



UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
FACULTAD DE INGENIERÍA



ACGEF: Análisis de cortocircuito en generadores eólicos y fotovoltaicos

MEMORIA DE PROYECTO PRESENTADA A LA FACULTAD DE
INGENIERÍA DE LA UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA POR

Federico Esteve - Conrado Silveira - Alejandro
Maldonado

EN CUMPLIMIENTO PARCIAL DE LOS REQUERIMIENTOS
PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO ELECTRICISTA.

TUTOR

MSC. Ing. Ignacio Afonso Universidad de la República

TRIBUNAL

MSC. Ing. Fernando Berrutti Universidad de la República

MSC. Ing. Pablo Toscano Universidad de la República

MSC. Ing. Ignacio Afonso Universidad de la República

Montevideo
martes 1 enero, 2019

ACGEF: Análisis de cortocircuito en generadores eólicos y fotovoltaicos, Federico Esteve - Conrado Silveira - Alejandro Maldonado.

Esta tesis fue preparada en L^AT_EX usando la clase iietesis (v1.1).
Contiene un total de 177 páginas.
Compilada el martes 1 enero, 2019.
<http://iie.fing.edu.uy/>

Agradecimientos

Agradecemos a nuestro tutor por su guía y colaboración en la realización de este proyecto, así como a nuestras respectivas familias.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

Tabla de contenidos

Agradecimientos	I
1. Introducción	1
2. Generador síncrono	7
2.1. Introducción	7
2.2. Construcción y funcionamiento	7
2.3. Comportamiento en régimen lineal	9
2.3.1. Modelo en coordenadas dq0	9
2.3.2. Régimen permanente	14
2.3.3. Potencia	16
2.4. Cortocircuito	18
2.4.1. Cortocircuito simétrico (trifásico) en vacío	18
2.4.2. Cortocircuito simétrico en vacío con impedancia externa . .	31
2.4.3. Cortocircuitos asimétricos en vacío	35
2.4.4. Corriente de cortocircuito asimétrico total en vacío con im- pedancia externa	40
2.4.5. Cortocircuito con la máquina en carga	41
3. Generador de Inducción Doblemente Alimentado “DFIG”	43
3.1. Introducción	43
3.2. Control de los aerogeneradores	43
3.2.1. Control aerodinámico	43
3.3. Construcción y funcionamiento	47
3.4. Modelo dinámico	49
3.5. Modelo del DFIG en régimen	54
3.6. Cortocircuito	56
3.6.1. Cortocircuito simétrico	56
3.6.2. Asimétricos	63
3.6.3. Resistencia de crowbar	65
4. Generadores fotovoltaicos y Generadores eólicos “Full-converter”	67
4.1. Introducción	67
4.2. Aerogeneradores “Full-converter”	67
4.2.1. Introducción	67

Tabla de contenidos

4.2.2.	Aspectos constructivos	68
4.2.3.	Distintas topologías implementadas actualmente en los convertidores AC-AC	69
4.2.4.	Funcionamiento en régimen	72
4.3.	Generador fotovoltaico	73
4.3.1.	Introducción	73
4.3.2.	Construcción y funcionamiento	73
4.3.3.	Conexión con la red	73
4.4.	Cortocircuitos	75
4.4.1.	Previo al cortocircuito	76
4.4.2.	Período transitorio	77
4.4.3.	Régimen	79
4.4.4.	Estudio cualitativo de cortocircuitos asimétricos	80
5.	Norma IEC-60909	83
5.1.	Introducción	83
5.2.	Curva típica de cortocircuito	84
5.3.	Corriente simétrica inicial	85
5.3.1.	Diferentes tipos de red	86
5.3.2.	Método de cálculo	89
5.3.3.	Cortocircuito trifásico	95
5.3.4.	Cortocircuitos asimétricos	96
5.4.	Corriente DC	97
5.5.	Corriente de pico	99
5.6.	Corriente de régimen	102
5.7.	Comparación de las corrientes	105
6.	Consecuencias en equipamiento y protecciones	109
6.1.	Introducción	109
6.2.	Impacto de la corriente de CC en componentes de la red	109
6.3.	Consideraciones para sistemas de protección de la red	110
6.3.1.	Interruptores	110
6.3.2.	Consideraciones para protecciones	113
7.	Conclusiones	117
	Apéndices	119
A.	Transformadas	119
A.1.	Transformada de Park o DQ0	119
A.2.	Componentes simétricas	120
B.	Electrónica de potencia	121
B.1.	Introducción	121
B.2.	Inversores	121
B.2.1.	Rama inversora	122

B.2.2. Inversor trifásico	123
B.2.3. Modulación por ancho de pulso	123
B.2.4. Inversor conectado a la red y parámetros de fabricante	127
B.3. Convertidor Back-to-Back	128
B.3.1. Rectificador e inversor	128
B.3.2. Puente de continua	129
B.3.3. Circuito chopper	129
B.4. Control del back-to-back	130
B.4.1. Control del inversor	130
B.4.2. Control del rectificador	131
B.5. Boost elevador	132
C. Impedancias según Norma IEC 60909	133
C.1. Transformadores	133
C.1.1. Dos devanados	133
C.1.2. Tres devanados	134
C.2. Impedancia de la red	134
C.3. Líneas y Cables	135
C.4. Motores	135
D. Ejemplo cortocircuito en vacío alimentado por un GS	137
E. Panel solar	145
E.1. Modelo ideal de la celda fotovoltaica	145
E.1.1. Relación I-V y P-V	146
E.1.2. Dependencia de la irradiancia (G)	147
E.1.3. Dependencia de la temperatura (T)	147
E.2. Modelo real de la celda fotovoltaica	147
E.3. Modelo de panel y parque solar	148
E.3.1. Celdas en paralelo	149
E.3.2. Modelo único del panel y parque	149
E.3.3. Curvas V-I y P-V	149
E.3.4. Circuito abierto	151
E.3.5. Cortocircuito	151
E.3.6. Potencia máxima	152
E.4. Control MPPT	152
E.4.1. Voltaje fijo	153
E.4.2. Fracción de tensión de vacío o corriente de cortocircuito	153
E.4.3. Perturbar y observar	153
Referencias	157
Nomenclatura	161
Índice de tablas	163

Tabla de contenidos

Índice de figuras

164

Capítulo 1

Introducción

Marco de análisis

El compromiso ecológico y las predicciones de una futura reducción del recurso fósil, hacen que el desarrollo y explotación de fuentes de energía renovable sea uno de los temas centrales en investigación actualmente. La incorporación de dichas fuentes a la matriz energética hace necesarias ciertas modificaciones en la operación del sistema. Para lograr estas modificaciones, los operadores de red de cada país incorporan nuevas exigencias y restricciones a las especificaciones técnicas vigentes para generadores conectados al sistema eléctrico (SE), comúnmente llamadas “*grid codes*”. En particular, para las fuentes de generación no convencionales existen consignas de operación durante huecos de tensión. Cada tipo de generador tiene una respuesta dinámica particular frente a estos transitorios, que depende de su construcción y estrategias de control, diseñadas para respetar las consignas de operación del “*grid code*”. El cálculo de la corriente de cortocircuito en un punto cualquiera de la red permite seleccionar adecuadamente los componentes del SE. La correcta operación de estos elementos previene daños a los equipos que conforman la red y mejora su estabilidad frente a cortocircuitos (CC).

Objetivos y desarrollo de la tesis

En este trabajo se analizan las corrientes de CC de generadores no convencionales presentes en el SE uruguayo y se comparan sus características con respecto al generador síncrono (GS) tradicional. Los generadores no convencionales que se estudiarán son los generadores fotovoltaicos (PV) y los parques eólicos compuestos por aerogeradores Full converter (FC) y doblemente alimentados (DFIG). Se utiliza la norma IEC-60909 [1] para caracterizar las corrientes de CC. Se estudia también las corrientes de CC de estos generadores en cumplimiento con las exigencias impuestas por UTE en su Convenio de Uso [2]. Resumen de los objetivos:

1. Realizar un estudio comparativo del aporte de la corriente de cortocircuito en un punto de la red, entre los distintos generadores conectados en la red uruguaya.

Capítulo 1. Introducción

2. Realizar un estudio comparativo del impacto de estas corrientes en equipamiento y protecciones de la red.

Desde el capítulo 2 a 4 se hace un estudio teórico del comportamiento dinámico frente a CC, de los distintos tipos de generadores presentados.

El capítulo 5 se comparan las corriente de CC de los generadores mediante la norma internacional IEC-60909 [1].

En el capítulo 6 se analiza el impacto de las corrientes de CC en equipamiento y protecciones, teniendo en cuenta los *grid code* definidos por UTE.

Marco teórico

Como se indicó anteriormente, el Proyecto está orientado al estudio de aportes a cortocircuitos por parte de unidades generadoras no convencionales y sus consecuencias tanto en equipamiento como en el sistema de protecciones. Para abordar la tesis, es preciso definir hueco de tensión, cortocircuito y los “*grid code*”.

Se define un cortocircuito igual que en la norma [1]: “*Camino conductivo accidental o intencional entre dos o más partes conductoras que provoca que la diferencia de potencial entre ellas sea cero o próxima a cero*”. Adicionalmente la norma clasifica los tipos de CC en función de la cantidad de fases que entran en falta y se representan en la figura 1.1.

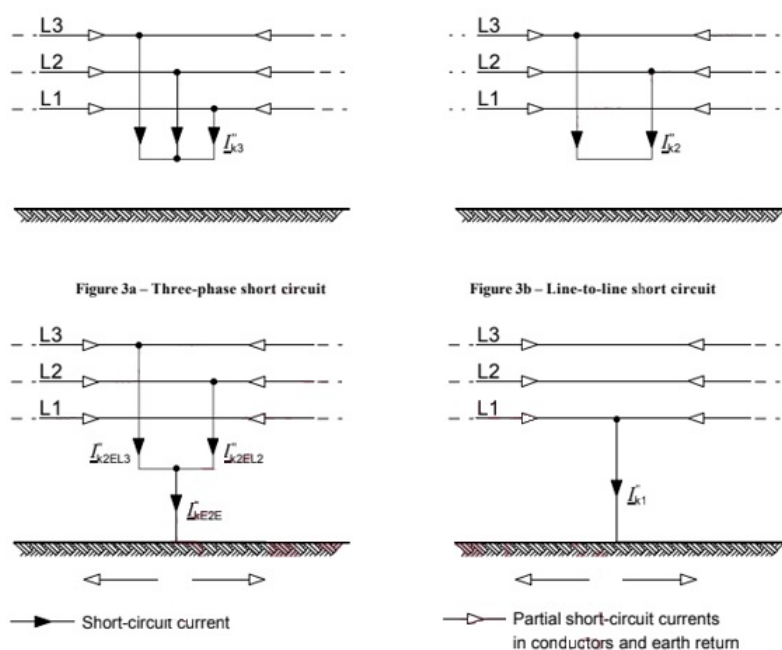


Figura 1.1: Tipos de cortocircuito, imagen extraída de [1]

Para definir un hueco de tensión se utiliza [3] “*Un hueco de tensión es una disminución brusca de la tensión seguida de su restablecimiento después de un corto lapso de tiempo. Por convenio, un hueco de tensión dura de 10 ms a 1 minuto*”. Hay que señalar que para tensiones inferiores a 90 % de la tensión nominal, con duración mayor a un minuto, se considera como sub-tensión. Según [2], para redes de 150kV se considera un hueco de tensión, cuando se adquieren valores entre un 93 % y un 1 % de la tensión nominal fase-tierra. Estos valores varían según el nivel de tensión nominal en el punto donde ocurre el evento y se caracteriza el hueco por los siguientes parámetros:

- Magnitud del hueco de tensión (U_H): Es la tensión eficaz existente durante el hueco de tensión en por unidad (p.u.) con respecto a la tensión antes del hueco.
- Caída de tensión (ΔU): es la diferencia entre las tensión eficaz antes del hueco y la tensión eficaz durante el hueco.
- Duración del hueco de tensión (Δt): Es el tiempo en el cual la tensión se encuentra entre el 0,9 pu y 0,1 pu de la tensión nominal.

Todos los parámetros se ven representados en la Figura 1.2.

CARACTERÍSTICAS DE HUECO DE TENSIÓN

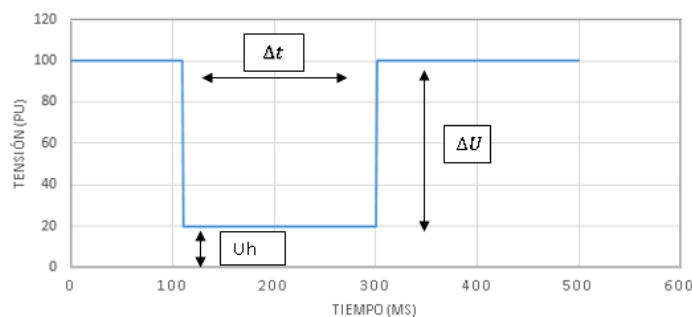


Figura 1.2: Parámetros del hueco de tensión

Una de las causas del hueco de tensión son los CC en la red, donde la tensión en el punto de falta tiende a cero y la U_H del generador dependiera de la corriente de CC y la impedancia hasta la falta. La reglamentación de UTE [2] establece condiciones para la operación de los generadores conectados al SE Uruguay ¹ y dentro de sus requisitos se encuentra el comportamiento ante huecos de tensión. Frente a huecos de tensión o cortocircuitos asimétricos, el aterramiento del transformador de interconexión a la red es fundamental debido a que determina la red

¹El Convenio de Uso de UTE se dirige específicamente a los generadores eólicos, pero el mismo puede ser aplicado también a generadores fotovoltaicos.

Capítulo 1. Introducción

de secuencia cero del sistema (ver anexoA.2) y se lo elige tal que “*El o los transformadores de potencia que vinculan las unidades generadoras de energía eléctrica de la RED de UTE serán tales que aislen la componente homopolar. El neutro del lado correspondiente a la conexión de la Red de Transmisión de UTE deberá estar rígidamente aterrado*” [2]. En general la opción más común en la red de transmisión es utilizar el transformador Dyn con neutro rígidamente aterrado del lado de la red. En caso que suceda un cortocircuito a tierra del lado del generador, la red de UTE no aporta componente homopolar de corriente y es responsabilidad del generador despejar la falta. En el caso contrario si el cortocircuito sucede en la red la secuencia cero solo dependera del aterramiento del transformador. En la actualidad debido al nivel de demanda energética que satisfacen los generadores no convencionales, se les exige mantenerse conectado a la red durante un hueco de tensión. El concepto de mantenerse conectado es amplio y varía en función del operador de cada SE. Puntualmente existen dos requerimientos principales que se estudiarán en este marco, la curva “*Low Voltage Ride Through*” (LVRT) y la consigna de potencia activa y reactiva durante el hueco. Para el primer caso se cita el requisito “*La central generadora se deberá mantener conectada a la red de UTE sin sufrir desconexión por causas de los huecos de tensión en el nodo de conexión, producidos por cortocircuitos trifásicos, de dos fases a tierra o una fase a tierra, con perfiles de magnitud y duración por encima de la siguiente curva: 1.3*”

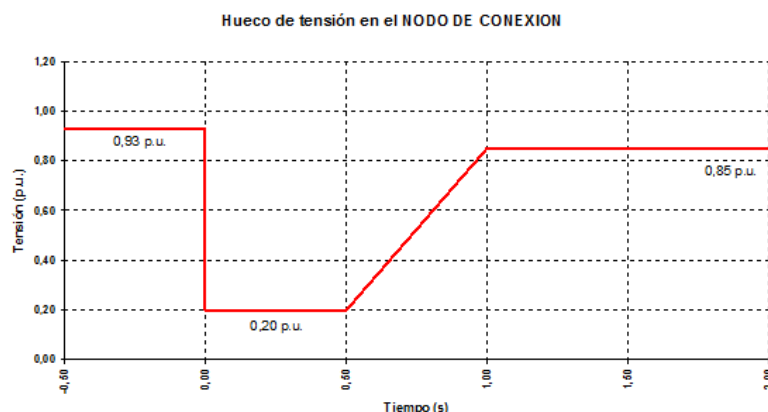


Figura 1.3: Hueco de tensión en nodo de conexión, [2]

Las tensiones son fase-tierra en las fases con falta y el nodo de conexión es el punto donde el transformador se conecta a la red. El área por debajo de la curva LVRT son los niveles de tensión para los cuales el generador se puede desconectar de la red. La curva indica que la tensión mínima de operación sin considerarse un hueco es de 0,93pu, en el tiempo $t = 0$ sucede un hueco de tensión con magnitud U_H y la permanencia del generador dependera de la curva LVRT. Luego de despejada la falta la tensión mínima de operación podría ser de hasta 0,85pu durante 60s. Existe otra curva LVRT para un caso particular de la topología de la red: “*En el caso de una central generadora conectada a un circuito radial de Transmisión, se establece la siguiente exigencia adicional:*

La central generadora se deberá mantener conectada a la red de UTE, sin sufrir desconexión por causa de huecos de tensión en el nodo de conexión, producidos por cortocircuitos de una fase a tierra en la red de Trasmisión, con perfil de magnitud y duración por encima de la siguiente curva:” 1.4.

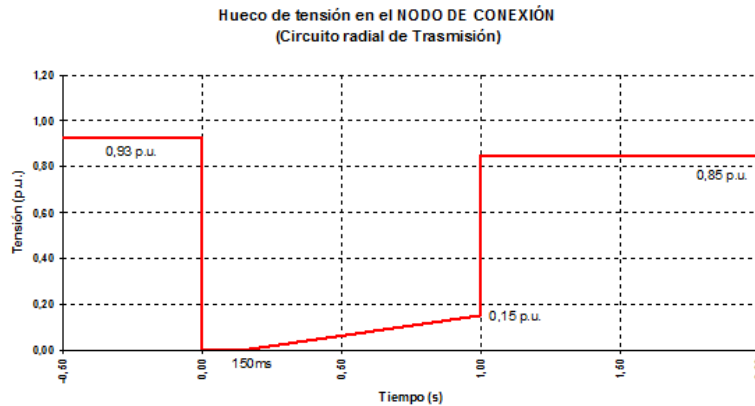


Figura 1.4: Hueco de tensión en nodo de conexión (circuito radial), imagen extraída de [2]

Se definió el tiempo de permanencia del generador en función de la magnitud del hueco y falta determinar que hace el generador cuando se mantiene conectado. *“El generador deberá coordinar con UTE y el DNC el ajuste de sus relés, protecciones y sistemas de control, para la implementación de los Esquemas de Control Suplementario, con el fin de preservar la seguridad del Sistema Interconectado Nacional (en particular, en relación a los ajustes asociados a la frecuencia). El sistema de control de la central generadora deberá poder recibir una consigna automática de generación del DNC”*.

El sistema de control de los generadores no convencionales les permite adoptar distintas estrategias en cuanto a la inyección de corriente a la red durante huecos de tensión. El control del flujo de potencia reactiva de la red permite controlar la tensión de las barras del SE, puntualmente si el generador comienza a inyectar reactiva termina aumentando la tensión en el nodo de conexión y mitiga el efecto del hueco de tensión. En [4] se menciona que durante el hueco la central generadora puede inyectar potencia reactiva a la red, también se puede dar prioridad a la inyección de potencia activa o bien mantenerse conectado a la red como indica [2], pero sin inyectar corriente. Considerando lo anterior y teniendo en cuenta la preferencia por inyección de corriente reactiva por algunos *grid codes* y artículos relacionadas a modelos de comportamiento dinámico [5], en el estudio de comportamiento frente a huecos de tensión de distintos generadores se considera la inyección de corriente reactiva como estrategia adoptada durante huecos de tensión.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

Capítulo 2

Generador síncrono

2.1. Introducción

La máquina síncrona es el convertidor electromecánico más difundido en materia de generación de energía eléctrica para sistemas de alterna trifásicos. Las curvas de I_{CC} definidas en [1] se basan en el aporte al CC de estas máquinas, analizar su funcionamiento y comportamiento dinámico es de particular interés para este trabajo. En la sección actual se describe el funcionamiento del generador en condiciones nominales, su modelo dinámico y comportamiento frente a diferentes tipos de cortocircuito. Para el comportamiento en régimen se desarrolla el modelo planteado en [6] y para el cortocircuito se utiliza los modelos presentados en [7] y [8].

2.2. Construcción y funcionamiento

La máquina síncrona consiste básicamente en dos partes: estator (inducido) y rotor (inductor).

Estator

Es la parte fija o estática de la máquina, se compone de tres devanados de igual cantidad de vueltas ubicados con un desfase espacial de $\frac{120^\circ}{p}$ (p son pares de polos) por los que circula un sistema trifásico equilibrado y perfecto. Se busca que la distribución espacial de las espiras sea sinusoidal (eliminar armónicos). El inducido se conecta a la red que es un sistema trifásico de alterna que se asume equilibrado y perfecto.

El estator se diseña para soportar esfuerzos mecánicos producidos por transitorios de corriente y el hierro del estator se diseña de forma laminar para reducir pérdidas de Foucault producidas por el campo magnético variable.

Capítulo 2. Generador síncrono

Rotor

Es la parte móvil de la máquina y tiene dos devanados:

- Devanado inductor: Por el cual circula una corriente continua creando una FMM fija en módulo a corriente constante. La FMM gira solidaria al rotor con la misma velocidad angular.
- Devanado amortiguador: Éste se encuentra cortocircuitado y su función es reducir las oscilaciones producidas por el "penduleo"¹.

Funcionamiento

El devanado del rotor es alimentado por una corriente continua con el fin de mantener una FMM de módulo constante que gira a la velocidad mecánica del rotor ($\omega_m = p\Omega_m$). Asumiendo la condición de sincronismo, la suma vectorial de los fasores de flujo magnético asociados a las corrientes de inductor e inducido producen un sistema equilibrado y perfecto de tensiones trifásicas en el estator ². El ángulo entre los fasores de flujo magnético de rotor y estator determina el par magnético sobre el rotor y por lo tanto la potencia transmitida a la red³.

Polos lisos y salientes

Los GS se clasifican en dos tipos según la construcción del rotor:

- **Polos salientes**: Usualmente se usan en máquinas con un gran número de polos, que funcionan a bajas velocidades. Generalmente los bobinados están concentrados en los polos que sobresalen del rotor en dirección radial. Este tipo de rotor cuenta adicionalmente con bobinados amortiguadores. El hierro de los polos de este tipo de rotor generalmente es laminado.
- **Polos lisos**: Usados en máquinas que trabajan a velocidades altas, el rotor es de acero sólido y su superficie es lisa. Las máquinas de polos lisos generalmente tienen uno o dos pares de polos y sus devanados son distribuidos en ranuras sobre la superficie del rotor. No es usual que cuenten con bobinado amortiguador, no obstante, el acero sólido del rotor proporciona un camino para las corrientes de Foucault producidas por las oscilaciones de la velocidad del rotor.

¹Perturbación del ángulo entre el campo rotativo generado por el estator y el campo generado por el rotor.

²Asumiendo que las corrientes por el estator forman un sistema equilibrado y perfecto.

³Sin contemplar las pérdidas de la propia máquina.

2.3. Comportamiento en régimen lineal

Antes de realizar el modelo del GS se deben tener en cuenta las siguientes hipótesis:

- El rotor puede ser de polos lisos o salientes
- El circuito magnético del GS nunca satura, puede asumirse linealidad y representa que el flujo es proporcional a la FMM.
- La red es un sistema equilibrado y perfecto de secuencia directa.
- El rotor gira a velocidad de sincronismo de forma constante.

Como el GS no se encuentra saturado entonces se puede aplicar el principio de superposición para los flujos. La máquina posee dos fuentes de tensión, la primera es la red que se conecta al estator y la segunda es una fuente de tensión continua que se conecta al rotor.

Aplicando superposición se estudia la máquina alimentada desde el rotor, luego desde el estator para finalmente obtener un flujo resultante de la suma vectorial. Como el rotor es la parte móvil y el estator la fija es necesario obtener una base de coordenadas en común, para ello se utiliza las coordenadas $dq0$ que se encuentran explicadas en el anexo A.1.

2.3.1. Modelo en coordenadas $dq0$

Debido a que el rotor es la parte móvil de la máquina es sencillo visualizarlo mediante sus componentes $dq0$ y quedaría representado según la figura 2.1. El eje magnético del rotor es el directo d y su eje en cuadratura (90° eléctricos) es q .

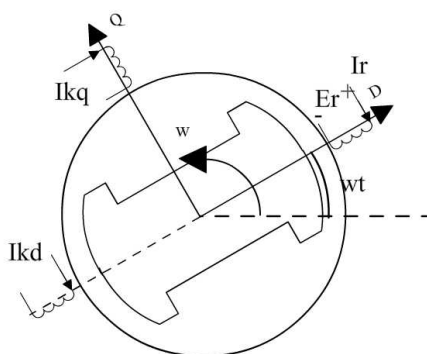


Figura 2.1: Modelo del rotor

Capítulo 2. Generador síncrono

Las ecuaciones dinámicas en este caso serían el sistema de ecuaciones 2.1.

$$\begin{cases} E_r(t) = R_r I_r(t) + N_r \frac{\delta}{\delta t} \Phi_r(t) \\ 0 = R_{kd} I_{kd}(t) + N_{kd} \frac{\delta}{\delta t} \Phi_{kd}(t) \\ 0 = R_{kq} I_{kq}(t) + N_{kq} \frac{\delta}{\delta t} \Phi_{kq}(t) \end{cases} \quad (2.1)$$

La tensión de excitación E_r es continua y los devanados amortiguadores en ambas coordenadas se encuentran cortocircuitados. Las variables Φ representan los flujos magnéticos enlazados y los parámetros R son las resistencias de cada devanado. Los subíndices kd, kq y r hacen referencia al devanados amortiguador directo, cuadratura y devanado rotórico respectivamente.

El estator se representa visto desde la red mediante sus coordenadas de fase ABC para luego realizar la transformación $dq0$ y en términos matemáticos queda expresado el problema según el sistema de ecuaciones 2.2.

$$\begin{cases} V_a(t) + R_a I_a(t) = N_s \frac{\delta}{\delta t} \Phi_a(t) \\ V_b(t) + R_a I_b(t) = N_s \frac{\delta}{\delta t} \Phi_b(t) \\ V_c(t) + R_a I_c(t) = N_s \frac{\delta}{\delta t} \Phi_c(t) \end{cases} \quad (2.2)$$

Las tensiones de cada fase en bornes de la máquina son $V_a(t), V_b(t)$ y $V_c(t)$, mientras que $\Phi_a(t), \Phi_b(t)$ y $\Phi_c(t)$ representan el flujo magnético enlazado. La resistencia R_a es la resistencia de armadura.

El estator se encuentra expresado en una base fija (coordenadas de fase ABC) mientras que el rotor esta expresado en la base móvil $dq0$. Para establecer una base común se aplica la transformada de Park al estator. Expresando las ecuaciones de corriente de estator en formato matricial y multiplicando por la matriz $P(\theta)$ de la transformada de Park se obtiene la ecuación 2.3.

$$P(\theta)([V_{abc}(t)] + R_a [I_{abc}(t)]) = N_s P(\theta) \frac{\delta}{\delta t} [\Phi_{abc}(t)] \quad (2.3)$$

Aplicando linealidad y reescribiendo el término de $P(\theta)[\Phi_{abc}(t)]'$ mediante la regla del producto de la derivada ($(g(t) \frac{\delta}{\delta t} f(t) = \frac{\delta}{\delta t} (fg)(t) - f(t) \frac{\delta}{\delta t} g(t)$) se obtiene la ecuación 2.4.

$$P(\theta)[V_{abc}(t)] + R_a P(\theta)[I_{abc}(t)] = [P(\theta)\Phi_{abc}(t)]' - \theta' P(\theta)' [\Phi_{abc}(t)] \quad (2.4)$$

Calculando la derivada de la matriz $P(\theta)$ y multiplicando por el vector de flujos se define la dinámica del estator en $DQ0$ como 2.5.

$$[V_{DQ0}(t)] + R_a [I_{DQ0}(t)] = \frac{\delta}{\delta t} [\Phi_{DQ0}(t)] - \omega \begin{pmatrix} \Phi_q(t) \\ -\Phi_d(t) \\ 0 \end{pmatrix} \quad (2.5)$$

2.3. Comportamiento en régimen lineal

El sistema de ecuaciones 2.6 expresa el flujo de estator en cada componente.

$$\begin{cases} \frac{\delta}{\delta t} \Phi_d(t) = V_d + R_a I_d(t) + \omega \Phi_q(t) \\ \frac{\delta}{\delta t} \Phi_q(t) = V_q(t) + R_a I_q(t) - \omega \Phi_d(t) \\ \frac{\delta}{\delta t} \Phi_0(t) = V_0(t) + R_a I_0(t) \end{cases} \quad (2.6)$$

Teniendo la relación de los flujos entre las tensiones y corrientes se puede determinar un sistema dinámico que consta de seis corrientes, seis flujos y cuatro tensiones. Se puede representar mediante su ecuación dinámica 2.7.

$$\begin{cases} \frac{\delta}{\delta t} \begin{pmatrix} \Phi_d \\ \Phi_q \\ \Phi_0 \\ \Phi_r \\ \Phi_{kd} \\ \Phi_{kq} \end{pmatrix} (t) = \begin{pmatrix} \omega \Phi_q \\ -\omega \Phi_d \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} (t) + \begin{pmatrix} R_a I_d \\ R_a I_q \\ R_a I_0 \\ -R_r I_r \\ -R_{kd} I_{kd} \\ -R_{kq} I_{kq} \end{pmatrix} (t) + \begin{pmatrix} V_d \\ V_q \\ V_0 \\ E_r \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} (t) \end{cases} \quad (2.7)$$

Se vincula las variables de corriente y flujo realizando un circuito magnético que relacione los flujos de rotor con los de estator. Asumiendo que el hierro de la máquina síncrona se encuentra en zona lineal entonces el flujo es proporcional con las FMM y éstas son proporcionales a las corrientes. Se puede establecer un circuito magnético lineal que relaciona las corrientes con los flujos mediante inductancias según la Figura 2.2.

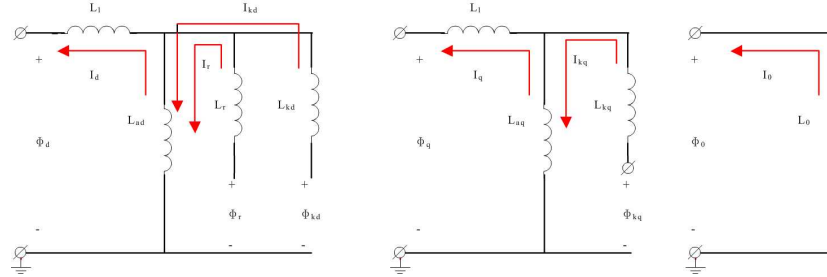


Figura 2.2: Modelo DQ0 de los flujos de la máquina síncrona

Resolviendo los circuitos magnéticos de 2.2 se obtiene el sistema de ecuaciones 2.8.

$$\begin{cases} \Phi_d(t) = -(L_l + L_{ad})I_d(t) + L_{ad}(I_{kd}(t) + I_r(t)) \\ \Phi_q(t) = -(L_l + L_{aq})I_q(t) + L_{aq}I_{kq}(t) \\ \Phi_0(t) = -L_0 I_0(t) \\ \Phi_r(t) = (L_{ad} + L_r)I_r(t) + L_{ad}(I_d(t) + I_{kd}(t)) \\ \Phi_{kd}(t) = (L_{ad} + L_{kd})I_{kd}(t) + L_{ad}(I_d(t) + I_r(t)) \\ \Phi_{kq}(t) = (L_{aq} + L_{kq})I_{kq}(t) + L_{aq}I_q(t) \end{cases} \quad (2.8)$$

Si se representa el flujo como $[\Phi(t)] = [L][I(t)]$, se tiene la ecuación dinámica que relaciona flujos con tensiones y corrientes 2.7, y el circuito magnético que relaciona flujos con corrientes 2.8. Las tensiones pueden asumirse como entradas del

Capítulo 2. Generador síncrono

sistema, hay doce variables (seis flujos y corrientes) y doce ecuaciones. Resolviendo el problema de 2.7 y 2.8 en términos matriciales se obtiene el modelo dinámico del GS para cualquier tensión de red y de excitación bajo las hipótesis mencionadas. Se puede formalizar las ecuaciones mediante un modelo de variables de estado el cual tiene el flujo como vector de estados, las tensiones como entradas y las corrientes como salidas según la ecuación 2.9.

$$\begin{aligned}\frac{\delta}{\delta t}[\Phi] &= [A][\Phi(t)] + [B][V(t)] \\ I(t) &= [L]^{-1}[\Phi](t)\end{aligned}\tag{2.9}$$

Donde $[\Phi] = (\Phi_d, \Phi_q, \Phi_0, \Phi_r, \Phi_{kd}, \Phi_{kq})$, $[V] = (V_d, V_q, V_0, E_r)$ e $[I] = (I_d, I_q, I_0, I_r, I_{kd}, I_{kq})$. La matriz $[L]$ satisface el sistema de ecuaciones 2.8 y las matrices $[A] = [C] + [R][L]^{-1}$, $[R]$ y $[B]$ satisfacen la ecuación dinámica 2.7.

Habiendo definido el modelo y sus variables queda por determinar las inductancias que dependen de características físicas:

- Cantidad de vueltas por espira
- Permeabilidad del hierro
- Dimensión o geometría física del entrehierro

La cantidad de vueltas y la permeabilidad del hierro son constantes en el tiempo. Las dimensiones del entre-hierro son cambiantes (polos salientes) y dependen de la posición del rotor o en otras palabras del ángulo respecto a un observador estático. Entonces las inductancias varían dependiendo de la posición del rotor con respecto al eje de la bobina en las coordenadas A, B y C . Si el observador se sitúa sobre el eje directo entonces las dimensiones del entrehierro son constantes y trabajando en $dq0$ las inductancias también.

2.3. Comportamiento en régimen lineal

El circuito se modela según se indica en la figura 2.3.

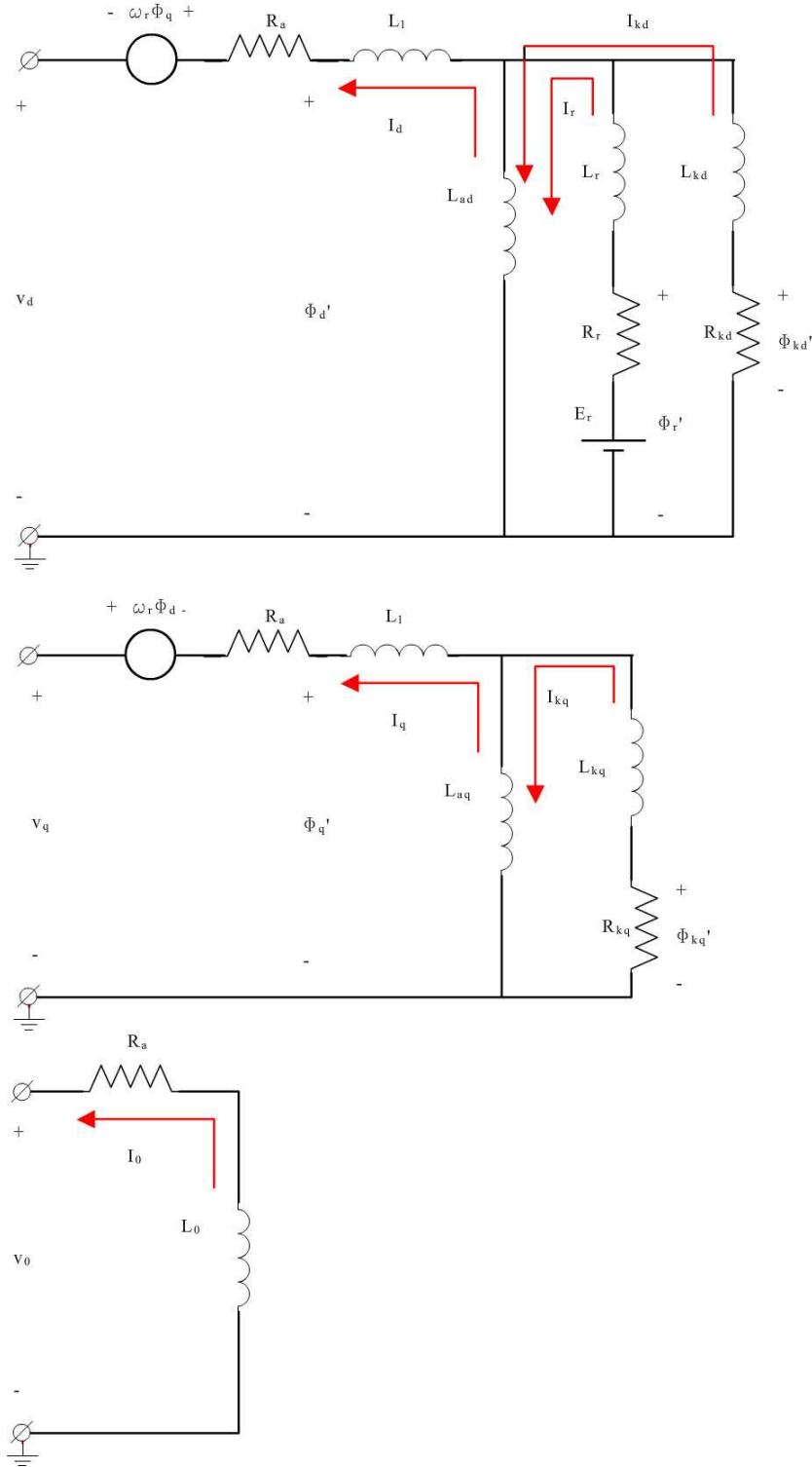


Figura 2.3: Circuito final del GS en coordenadas DQ0

2.3.2. Régimen permanente

El estado de régimen o equilibrio se obtiene cuando las variables de estado se mantienen invariantes en tiempo para una entrada definida y el mismo sucede cuando $\frac{\delta}{\delta t}\Phi(t) = 0$. Imponiendo el régimen en la ecuación dinámica 2.7 se obtiene el sistema de ecuaciones 2.10.

$$\left\{ \begin{array}{l} \left(\begin{array}{c} -\omega\Phi_q \\ \omega\Phi_d \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{array} \right) (t) = \left(\begin{array}{c} R_a I_d \\ R_a I_q \\ R_a I_0 \\ -R_r I_r \\ -R_{kd} I_{kd} \\ -R_{kq} I_{kq} \end{array} \right) (t) + \left(\begin{array}{c} V_d \\ V_q \\ V_0 \\ E_r \\ 0 \\ 0 \end{array} \right) (t) \end{array} \right. \quad (2.10)$$

Desarrollando cada término se obtiene el sistema de ecuaciones 2.11.

$$\left\{ \begin{array}{l} R_a I_d(t) + V_d(t) = -\omega\Phi_q(t) \\ R_a I_q(t) + V_q(t) = \omega\Phi_d(t) \\ R_a I_0(t) + V_0(t) = 0 \\ I_r(t) = \frac{E_r(t)}{R_r} \\ I_{kd}(t) = I_{kq}(t) = 0 \end{array} \right. \quad (2.11)$$

Combinando los sistemas de ecuaciones 2.8 y 2.11, se obtiene el sistema de ecuaciones 2.12.

$$\left\{ \begin{array}{l} \Phi_d(t) = -(L_{ad} + Ll)I_d(t) + L_{ad} \frac{E_r(t)}{R_r} \\ \Phi_q(t) = -(L_{aq} + Ll)I_q(t) \\ \Phi_0(t) = -L_0 \frac{V_0(t)}{R_a} \\ \Phi_r(t) = L_{ad}I_d(t) + (L_r + L_{ad}) \frac{E_r(t)}{R_r} \\ \Phi_{kd}(t) = -L_{ad}I_d(t) + L_{ad} \frac{E_r(t)}{R_r} \\ \Phi_{kq}(t) = -L_{ad}I_q(t) \end{array} \right. \quad (2.12)$$

Sustituyendo los flujos de los sistemas de ecuaciones 2.12 en 2.11 y compactando todas las ecuaciones previas se obtiene el sistema de ecuaciones 2.13.

$$\left\{ \begin{array}{l} V_q(t) + R_a I_q(t) = \omega(-(L_{ad} + Ll)I_d(t) + L_{ad} \frac{E_r(t)}{R_r}) \\ -V_d(t) - R_a I_d(t) = \omega(-(L_{aq} + Ll)I_q(t)) \\ \Phi_0(t) = -L_0 \frac{V_0(t)}{R_a} \\ \Phi_r(t) = L_{ad}I_d(t) + (L_r + L_{ad}) \frac{E_r(t)}{R_r} \\ \Phi_{kd}(t) = -L_{ad}I_d(t) + L_{ad} \frac{E_r(t)}{R_r} \\ \Phi_{kq}(t) = -L_{ad}I_q(t) \end{array} \right. \quad (2.13)$$

Se asume que la tensión en régimen lineal es perfectamente equilibrada implicando que su componente homopolar sea $V_0 = 0$ y como consecuencia el flujo homopolar se anula. A pesar que las corrientes de los amortiguadores son nulas sus flujos no se anulan debido a que dependen de las inductancias mutuas con el resto del sistema. Definiendo $L_d = L_{ad} + Ll$ y $L_q = Ll + L_{aq}$, las primeras dos ecuaciones del sistema 2.12 se reducen en la ecuación 2.14.

2.3. Comportamiento en régimen lineal

$$\begin{cases} V_q(t) + R_a I_q(t) + \omega L_d I_d(t) = \omega L_{ad} I_r(t) \\ V_d(t) + R_a I_d(t) - \omega L_q I_q(t) = 0 \end{cases} \quad (2.14)$$

Utilizando notación compleja, como el eje cuadratura está desfasado 90° con respecto al directo es equivalente en complejos a multiplicar por la unidad imaginaria “j”. Adicionalmente los fasores espaciales y temporales son iguales debido a que en todo el sistema tanto mecánico como eléctrico se tiene una pulsación de ω de sincronismo⁴. En régimen como las tensiones y corrientes de red son perfectas y equilibradas, las componentes en dq son constantes. Además la corriente $I_r(t)$ es constante porque $E_r(t)$ es la tensión de excitación continua.

Partiendo del sistema 2.14 se multiplica la primer ecuación por “j” y se las suma obteniendo la ecuación 2.15.

$$V_d + V_q j + R_a(I_d + (I_q)j) + \omega L_d I_d j - \omega L_q I_q(t) = \omega L_{ad} I_r j \quad (2.15)$$

Se definen los complejos:

- $\bar{V} = V_d + jV_q$ que representa el fasor de la tensión de red.
- $\bar{I} = I_d + jI_q = \bar{I}_d + \bar{I}_q$ que representa el fasor de la corriente de red.
- $\bar{E}_0 = j\omega L_{ad} I_r$ que representa la tensión de vacío del GS.
- $X_d = \omega L_d$ que representa la reactancia de sincronismo o reactancia de eje directo.
- $X_q = \omega L_q$ que representa la reactancia de cuadratura.

Expresando la ecuación 2.15 en términos fasoriales se obtiene la ecuación 2.16.

$$\bar{V} + R_a \bar{I} + j(X_d \bar{I}_d + X_q \bar{I}_q) = \bar{E}_0 \quad (2.16)$$

En términos fasoriales \bar{E}_0 es la tensión interna y se ubica en el eje de cuadratura (Q), \bar{V} es la tensión en el estator y se considera que tiene un desfase angular con respecto a \bar{E} de δ . Para simplificar los cálculos se utiliza la tensión atrás de la reactancia síncrona del eje de cuadratura $\bar{E}_q = \bar{E}_0 - \bar{I}_d(X_d - X_q)j$. La ecuación 2.16 se define como la ecuación 2.17.

$$\bar{V} + \bar{I}(R_a + jX_q) = \bar{E}_q \quad (2.17)$$

Este modelo es válido tanto para una máquina de polos lisos o salientes. En particular si es de polos lisos (X_q) y (X_d) son iguales por tener un entre-hierro constante y la expresión 2.16 se reformula como la ecuación 2.18.

$$\bar{V} + \bar{I}(R_a + jX_d) = \bar{E} \quad (2.18)$$

⁴Para simplificar notación se la llamara ω de aca en adelante

Capítulo 2. Generador síncrono

Este modelo es conocido como modelo de Behn Eschemburg y es aplicable a máquinas síncronas de polos lisos donde X_d se define como reactancia de sincrismo. La representación fasorial de la máquina de polos salientes es la figura 2.4 y si es de polos lisos en la figura 2.5.

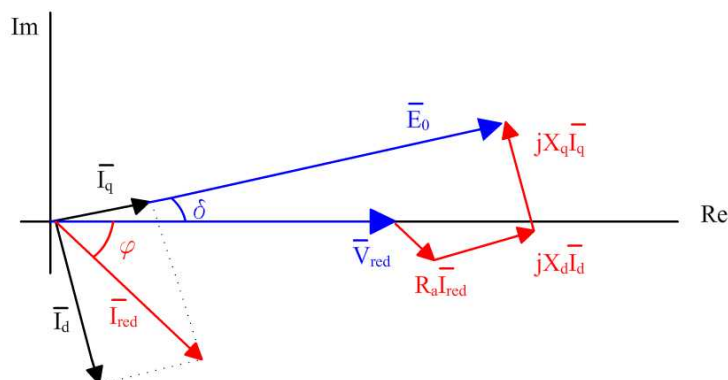


Figura 2.4: Modelo fasorial de la máquina síncrona de polos salientes

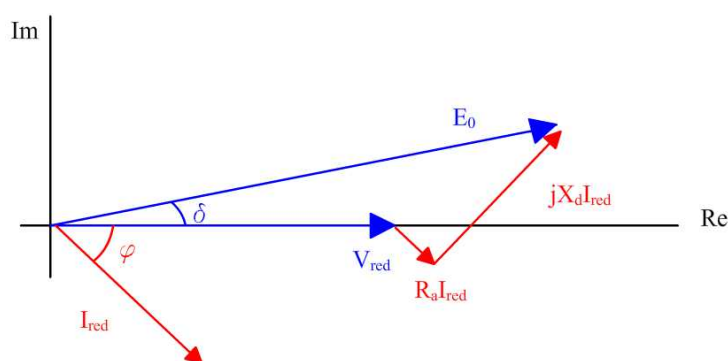


Figura 2.5: Modelo fasorial de Behn Eschemburg

2.3.3. Potencia

El análisis de inyección de potencia a la red se realiza según lo planteado en [9]. Las hipótesis que se utilizan son las siguientes:

- Se utiliza el modelo para polos salientes por ser genérico.
- Se desprecian los términos resistivos en comparación con las reactancias directa y cuadratura.
- La tensión de red se considera origen de fase en el modelo fasorial.

La potencia se deduce a partir de las fórmulas en el anexo A.1 y el par según 2.19.

2.3. Comportamiento en régimen lineal

$$\begin{aligned} P &= V_d I_d + V_q I_q \\ Q &= V_q I_d - V_d I_q \\ C &= \frac{P}{\omega} \end{aligned} \quad (2.19)$$

Las tensiones son datos de entrada y deben deducirse las corrientes a partir de la ecuación compleja 2.16. Las corrientes quedan definidas según la ecuación 2.20.

$$\begin{aligned} I_d &= \frac{E_0 - V_q}{X_d} \\ I_q &= \frac{V_q}{X_q} \end{aligned} \quad (2.20)$$

La tensión $V_d = V \text{sen}(\delta)$ y $V_q = V \text{cos}(\delta)$, por lo cual operando la ecuación 2.19 y 2.20, se obtiene la potencia activa, reactiva y el par según la ecuación 2.21.

$$\begin{aligned} P &= 3 \frac{E_0 V}{X_d} \text{sen}(\delta) + \frac{3V^2}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \text{sen}(2\delta) \\ Q &= \frac{3V E_0}{X_d} \text{cos}(\delta) - \frac{3V^2}{X_d} \text{cos}(\delta)^2 - \frac{3V^2}{X_q} \text{sen}(\delta)^2 \\ C &= 3 \frac{E_0 V}{\omega X_d} \text{sen}(\delta) + \frac{3V^2}{2\omega} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \end{aligned} \quad (2.21)$$

La potencia activa puede estudiarse a partir del par generado. El par depende de dos términos, uno de ellos del desfase δ entre las tensiones y en consecuencia del desfase entre los campos magnéticos giratorios. El otro término depende del doble del ángulo 2δ y dicho término se define como par de reluctancia. Se define con este nombre porque no depende de la tensión interna de máquina y en consecuencia no depende de la excitación del GS. Quiere decir que la máquina posee un par mecánico conectándolo a la red y sin excitarlo. La razón es que cuando se conecta a la red se genera un campo magnético giratorio generado por el estator y el rotor tiende a alinearse con el mismo para maximizar el flujo magnético. El término restante depende de la tensión interna y de red, que respetando la condición de sincronismo mantienen un ángulo δ constante para cada punto de operación. Por lo cual el término es constante para cada punto de operación deseado.

En el caso de la reactiva todos los términos dependen del ángulo, pero específicamente los términos que no dependen de la tensión interna tienen signo negativo. Por lo tanto el término que depende de E_0 es la potencia reactiva generada internamente por la máquina y los restantes la potencia reactiva en cada reactancia respectivamente.

En el caso de una máquina de polos lisos $X_d = X_q$ y se puede deducir la potencia como 2.22.

$$\begin{aligned} P &= 3 \frac{E_0 V}{X_d} \text{sen}(\delta) \\ Q &= 3V \frac{E_0 \text{cos}(\delta) - V}{X_d} \\ C &= 3 \frac{E_0 V}{\omega X_d} \text{sen}(\delta) \end{aligned} \quad (2.22)$$

En el caso de una máquina de polos lisos el par de reluctancia es nulo, esto es coherente con el hecho de que el rotor no puede orientarse buscando maximizar el flujo. Ignorando el par de reluctancia las potencias y pares son iguales, como las tensiones son fijas para cada punto de operación entonces se depende del ángulo de

Capítulo 2. Generador síncrono

operación. Si el ángulo δ es negativo entonces P también lo es, quiere decir que el generador pasa a trabajar como motor. Por lo cual como se desea utilizarla como generador se considera el ángulo positivo.

Por otra parte en el flujo de reactiva, los términos que dependían de la tensión de red únicamente se simplificaron en un solo término. La caída de tensión en las reactancias directa y cuadratura es la misma. Como el ángulo en general es pequeño, se aproxima $\cos(\delta) \approx 1$ y el flujo de potencia puede aproximarse por los niveles de tensión, partiendo desde el nivel de tensión mayor hacia el menor. Cuando la tensión interna sea mayor a la de red se considera que la máquina inyecta reactiva.

Finalizando, la reactancia directa determina la potencia máxima que puede intercambiar entre la red y el generador. Si la reactancia aumenta quiere decir que la potencia máxima que puede transmitir el GS disminuye y el flujo de reactiva disminuye.

Tanto en la máquina de polos lisos como salientes, la potencia y par del GS dependen de las tensiones de red e interna. Las reactancias se consideran constantes y determinan la máxima potencia o par.

2.4. Cortocircuito

El estudio en este caso se realizara respetando el siguiente esquema de trabajo:

- Cortocircuito trifásico o simétrico en bornes del generador estando previamente en vacío
- Cortocircuito simétrico en el generador a través de una impedancia estando previamente en vacío
- Idem para items anteriores para cortocircuitos asimétricos
- Idem para items anteriores con el generador previamente en carga.

2.4.1. Cortocircuito simétrico (trifásico) en vacío

El objetivo es estudiar las I_{CC} transitorias y en régimen. Previo al CC la máquina se encuentra en vacío, es decir que las corrientes por las fases son nulas. En el instante que ocurre la falta las tensiones de estator V_r, V_s y V_t se vuelven nulas.

Un método para calcular la corriente de cortocircuito es resolver el sistema de variables de estado 2.9 hallando una solución general mediante el uso de herramientas computacionales de cálculo numérico. Se puede abordar el problema con mayor facilidad analizando el generador mediante su modelo monofásico equivalente. Se modela el GS como una fuente de tensión sinusoidal de frecuencia ω en serie con un circuito RL. Para modelar el cortocircuito se utiliza una llave que se cierra en $t=0$ y su representación se observa en la figura 2.6. El modelo no tiene en cuenta

los devanados inductor y amortiguador, solo considera la reactancia síncrona y da un modelo aproximado del comportamiento de la I_{CC} .

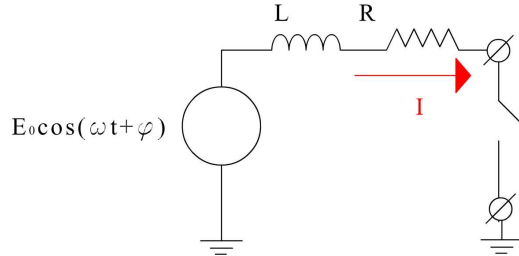


Figura 2.6: Circuito RL

En el circuito RL la corriente puede calcularse resolviendo la ecuación diferencial 2.23 y su solución es 2.24.

$$\begin{cases} E \cos(\omega t + \varphi) = LI' + RI \\ I(0) = I_0 \end{cases} \quad (2.23)$$

$$I(t) = \frac{E}{\sqrt{(\omega L)^2 + R^2}} \cos(\omega t + \varphi - \text{atan}(\frac{L\omega}{R})) + I_{u0} e^{-t\frac{R}{L}} \quad (2.24)$$

La corriente tiene dos componentes diferentes:

- Continua o unidireccional
- Alterna simétrica

La componente continua es la asociada a la exponencial decreciente y la alterna simétrica al término sinusoidal. La solución a la ecuación diferencial se obtiene calculando la solución homogénea y particular por separado para luego sumarlas aplicando superposición.

La solución particular se calcula ignorando las condiciones iniciales (en este caso la energía almacenada en la bobina) y representa la respuesta en régimen sinusoidal del circuito. Por otra parte la solución homogénea es la exponencial decreciente que corresponde a la respuesta del circuito considerando la condición inicial y anulando la fuente de tensión.

Para comprender mejor la solución hallada se enuncia el principio de Doherty:

“El flujo total concatenado en un circuito cerrado inductivo no puede cambiar de forma brusca al presentarse una perturbación, sino que momentáneamente mantiene su valor inicial”.

El principio puede interpretarse para el caso donde la perturbación es el cortocircuito y el flujo magnético dentro de la bobina debe mantenerse en el instante que ocurre la falla. Si se considera que la máquina opera en su zona lineal, entonces el flujo es lineal con la corriente y mantiene la continuidad en el instante que ocurre

Capítulo 2. Generador síncrono

la falta. La componente alterna simétrica representa la respuesta en régimen del circuito y la componente exponencial decreciente mantiene la continuidad del flujo en el instante que ocurre la falta .

Componente de continua

La corriente de continua se define según la ecuación 2.25

$$I_{DC}(t) = I_{u0} e^{-\frac{t}{\tau_i}} \quad (2.25)$$

Donde los parámetros que la modelan son:

- Constante de tiempo τ_i
- Corriente I_{u0}

La corriente I_{u0} queda determinada por la corriente previa al cortocircuito y la corriente de alterna simétrica en el instante del cortocircuito, conservando el flujo y la corriente total en el momento de la falta.

Durante el transitorio, se asume que la inercia mecánica del rotor mantiene su velocidad de sincronismo ω . El campo magnético generado por el estator es proporcional a la FMM producida por las corrientes de inducido. Este campo puede descomponerse entonces en un campo generado por la alterna simétrica y otro por la componente de continua. Este último "no gira", siendo constante en dirección y decayendo en módulo. Visto desde el rotor, el campo producido por la componente continua en el estator gira a $-\omega$. Es la misma situación de tener el rotor fijo conectado a una red de secuencia inversa. Se considera entonces la impedancia correspondiente a la componente de continua es la impedancia inversa $R_a + jX_i$ y la constante de tiempo τ_i se define según la ecuación 2.26.

$$\tau_i = \frac{X_i}{\omega R_a} \quad (2.26)$$

Si el fabricante no aporta el dato de X_i en general se asume igual a su reactancia subtransitoria directa X_d'' que se explicara más adelante. En caso de conocer el dato de la reactancia subtransitoria de cuadratura X_q'' que se indicara más adelante y se calcula X_i según la ecuación 2.27.

$$X_i = \frac{X_d'' + X_q''}{2} \quad (2.27)$$

Componente de alterna simétrica

El caso de un cortocircuito trifásico difiere con respecto al caso RL al tener en cuenta el aporte y duración de los transitorios de los devanados restantes. Se representa el módulo de la corriente alterna simétrica según la ecuación 2.28.

$$I_{as}(t) = \sqrt{2}I_{as,eff} \quad (2.28)$$

El valor eficaz de la corriente depende de la dinámica de todos los flujos involucrados y se distinguen tres etapas:

- Período subtransitorio
- Período transitorio
- Régimen permanente de cortocircuito

Durante todas las etapas la única fuente de tensión existente es la tensión interna del GS y se sitúa sobre el eje Q. Despreciando la resistencia de armadura frente a su reactancia, la corriente está en cuadratura con la tensión interna y se considera de secuencia directa.

En el caso del modelo RL la alterna simétrica es una senoide que responde al régimen sinusoidal y en este caso la senoide tiene aportes adicionales de corrientes por los bobinados restantes que decaen exponencialmente. Estos aportes adicionales terminan provocando que la componente alterna simétrica sea una senoide con envolvente que tiende a su valor de régimen. En cada etapa la envolvente puede modelarse como una exponencial decreciente cuya constante de tiempo se calcula mediante un equivalente Thévenin.

Período subtransitorio

En el instante que ocurre el cortocircuito comienza el período subtransitorio, por lo tanto el vector de flujo modelado en el sistema de ecuaciones 2.9 no permanece invariante en el tiempo, existiendo tensiones inducidas en los diferentes devanados. Se realiza un equivalente Thévenin en bornes del generador como se indica en la figura 2.7.

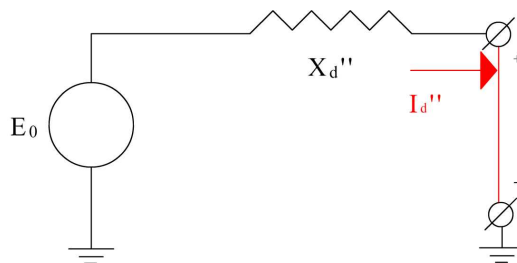


Figura 2.7: Modelo Thévenin del subtransitorio en el eje directo

La fuente de tensión es la tensión de vacío de la máquina que depende linealmente de la velocidad, la cual se asume constante en el estudio debido a la inercia

Capítulo 2. Generador síncrono

del rotor. La impedancia de Thévenin es la impedancia vista desde los bornes del generador y despreciando los términos resistivos respecto a los inductivos se obtiene una reactancia equivalente. La reactancia calculada es un parámetro que aporta el fabricante, definida como reactancia subtransitoria de eje directo X_d'' . La corriente I_d'' se define corriente subtransitoria de eje directo⁵, es el valor inicial del valor eficaz de la corriente alterna simétrica. Definiéndola según la ecuación 2.29.

$$I_d'' = I_{as,eff}(0) = \frac{E_0}{X_d''} \quad (2.29)$$

En el período existen aportes tanto de la rama rotórica como del amortiguador. Por las características constructivas de la máquina se puede considerar que aporte del amortiguador es el primero en extinguirse. Por lo tanto su duración se extiende hasta que no circule corriente por el devanado de amortiguador y en general es del orden de centésimas de segundos. Se aproxima el período subtransitorio como una exponencial decreciente donde la constante de tiempo dependerá principalmente de la rama de amortiguación. Esta constante depende entonces de la resistencia del devanado amortiguador y la reactancia vistas desde el mismo. El cálculo de los parámetros influyentes en las constantes se observan en la figura 2.8.

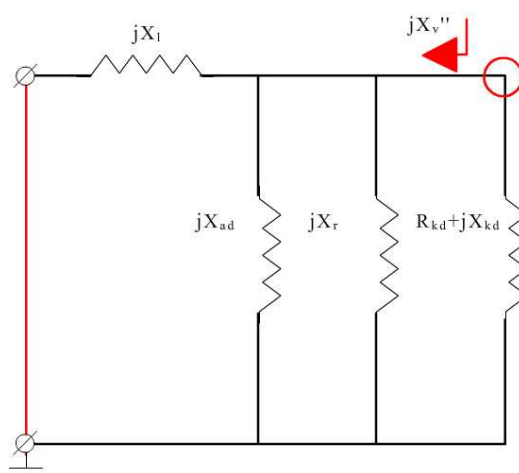


Figura 2.8: Constante de tiempo subtransitoria

Entonces el período subtransitorio queda definido como 2.30.

$$I_{sub}(t) = Ae^{-\frac{t}{\tau''}} \quad (2.30)$$

$$\tau'' = \frac{X_{kd} + X_l // X_{ad} // X_r}{R_{kd}\omega}$$

⁵Esta es una definición de [1], por más información mirar el capítulo 5

2.4. Cortocircuito

Es posible que el fabricante no aporte el dato de τ_d'' y en su defecto aporte la constante de tiempo de circuito abierto subtransitoria τ_0'' . Su cálculo es similar al de la constante τ_d'' pero en lugar de cortocircuitar el estator se lo deja abierto y su análisis se observa en la figura 2.9.

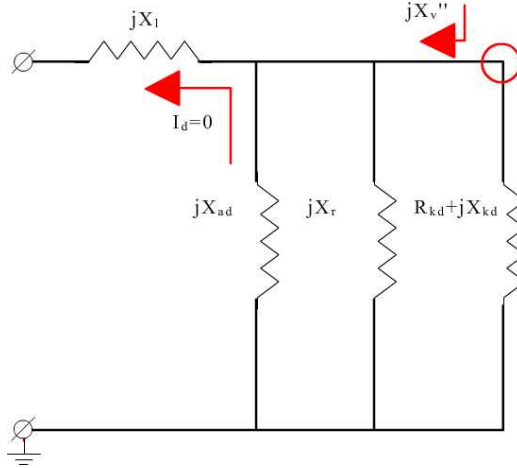


Figura 2.9: Constante de tiempo subtransitoria de circuito abierto

La constante τ_0'' y su relación con τ_d'' se define en la ecuación 2.31.

$$\begin{aligned}\tau_d'' &= \tau_0'' \frac{X_d''}{X_q''} \\ \tau_0'' &= \frac{X_{kd} + X_{ad} // X_r}{\omega R_{kd}}\end{aligned}\quad (2.31)$$

Reactancia subtransitoria de cuadratura

Antes de proseguir con el período transitorio, el dato de la reactancia de cuadratura es útil para calcular la reactancia inversa⁶. La lógica de X_q'' es la misma que X_d'' solo que en lugar de utilizar el sistema directo se utiliza el sistema en cuadratura. Dentro de las hipótesis del cálculo de cortocircuito se desprecia cualquier aporte de la corriente de cuadratura, X_q'' solo se utilizara para definir X_i . Entonces al igual en el caso directo X_q'' es la impedancia vista desde los bornes de la máquina en su eje Q. Por lo cual despreciando las resistencias con respecto a sus reactancia correspondiente, X_q'' se define según la ecuación 2.32.

$$X_q'' = X_l + X_{kd} // X_{aq} \quad (2.32)$$

⁶La reactancia inversa no solo sirve para calcular la constante de tiempo de la componente de continua, a parte es útil para el cálculo de cortocircuitos asimétricos.

Capítulo 2. Generador síncrono

Período transitorio

El período transitorio comienza una vez terminado el subtransitorio y dura hasta que las corrientes alcancen el régimen. Para alcanzar el régimen el flujo del rotor debe ser invariante en el tiempo y la componente de continua debe poder considerarse nula. La condición que aporta mayor restricción es la primera donde el período adquiere una duración del orden de segundos. El aporte del amortiguador se considera nulo y puede realizarse nuevamente un equivalente Thévenin en bornes del generador como se muestra en la figura 2.10.

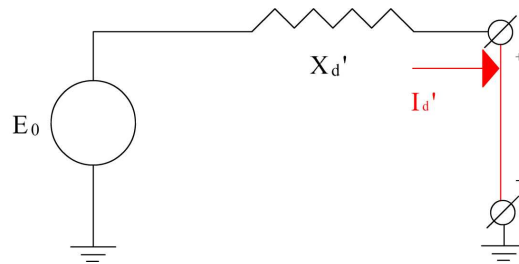


Figura 2.10: Modelo Thévenin del transitorio en el eje directo

La tensión es la de vacío y la impedancia de Thévenin es la impedancia vista desde los bornes del generador. Despreciando los términos resistivos respecto a los inductivos se obtiene una reactancia equivalente que se define como reactancia transitoria X_d' . La corriente I_d' se define corriente transitoria, es el valor inicial del eficaz de la corriente I_{as} si el GS no posee devanado amortiguador. Se define I_d' en la ecuación 2.33.

$$I_d' = I_{as,eff}(0)|_{GSsinamort} = \frac{E_0}{X_d'} \quad (2.33)$$

Se aproxima el período subtransitorio como una exponencial decreciente donde la constante de tiempo τ_d' dependerá de la rama de rotor. La constante τ_d' depende de la resistencia del devanado de rotor y las reactancia vistas desde el mismo.

2.4. Cortocircuito

El cálculo de los parámetros influyentes en las constantes se observan en la figura 2.11.

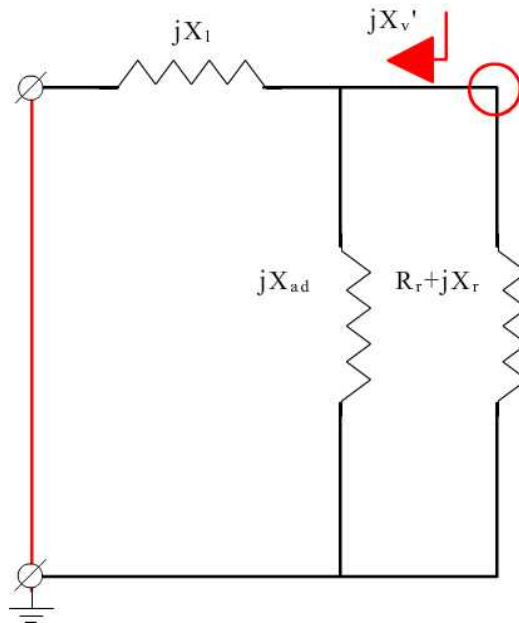


Figura 2.11: Constante de tiempo transitoria

La corriente en el período transitorio queda definida según la ecuación 2.34.

$$I_{tra}(t) = B e^{-\frac{t}{\tau'}} \quad (2.34)$$

$$\tau' = \frac{X_r + X_l / X_{ad}}{R_r \omega}$$

El período transitorio se puede estudiar como la respuesta transitoria de la máquina ante un cortocircuito si la misma no tiene el devanado amortiguador. También puede pasar que el fabricante no aporte el dato de τ'_d y en su defecto aporte la constante de tiempo de circuito abierto transitoria τ'_0 .

Capítulo 2. Generador síncrono

Aplicando el mismo análisis que en el modelo subtransitorio se obtiene la figura 2.12.

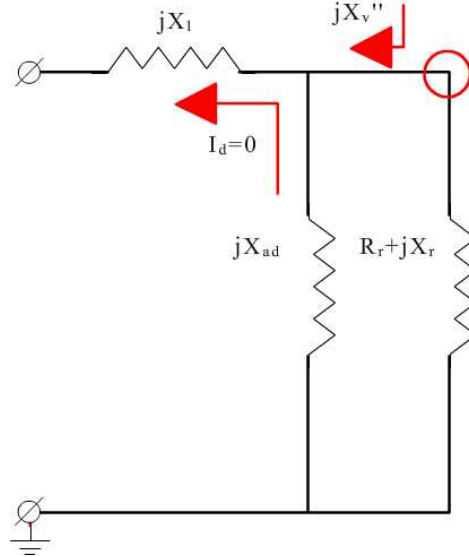


Figura 2.12: Constante de tiempo transitoria de circuito abierto

La constante τ'_0 y su relación con τ'_d se definen en la ecuación 2.35.

$$\begin{aligned}\tau'_d &= \tau'_0 \frac{X'_d}{X_d} \\ \tau'_0 &= \frac{X_{ad} + X_r}{\omega R_r}\end{aligned}\quad (2.35)$$

Régimen permanente de cortocircuito

El régimen permanente se alcanza cuando las variables de estados (modelo de variables de estados 2.9) permanecen invariantes en el tiempo. Si el vector de estados es el flujo magnético el régimen se obtiene cuando ya no hay variaciones de flujo en sus componentes DQ0 ni tampoco en los devanados de rotor y amortiguador.

No es necesario utilizar el equivalente de Thévenin, puede calcularse utilizando la ecuación 2.16 y anulando la tensión de la red. En este caso se considera la resistencia de armadura. Se sustituye las tensiones de fase en la ecuación 2.18, descomponiendo en las coordenadas reales y complejas se obtiene el sistema de ecuaciones 2.36.

$$\begin{aligned}R_a I_d - X_q(I_q) &= 0 \\ R_a I_q + X_d I_d &= E_0\end{aligned}\quad (2.36)$$

La expresión queda determinada por las corrientes, reactancias, resistencias y la tensión interna E . Las resistencias y reactancias son datos característicos de la máquina mientras que las corrientes son las incógnitas del problema. La tensión E_0 se calcula como $E_0 = I_r \omega L_{ad}$, donde L_{ad} es la inductancia directa de entre-hierro, la corriente rotórica es $I_r = \frac{E_r}{R_r}$ y ω es la velocidad mecánica del rotor. La corriente

2.4. Cortocircuito

rotórica se asume constante porque la tensión de excitación es la única entrada que se conserva y la inductancia L_{ad} depende de características constructivas de la máquina. La inercia del rotor mantiene la velocidad ω durante el cortocircuito. Todos los parámetros que influyen en la tensión interna se asumen constantes, E también es constante y conserva su valor previo al cortocircuito. La ecuación 2.36 se representa de forma matricial en 2.37.

$$\begin{pmatrix} R_a & -X_q \\ X_d & R_a \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_d \\ I_q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ E_0 \end{pmatrix} \quad (2.37)$$

Es un problema lineal y se resuelve por el método de la matriz inversa en la ecuación 2.38.

$$\begin{pmatrix} I_d \\ I_q \end{pmatrix} = \frac{1}{R_a^2 + X_d X_q} \begin{pmatrix} R_a & X_q \\ -X_d & R_a \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ E_0 \end{pmatrix} \quad (2.38)$$

Se calcula la corriente I a partir de sus componentes en los ejes directo y cuadratura según la ecuación 2.39.

$$\begin{aligned} I &= \sqrt{I_d^2 + I_q^2} \\ I &= \frac{1}{R_a^2 + X_d X_q} \sqrt{(X_q(E_0))^2 + (R_a(E_0))^2} \\ I &= \frac{E_0}{R_a^2 + X_d X_q} \sqrt{X_q^2 + R_a^2} \end{aligned} \quad (2.39)$$

Para el caso donde se desprecie la R_a el valor eficaz de la corriente tanto para máquinas de polos lisos como salientes, queda según la ecuación 2.40.

$$I_{ccp} = \frac{E_0}{X_d} \quad (2.40)$$

La corriente I_{ccp} se define corriente de régimen permanente de cortocircuito, es el valor eficaz de la corriente de régimen de $I_{as}(t)$. En la figura 2.13 se muestra un modelo Thévenin del GS conforme a lo expresado en la ecuación 2.40.

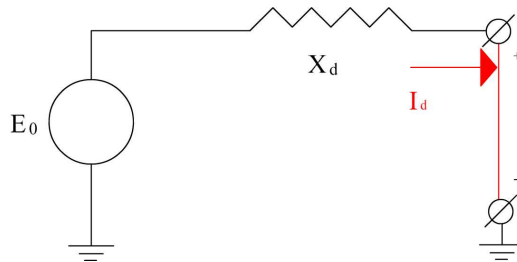


Figura 2.13: Modelo Thévenin del régimen en el eje directo

Capítulo 2. Generador síncrono

El valor eficaz de la corriente simétrica $I_{as,eff}(t)$ puede calcularse como el aporte de todas las ramas y cada una tiene mayor predominancia en sus respectivos períodos según la ecuación 2.41.

$$I_{as,eff}(t) = I_{ccp} + Ae^{-\frac{t}{\tau''}} + Be^{-\frac{t}{\tau'}} \quad (2.41)$$

Falta definir las constantes A y B, y para ello se utilizaran los modelos calculados previamente para cada etapa. Las corrientes I'_d e I''_d permiten establecer dos condiciones iniciales para determinar las constantes A y B. I''_d es el valor de la corriente directa en el instante de falta ($t=0$), como se muestra en el sistema de ecuaciones 2.42.

$$\begin{aligned} I_{as,eff}(t) &= I_{ccp} + Ae^{-\frac{t}{T_d''}} + Be^{-\frac{t}{T_d'}} \\ I_{as,eff}(0) &= I''_d \end{aligned} \quad (2.42)$$

Si no se considerara el devanado amortiguador entonces $A = 0$ y la condición inicial es I'_d . El sistema queda expresado según 2.43.

$$\begin{aligned} I_{as,eff}(t) &= I_{ccp} + Be^{-\frac{t}{T_d'}} \\ I_{as,eff}(0)_{GSsinamort} &= I'_d \end{aligned} \quad (2.43)$$

I''_d e I'_d son los valores de corriente en el instante inicial para el caso de máquinas con circuito amortiguador y sin el mismo, respectivamente. Las constantes A y B se definen en el sistema de ecuaciones 2.44.

$$\begin{aligned} A &= I''_d - I'_d \\ B &= I'_d - I_{ccp} \end{aligned} \quad (2.44)$$

La corriente alterna simétrica queda según la ecuación 2.45.

$$I_{as,eff}(t) = I_{ccp} + (I''_d - I'_d)e^{-\frac{t}{T_d''}} + (I'_d - I_{ccp})e^{-\frac{t}{T_d'}} \quad (2.45)$$

En la figura 2.14 se encuentra la curva de la alterna simétrica. La curva 1 y 2 refieren al valor eficaz de la corriente I_{as} para un generador con y sin devanado amortiguador respectivamente.

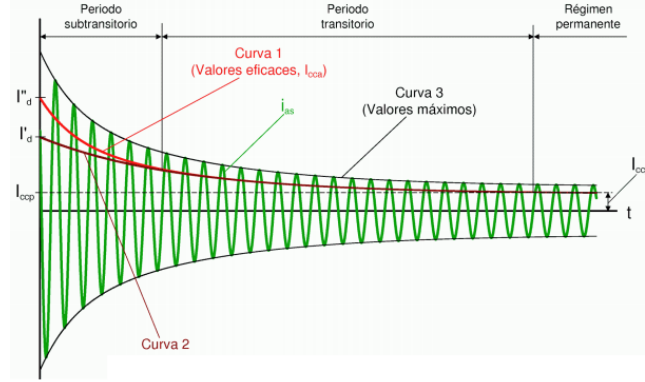


Figura 2.14: Corriente alterna simétrica [7]

Corriente total de cortocircuito

En la ecuación 2.46 se muestra la corriente total de cortocircuito de la fase A y es la suma de $I_{DC}(t)$ e $I_{as}(t)$.

$$I(t) = I_{u0}e^{-\frac{t}{\tau_i}} + \sqrt{2}I_{as,eff}(t)\cos(\omega t + \gamma) \quad (2.46)$$

El ángulo γ representa el desfase de la corriente con la tensión interna, si la misma se la aproxima por su componente directa tendrá un desfase $-\frac{\pi}{2}$ respecto de la tensión interna en instante inicial. Como se explicó previamente, la constante I_{u0} mantiene la continuidad de la corriente en el instante del cortocircuito $I_{u0} + I_{as}(t = 0) = I_{prev}$ y se determina el sistema de ecuaciones 2.47.

$$\begin{aligned} \gamma &= \angle E - \frac{\pi}{2} \\ I_{u0} &= -\sqrt{2}I''_d \cos(\gamma) \end{aligned} \quad (2.47)$$

La corriente propuesta es para una sola fase y para las fases restantes la alterna simétrica es igual con sus respectivos desfases según el sistema de ecuaciones 2.48.

$$\begin{aligned} I_a(t) &= -\sqrt{2}I''_d \cos(\gamma)e^{-\frac{t}{\tau_i}} + \sqrt{2}I_{as}(t)\cos(\omega t + \gamma) \\ I_b(t) &= -\sqrt{2}I''_d \cos(\gamma - \frac{2\pi}{3})e^{-\frac{t}{\tau_i}} + \sqrt{2}I_{as}(t)\cos(\omega t + \gamma - \frac{2\pi}{3}) \\ I_c(t) &= -\sqrt{2}I''_d \cos(\gamma + \frac{2\pi}{3})e^{-\frac{t}{\tau_i}} + \sqrt{2}I_{as}(t)\cos(\omega t + \gamma + \frac{2\pi}{3}) \end{aligned} \quad (2.48)$$

El valor de la componente de continua depende de la corriente previa, subtransitoria y del ángulo de la tensión interna en el instante de la falta para cada fase.

El valor del pico máximo de corriente se aproxima a partir del ángulo de la tensión interna. Su máximo se obtiene cuando el ángulo maximiza la constante I_{u0} y la constante de tiempo τ_i mantiene constante la componente de continua durante el subtransitorio. Significa que si el ángulo de la tensión interna es por ejemplo $\frac{\pi}{2}$ entonces la tensión es nula en ese instante y el flujo directo es máximo.

Capítulo 2. Generador síncrono

La constante I_{u0} es máxima en el devanado de la fase correspondiente y además la componente de continua se mantiene casi constante durante el subtransitorio, la corriente llega a su pico que se aproxima como $I_p = -\sqrt{2}I_d'' \cos(\pi) + \sqrt{2}I_d' = 2\sqrt{2}I_d''$.

En general en la práctica se acepta que $I_p \approx I_{din} = 1,8\sqrt{2}I_d'' = 2,5I_d'$.

Se analiza también los fasores espaciales de la tensión y corriente que se representan según la imagen 2.15.

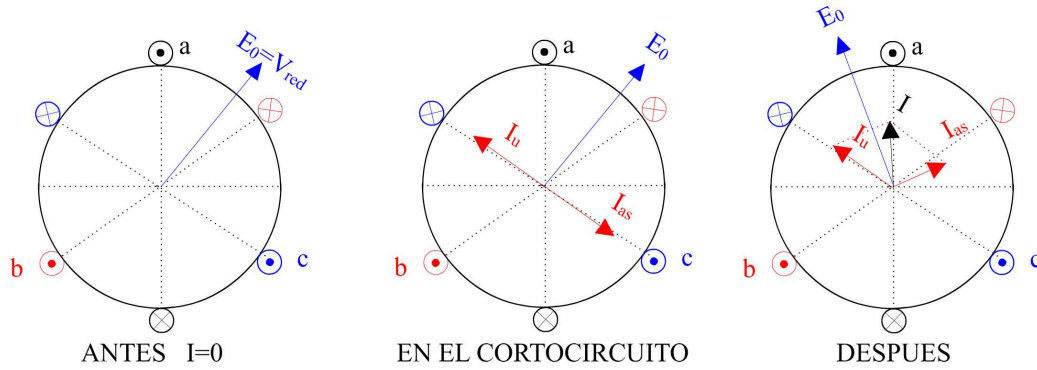


Figura 2.15: Tensión y corriente en DQ

En la figura 2.15 se muestra el instante previo donde la máquina se encuentra en vacío, luego en el cortocircuito la corriente se descompone en la continua y la alterna simétrica para preservar la corriente nula. Finalmente la corriente continua queda constante y la alterna simétrica rota en cuadratura con la tensión de vacío. Se destaca que una vez que el GS adquiera el estado de régimen la corriente alterna simétrica vale la corriente de régimen y la continua se extingue.

Parámetros de cortocircuito

Los parámetros que modelan el cortocircuito son:

- τ_i es la constante de tiempo continua o unidireccional.
- τ_d' y τ_d'' son las constantes de tiempo de cortocircuito.
- τ_0' y τ_0'' son las constantes de tiempo de circuito abierto.
- X_d, X_d' y X_d'' son las reactancias de sincronismo, transitorias y subtransitorias respectivamente. La reactancia transitoria es la sincronismo con la rama de rotor en paralelo y se cumple que $X_d' < X_d$. El mismo análisis se realiza para la subtransitoria y se deduce que $X_d'' < X_d' < X_d$.
- $I_{ccp} = \frac{E_0}{X_d}, I_d' = \frac{E_0}{X_d'}$ y $I_d'' = \frac{E_0}{X_d''}$ son las corrientes de régimen, transitoria y subtransitoria respectivamente. En función de las reactancias se puede deducir que la corriente mayor es la subtransitoria, luego es la transitoria y finalmente la de régimen.

- I_{u0} constante de la componente de continua.
- ω frecuencia nominal de la máquina.
- α fase de la tensión interna en el instante del cortocircuito.
- γ fase de la corriente alterna simétrica en el instante del cortocircuito.

En general el fabricante aporta como datos las reactancias de sincronismo, transitoria y subtransitoria. La frecuencia nominal también es un dato de chapa y el fabricante puede dar las constantes de tiempo o bien las constantes de circuito abierto para cada etapa. El resto de los datos se deducen o dependen del caso particular, como por ejemplo los ángulos.

En el anexo D se muestra con un ejemplo de cortocircuito en vacío lo analizado en la sección 2.4.

2.4.2. Cortocircuito simétrico en vacío con impedancia externa

La máquina se encuentra previamente en vacío y sucede un cortocircuito trifásico a través de una impedancia externa $Z_L = R_L + X_L j$ conectada al estator. El caso es muy similar a la máquina en vacío con una falla trifásica en sus bornes donde la resistencia e inductancia del estator cambian. Todos los parámetros definidos para el cortocircuito trifásico dependen de la impedancia de estator se modifican y se estudiara como lo hacen. La primera hipótesis para analizar es la aproximación de la corriente por su componente directa al despreñar la resistencia de inducido con respecto a su reactancia. Se puede asumir que la impedancia externa representa transformadores o líneas que son elementos prácticamente inductivos y se sigue aproximando la corriente por su componente directa.

Corriente subtransitoria, transitoria y de régimen

Dependiendo de la tensión de vacío del generador previo a la falta y las reactancias de sincronismo, transitoria y subtransitoria se definen sus corrientes respectivas y se definen según el sistema de ecuaciones 2.49.

$$\begin{aligned} I_{ccp} &= \frac{E_0}{X_d + X_L} \\ I'_d &= \frac{E_0}{X'_d + X_L} \\ I''_d &= \frac{E_0}{X''_d + X_L} \end{aligned} \quad (2.49)$$

Como la fuente de tensión E_0 es la tensión de vacío, es independiente de la impedancia externa porque no circula corriente por la misma. Si la reactancia de red es lo suficientemente grande comparado con la reactancia de sincronismo entonces las corrientes definidas en 2.49 tienden a ser similares. En ese caso la componente alterna simétrica es igual a la corriente de régimen de cortocircuito.

Capítulo 2. Generador síncrono

Constantes de tiempo

La constante de tiempo continua depende de la reactancia inversa, frecuencia y la resistencia de armadura. La frecuencia se mantiene constante y las impedancias están en serie con la impedancia externa, quedando la constante τ_i según la ecuación 2.50.

$$\tau_i = \frac{X_i + X_L}{\omega(R_a + R_L)} \quad (2.50)$$

La constante de tiempo transitoria se calculó realizando un equivalente Thévenin en el devanado inductor despreciando el aporte del devanado amortiguador y la impedancia vista queda según la ecuación 2.51.

$$Z_v = jX_r + jX_{ad} / (R_a + R_L + j(X_L + X_l)) \quad (2.51)$$

Las resistencias de línea y armadura se desprecian en comparación con las reactancias, entonces la impedancia vista resulta inductiva pura y se expresa como $X_v = X_r + \frac{X_{ad}(X_L + X_l)}{X_d + X_L}$. Se puede obtener una expresión para la constante de tiempo $\tau' = \frac{X_v}{\omega R_r}$ y se puede hallar una expresión más simple utilizando la constante de tiempo transitoria de circuito abierto τ'_0 . Calculando la constante de circuito abierto con los mismos criterios que en el caso sin impedancia externa. La constante es un parámetro que permite modelar la respuesta de la máquina cuando su estator se desconecta bruscamente en sus bornes lo cual es análogo a considerar que la reactancia de la línea tiende a infinito $\tau'_0 = \frac{X_r + X_{ad}}{R_r \omega}$. Utilizando la constante de tiempo transitoria de circuito abierto y las definiciones de las reactancias se calcula la constante de tiempo τ' en el sistema de ecuaciones 2.52.

$$\begin{aligned} \tau'_d &= \tau'_0 \frac{X'_d + X_L}{X'_d + X_L} \\ \tau'_0 &= \frac{X_r + X_{ad}}{R_r \omega} \end{aligned} \quad (2.52)$$

La constante de tiempo queda expresada en función de los parámetros físicos del generador y de la reactancia de línea. Aplicando la misma lógica que para la constante de tiempo transitoria, la constante subtransitoria de circuito abierto es $\tau''_0 = \frac{X_{kd} + X_r // X_{ad}}{\omega R_{kd}}$ y la reactancia equivalente es $X_v = X_{kd} + X_r // X_{ad} / (X_l + X_L)$. La constante de tiempo queda definida según el sistema de ecuaciones 2.53.

$$\begin{aligned} \tau''_d &= \tau''_0 \frac{X''_d + X_L}{X''_d + X_L} \\ \tau''_0 &= \frac{X_{kd} + X_r // X_{ad}}{\omega R_{kd}} \end{aligned} \quad (2.53)$$

Parámetros de cortocircuito

Se resumen los parámetros que se modifican:

$$\begin{aligned} \tau_i &= \frac{X_i + X_L}{\omega(R_a + R_L)} \\ \tau'_d &= \tau'_0 \frac{X'_d + X_L}{X'_d + X_L} \\ \tau''_d &= \tau''_0 \frac{X''_d + X_L}{X''_d + X_L} \end{aligned} \quad (2.54)$$

$$\begin{aligned}
 I_{ccp} &= \frac{E_0}{X_d + X_L} \\
 I'_d &= \frac{E_0}{X'_d + X_L} \\
 I''_d &= \frac{E_0}{X''_d + X_L} \\
 I_{u0} &= -I''_d \cos(\gamma)
 \end{aligned}
 \tag{2.55}$$

Conclusiones al agregar la impedancia

Al agregar la impedancia, los parámetros que definen la corriente de CC se modifican y son determinados por los sistemas de ecuaciones 2.54 y 2.55. El objetivo es modelar los parámetros en función de la reactancia y deducir la nueva forma de onda. Para ello se utiliza el ejemplo situado en el anexo D y se le conecta una impedancia externa Z_L .

Para simplificar las operaciones se considera que Z_L es una reactancia pura jX_L .

En la gráfica de la figura 2.16 se puede ver como las corrientes subtransitoria, transitoria y régimen disminuyen a medida que la reactancia de línea aumenta. Existiendo un valor X_L umbral para el cual la diferencia entre las tres corrientes sea despreciable y para el caso puntual de la figura es $X_L = 4,5X_d$. Por lo tanto, en función de la impedancia hasta la falta, la corriente de CC puede diferenciarse en dos tipos de onda que son cuando se encuentre “cerca” y “lejos” del generador.

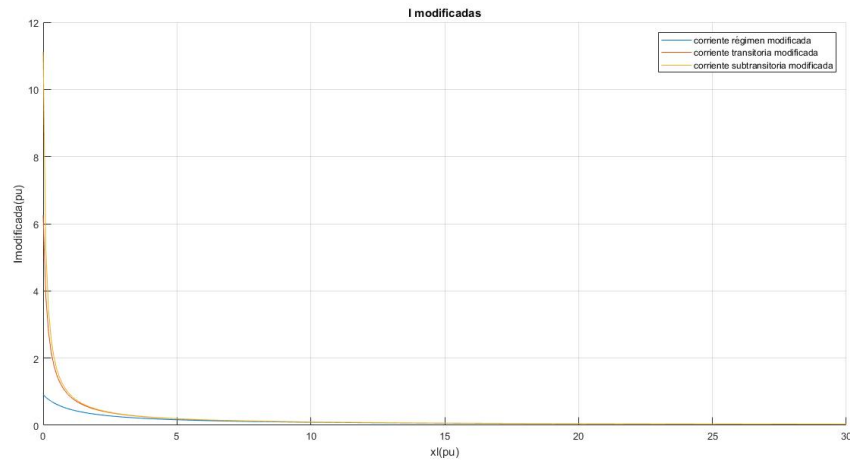


Figura 2.16: Variación de las corrientes I''_d , I'_d e I_d en función del valor de la reactancia de línea X_L .

Capítulo 2. Generador síncrono

En la gráfica de la figura 2.17 se muestra la variación de las constantes de tiempo en función de impedancia.

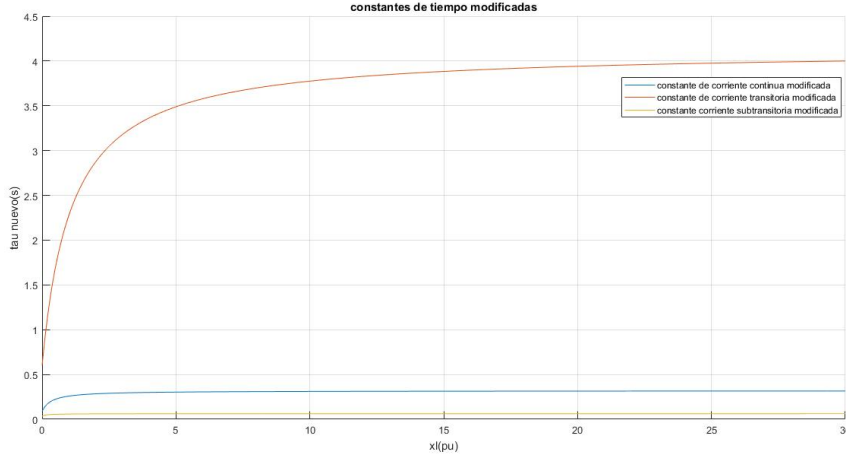


Figura 2.17: Variación de las constantes de tiempo τ_d'' , τ_d' y τ_i en función del valor de la reactancia de línea X_L en pu.

Matemáticamente en el cálculo de τ_d'' la reactancia del estator $X_l + X_L$ se encuentra en paralelo con la del rotor X_r y la mutua X_{ad} . A pesar de que la impedancia entre el GS y el punto de falta aumenta, la constante de tiempo subtransitorio máxima τ_0'' se ve limitada por la rama de rotor y en consecuencia la limita la propia máquina. En términos físicos durante el subtransitorio, el aporte de corriente por parte del amortiguador se direcciona hacia la rama rotórica en lugar del estator. Para el caso de la constante de tiempo transitoria τ_d' es el mismo procedimiento y tiene las mismas consecuencias. Por lo tanto la duración del cortocircuito queda determinada por τ_d' y tiene un valor máximo determinado por τ_0' . En la gráfica de la figura 2.17 se observa que a medida que la reactancia aumenta, las constantes de tiempo τ_d' y τ_d'' tienden a sus constantes de vacío respectivamente. Si la reactancia tiende a cero entonces las constantes tienden a las constantes de tiempo de cortocircuito en bornes del generador. Ambas situaciones son coherentes y se puede afirmar que cuanto mayor sea la reactancia el aporte de cortocircuito es más lento. También puede notarse que la constante que determina la duración del transitorio es τ_d' , que aumento aproximadamente siete veces mientras que τ_d'' se duplica.

Para definir τ_i se requiere R_L y el mismo se parte de la hipótesis que puede despreciarse en comparación de X_L . Se eligió $R_L = \frac{X_L}{100}$, el cociente cien se eligió para que la resistencia sea despreciable ante X_L y a la vez su efecto en la constante sea visible en la gráfica. A medida que la reactancia aumenta, la constante tiende a $\frac{X_L}{\omega R_L} = \frac{\tan(\varphi_L)}{\omega} = \frac{100}{\omega} = 0,318s$. Cuanto más “lejos” sea la falta, la constante τ_i dependerá fuertemente del cociente $\frac{R_L}{X_L}$ y no de la máquina. Si se hubiera elegido $R_L = 0$ exactamente, la constante tendería a infinito y su efecto real no sería apreciable.

La corriente I_{u0} depende de la fase de la tensión de vacío, corriente subtransitoria y la corriente previa. Previamente el generador estaba en vacío, la fase de la tensión es circunstancial y la corriente subtransitoria se explicó previamente como varía.

Para la corriente de pico máxima ($\angle E = \frac{\pi}{2}$), a medida que aumenta la impedancia se disminuye I_d'' tendiendo a cero. Por otra parte las constantes τ_d'' y τ_d' tienden asintóticamente a τ_0'' y τ_0' respectivamente, mientras que τ_i depende de Z_L y tiende a $\frac{X_L}{\omega R_L}$. Cuanto más inductiva sea la impedancia mayor es τ_i y la componente de continua se torna más lenta (converge con menor velocidad a cero). La corriente pico requiere que i_{DC} sea prácticamente constante durante el subtransitorio y cuanto más lenta sea τ_i mayor magnitud tiene el pico. Pero la magnitud del pico depende también del valor de I_d'' , la cual se reduce al aumentar $X_d'' + X_L$ y es el efecto el más significativo en el pico de corriente. Por tanto, al aumentar la reactancia, la magnitud de pico se reduce con respecto al caso $X_L = 0$. El cociente $\frac{X_d'' + X_L}{R_a + R_L}$ es el que determina la relación entre las constantes de tiempo involucrada y define la magnitud del pico en relación con I_d'' . Se generaliza el pico como $i_p = \sqrt{2} \cdot k \cdot I_d''$ (ver norma IEC capítulo 5). Si la reactancia aumenta en comparación con la resistencia, la constante de tiempo τ_i aumenta, tendiendo la componente continua a ser constante durante el período subtransitorio e $I_p = 2\sqrt{2}I_d''$ alcanza el máximo posible (ideal). A medida que la resistencia aumenta la constante baja, la componente de continua converge con mayor velocidad a cero y el factor k se reduce.

En conclusión al aumentar X_L , las corrientes I_d, I_d' e I_d'' tienden a asemejarse y puede establecerse un modelo simplificado para cortocircuitos lejanos. El aporte del generador tiene una mayor duración con umbrales máximos de tiempo y las magnitudes se reducen. Inclusive con la suficiente impedancia de por medio la corriente aportada por el GS puede ser considerada nula. La corriente de pico depende de I_d'' y el factor k , la corriente es menor a medida que aumenta la impedancia y el factor k tiene un valor máximo 2 cuando la resistencia es nula.

2.4.3. Cortocircuitos asimétricos en vacío

Para el estudio de los cortocircuitos asimétricos se puede apelar a dos posibles caminos o métodos. Uno de ellos es la resolución del modelo de variables de estado ante una entrada [V] que dependa de cada cortocircuito. El segundo método es utilizar la solución para cortocircuitos simétricos y adaptarla a los cortocircuito asimétricos por medio de sus componentes simétricas. El primer método tiene una complejidad matemática que no permite ser resuelto analíticamente entonces se opta por el segundo. Al igual que en los cortocircuitos simétricos se puede descomponer la corriente en su componente continua y alterna simétrica. Donde la componente de alterna simétrica se puede dividir nuevamente en el período subtransitorio, transitorio y régimen.

Se respeta el mismo orden de estudio que en los cortocircuito trifásicos (simétricos) comenzando con el generador previamente en vacío.

Componente de continua

La componente de continua es la solución homogénea del sistema de ecuaciones diferencial propuesto en el modelo de variables del sistema de ecuaciones 2.9. Entonces la solución homogénea es independiente de la entrada del sistema, que en el caso actual son las tensiones de estator y tensión de excitación del rotor. La constante de tiempo τ_i es igual que en el caso simétrico y la corriente I_{u0} mantiene la continuidad del flujo magnético en el instante de falta.

Componente alterna simétrica

Las ecuaciones de fase de cada componente se definen según la ecuación 2.56.

$$[V_{abc}] = [U_{abc}] + [Z_{abc}][I_{abc}] \quad (2.56)$$

Aplicando las componentes simétricas al sistema y la linealidad de las mismas se obtiene el sistema de ecuaciones 2.57.

$$\begin{cases} \overline{E}_d = Z_s \overline{I}_d + \overline{V}_d \\ 0 = Z_a \overline{I}_i + \overline{U}_i \\ 0 = Z_0 \overline{I}_h + \overline{U}_h \end{cases} \quad (2.57)$$

La tensión interna o de vacío de la máquina E_0 se encuentra en cuadratura con el rotor y corresponde a una secuencia directa E_d ⁷. Las impedancias Z_s, Z_a y Z_0 corresponden a las impedancias secuenciales de cada componente. Para cada tipo de falla se determina las componentes de la tensión de red V_d, V_i y V_h con el objetivo de determinar las componentes simétricas de las corrientes de cortocircuito. Gráficamente se pueden representar las ecuaciones de la ley de Ohm según el sistema de ecuaciones 2.57 y mediante las redes de secuencias según la figura 2.18.

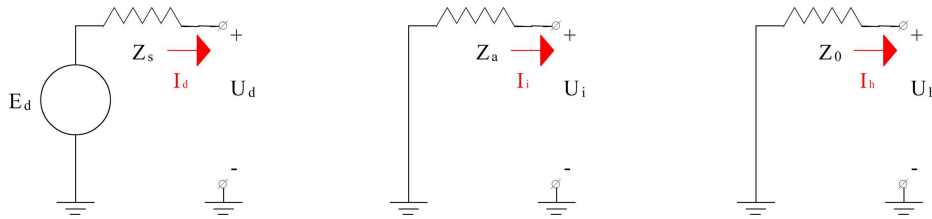


Figura 2.18: Redes de secuencia

Las impedancias de secuencia son:

- $Z_s = jX_d$ en régimen, jX'_d en el transitorio y jX''_d en el subtransitorio
- $Z_a = jX_i$
- $Z_0 = jX_0$

⁷No se debe confundir el eje directo con la tensión de secuencia directa. La tensión directa es un sistema trifásico directo, mientras que el eje directo de DQ es el eje del rotor.

2.4. Cortocircuito

Las impedancias de secuencia inversa y homopolar se mantienen constantes a lo largo del cortocircuito mientras que la impedancia directa depende del período de estudio.

En función de cada tipo de cortocircuito se determina las corrientes I_d'' , I_d e I_{ccp} . Por otra parte en las bibliografías consultadas, no se encontró información acerca de las constantes de tiempo de cortocircuito desbalanceado. Por lo tanto, solo se estudia la magnitud de la corriente y no su duración.

Cortocircuito fase A a tierra

La condición previa al cortocircuito es el vacío entonces $I_b = I_c = 0$ y la fase A sufre un cortocircuito a tierra $V_a = 0$. Las componentes secuenciales de la corriente y la tensión de la fase A se definen el sistema de ecuaciones 2.58.

$$\begin{cases} \bar{I}_d = \frac{\bar{I}_a}{3} \\ \bar{I}_i = \frac{\bar{I}_a}{3} \\ \bar{I}_h = \frac{\bar{I}_a}{3} \\ \bar{V}_d + \bar{V}_i + \bar{V}_h = 0 \end{cases} \quad (2.58)$$

Sumando todas las ecuaciones de 2.57 y sustituyendo las condiciones obtenidas en el sistema de ecuaciones 2.58 se obtiene la ecuación 2.59.

$$\bar{I}_d = \bar{I}_i = \bar{I}_h = \frac{\bar{E}_0}{Z_s + Z_a + Z_0} \quad (2.59)$$

Si la corriente por todas las secuencias es la mismas, se obtiene el modelo de la figura 2.19.

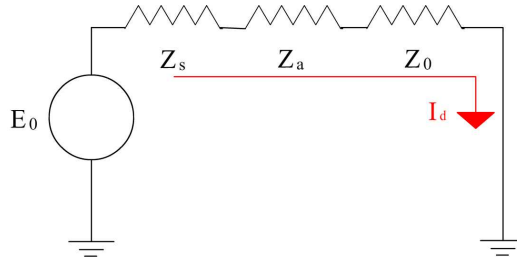


Figura 2.19: Modelo de reactancias de cortocircuito fase-tierra

Las corrientes subtransitoria, transitoria y régimen depende de las reactancias en cada caso según el sistema de ecuaciones 2.60.

$$\begin{cases} I_d'' = 3 \frac{E_0}{X_i + X_0 + X_d''} \\ I_d' = 3 \frac{E_0}{X_i + X_0 + X_d'} \\ I_{ccp} = 3 \frac{E_0}{X_i + X_0 + X_d} \end{cases} \quad (2.60)$$

Capítulo 2. Generador síncrono

Cortocircuito fase B y C a tierra

La condición previa al cortocircuito es el vacío entonces $I_a = 0$ mientras la fase A y B sufre un cortocircuito a tierra $V_b = V_c = 0$. Las componentes secuenciales de la tensión de red y la corriente de la fase A se definen en el sistema de ecuaciones 2.61.

$$\begin{cases} \bar{V}_d = \frac{\bar{V}_a}{3} \\ \bar{V}_i = \frac{\bar{V}_a}{3} \\ \bar{V}_h = \frac{\bar{V}_a}{3} \\ \bar{I}_d + \bar{I}_i + \bar{I}_h = 0 \end{cases} \quad (2.61)$$

Despejando las corrientes en 2.57, sumándolas y sustituyendo las condiciones obtenidas en 2.61 se obtiene el sistema de ecuaciones 2.62.

$$\begin{cases} \bar{I}_d = \frac{Z_a + Z_0}{Z_a Z_s + Z_a Z_0 + Z_s Z_0} \bar{E}_0 \\ \bar{I}_i = -\frac{Z_0}{Z_a Z_s + Z_a Z_0 + Z_s Z_0} \bar{E}_0 \\ \bar{I}_h = -\frac{Z_a}{Z_a Z_s + Z_a Z_0 + Z_s Z_0} \bar{E}_0 \end{cases} \quad (2.62)$$

La suma de las corrientes secuenciales es nula lo que implica que las mismas forman un nodo y si las tensiones son iguales entonces están las redes en paralelo. En la figura 2.20 se observa el circuito resultante.

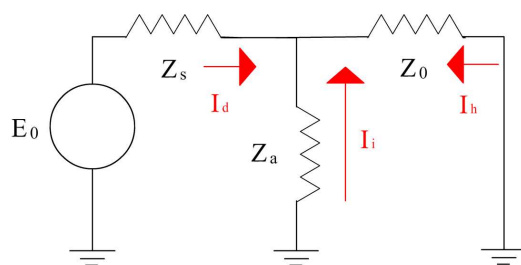


Figura 2.20: Modelo de reactancias de cortocircuito fase-fase-tierra

En el caso del cortocircuito de las fases B y C a tierra existen tres corrientes de cortocircuito. Dos por las fases en falta y una por el conductor de neutro(en caso de tenerlo) o la tierra. Existe una corriente I''_d, I'_d e I_{ccp} para las fases y el neutro. Por lo cual se aplica la ecuación 2.62 correspondiente a cada conductor y se utiliza el modelo de reactancias adecuado.

Cortocircuito bifásico entre las fases B y C

La condición previa al cortocircuito es el vacío entonces $I_a = 0$ mientras la fase A y B sufren un cortocircuito entre sí $V_b = V_c$ y $I_b = -I_c$. Las componentes secuenciales de la tensión de red y de la corriente se definen en la ecuación 2.63.

$$\begin{cases} \bar{V}_h = \frac{2\bar{V}_a + \bar{V}_c}{3} \\ \bar{V}_d = \frac{\bar{V}_a(a+a^2) + \bar{V}_c}{3} \\ \bar{V}_i = \frac{\bar{V}_a(a^2+a) + \bar{V}_c}{3} \\ \bar{I}_h = 0 \\ \bar{I}_d = \frac{\bar{I}_b a(-a+1)}{3} \\ \bar{I}_i = \frac{\bar{I}_b a(-1+a)}{3} \end{cases} \quad (2.63)$$

Del sistema de ecuaciones 2.63 se deducen las condiciones $I_h = 0, U_d = U_i$ e $I_d = -I_i$. Sumando las primeras dos ecuaciones de 2.57 y sustituyendo las condiciones obtenidas en 2.61 se obtiene el sistema de ecuaciones 2.64.

$$\begin{cases} \bar{I}_d = \frac{\bar{E}_0}{Z_s + Z_a} \\ \bar{I}_i = -\frac{\bar{E}_d}{Z_s + Z_a} \\ \bar{I}_h = 0 \end{cases} \quad (2.64)$$

La corriente de secuencia cero es nula, y las tensiones directa e inversa son iguales por lo cual las redes están en paralelo. En la figura 2.21 se observa el circuito resultante.

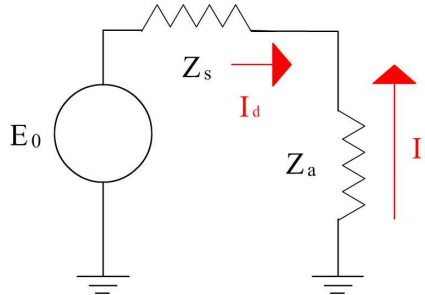


Figura 2.21: Modelo de reactancias de cortocircuito fase-fase

Calculando las corrientes por las fases B y C se aproximan las corrientes subtransitoria, transitoria y régimen según el sistema de ecuaciones 2.65.

$$\begin{cases} I_d'' = \sqrt{3} \frac{E_0}{X_d'' + X_i} \\ I_d' = \sqrt{3} \frac{E_0}{X_d' + X_i} \\ I_{ccp} = \sqrt{3} \frac{E_0}{X_d + X_i} \end{cases} \quad (2.65)$$

Corriente total de cortocircuito y sus parámetros

La corriente total es la suma de la corriente alterna simétrica y continua, recordando que las fases que quedan sanas siguen en vacío ($I = 0$). Como se estudia

Capítulo 2. Generador síncrono

la magnitud de la corriente de cortocircuito simétrico, es preferible maximizar el valor $I_{u0} = -\sqrt{2}I_d''$ y calcular el mayor pico posible. El cálculo del pico que se realizó para un cortocircuito trifásico, fue para una sola fase. Se aplica el mismo criterio y el valor del pico máximo es $2\sqrt{2}I_d''$.

2.4.4. Corriente de cortocircuito asimétrico total en vacío con impedancia externa

Se conecta la impedancia $Z_L = R_L + jX_L$ al GS, representando líneas o transformadores. Para una línea la impedancia homopolar $Z_{L0} \approx 2Z_L$ y para el transformador la red homopolar depende del aterramiento del mismo. Agregar una impedancia genérica adquiere complejidad con respecto al caso del cortocircuito simétrico. Según [2] los GS se conectan a la red mediante un transformador Dyn y se estandariza la red de secuencia homopolar. Las redes de secuencia se representan en la figura 2.22.

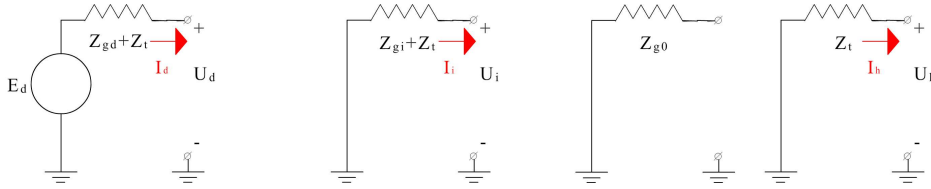


Figura 2.22: Redes de secuencia

Las impedancias Z_{gd}, Z_{ga} y Z_{g0} son las impedancias secuenciales del GS. Mientras que Z_t es la impedancia de cortocircuito del transformador. Como se conecta un triángulo del lado del GS, las corrientes de secuencia cero no pueden circular por el mismo. Por ende el generador solamente aporta corrientes de secuencia directa e inversa. Con un enfoque más práctico los cortocircuitos que dependen de la red de secuencia cero son FT y 2FT, que son visualizados como un 2F y 3F respectivamente desde el GS. Por lo tanto el cortocircuito máximo entre los simétricos y asimétricos no es el trifásico estrictamente.

Al igual que en el cortocircuito simétrico, al aumentar la impedancia entre el generador y el punto de falta, las corrientes I_{ccp}, I_d' e I_d'' tienden a ser iguales. Cuanto mayor sea la impedancia, menor es la corriente en cada caso. En el caso de la corriente subtransitoria de un cortocircuito 2FT, las corrientes pueden ser tales que adquiera el mismo orden de magnitud que un 3F.

Las expresiones expuestas en el sistema de ecuaciones 2.55 que determinan el pico de corriente son para una sola fase genérica. Como se modelaron de igual forma las curvas de todas las fases para el cortocircuito trifásico y asimétrico, se respeta la misma tendencia. El pico se modela como $I_p = k\sqrt{2}I_d''$, donde el factor k depende de la reactancia y resistencia directa vista desde el generador. Aumentando la reactancia el pico aumenta y si la resistencia aumenta el pico se reduce. El análisis planteado para determinar la forma de onda de la corriente de CC es igual para el caso simétrico y asimétrico. Por lo cual la discusión radica en observar las diferencias en los parámetros.

2.4.5. Cortocircuito con la máquina en carga

El generador se encuentra conectado a una red de alterna trifásica con potencia de CC $S_{CCred} = \frac{E_m^2}{Z_m}$ a través de una línea de impedancia Z , por la que circula una corriente previa I_{prev} . Sucede un cortocircuito en el punto A en $t=0$, para calcular la corriente de CC aportada por el generador se utiliza el método del equivalente de Thévenin. El circuito posee componentes lineales y se puede aplicar el método de superposición como se muestra en la figura 2.23. La corriente de

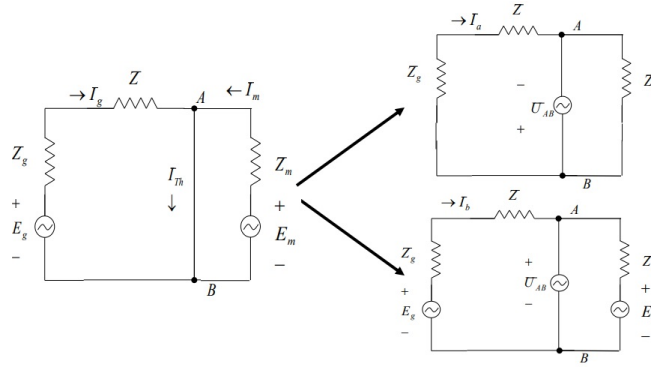


Figura 2.23: Equivalente Thévenin de una máquina cargada [10]

cortocircuito I_{th} es igual a la suma de las corrientes por la máquina para cada circuito. La corriente I_b de la figura 2.23 es la corriente por la máquina si no sucede el cortocircuito y es igual a la corriente previa a la falla I_{prev} . La corriente I_a es la corriente de CC con el generador previamente en vacío y con una impedancia externa Z . Se puede resumir que la corriente de cortocircuito es igual a la corriente previa más la calculada para el CC en vacío. En cada período la impedancia Z_g es distinta, definiendo las tensiones y corrientes subtransitorias, transitorias y de régimen según los sistema de ecuaciones 2.66 y 2.67 respectivamente.

$$\begin{aligned}\overline{E_0} &= jX_d \overline{I_{prev}} + V \\ \overline{E'_0} &= jX'_d \overline{I_{prev}} + V \\ \overline{E''_0} &= jX''_d \overline{I_{prev}} + V\end{aligned}\quad (2.66)$$

$$\begin{aligned}I_d &= |\overline{I_{prev}} + \overline{I_a}| \\ I'_d &= |\overline{I_{prev}} + \overline{I'_a}| \\ I''_d &= |\overline{I_{prev}} + \overline{I''_a}|\end{aligned}\quad (2.67)$$

Sustituyendo los nuevos valores de las corrientes subtransitoria, transitoria y régimen en la corriente alterna simétrica la misma queda definida según la ecuación 2.68.

$$I_{as}(t) = I_{prev} + I_{as}^a \quad (2.68)$$

Donde I_{as}^a es la corriente alterna simétrica si la máquina previamente estaba en vacío. Finalizando la corriente de componente continua tiene la función de conservar la continuidad de la corriente de cortocircuito. Entonces para cualquier tipo de cortocircuito se puede calcular el cortocircuito mediante su corriente previa a la falta y el comportamiento con la máquina previamente en vacío.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

Capítulo 3

Generador de Inducción Doblemente Alimentado “DFIG”

3.1. Introducción

Los aerogeneradores se pueden dividir en dos familias, los de velocidad variable y los de velocidad fija. Debido a la variabilidad de la velocidad del viento, los de velocidad variable son más utilizados actualmente para hacer un uso más eficiente del recurso eólico. En el proyecto presentado se estudian dos tipos: generador doblemente alimentado y aerogenerador full converter.

En este capítulo se describe el comportamiento en régimen nominal, el modelo dinámico y su comportamiento ante cortocircuitos.

Adicionalmente los aspectos más generales, comunes a los dos tipos de aerogeneradores, también son tratados en el presente capítulo.

3.2. Control de los aerogeneradores

3.2.1. Control aerodinámico

Mediante el control aerodinámico se busca proteger el aerogenerador contra vientos elevados y controlar algunos de sus parámetros de funcionamiento. Existen dos variables de control aerodinámico: el ángulo de paso (pitch) y la orientación (yaw). A continuación se menciona la utilidad de las distintas lógicas de control de estas variables.

- Pitch (β): Permite limitar la velocidad de giro, ampliar el margen de velocidad del viento en que la máquina opera, mejora el desempeño en arranques y paradas, compensa variables climáticas como la disminución de densidad del aire por aumento de temperatura y sirve como sistema primario de frenado.
- Pitch individual: Sirve para compensar cargas asimétricas sobre el rotor debidas a una distribución no uniforme sobre el mismo o a que el aerogenerador esté desalineado con respecto a la dirección del viento.

Capítulo 3. Generador de Inducción Doblemente Alimentado “DFIG”

- Yaw: Su función es mantener la turbina orientada en la dirección del viento y desenrollar los cables que bajan desde la góndola hasta la base de la torre.

En la figura 3.1 se observa los diferentes ángulos de ataque y la figura 3.2 representa el yaw.

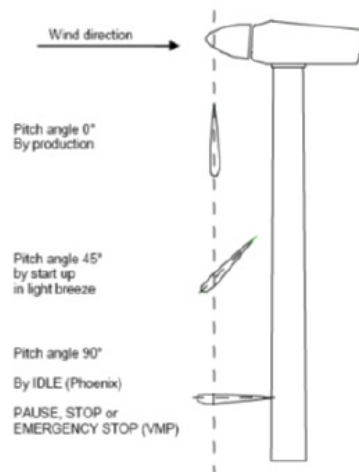


Figura 3.1: Distintos ángulos de ataque β para controlar la velocidad de giro según la velocidad del viento [4]

1. Mecanismo de orientación y frenos eléctricos.

Motores de paso o inducción y piñones acoplados a sus ejes.

2. Corona de orientación.

3. Freno hidráulico

Sobre toda la corona, en caso de que el sistema de orientación esté desactivado.

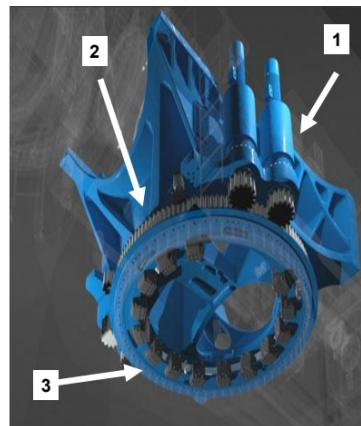


Figura 3.2: Mecanismo de orientación de la turbina (Yaw) [4]

3.2. Control de los aerogeneradores

Estrategia de control de potencia

Mediante el control del ángulo de paso, la potencia activa y la velocidad de giro de la máquina, se pretende maximizar la energía extraída del viento sin exigir mecánicamente al aerogenerador.

La potencia extraída en función de la velocidad del viento tiene la siguiente característica en la figura 3.3.

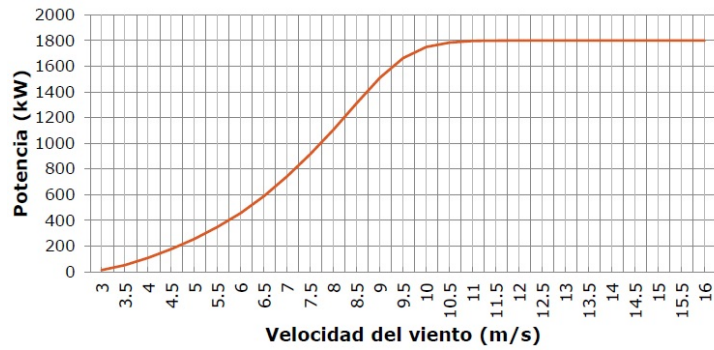


Figura 3.3: Curva de potencia extraída según la velocidad del viento [4]

La estrategia de control consiste de tres etapas según la velocidad del viento en la figura 3.4.

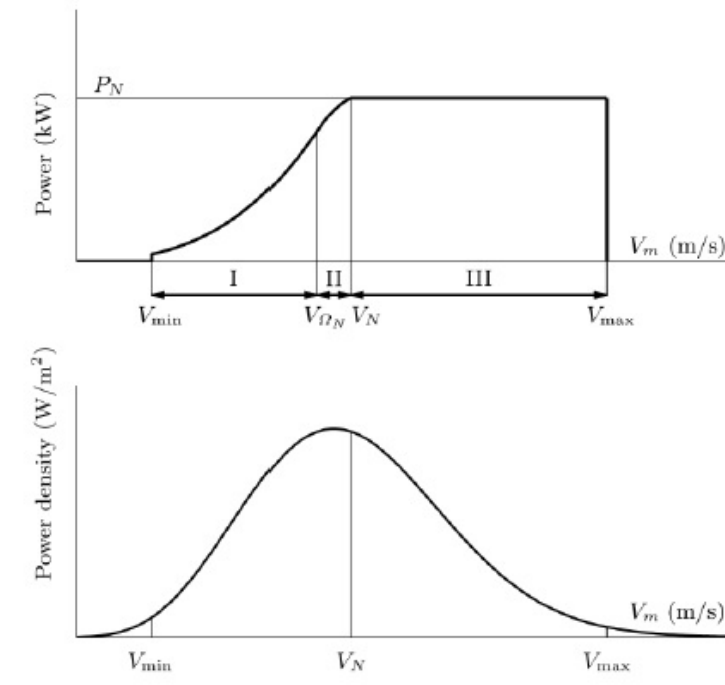


Figura 3.4: Tres estrategias de control según la velocidad del viento [4]

En la gráfica de la figura 3.3 se destacan cuatro velocidades del viento:

Capítulo 3. Generador de Inducción Doblemente Alimentado “DFIG”

- V_{min} : Mínima velocidad a la que la potencia generada es capaz de compensar las pérdidas.
- V_{max} : Por encima de esta velocidad el aerogenerador puede sufrir sobrecargas mecánicas. Construir la máquina para que resista la operación a estas velocidades es más costoso y no se justifica ya que los vientos a esta velocidad son poco frecuentes.
- V_N : Velocidad a la que el aerogenerador alcanza su potencia nominal.
- $V_{\omega N}$: Velocidad del viento a la cual se alcanza la velocidad de giro nominal del aerogenerador.

Las velocidades definen etapas de control y sus estrategias de control son:

- **Etapa I de control**, consiste de dos partes:

Etapa Ia, para velocidades de viento muy bajas. Se fija la velocidad de rotación de la turbina en el mínimo (máximo deslizamiento) y se aumenta la potencia hasta un valor óptimo para esa velocidad del viento y velocidad de giro de la turbina.

Etapa Ib, con velocidades de la turbina entre V_{min} y V_{nom} , se busca extraer la máxima potencia del viento, siguiendo la curva de máximo coeficiente de potencia. Para esto se mantiene fijo el ángulo de pitch y se incrementa la velocidad de giro de forma de mantener la velocidad específica óptima.

- **Etapa II de control**, con velocidades de viento medias, el sistema de control impone una carga fija de modo de mantener la velocidad de giro de la máquina V_{max} . Esta velocidad puede presentar variaciones entre un 5 y 10 % en torno a la consigna.
- **Etapa III de control**, se limita la potencia extraída del viento a la potencia nominal, manteniendo la velocidad nominal de giro V_{max} . Esto se logra modificando el ángulo de pitch.

Para velocidades del viento muy altas lo que se hace es desconectar la generación de potencia hasta que la velocidad baje de cierto umbral que se ubica por debajo de la velocidad máxima V_{max} , donde se reconecta para seguir generando.

3.3. Construcción y funcionamiento

El generador doblemente alimentado es una máquina de inducción cuyos elementos principales son el rotor y el estator. El rotor se encuentra conectado a la turbina, que tiene una velocidad de giro impuesta por la velocidad del viento y el ángulo de pitch. El DFIG puede intercambiar potencia con la red si se cumple la condición de sincronismo según la ecuación 3.1.

$$\omega_s = \omega_m + \omega_r \quad (3.1)$$

La frecuencia eléctrica del rotor ω_r debe compensar la diferencia entre la frecuencia mecánica $\omega = p\Omega_m$ (p es el número de polos) y frecuencia eléctrica del estator ω_s . En la ecuación 3.2 se define el deslizamiento s para simplificar los cálculos.

$$\begin{aligned} s &= \frac{\omega_s - \omega_m}{\omega_s} \\ \omega_r &= s\omega_s \\ \omega_m &= p\Omega_m \end{aligned} \quad (3.2)$$

En función del deslizamiento se identifican tres modos de funcionamiento:

- $s.\omega_m < \omega_s \rightarrow \omega_r > 0 \rightarrow s > 0 \rightarrow$ Operación Subsíncrona
- $s.\omega_m > \omega_s \rightarrow \omega_r < 0 \rightarrow s < 0 \rightarrow$ Operación Supersíncrona
- $s.\omega_m = \omega_s \rightarrow \omega_r = 0 \rightarrow s = 0 \rightarrow$ Operación Síncrona

El convertidor back-to-back se utiliza en este caso para interactuar entre dos sistemas de frecuencias distintas y es la diferencia constructiva del DFIG con respecto a otros generadores no convencionales. El convertidor rectifica la tensión de la red e impone en el rotor una tensión con módulo, frecuencia y fase determinados. Finalmente se utiliza un transformador para realizar la conexión con la red, existiendo diferentes configuraciones de conexión. Esto permite controlar el intercambio de potencia activa y reactiva entre el generador y la red. Se incorporan filtros al diseño del aerogenerador, para mitigar el ripple de tensión que el convertidor introduce en la red. En general los aspectos constructivos del DFIG se pueden resumir en las siguientes partes:

- La Turbina mueve el eje principal que está conectado a la caja multiplicadora, la cual gira el rotor a una velocidad cercana a la nominal. Usualmente las máquinas de inducción utilizadas son de uno o dos pares de polos.
- El estator de la máquina de inducción está conectada a la red mediante un transformador elevador.
- El convertidor Back-to-back explicado en el anexo B.3 se conecta entre la red y el rotor, controlando el módulo, fase y frecuencia de la corriente que circula por el bobinado del rotor.

Capítulo 3. Generador de Inducción Doblemente Alimentado "DFIG"

Las diferentes configuraciones de conexionado se muestran en la figura 3.5

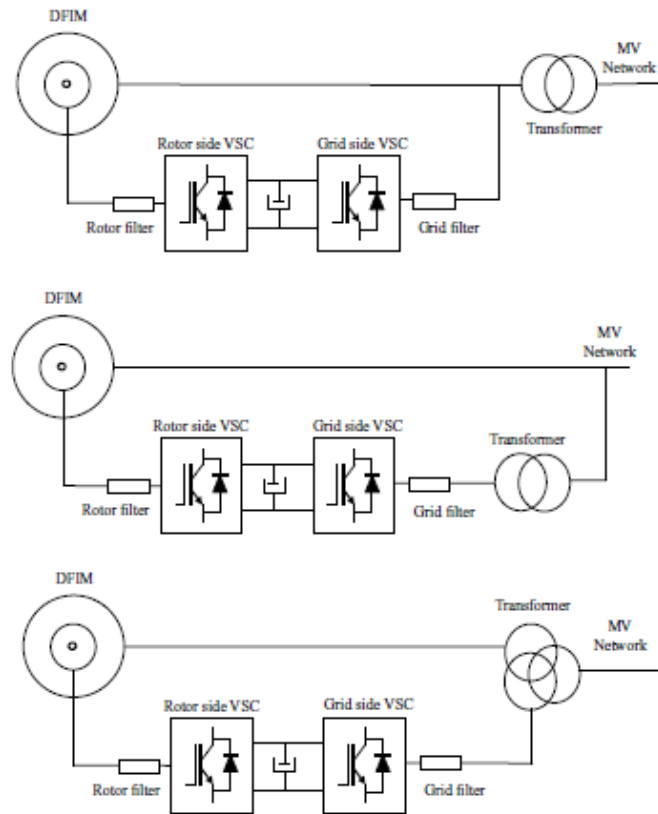


Figura 3.5: Diferentes Configuraciones de DFIG dependiendo conexión de Transformador [11].

En la figura 3.6 se aprecian los diferentes componentes del generador.

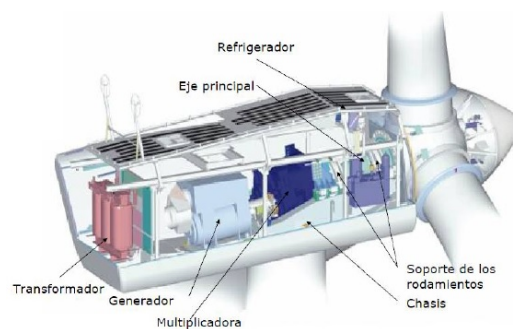


Figura 3.6: Componentes de un aerogenerador DFIG [4]

3.4. Modelo dinámico

Al igual que en el GS (Capítulo 2), el DFIG tiene un vínculo electromecánico con la red por medio del flujo magnético. El convertidor back-to-back es un dispositivo electrónico que funciona como una fuente de tensión independiente de la red. Se plantea un modelo dinámico en coordenadas DQ0 (ver anexo A.1) del DFIG, del cual se extrae el comportamiento en régimen y cortocircuito. Las hipótesis para el modelo son las siguientes:

- Los bobinados estáticos son idénticos entre sí.
- Los bobinados rotóricos son idénticos entre sí.
- Se desprecian los armónicos espaciales.
- El convertidor es una fuente de tensión de frecuencia f_r independiente de la red.
- Se trabaja en zona lineal.

Para el desarrollo del modelo dinámico se presenta un modelo de la máquina que consta de tres bobinados en el estator y tres en el rotor como en la figura 3.7.

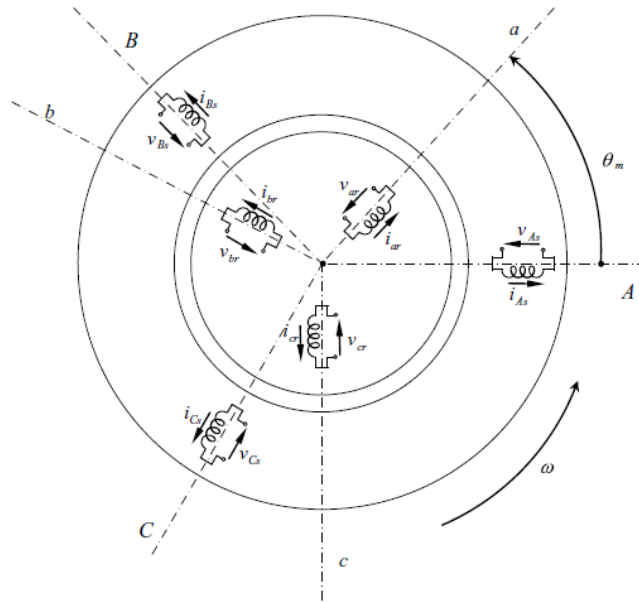


Figura 3.7: Representación ideal de los tres devanados (estator y Rotor) de DFIG [11].

A partir de este modelo, las tensiones, corrientes y flujos instantáneos de la máquina se relacionan por medio del sistema de ecuaciones 3.3.

$$\begin{aligned}
 V_{As}(t) &= R_s i_{As}(t) + N_s \frac{\delta \Phi_{As}(t)}{\delta t} \\
 V_{Bs}(t) &= R_s i_{Bs}(t) + N_s \frac{\delta \Phi_{Bs}(t)}{\delta t} \\
 V_{Cs}(t) &= R_s i_{Cs}(t) + N_s \frac{\delta \Phi_{Cs}(t)}{\delta t}
 \end{aligned}
 \tag{3.3}$$

Capítulo 3. Generador de Inducción Doblemente Alimentado “DFIG”

Se define cada término a continuación:

- R_s es la resistencia del estator
- $i_{As}(t), i_{Bs}(t)$ e $i_{Cs}(t)$ son las corrientes de fase del estator.
- $V_{As}(t), V_{Bs}(t)$ y $V_{Cs}(t)$ son las tensiones aplicadas al estator.
- $\Phi_{As}(t), \Phi_{Bs}(t)$ y $\Phi_{Cs}(t)$ son los flujos enlazados por cada bobinado de fase del estator.
- N_s es la cantidad de vueltas del estator.

Para el caso del rotor, el sistema de ecuaciones es 3.4.

$$\begin{aligned} V_{ar}(t) &= R_r i_{ar}(t) + N_r \frac{\delta \Phi_{ar}(t)}{\delta t} \\ V_{br}(t) &= R_r i_{br}(t) + N_r \frac{\delta \Phi_{br}(t)}{\delta t} \\ V_{cr}(t) &= R_r i_{cr}(t) + N_r \frac{\delta \Phi_{cr}(t)}{\delta t} \end{aligned} \quad (3.4)$$

Se define cada término a continuación:

- R_r es la resistencia del rotor referida al estator
- $i_{ar}(t), i_{br}(t)$ e $i_{cr}(t)$ son las corrientes de fase del rotor referidas al estator
- $V_{ar}(t), V_{br}(t)$ y $V_{cr}(t)$ son las tensiones aplicadas al rotor referidos del estator
- $\Phi_{as}(t), \Phi_{bs}(t)$ y $\Phi_{abs}(t)$ son los flujos enlazados por cada bobinado de fase del rotor.
- N_r es la cantidad de vueltas del rotor.

Se tienen tres frecuencias angulares involucradas: ω_r (frecuencia eléctrica del rotor), ω_s (frecuencia eléctrica del estator) y ω_m ($p\Omega_m$). Se definen las bases móviles $\{D, Q\}$ que gira a la velocidad mecánica ω_m (solidario al rotor) y $\{d, q\}$ que gira a ω_s (velocidad de sincronismo). En la figura 3.8 se modelan las bases mencionadas, donde el ángulo del rotor es la diferencia angular entre ambas bases.

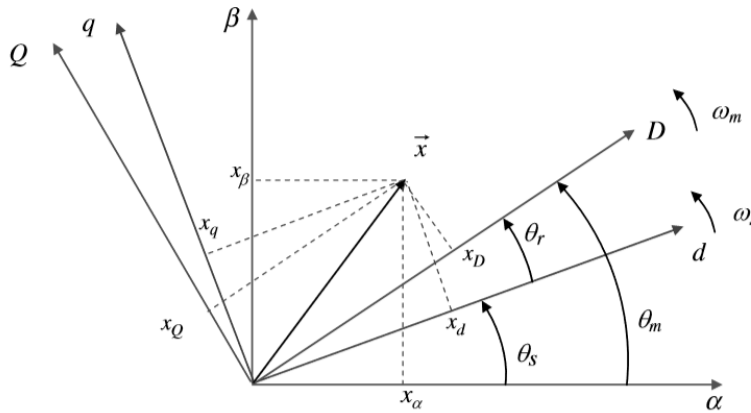


Figura 3.8: Vectores espaciales del DFIG [11]

3.4. Modelo dinámico

Se escriben las ecuaciones de estator y rotor de forma matricial según el sistema de ecuaciones 3.5.

$$\begin{cases} [V_s^s](t) = R_s[I_s^s](t) + \frac{\delta}{\delta t}[\Phi_s^s](t) \\ [V_r^r](t) = R_r[I_r^r](t) + \frac{\delta}{\delta t}[\Phi_r^r](t) \end{cases} \quad (3.5)$$

Las variables de rotor se encuentran a frecuencia f_r y del estator a f_s . El subíndice indica si la variable es de estator o rotor, mientras que el superíndice indica a que frecuencia se lo trabaja.

Se aplica la transformada de Park (anexo A.1) a los sistemas de ecuaciones 3.4 y 3.3, para el estator se considera $\theta_s = \omega_s t$ y para el rotor $\theta_r = \omega_r t$. Las variables de estator se encuentran a frecuencia ω_s y al ser representadas en la base de Park se transforman en vectores fijos con respecto a la base $\{d, q\}$. El rotor gira a velocidad mecánica ω_m y al aplicar Park con θ_r los vectores resultantes giran a velocidad ω_r con respecto a $\{D, Q\}$. Por lo tanto los vectores resultantes giran a $\omega_r + \omega_m = \omega_s$ y son fijos respecto a la base $\{d, q\}$. Multiplicando los sistemas de ecuaciones por la matrices $[P(\theta_s)]$ y $[P(\theta_r)]$ correspondientes y aplicando la regla del producto de la derivada ($\frac{\delta}{\delta t}([P][\Phi])(t) = [P](t)\frac{\delta}{\delta t}[\Phi](t) + [\Phi](t)\frac{\delta}{\delta t}[P](t)$) se obtiene el sistema de ecuaciones 3.6.

$$\begin{cases} [V_s^s](t) = R_s[I_s^s](t) + \frac{\delta}{\delta t}[\Phi_s^s](t) - \omega_s \begin{pmatrix} \Phi_{sq}(t) \\ -\Phi_{sd}(t) \\ 0 \end{pmatrix} \\ [V_r^s](t) = R_r[I_r^s](t) + \frac{\delta}{\delta t}[\Phi_r^s](t) - \omega_r \begin{pmatrix} \Phi_{rq}(t) \\ -\Phi_{rd}(t) \\ 0 \end{pmatrix} \end{cases} \quad (3.6)$$

En el sistema de ecuaciones 3.6 las matrices planteadas se encuentran en coordenadas $\{d, q, 0\}$, el versor 0 de la base corresponde a la componente homopolar que no rota con respecto a una base espacial fija. El sistema de ecuaciones 3.6 representa la dinámica del generador. Para completar el modelo es necesario relacionar el flujo con las corrientes mediante el circuito magnético. La relación entre los flujos y corrientes dependen de las autoinductancias e inductancias mutuas de la máquina. Se plantea el flujo según la ecuación 3.7.

$$\begin{cases} [\Phi_s^s](t) = [L_s](t)[I_s^s](t) + [L_m](t)[I_r^s](t) \\ [\Phi_r^r](t) = [L_m](t)[I_s^s](t) + [L_r](t)[I_r^r](t) \end{cases} \quad (3.7)$$

El valor de las matrices $[L_s], [L_r]$ y $[L_m]$ depende de la cantidad de vueltas de cada devanado y la reluctancia vista desde la base $\{d, q\}$. En dicha base la geometría de la máquina es invariante y la permeabilidad del hierro es constante. Se multiplica el sistema de estator y rotor por la matriz $[P]$ correspondiente, obteniendo los flujos y corrientes en la base $\{d, q, 0\}$ referidos a frecuencia ω_s según el sistema de ecuaciones 3.8.

Capítulo 3. Generador de Inducción Doblemente Alimentado "DFIG"

$$\left\{ \begin{array}{l} [\Phi_s^s](t) = \begin{bmatrix} L_{\sigma s} + L_m & 0 & 0 \\ 0 & L_{\sigma s} + L_m & 0 \\ 0 & 0 & L_{\sigma s} \end{bmatrix} [I_s^s](t) + \begin{bmatrix} L_m & 0 & 0 \\ 0 & L_m & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} [I_r^s](t) \\ [\Phi_r^s](t) = \begin{bmatrix} L_m & 0 & 0 \\ 0 & L_m & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} [I_s^s](t) + \begin{bmatrix} L_{\sigma r} + L_m & 0 & 0 \\ 0 & L_{\sigma r} + L_m & 0 \\ 0 & 0 & L_{\sigma r} \end{bmatrix} [I_r^s](t) \end{array} \right. \quad (3.8)$$

Las variables de flujo y corriente del rotor están referenciadas al estator por medio de la transformada de Park como se mostró anteriormente. Los parámetros se detallan a continuación:

- $L_{\sigma s}$ es la autoinductancia del devanado de estator.
- $L_{\sigma r}$ es la autoinductancia del devanado de rotor.
- L_m es inductancia magnetizante de la máquina.

Se definen también la inductancia de rotor $L_r = L_{\sigma r} + L_m$ y la inductancia de estator $L_s = L_{\sigma s} + L_m$.

A partir de los sistemas de ecuaciones de 3.8 y 3.6, se obtiene el sistema de ecuaciones 3.9, que representa el modelo dinámico del DFIG.

$$\left\{ \begin{array}{l} [V_s^s](t) = R_s [I_s^s](t) + \frac{\delta}{\delta t} [\Phi_s^s](t) - \omega_s \begin{pmatrix} \Phi_{sq}(t) \\ -\Phi_{sd}(t) \\ 0 \end{pmatrix} \\ [V_r^s](t) = R_r [I_r^s](t) + \frac{\delta}{\delta t} [\Phi_r^s](t) - \omega_r \begin{pmatrix} \Phi_{rq}(t) \\ -\Phi_{rd}(t) \\ 0 \end{pmatrix} \\ [\Phi_s^s](t) = \begin{bmatrix} L_s & 0 & 0 \\ 0 & L_s & 0 \\ 0 & 0 & L_{\sigma s} \end{bmatrix} [I_s^s](t) + \begin{bmatrix} L_m & 0 & 0 \\ 0 & L_m & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} [I_r^s](t) \\ [\Phi_r^s](t) = \begin{bmatrix} L_m & 0 & 0 \\ 0 & L_m & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} [I_s^s](t) + \begin{bmatrix} L_r & 0 & 0 \\ 0 & L_r & 0 \\ 0 & 0 & L_{\sigma r} \end{bmatrix} [I_r^s](t) \end{array} \right. \quad (3.9)$$

Las componentes $\{d, q\}$ de la base giran a ω_s que por hipótesis es constante y además sus ejes son ortonormales. Se realiza una transformación entre los vectores físicos a un fasor complejo que gira a ω_s . Dicha aplicación es válida solo para las componentes $\{d, q\}$ de la base y el sistema resultante es 3.10. La utilidad de esta notación es que permite representar cuatro variables reales en dos variables complejas.

$$\left\{ \begin{array}{l} \overline{V}_s(t) = R_s \overline{I}_s(t) + \frac{\delta}{\delta t} \overline{\Phi}_s(t) + j\omega_s \overline{\Phi}_s(t) \\ \overline{V}_r(t) = R_r \overline{I}_r(t) + \frac{\delta}{\delta t} \overline{\Phi}_r(t) + j\omega_r \overline{\Phi}_r(t) \\ \begin{bmatrix} \overline{\Phi}_s \\ \overline{\Phi}_r \end{bmatrix} (t) = \begin{bmatrix} L_s & L_m \\ L_m & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \overline{I}_s \\ \overline{I}_r \end{bmatrix} (t) \end{array} \right. \quad (3.10)$$

3.4. Modelo dinámico

En la ecuación 3.10 ninguna variable tiene superíndice, porque se asume que todos son fasores que giran a frecuencia de red.

El circuito equivalente para cada coordenada se detalla en la figura 3.9.

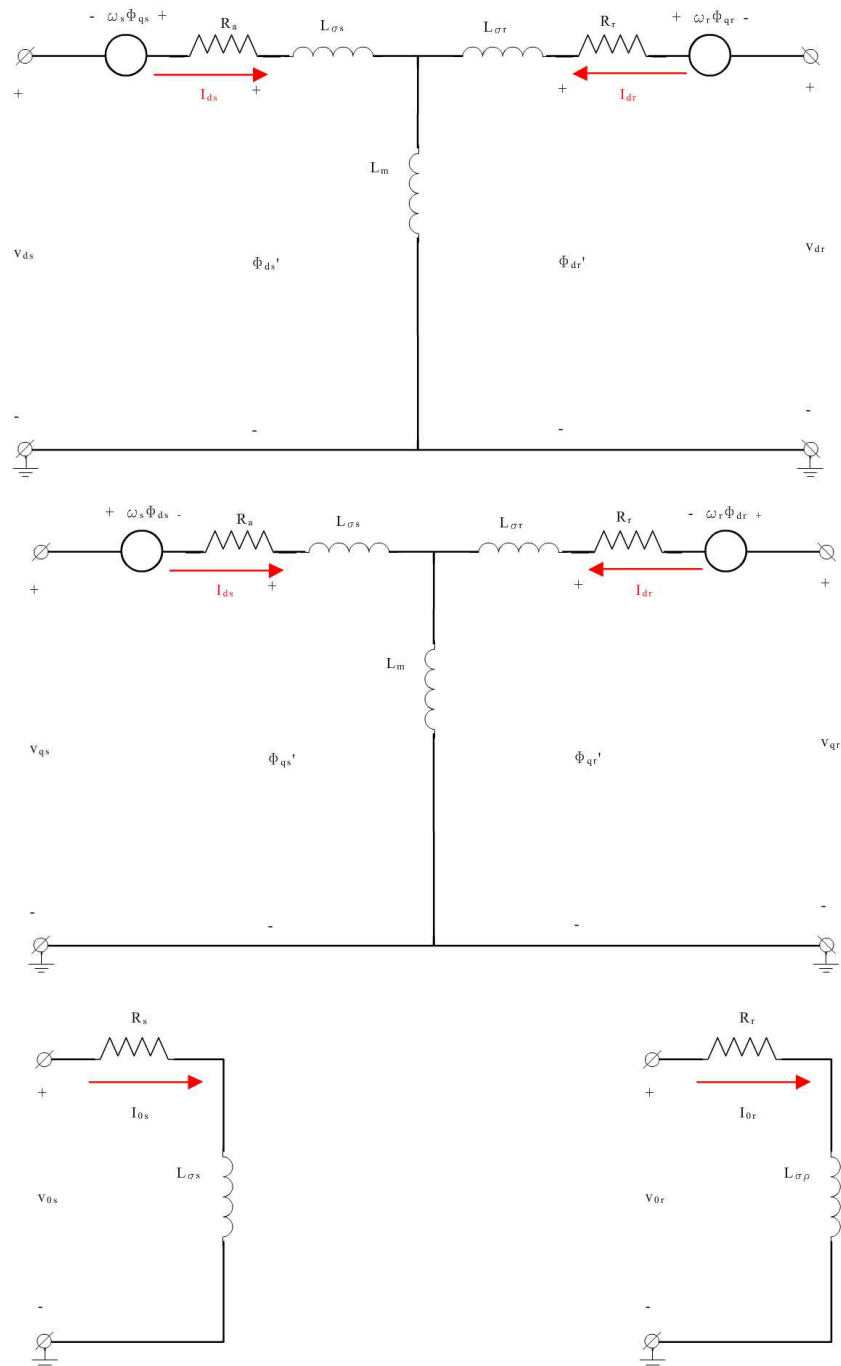


Figura 3.9: Modelo del DFIG en DQ0

Capítulo 3. Generador de Inducción Doblemente Alimentado “DFIG”

Para completar el desarrollo del modelo, se lo representa en variables de estados relacionando las tensiones con las corrientes. A partir del sistema de ecuaciones 3.10 se obtiene el modelo de variables de estado 3.11.

$$\begin{cases} \frac{\delta}{\delta t} \begin{bmatrix} \overline{\Phi}_s \\ \overline{\Phi}_r \end{bmatrix} (t) = \begin{bmatrix} V_s \\ V_r \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_s & L_m \\ L_m & L_r \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \overline{\Phi}_s \\ \overline{\Phi}_r \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} j\omega_s & 0 \\ 0 & j\omega_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \overline{\Phi}_s \\ \overline{\Phi}_r \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} \overline{\Phi}_s \\ \overline{\Phi}_r \end{bmatrix} (t) = \begin{bmatrix} L_s & L_m \\ L_m & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \overline{I}_s \\ \overline{I}_r \end{bmatrix} (t) \end{cases} \quad (3.11)$$

Resolviendo el sistema lineal entre flujos y corrientes, se obtiene la ecuación dinámica entre las tensiones y corrientes en 3.12.

$$\begin{aligned} \frac{\delta}{\delta t} \begin{bmatrix} \overline{I}_s \\ \overline{I}_r \end{bmatrix} (t) &= \frac{1}{\sigma L_s L_r} \begin{bmatrix} -R_s L_r - j\omega_m L_m^2 - j\omega_s \sigma L_s L_r & R_r L_m - j\omega_m L_m L_r \\ R_s L_m + j\omega_m L_m L_s & -R_r L_s + j\omega_m L_r L_s - j\omega_s \sigma L_s L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \overline{I}_s \\ \overline{I}_r \end{bmatrix} (t) \\ &+ \frac{1}{\sigma L_s L_r} \begin{bmatrix} L_r & -L_m \\ -L_m & L_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \overline{V}_s \\ \overline{V}_r \end{bmatrix} (t) \end{aligned} \quad (3.12)$$

Se define un nuevo término $\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r}$ llamado coeficiente de fuga.

La dinámica de la secuencia cero es más sencilla, es independiente de las coordenadas $\{d, q\}$ y se analiza por separado según 3.13.

$$\frac{\delta}{\delta t} [I_0] (t) = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_{\sigma s}} & 0 \\ 0 & -\frac{R_r}{L_{\sigma r}} \end{bmatrix} [I_0] + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_{\sigma s}} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_{\sigma r}} \end{bmatrix} [V_0] \quad (3.13)$$

Donde:

- $[I_0]$ es el vector de corrientes homopolares $[I_{0s}, I_{0r}]$.
- $[V_0]$ es el vector de tensiones homopolares $[V_{0s}, V_{0r}]$.

Es necesario notar que las mismas no tienen notación fasorial y es debido a que dicha notación es para representar un vector espacial en el plano complejo según $\{d, q\}$.

3.5. Modelo del DFIG en régimen

Para el cálculo del modelo en régimen del DFIG se utiliza el modelo dinámico hallado en 3.4 con el vector de estado $[\overline{I}_s, \overline{I}_r, I_0](t)$ invariante en el tiempo. Además se agregan las siguientes hipótesis adicionales:

- Se supone que tanto el estator como el rotor están conectados en estrella.
- La tensión de estator es suministrada por la red y las corrientes forman un sistema trifásico perfecto y equilibrado.

3.5. Modelo del DFIG en régimen

Si el estator y rotor son sistemas trifásicos perfectos y equilibrados, entonces no hay tensiones homopolares y el vector $[I_0]$ es nulo.

Las tensiones y corrientes de estator y rotor se encuentran en régimen fasorial y en las coordenadas de Park son fasores constantes. Operando en el sistema de ecuaciones de 3.12 se obtiene el sistema de ecuaciones 3.14.

$$\begin{bmatrix} \bar{V}_s \\ \bar{V}_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{I}_s \\ \bar{I}_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} j\omega_s & 0 \\ 0 & j\omega_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_s & L_m \\ L_m & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{I}_s \\ \bar{I}_r \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

Relacionando las frecuencias como $\omega_r = s\omega_s$ y operando sobre el sistema 3.11 se obtiene el sistema de ecuaciones 3.15.

$$\begin{aligned} \bar{V}_s &= R_s \bar{I}_s + j\omega_s L_s \bar{I}_s + j\omega_s L_m \bar{I}_r \\ \bar{V}_r &= R_r \bar{I}_r + sj\omega_s L_m \bar{I}_s + sj\omega_s L_r \bar{I}_r \end{aligned} \quad (3.15)$$

Definiendo las impedancias $X_s = \omega_s L_s$, $X_r = \omega_s L_r$ y $X_m = \omega_s L_m$, el sistema de ecuaciones que modela el régimen del DFIG es 3.16.

$$\begin{aligned} \bar{V}_s &= (R_s + jX_s) \bar{I}_s + jX_m \bar{I}_r \\ \frac{\bar{V}_r}{s} &= \left(\frac{R_r}{s} + jX_r\right) \bar{I}_r + jX_m \bar{I}_s \end{aligned} \quad (3.16)$$

Se representa el circuito equivalente en la figura 3.10.

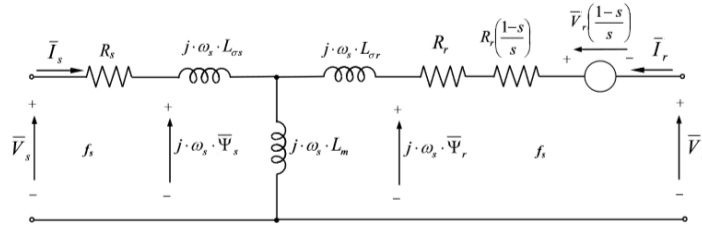


Figura 3.10: Modelo fasorial del DFIG en régimen [11]

El modelo propuesto se utiliza para calcular el flujo de potencia del estator y rotor mediante las fórmulas planteadas en el anexo A.1, obteniendo el sistema de ecuaciones 3.17.

$$\begin{aligned} P_s &= \frac{3}{2}(V_{ds}I_{ds} + V_{qs}I_{qs}) \\ P_r &= \frac{3}{2}(V_{dr}I_{dr} + V_{qr}I_{qr}) \\ Q_s &= \frac{3}{2}(V_{qs}I_{ds} - V_{ds}I_{qs}) \\ Q_r &= \frac{3}{2}(V_{qr}I_{dr} - V_{dr}I_{qr}) \end{aligned} \quad (3.17)$$

3.6. Cortocircuito

El análisis presentado en esta sección toma como referencia lo estudiado en [11] y [4], obteniendo expresiones aproximadas de la corriente de cortocircuito, su valor máximo y el efecto de la actuación de las protecciones del convertidor. La corriente de CC tiene dos aportes distintos, el proveniente del estator y el que viene del convertidor del lado de la red. Este último no se tuvo en cuenta en ninguna bibliografía, esto se debe a que el convertidor tiene un retardo propio y no participa en los primeros ciclos de la falta. Entonces el convertidor no influye significativamente durante el transitorio de corriente en relación al efecto de los flujos magnéticos de estator y rotor, por ende se lo desprecia en el cálculo de la corriente de CC. En el régimen de CC puede suponerse que el convertidor aporta una corriente definida que depende únicamente del control del convertidor.

Se ordena el estudio en los siguientes casos:

- Cortocircuito simétrico con el rotor abierto ($I_r = 0$ para todo tiempo).
- Cortocircuito genérico trifásico con rotor conectado.
- Cortocircuito asimétrico.

Para el cálculo de los cortocircuitos asimétricos se utilizan las componentes simétricas explicadas en el anexo A.2. El generador se conecta a la red por medio de un transformador Dyn y todo cortocircuito del lado de estrella es un bifásico o trifásico desde el triángulo. Entonces el generador no aporta corriente de secuencia cero al cortocircuito.

3.6.1. Cortocircuito simétrico

Rotor abierto

Antes de comenzar el análisis se deben conocer las condiciones previas en la que estaba operando la máquina. Se asume que la tensión de red era la de un sistema equilibrado y perfecto. Su representación en $\{d, q, 0\}$ es $V_{pre}e^{j\alpha}$. En el instante $t=0$ sucede un cortocircuito y las tres fases caen bruscamente a cero. La corriente de rotor es nula y la de estator previa a la falta se deduce del sistema de ecuaciones 3.16¹, obteniendo la ecuación 3.18.

$$\bar{I}_s(0-) = \frac{V_{pre}}{jX_s} e^{j\alpha} \quad (3.18)$$

Si se considera que la máquina trabaja en zona lineal, el circuito magnético definido en 3.11 sigue siendo válido y el flujo previo a la falta se determina en el sistema de ecuaciones 3.19.

$$\begin{aligned} \bar{\Phi}_s(0-) &= L_s \bar{I}_s(0-) = \frac{V_{pre}}{j\omega_s} e^{j\alpha} \\ \bar{\Phi}_r(0-) &= L_m \bar{I}_s(0-) = \frac{L_m}{L_s} \frac{V_{pre}}{j\omega_s} e^{j\alpha} \end{aligned} \quad (3.19)$$

¹Se desprecia la resistencia R_s en comparación con la reactancia X_s

3.6. Cortocircuito

El principio de Doherty asegura que el flujo debe conservarse en el instante de la falta y es continuo para todo tiempo. Del modelo de variables de estado 3.11² y aplicando $I_r = 0$ se obtiene el sistema de ecuaciones diferenciales 3.20.

$$\frac{\delta}{\delta t} \begin{bmatrix} \overline{\Phi}_s \\ \overline{\Phi}_r \end{bmatrix} (t) = \begin{bmatrix} 0 \\ V_r \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} L_s & L_m \\ L_m & L_r \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \overline{I}_s \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} j\omega_s & 0 \\ 0 & j\omega_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \overline{\Phi}_s \\ \overline{\Phi}_r \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

La dinámica del flujo de estator se representa en la ecuación 3.21.

$$\frac{\delta}{\delta t} \overline{\Phi}_s = -\left(\frac{R_s}{L_s} + \omega_s j\right) \overline{\Phi}_s \quad (3.21)$$

Es una ecuación diferencial homogénea de primer orden y al resolverla el flujo de estator queda como se expresa en la ecuación 3.22.

$$\begin{aligned} \overline{\Phi}_s(t) &= \overline{\lambda} e^{-(\frac{1}{\tau_s} + j\omega_s)t} = \overline{\lambda} e^{-\frac{t}{\tau_s}} e^{-j\omega_s t} \\ \tau_s &= \frac{L_s}{R_s} \\ \overline{\lambda} &= \frac{V_{pre}}{j\omega_s} e^{j\alpha} \end{aligned} \quad (3.22)$$

La constante τ_s es la constante de tiempo de estator y λ es la que asegura continuidad del flujo en el instante de cortocircuito. Hay que notar que el flujo tiene dos componentes, una real y otra compleja. La compleja indica que el fasor gira a $-\omega_s$ cuando la base $\{d, q\}$ gira a ω_s , indicando que el vector de flujo está fijo con respecto a una base solidaria al estator. El flujo calculado se define como flujo natural, es el símil de la componente DC del cortocircuito de un generador síncrono (capítulo 2). La componente real indica el amortiguamiento que introduce la resistencia y en caso de que la misma tendiera a cero el flujo sería constante.

El flujo en el instante de cortocircuito tiene un valor previo $\overline{\Phi}_s(0^-)$, el mismo se fija en el espacio y decae exponencialmente hasta cero y en componentes de fase es una exponencial decreciente.

En general para máquinas de varios megawatts la constante de tiempo ronda entre 0.8 y 1.5 segundos. Si se considera que la falta es despejada en tiempos menores el flujo natural nunca llega a ser nulo.

Aplicando el circuito magnético, se obtiene la corriente de estator en la ecuación 3.23.

$$\overline{I}_s(t) = \frac{\overline{\Phi}_s(t)}{L_s} = \frac{V_{pre}}{jX_s} e^{j(\alpha - \omega_s t)} e^{-\frac{t}{\tau_s}} \quad (3.23)$$

En términos de coordenadas de la fase A la corriente es la ecuación 3.24.

$$I_{s,A}(t) = \frac{V_{pre}}{X_s} \cos\left(\alpha - \frac{\pi}{2}\right) e^{-\frac{t}{\tau_s}} \quad (3.24)$$

La corriente de estator es una exponencial que decrece con el tiempo y su valor máximo es limitado por el flujo previo. Previo al CC, el flujo depende de la tensión

²No tiene sentido utilizar la ecuación dinámica de la componente homopolar debido a que es un cortocircuito simétrico.

Capítulo 3. Generador de Inducción Doblemente Alimentado “DFIG”

V_{pre} , la impedancia hasta la falta X_s y la fase de la tensión α en el instante de falta. Para $\alpha = \frac{\pi}{2}$ la corriente es nula ya que el flujo previo era nulo. Como el CC es en bornes del generador la impedancia involucrada es X_s y en caso de existir, se suma la impedancia \overline{Z}_L entre la falta y el generador. En este último caso la impedancia aumenta y la magnitud de la corriente se reduce.

La curva converge a cero en aproximadamente $3\tau_s \approx 3 \frac{X_L + X_s}{\omega_s(R_L + R_s)}$, el término resistivo aporta amortiguación, por lo que converge más rápidamente a cero. Por lo tanto la distancia hasta el punto de falta determina la duración del transitorio de corriente y su magnitud.

Tensión inducida en el rotor

Comenzamos el estudio calculando la tensión inducida en el rotor, aplicando la Ley de Faraday al flujo rotórico visto desde el rotor. Mediante modelo de variables de estado de 3.11, se obtiene el siguiente sistemas de ecuaciones 3.25.

$$\begin{aligned} \overline{V}_r^r(t) &= R_r \overline{I}_r^r(t) + \frac{\delta}{\delta t} \overline{\Phi}_r^r(t) \\ \overline{\Phi}_r^r(t) &= \frac{L_m}{L_s} \overline{\Phi}_s^r(t) + \sigma L_r \overline{I}_r^r(t) \end{aligned} \quad (3.25)$$

Operando con el sistema 3.25 se obtiene la ecuación 3.26.

$$\overline{V}_r^r(t) = \frac{L_m}{L_s} \frac{\delta}{\delta t} \overline{\Phi}_s^r(t) + R_r \overline{I}_r^r(t) + \sigma L_r \frac{\delta}{\delta t} \overline{V}_r^r(t) \quad (3.26)$$

Si el convertidor impone la tensión $\overline{V}_r^r(t)$, los términos dependientes de $\overline{I}_r^r(t)$ son la caída de tensión en la rama rotórica. El término faltante $\frac{L_m}{L_s} \frac{\delta}{\delta t} \overline{\Phi}_s^r(t)$ es la tensión inducida en el devanado rotórico cuando éste está abierto (corriente cero). Por lo tanto el término hallado en 3.23 debe ser visto desde el rotor y luego se lo deriva respecto al tiempo. Como es un vector fijo en fase, gira a $-\omega_s$ respecto al estator y en consecuencia a $-\omega_m$ respecto al rotor. El vector de flujo $\overline{\Phi}_s(t)$ se multiplica por $e^{-j\omega_m t}$ para obtenerlo en coordenadas rotóricas y la tensión inducida es la ecuación 3.27.

$$\overline{\epsilon}_r^r(t) = -\frac{L_m V_{pre}}{L_s j\omega_s} e^{j\alpha} \left(\frac{1}{\tau_s} + j\omega_m \right) e^{-t(j\omega_s + \frac{1}{\tau_s})} \quad (3.27)$$

La tensión inducida decae con el flujo natural y su valor máximo es en $t=0$ según la ecuación 3.28.

$$|\overline{\epsilon}_{r,max}^r| \approx V_{pre} \frac{L_m \omega_m}{L_s \omega_s} = V_{pre} \frac{L_m}{L_s} (1 - s) \quad (3.28)$$

Durante el transitorio de cortocircuito, la frecuencia de $\overline{\epsilon}_r^r$ pasa a depender de la velocidad mecánica ω_m . Previo al cortocircuito la frecuencia era la rotórica $s\omega_s$ y pasa a ser la mecánica $(1 - s)\omega_s$. La tensión $\overline{\epsilon}_r^r$ depende del deslizamiento, si ω_m previa al CC era la de sincronismo ($s = 0$) entonces $\overline{\epsilon}_r^r$ era nula y pasa a valer $V_{pre} \frac{L_m}{L_s}$.

En este caso se estudió la máquina previamente en vacío, pero si la máquina se encuentra operando en modo subsíncrono o supersíncrono el deslizamiento no es

nulo. El rango del deslizamiento de estas máquinas es entre -0.25 a 0.25, entonces el rotor puede experimentar sobrevoltajes de 3 a 5 veces su tensión nominal. Saturando el convertidor y perdiendo el control sobre la corriente. Protegerlo es de vital importancia y para ello se utiliza la resistencia de crowbar (sección 3.6.3).

Rotor conectado

Al considerar el rotor con una corriente circulando por el mismo, la solución del modelo de variable de estados 3.11 adquiere mayor complejidad, porque la respuesta exacta del convertidor al CC se desconoce. Para solucionarlo se estudia cualitativamente el comportamiento de la máquina y su funcionamiento en el transitorio de cortocircuito.

La solución de la ecuación diferencial del modelo de variable de estados tiene dos componentes, la solución homogénea y particular. La solución homogénea, es el flujo natural de cada bobinado y depende de la condición inicial, mientras que la particular es el flujo forzado que impone la fuente de tensión de la red y el convertidor. Por medio del circuito magnético se obtienen las corrientes en función de los flujos según el sistema de ecuaciones 3.29.

$$\begin{bmatrix} I_s \\ I_r \end{bmatrix} (t) = \begin{bmatrix} \frac{1}{L'_s} & -\frac{k_r}{L'_s} \\ -\frac{k_s}{L'_r} & \frac{1}{L'_r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Phi_s \\ \Phi_r \end{bmatrix} (t) \quad (3.29)$$

Donde se definen los siguientes parámetros:

- $L'_s = L_{\sigma s} + L_m // L_{\sigma r}$
- $L'_r = L_{\sigma r} + L_m // L_{\sigma s}$
- $k_s = \frac{L_m}{L_s}$
- $k_r = \frac{L_m}{L_r}$

Con el modelo de variable de estado indicado en 3.11, se calcula la solución homogénea por el método de la matriz exponencial. Para hallar la solución se requiere conocer el flujo previo al CC y la matriz A que se definen en el sistema de ecuaciones 3.30.

$$\begin{aligned} [A] &= \begin{bmatrix} \frac{1}{\tau'_s} + \omega_s j & -\frac{k_r}{\tau'_s} \\ -\frac{k_s}{\tau'_r} & \frac{1}{\tau'_r} + \omega_r j \end{bmatrix} \\ \tau'_s &= \frac{R_s}{L'_s} \\ \tau'_r &= \frac{R_r}{L'_r} \\ \overline{[\Phi(0^-)]} &= \begin{bmatrix} \overline{\Phi_s(0^-)} \\ \overline{\Phi_r(0^-)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \overline{\frac{V_{pre}}{jX_s}} \\ \overline{\Phi_{r,pre}} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.30)$$

La matriz exponencial $e^{[A]t}$ se resuelve por medio de la transformada de Laplace $(sI - A)^{-1}$ y se define según la ecuación 3.31.

³s en este caso es la variable compleja en el dominio de Laplace

Capítulo 3. Generador de Inducción Doblemente Alimentado “DFIG”

$$e^{At} = \begin{bmatrix} e^{-\frac{t}{\tau'_s} e^{-j\omega_s t}} & \frac{k_r}{\tau'_s} \bar{c} (e^{-\frac{t}{\tau'_s} e^{-j\omega_s t}} - e^{-\frac{t}{\tau'_r} e^{-j\omega_r t}}) \\ \frac{k_s}{\tau'_s} \bar{c} (e^{-\frac{t}{\tau'_s} e^{-j\omega_s t}} - e^{-\frac{t}{\tau'_r} e^{-j\omega_r t}}) & e^{-\frac{t}{\tau'_r} e^{-j\omega_r t}} \end{bmatrix} \quad (3.31)$$

$$\bar{c} = \frac{1}{\frac{1}{\tau'_s} - \frac{1}{\tau'_r} + j\omega_m}$$

Se resuelve la solución homogénea $[\overline{\Phi}_h](t) = e^{At} \overline{\Phi}(0^-)$ en la ecuación 3.32.

$$[\overline{\Phi}_h](t) = \begin{bmatrix} e^{-\frac{t}{\tau'_s} e^{-j\omega_s t}} \frac{\overline{V}_{pre}}{\omega_s j} + \frac{k_r}{\tau'_s} c (e^{-\frac{t}{\tau'_s} e^{-j\omega_s t}} - e^{-\frac{t}{\tau'_r} e^{-j\omega_r t}}) \overline{\Phi}_{r,pre} \\ \frac{k_s}{\tau'_r} \bar{c} (e^{-\frac{t}{\tau'_s} e^{-j\omega_s t}} - e^{-\frac{t}{\tau'_r} e^{-j\omega_r t}}) \frac{\overline{V}_{pre}}{\omega_s j} + e^{-\frac{t}{\tau'_r} e^{-j\omega_r t}} \overline{\Phi}_{r,pre} \end{bmatrix} \quad (3.32)$$

Lo primero que puede observarse es que los flujos de rotor y estator presentan términos en dos frecuencias: $-\omega_s$ y $-\omega_r$. Los vectores que se multiplican por $e^{-j\omega_s t}$ se encuentran espacialmente fijos y los que se multiplican por $e^{-j\omega_r t}$ giran a $\omega_m t$.

Se ha demostrado que el generador se modela como resistencias, inductancias y fuentes de tensión. Para el caso sencillo de un CC en un circuito RL alimentado por una fuente de alterna, la corriente se descompone en dos términos: la alterna simétrica y continua. La componente de alterna es la respuesta en régimen, modelada por un fasor y la continua es un vector fijo en el espacio cuya función es mantener la continuidad en el instante de falta. En el caso RL la continuidad de la corriente depende exclusivamente del flujo de la bobina L, pero en este caso hay dos flujos involucrados (rotor y estator). Ambos flujos son continuos en el instante de falta y por la linealidad del circuito magnético también lo son las corrientes.

Se comienza estudiando los términos en la diagonal principal. Para el flujo de estator, tiene dos términos que dependen del flujo previo de estator y rotor respectivamente. El que depende del estator es fijo con respecto al mismo y es exactamente igual al determinado para el caso con rotor abierto. Por lo tanto, esta componente mantiene la continuidad del flujo estático en el instante de falta. Por linealidad la corriente de estator depende del flujo, el cual genera una corriente que decrece exponencialmente con una constante de tiempo τ'_s que es menor a τ_s . Quiere decir que la componente se mitiga con mayor velocidad debido a que la inductancia vista desde el estator es $L'_s < L_s$.

Para el caso del flujo de rotor la componente que asegura continuidad se encuentra girando a ω_m relativo al estator. La razón es que este flujo es fijo respecto a la base móvil del rotor $\{D, Q\}$ y la corriente que este término induce en el estator es una senoide de frecuencia ω_m . Además, el flujo decrece exponencialmente según la constante τ'_r que depende de la impedancia vista desde la rama rotórica. Este hecho es sumamente importante, porque durante el transitorio de CC (dependiendo de τ'_r) la corriente de CC total tiene un término de frecuencia distinta a la de red. La frecuencia mecánica depende del deslizamiento previo y si este varía en un $\pm 25\%$ entonces ω_m se encuentre entre 75% y 125% de la frecuencia de red ω_s .

Falta estudiar los términos fuera de la diagonal principal, los cuales no participan en la continuidad de los flujos de estator y rotor. Los términos en la diagonal

tienen una componente fija y otra que gira a ω_m respecto a las coordenadas de fase. Tanto k_r como k_s son directamente proporcionales a L_m , y los flujos planteados dependen de la rama magnetizante. Si la máquina se construyera de un material ideal⁴, la rama magnetizante sería nula y las F.M.M del estator y rotor no se relacionarían. Entonces estos flujos representan la inductancia mutua que existente entre los bobinados de rotor y estator.

El flujo forzado se calcula imponiendo las tensiones en el rotor y estator respectivamente. No puede calcularse a partir de las variables de estado debido a que se desconoce la respuesta del convertidor al CC. Se puede asumir que el convertidor reacciona casi instantáneamente al CC imponiendo una tensión $V_r(t)$, que debería establecer un flujo forzado $\Phi_{r,f}(t)$ y el estator, al tener tensión nula no puede imponer flujo. Al superponer el flujo previo $\Phi_s(0^-)$ con el que debería tener $\Phi_{r,f}(0^+)$ se obtiene la ecuación 3.33.

$$\begin{bmatrix} \overline{\Phi_s} \\ \overline{\Phi_r} \end{bmatrix} (t) = \begin{bmatrix} e^{-\frac{t}{\tau'_s}} e^{-j\omega_s t} \frac{\overline{V_{pre}}}{\omega_{sj}} + \frac{k_r}{\tau'_s} \bar{c} (e^{-\frac{t}{\tau'_s}} e^{-j\omega_s t} - e^{-\frac{t}{\tau'_r}} e^{-j\omega_r t}) (\overline{\Phi_{r,pre}} - \overline{\Phi_{r,f}}) \\ \frac{k_s}{\tau'_r} \bar{c} (e^{-\frac{t}{\tau'_s}} e^{-j\omega_s t} - e^{-\frac{t}{\tau'_r}} e^{-j\omega_r t}) \frac{\overline{V_{pre}}}{\omega_{sj}} + e^{-\frac{t}{\tau'_r}} e^{-j\omega_r t} (\overline{\Phi_{r,pre}} - \overline{\Phi_{r,f}}) \end{bmatrix} \quad (3.33)$$

La corriente de estator se calcula por medio del circuito magnético en la ecuación 3.29 y se define según la ecuación 3.34.

$$\begin{aligned} \overline{I_s}(t) &= \overline{I_{DC}}(t) e^{-j\omega_s t} e^{-\frac{t}{\tau'_s}} + \overline{I_{\omega_m}} e^{-j\omega_m t} e^{-\frac{t}{\tau'_r}} + \overline{I_{\omega_s}}(t) \\ \overline{I_{DC}}(t) &= \frac{\overline{V_{pre}}}{jX'_s} (1 - \frac{k_r k_s}{\tau'_r} c) + \Delta \overline{\Phi_r} \frac{k_r \bar{c}}{\tau'_s} \\ \overline{I_{\omega_s}}(t) &= -\frac{k_r}{L'_s} \overline{\Phi_{r,f}} \\ \overline{I_{\omega_m}}(t) &= \frac{\overline{V_{pre}}}{jX'_s} (-\frac{k_r k_s}{\tau'_r} \bar{c}) + \Delta \overline{\Phi_r} \frac{k_r}{L'_s} (1 - \frac{\bar{c}}{\tau'_s}) \\ \Delta \overline{\Phi_r} &= \overline{\Phi_r}(0^-) - \overline{\Phi_{r,f}}(0^+) \end{aligned} \quad (3.34)$$

La corriente de cortocircuito se determina en tres componentes:

- La componente continua I_{DC} es una exponencial decreciente de constante de tiempo τ'_s .
- La componente síncrona I_{ω_s} es una sinusoidal de frecuencia de red.
- La componente mecánica I_{ω_m} es una sinusoidal de frecuencia ω_m con envolvente exponencial decreciente de constante τ'_r .

En las diferentes bibliografías consultadas ([11] [4]) se obtuvieron distintas simplificaciones de la expresión hallada. En la realidad no existe una expresión exacta de la corriente, porque se requiere considerar otros aspectos como: la respuesta del convertidor del lado de la red, la saturación de la máquina, la influencia del chopper y crowbar entre otros. Pero se puede considerar que la tensión previa al CC, la respuesta del convertidor y el punto de operación previo determina la respuesta al CC del generador. El DFIG tiene la particularidad de que el transitorio es determinado principalmente por la dinámica de los flujos magnéticos y el

⁴La permeabilidad del hierro tiende a infinito $\mu \rightarrow \infty$

Capítulo 3. Generador de Inducción Doblemente Alimentado “DFIG”

régimen por el convertidor. Quiere decir que el régimen de cortocircuito es controlado y no depende de condiciones externas. Además, por el circuito magnético la corriente de estator es inversamente proporcional a la inductancia L'_s y esta es mayor en la medida que aumenta la impedancia $Z_L = R_L + jX_L$ (módulo) desde el generador hasta la falta. Entonces al aumentar la impedancia Z_L la corriente de CC se reduce y por otra parte las constantes de tiempo cambian en función de Z_L . La constante de estator τ'_s depende del cociente $\frac{R_L+R_s}{X_L+X'_s}$, cuanto más resistiva es la impedancia mayor es el amortiguamiento que se produce y se mitiga la componente DC con mayor velocidad. Para el caso de la constante de rotor τ'_r no depende en gran medida de Z_L , porque desde el punto de vista del rotor se encuentra en paralelo con X_m . A medida que se agrande Z_L , la rama magnetizante tendrá mayor predominancia y la constante de tiempo tiende a $\tau'_r \approx \frac{L_m+L_r}{R_r}$. Para reducir la constante τ'_r se debe aumentar la resistencia R_r y por ello se utiliza la resistencia de crowbar que se explica en la sección 3.6.3. Si se ignora el aporte del convertidor, el transitorio de CC es determinado por los fenómenos electromagnéticos y es muy similar al comportamiento del GS.

El pico de corriente es determinado por el flujo natural, para simplificar los cálculos se ignora las componentes mutuas del flujo natural. Se aproxima el pico de la corriente como 3.35.

$$I_{s,max} \approx \frac{V_{pre}}{X'_s} \cos\left(\alpha - \frac{\pi}{2}\right) e^{-\frac{\Delta t}{\tau'_s}} - \frac{k_r}{L'_s} |\Delta\Phi_r| \cos(\omega_m \Delta t + \varphi_{r,n}) e^{-\frac{\Delta t}{\tau'_r}} \quad (3.35)$$

Donde los parámetros adicionales son los siguientes:

- α es el ángulo de la tensión en el momento del cortocircuito.
- Δt es el tiempo en el que ocurre el pico.
- $\varphi_{r,n}$ es la fase del vector $\Delta\Phi_r$.

Las exponenciales son estrictamente decrecientes, la fase $\alpha = \frac{\pi}{2}$ maximiza el flujo natural del estator y el tiempo $t = \Delta t$ minimiza el flujo natural del rotor. En términos vectoriales la corriente es máxima si el flujo natural de estator es opuesto al flujo natural de rotor. La corriente de estator máxima aproximada se expresa en la ecuación 3.36.

$$I_{s,max} \approx \frac{V_{pre}}{X'_s} e^{-\frac{\Delta t}{\tau'_s}} - \frac{k_r}{L'_s} |\Delta\Phi_r| \cos(\omega_m \Delta t + \varphi_{r,n}) e^{-\frac{\Delta t}{\tau'_r}} \quad (3.36)$$

El pico sucede cuando el coseno de la componente rotórica alcanza su máximo y el tiempo es $\Delta t = \frac{\pi - \varphi_{rn}}{\omega_s} = \frac{\pi - \varphi_{rn}}{\omega_s(1-s)}$. La fase de la diferencia entre el flujo previo y el forzado no se puede cuantificar exactamente y por ello se estudia la relación de Δt con el deslizamiento. En comparación con el modo síncrono ($s=0$) si la máquina operaba en modo subsíncrono ($s > 0$), alcanza su máximo para tiempos más lentos y la magnitud del pico también se reduce porque las exponenciales decrecen a medida que aumenta el tiempo. Otra forma de verlo es que cuanto más lento gire el rotor, mayor es la demora de los flujos en oponerse. Si operaba en modo supersíncrono ($s < 0$), la velocidad mecánica es mayor a la de sincronismo, el pico se alcanza en tiempos más cortos y en consecuencia son de mayor magnitud.

3.6.2. Asimétricos

Para el cálculo de los cortocircuitos asimétricos se utiliza el método de las componentes simétricas explicadas en el anexo A.2. El generador se conecta a la red por medio de un transformador Dyn y todo cortocircuito del lado de estrella es un bifásico o trifásico desde el triángulo⁵. En la ecuación 3.37 se muestra la tensión de falta impuesta en el estator.

$$\overline{V_{falta}}(t) = \overline{V^+} + \overline{V^-} e^{-j2\omega_s t} \quad (3.37)$$

Aplicando superposición, se estudia el efecto de la tensión directa e inversa por separado.

Secuencia directa

La tensión cae bruscamente en módulo desde V_{pre} hasta V^+ , representando un hueco de tensión en la secuencia directa. El flujo de estator forzado se determina con el modelo en régimen propuesto en la sección 3.5. El flujo natural es una exponencial decreciente de constante τ'_s que mantiene la continuidad en el instante de cortocircuito y se determina el flujo de estator según el sistema de ecuaciones 3.38.

$$\begin{aligned} \overline{\Phi_{sf}}(t) &= \frac{\overline{V^+}}{j\omega_s} \\ \overline{\Phi_{sn}}(t) &= \lambda e^{-\frac{t}{\tau'_s}} e^{-j\omega_s t} \\ \lambda &= \frac{\overline{V_{prev}} - \overline{V^+}}{j\omega_s} \end{aligned} \quad (3.38)$$

El flujo por parte del rotor depende del convertidor y el mismo se considera genérico como en el cortocircuito simétrico. La corriente total aportada al estator por parte de la componente directa se expresa en la ecuación 3.39.

$$\overline{I_{s,directa}}(t) = \frac{\overline{V_{prev}} - \overline{V^+}}{jX'_s} e^{-\frac{t}{\tau'_s}} e^{-j\omega_s t} + \frac{\overline{V^+}}{X'_s} - \frac{k_r}{L'_s} (\overline{\Phi_{r,f}}(t) + \Delta\overline{\Phi_r} e^{-j\omega_m t} e^{-\frac{t}{\tau'_r}}) \quad (3.39)$$

⁵El generador no aporta secuencia cero al cortocircuito.

Capítulo 3. Generador de Inducción Doblemente Alimentado “DFIG”

Secuencia inversa

Al ocurrir la falta se produce una tensión de secuencia inversa en bornes del estator. La tensión inducida en el rotor depende del flujo de estator, implicando la existencia de una tensión secuencia negativa en el rotor. Para contrarrestar la elevación de la tensión inducida se utiliza el método de la corriente desmagnetizante, que consiste en inyectar la corriente adecuada para disminuir el flujo estatórico de secuencia inversa. Para inyectar esta corriente se considera que el convertidor debe poder generar una tensión de secuencia inversa.

El flujo forzado de estator se calcula por medio de la ecuación régimen 3.5, con la salvedad de que la máquina funciona ante una secuencia inversa. Los parámetros que se modifican son los que dependen del deslizamiento, cambian el deslizamiento s por $2-s$ y para simplificar el cálculo se utiliza la reactancia inversa de la máquina Z_2 . El transitorio del flujo de estator es una exponencial decreciente de constante de tiempo τ'_s que conserva la continuidad del flujo inverso. Otro cuidado especial es que al ser un flujo inverso, el vector gira a $-2\omega_s$ con respecto a la base móvil y el sistema de ecuaciones que modela el flujo inverso es 3.40.

$$\begin{aligned}\overline{\Phi_{sp}(t)} &= \frac{\overline{V^-}(t)}{Z_2} e^{-j2\omega_s t} \\ \overline{\Phi_{sh}(t)} &= \overline{\lambda} e^{-\frac{t}{\tau'_s}} e^{-j\omega_s t} \\ \overline{\lambda} &= \frac{\overline{V^-}}{j\omega_s}\end{aligned}\quad (3.40)$$

Para el caso del rotor el cálculo del flujo forzado y natural depende del convertidor, sistema de control, tensión post-falta y la condición inicial. Por lo cual se generaliza la expresión en función de la tensión inversa impuesta en el estator. La corriente total de secuencia inversa se determina como suma de soluciones homogénea y particular según la ecuación 3.41.

$$\overline{I_{s,inversa}} = \left(\frac{\overline{V^-}}{Z_2} e^{-j2\omega_s t} + \overline{V^-} e^{-\frac{t}{\tau'_s}} e^{-j\omega_s t} \right) - \frac{k_r}{L'_s} \left(\frac{\overline{V^-}}{Z_2} \left(\frac{Z_2}{X'_s j} - 1 \right) \frac{L'_s}{k_r} \right) e^{-\frac{t}{\tau'_r}} e^{-j\omega_r t} \quad (3.41)$$

El término $\left(\frac{Z_2}{X'_s j} - 1 \right) \frac{L'_s}{k_r}$ se define como L_{r2} .

Corriente total de cortocircuito

La corriente total de cortocircuito es la suma de ambas secuencias y la corriente de estator es 3.42.

$$\begin{aligned}\overline{I_s(t)} &= \overline{I^+} + \overline{I^-} \\ \overline{I^+} &= \frac{\overline{V^+}}{jX'_s} + \frac{\overline{V_{prev} - V^+}}{jX'_s} e^{-\frac{t}{\tau'_s}} - \frac{k_r}{L'_s} (\overline{\Phi_{rf}(t)} + \overline{\Delta\Phi_r} e^{-j\omega_r t} e^{-\frac{t}{\tau'_r}}) \\ \overline{I^-} &= \frac{\overline{V^-}}{Z_2} e^{-j2\omega_s t} + \frac{\overline{V^-}}{jX'_s} e^{-\frac{t}{\tau'_s}} + \frac{k_r}{L'_s} L_{r2} \frac{\overline{V^-}}{Z_2} e^{-j\omega_r t} e^{-\frac{t}{\tau'_r}}\end{aligned}\quad (3.42)$$

La corriente de cortocircuito tiene tres frecuencias involucradas, la primera es la de sincronismo asociada al régimen de cortocircuito. La segunda es la frecuencia mecánica, siendo el flujo natural del rotor quien la impone al estar constante

respecto al rotor. La última es $-\omega_s$ que es la frecuencia de la secuencia inversa. Adicionalmente está el vector del flujo natural del estator que no gira. En general se trabaja con el concepto de tres máquinas, la máquina positiva que gira a ω_s , la negativa que gira a $-\omega_s$ y la natural del rotor que gira a ω_m .

Al igual que para el caso simétrico, el valor de pico depende principalmente del flujo natural. El problema es que existe en el flujo natural la componente de secuencia inversa, la caída de tensión o profundidad del hueco se adiciona a la componente inversa aumentando el valor de pico. La corriente de cortocircuito máximo es la ecuación 3.43.

$$\overline{I_{s,max}} \approx \frac{V_{pre} - \overline{V^+} + \overline{V^-}}{X'_{sj}} e^{-\frac{\Delta t}{\tau'_s}} + \frac{k_r}{L'_s} (\Delta\Phi_r + L_{r2} \frac{\overline{V^-}}{Z_2}) e^{-\frac{\Delta t}{\tau'_r}} \quad (3.43)$$

3.6.3. Resistencia de crowbar

Durante el transitorio de cortocircuito se inducen tensiones en el rotor que pueden producir el mal funcionamiento, daño o destrucción del convertidor back-to-back. En la sección presente se explica el funcionamiento y las consecuencias del dispositivo de protección de resistencias crowbar.

Dispositivo y conexión

Es un dispositivo que protege circuitos electrónicos contra sobretensiones en su fuente de alimentación, cortocircuitando la tensión de salida o por medio de una ruta de baja resistencia.

Para el caso del DFIG, la tensión inducida en el rotor durante el transitorio de cortocircuito depende del deslizamiento previo. El rotor puede alcanzar tensiones del orden de cinco veces su tensión nominal. Para evitar saturar o dañar el convertidor, éste se protege mediante el circuito de crowbar, que se conecta según la figura 3.11.

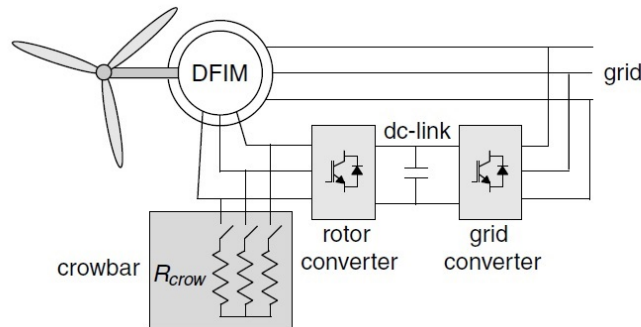


Figura 3.11: Sistema DFIG con Crowbar [11]

Hay que destacar que el dispositivo protege el convertidor en cualquier situación que generen sobrevoltajes en sus bornes, como por ejemplo huecos de tensión,

Capítulo 3. Generador de Inducción Doblemente Alimentado “DFIG”

sobretensión del DC-link⁶ o subtensión en el estator. El circuito de la rama rotórica con el crowbar conectado se muestra en la figura 3.12.

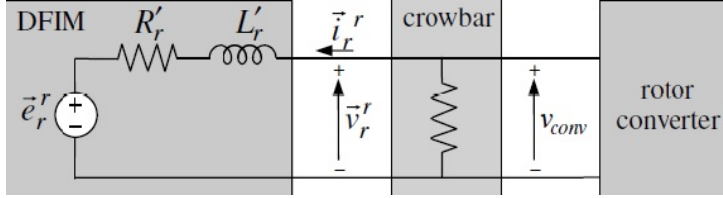


Figura 3.12: Equivalente del circuito considerando resistencia de crowbar [11]

Los parámetros involucrados son los mencionados hasta el momento, R_r' y L_r' son la resistencia e inductancia del rotor vista desde el mismo. Cuando la resistencia se conecta, se supone que la misma es una ruta de baja impedancia, por lo tanto casi toda la corriente de rotor circula por R_{crow} . La tensión en el convertidor se obtiene a partir de un divisor de impedancias, es una fracción de la tensión inducida y limita la tensión máxima v_{conv} .

El funcionamiento durante el cortocircuito consta de dos etapas:

- Cuando la tensión en el convertidor comienza a aumentar, se conecta la resistencia para prevenir daños.
- Cuando el flujo natural se redujo lo suficiente, se desconecta la resistencia.

El tiempo que se encuentra conectada la resistencia depende del tiempo que demore el flujo natural en reducirse.

Consecuencia en la corriente de cortocircuito

Al conectar la resistencia de crowbar, el parámetro modificado es la resistencia R_r que pasa a ser $R_r + R_{cb}$. La resistencia de crowbar se elige mayor a treinta veces la resistencia rotórica para limitar las corrientes de cortocircuitos y las sobretensiones del convertidor. El pico de cortocircuito sucede en los primeros milisegundos de la falla y la conexión de la resistencia tiene un retraso con respecto al instante de esta. Por lo cual la resistencia no puede atenuar el valor máximo, pero reduce considerablemente la constante de tiempo de rotor según la ecuación 3.44.

$$\tau_r' = \frac{L_r'}{R_r + R_{cb}} \approx \frac{L_r'}{R_{cb}} \quad (3.44)$$

El tiempo de asentamiento del 5 % de una exponencial decreciente de constante τ es aproximadamente 3τ , reducir la constante implica que se reduce el tiempo de asentamiento. Si la resistencia de crowbar es al menos treinta veces mayor a la de rotor, quiere decir que el tiempo que demora en mitigarse el flujo natural del rotor es al menos treinta veces menor. El efecto de agregar el crowbar aparte de proteger el back-to-back es mitigar con mayor velocidad el flujo natural y reduce la duración del transitorio de cortocircuito.

⁶Para sobretensión en el DC-link también se usa el circuito chopper, destinado exclusivamente para esta función.

Capítulo 4

Generadores fotovoltaicos y Generadores eólicos “Full-converter”

4.1. Introducción

El aerogenerador full-converter (FC) al igual que DFIG extrae energía cinética del viento mediante una turbina y la convierte en energía eléctrica con un convertidor electromecánico.

Los generadores fotovoltaicos (PV) convierten luz solar en energía eléctrica mediante el efecto fotoeléctrico.

Si bien las fuentes de energía son diferentes, el comportamiento de los generadores frente a CC y huecos de tensión en la red es similar. Como se verá en este capítulo, la conexión a la red por medio de un inversor es lo que caracteriza el comportamiento de estos generadores frente a perturbaciones.

En este capítulo se describen los aspectos constructivos y principios de funcionamiento de cada generador por separado para luego hacer un estudio del comportamiento frente a CC y huecos de tensión aplicable a ambos.

4.2. Aerogeneradores “Full-converter”

4.2.1. Introducción

Esta clase de aerogeneradores se caracterizan por convertir toda la potencia generada mediante electrónica de potencia. Esta tecnología presenta la ventaja de poder generar energía eléctrica en un rango más amplio de velocidades que otros tipos de aerogeneradores, con un control total de la potencia activa y reactiva que se inyecta a la red. Además, el sistema mecánico se encuentra desacoplado de la red y reduce los efectos del generador sobre la red y viceversa.

El generador consta de cuatro componentes básicas:

- Turbina
- Caja multiplicadora de velocidad

Capítulo 4. Generadores fotovoltaicos y Generadores eólicos “Full-converter”

- Generador (usualmente es un GS)
- Convertidor AC-AC

En la figura 4.1 se observa el esquema de conexión básico del full-converter y en el mismo se puede apreciar el inversor DC/AC que conecta el generador con la red.

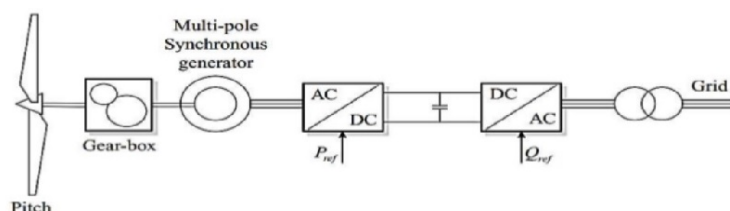


Figura 4.1: Esquema general del sistema full converter [12]

4.2.2. Aspectos constructivos

Máquina síncrona y multiplicadores de velocidad

Según las características de la máquina síncrona, la etapa de transmisión de energía mecánica y conversión electromecánica puede variar constructivamente. Concretamente, la velocidad nominal del GS determina si es necesario incorporar cajas multiplicadoras de velocidad en el diseño.

- **Máquinas con pocos pares de polos:** Tienen una alta velocidad de sincronismo, para mover el rotor del GS en un rango de velocidades cercanas a la nominal es necesario elevar la velocidad de rotación de la turbina mediante una caja multiplicadora de velocidad, en general son máquinas de menor dimensión y precio y de rotor bobinado.
- **Máquinas multipolares:** Son constructivamente más complejas y costosas y funcionan a bajas velocidades de rotación por lo que se conectan directamente al eje de la turbina sin necesidad de una caja multiplicadora. Aunque también tienen mayor inercia y en muchos casos su rotor induce el campo mediante imanes permanentes.

Los generadores pueden ser de rotor bobinado o de imanes permanentes, en el último caso pueden resultar más costosos, pero disminuyen las pérdidas por efecto Joule en el rotor y requieren menor mantenimiento (sin escobillas).

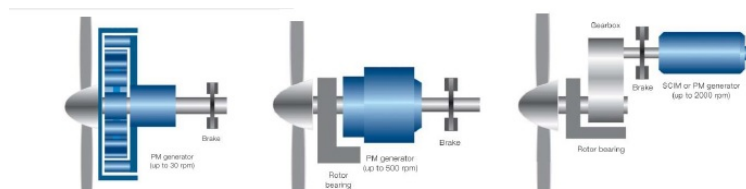


Figura 4.2: Distintos tipos de generadores según su velocidad nominal [4]

4.2.3. Distintas topologías implementadas actualmente en los convertidores AC-AC

Debido a que el generador produce tensiones y corrientes de velocidad variables (proporcionales a la velocidad de la turbina), es necesario el uso de un convertidor para transformar las magnitudes eléctricas a la frecuencia de la red.

Además, a través del convertidor se realiza el control de potencia activa (junto con el ángulo de las palas), reactiva y de la tensión en el nodo de conexión con la red. Desde que se comenzó a utilizar esta tecnología, se han diseñado aerogeneradores FC que producen cada vez más potencia. Como se vio en B.2.1 y B.2.1, la operación de las llaves del convertidor introduce armónicos en la red y en el generador, por lo que se han desarrollado métodos como el PWM (B.2.3) y la incorporación de filtros para reducir el contenido armónico de la tensión de salida del convertidor. El aumento de potencia trae consigo la necesidad de someter las llaves del convertidor a una mayor tensión, actualmente existen convertidores de varios niveles que resuelven este problema además de disminuir el contenido armónico del voltaje de salida del inversor.

En general, cuanto más potencia maneja el convertidor, éste resulta más complejo en su diseño y funcionamiento.

Las configuraciones del convertidor de un full-converter son variadas y cada una tiene sus características propias. Las ventajas y desventajas de cada uno se exponen a continuación.

Rectificador de seis pulsos (Figura 4.3) conectado a un inversor de dos niveles a través de un boost de uno o dos canales.

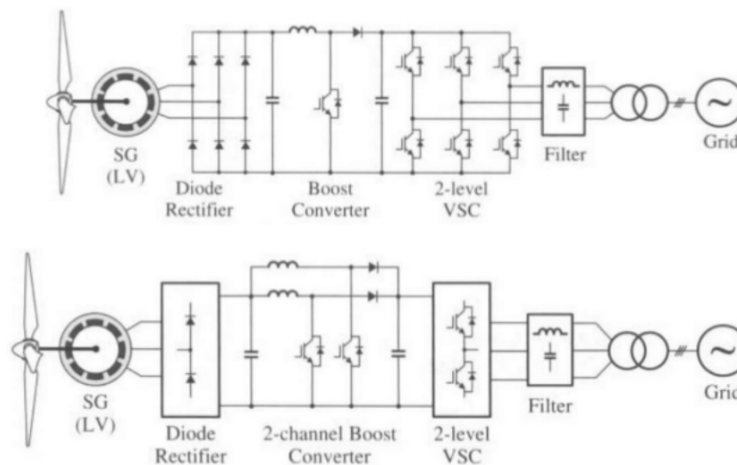


Figura 4.3: Convertidor con rectificador de seis pulsos con inversor de dos niveles [12]

- Son de menor costo que otras tecnologías.
- El sistema de control es más simple

Capítulo 4. Generadores fotovoltaicos y Generadores eólicos “Full-converter”

- Las corrientes de estator del generador presentan distorsiones, lo que produce pérdidas por armónicos y ripples en el par de la máquina.
- Se usan en aerogeneradores de baja potencia.

Rectificador de doce pulsos (Figura 4.4) conectado a un inversor de dos niveles a través de un boost de dos o tres canales intercalados.

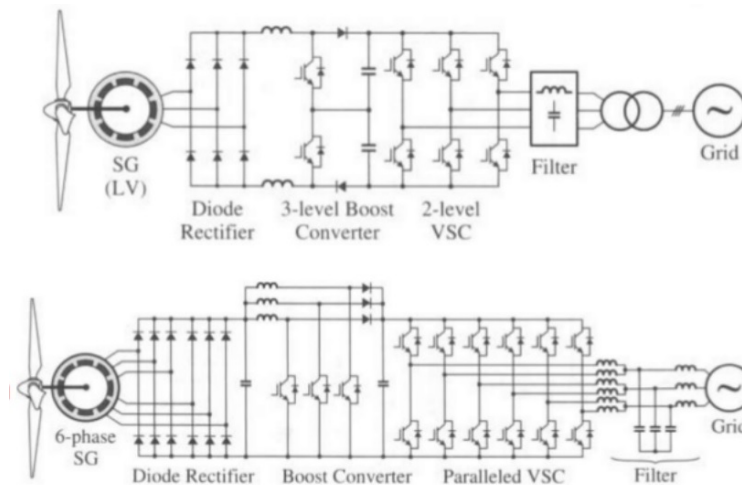


Figura 4.4: Convertidor con rectificador de doce pulsos [12]

- El rectificador de doce pulsos incrementa la corriente que puede circular.
- Se reducen los armónicos en la corriente de estator.
- Se usa en AG de baja o media potencia.

Convertidor de voltaje “back to back” (Figura 4.5) de dos niveles.

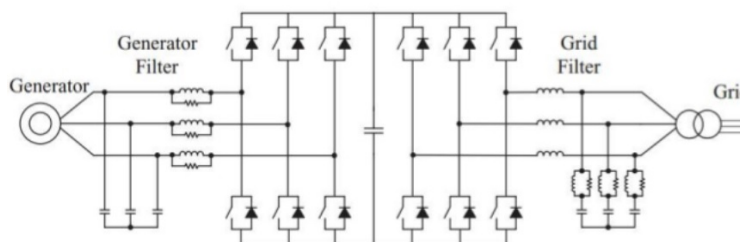


Figura 4.5: Convertidor back to back de dos niveles [12]

- Es el tipo de convertidor más usado.
- Introduce aún menos armónicos en la corriente de estator que los modelos anteriores.
- Tiene más pérdidas en las llaves.

4.2. Aerogeneradores “Full-converter”

- Requiere de un capacitor más grande.

Convertidor back to back de tres niveles (Figura 4.6) con neutro fijo.

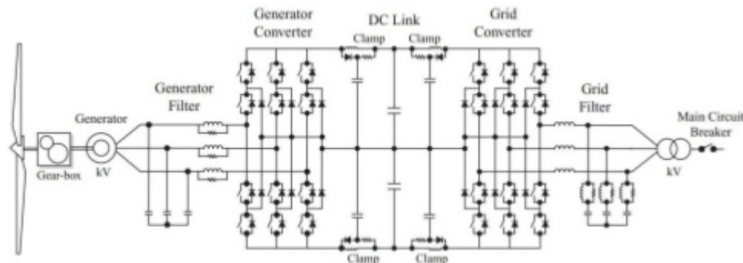


Figura 4.6: Convertidor back to back de tres niveles [12]

- Menor distorsión armónica.
- Menor tasa de variación de voltaje en cada llave (dV/dt).
- Permite trabajar a mayor voltaje.
- Menores pérdidas en las llaves.
- Requiere más componentes (más caro).
- Circuito de control más complejo.
- Mayores pérdidas en conducción.

También se utilizan convertidores multi-level (Figura 4.7), es decir, de más de tres niveles, que mejora aún más las ventajas del back to back de tres niveles, aunque son más caros ya que, como se mencionó anteriormente, aumentar los niveles de tensión de salida implica aumentar la cantidad de componentes de estado sólido, la complejidad del circuito de potencia y del circuito de control.

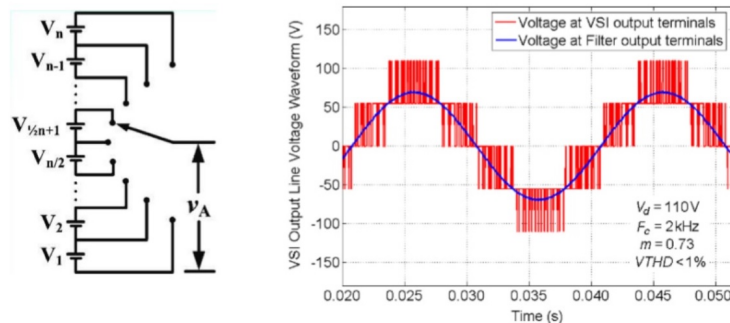


Figura 4.7: Esquema de funcionamiento del multilevel y gráfico de voltaje de un convertidor de cinco niveles [12]

4.2.4. Funcionamiento en régimen

La potencia extraída del viento está determinada por el ángulo de ataque de las palas de la turbina β . El ángulo β , la velocidad de giro del rotor ω_r y la velocidad de viento λ determinan el par mecánico T_m en el rotor. En régimen se cumple que $T_m = T_e$ (ecuación 4.1), siendo T_e el par electromecánico resistente de la máquina, por lo que la velocidad de rotación es constante.

$$J \frac{d\omega_r}{dt} = T_m - T_e = 0 \quad (4.1)$$

El control de pitch determina el ángulo β mediante la estrategia de rastreo del punto de máxima potencia (MPPT por sus siglas en inglés), que tiene por entradas la medida de ω_r y λ .

El sistema de control del convertidor es capaz de controlar el voltaje en el punto de conexión, la potencia activa y reactiva que se inyecta a la red. Este control impone las consignas de tensión y potencia mediante la creación de tensiones trifásicas sinusoidales de referencia δ_{INVabc} , que son luego generadas por el inversor mediante la modulación PWM y operación de apertura y cierre de las llaves de cada rama.

La referencia de potencia del lado de la red se calcula a partir de las variaciones de tensión en el DC-link y el valor C del capacitor, como muestra la ecuación 4.2:

$$P_{ref} = \frac{C\Delta V^2}{2} \cdot f \quad (4.2)$$

En el caso de que el convertidor AC-AC sea un back-to-back, las tensiones de referencia δ_{rabc} ¹ del rectificador son creadas mediante la estimación de la potencia en el MPP y las lecturas de tensión, corriente y ω_r del GS.

Para mantener el voltaje constante en el puente DC la corriente media por el capacitor en un período debe ser igual a cero (ecuación 4.3).

$$[\Delta E_{DC}]_t^{t+T} = C[\Delta Q]_t^{t+T} = 0 \Rightarrow \frac{1}{CT} \int_t^{t+T} (I_{inDC} - I_{DC}) dt = 0 \quad (4.3)$$

siendo I_{inDC} la corriente DC proveniente del rectificador e I_{DC} la corriente DC de entrada al inversor. Entonces toda la potencia generada que pasa por el rectificador debe llegar a la red a través del inversor.²

¹En este caso las tensiones sinusoidales son de frecuencia variable, dependiente de la velocidad de rotación del rotor.

²Esto depende de la eficiencia y contenido armónico del voltaje de salida del convertidor, parte de la potencia de entrada se pierde por efecto Joule y la potencia del contenido armónico del inversor es filtrada a la salida.

4.3. Generador fotovoltaico

4.3.1. Introducción

El generador fotovoltaico es una fuente de energía renovable cuyo uso se ha popularizado por su practicidad y eficiencia. La principal diferencia con respecto a los otros generadores estudiados es que utiliza el efecto fotoeléctrico para generar energía eléctrica y no hay conversión electromecánica de potencia. Se estudia el modelo del generador, control y conexiones, para ello se utilizan modelos basados en [13] y [14].

4.3.2. Construcción y funcionamiento

Construcción y funcionamiento de la celda

Un generador fotovoltaico consiste en un conjunto de celdas fotoeléctricas (paneles) que generan una corriente continua al recibir luz solar. Se convierte las corrientes y tensiones a alterna mediante un inversor, controlando la tensión y el flujo de potencia.

Cada celda se compone de una juntura n-p con contactos metálicos en cada extremo. El silicio tipo n está dopado con donadores y el silicio tipo p con aceptores. En la juntura o región de agotamiento se forma un campo eléctrico y por ende una diferencia potencial $V_{bloqueo}$.

Cuando la luz incide sobre la juntura se libera un fotón que vence momentáneamente la tensión de bloqueo permitiendo que circule un electrón y un hueco por los contactos metálicos en los bornes del panel. Se utilizan varias capas superpuestas de junturas n-p con diferentes dopajes con el objetivo de que cada capa reaccione a diferentes frecuencias del espectro de la luz, optimizando la obtención de energía solar. También se recubre con una capa externa de silicio u otros materiales para formar una superficie rugosa y así recapturar la mayor cantidad de rayos solares reflejados por la propia celda.

La potencia generada depende de la irradiancia y temperatura. La irradiancia es el flujo de potencia por área que incide en forma de luz en el panel. Para realizar una estimación coherente de la potencia generada es necesario evaluar la dependencia de la irradiancia y de la temperatura. Estos parámetros varían en función de la estación del año, la ubicación geográfica y la geometría del panel. En general estos parámetros se estiman a partir de datos relevados anualmente.

En el anexo E se encuentra el modelo mas detallado del parque solar y su sistema de control.

4.3.3. Conexión con la red

En E.1.1 se ve que la potencia generada también depende de la tensión sobre el panel, por lo que es necesario controlarla, para esto se utiliza un boost elevador, descrito en la sección B.5. Ajustando el ciclo de trabajo δ del mismo mediante la estrategia de control MPPT, se maximiza la potencia extraída del generador.

Capítulo 4. Generadores fotovoltaicos y Generadores eólicos “Full-converter”

Según la topología del generador se definen tres tipos de sistemas:

- Aislado: solo conectado a una carga
- Conectado a la red
- Híbrido: Conectado a la red y a una carga

En este estudio no se consideran las cargas de continua por lo que se considera el segundo tipo de sistema. Las conexiones de los inversores al parque se realizan generalmente según las siguientes configuraciones típicas:

- Inversor central: todos los paneles están conectados como un único panel a un solo inversor.
- Inversor Maestro-Esclavo: es un inversor central que cede potencia a inversores esclavos.
- Inversor en cadena o string: cada inversor se encarga de bloque de paneles en serie y se conecta a la red
- Inversor multicadena: se utilizan convertidores DC/DC para cada bloque en serie y luego se conecta cada convertidor a un único inversor
- Microinversores o inversor módulo: cada panel tiene un único microinversor que va conectado directamente a la red

La topología varía dependiendo de cada generador pero para simplificar los cálculos y diagramas presentados se considera un sistema con inversor central. Donde los paneles en conjunto se conectan al convertidor que luego se conecta a un único inversor.

El inversor en general es multinivel, utiliza algún método de modulación PWM B.2.3 y filtros para la reducción de armónicos. Se conecta el inversor a la red, la misma se modela como una fuente de tensión equilibrada y perfecta en serie con su impedancia de Thevenin jX_{red} , como se muestra en la figura 4.8.

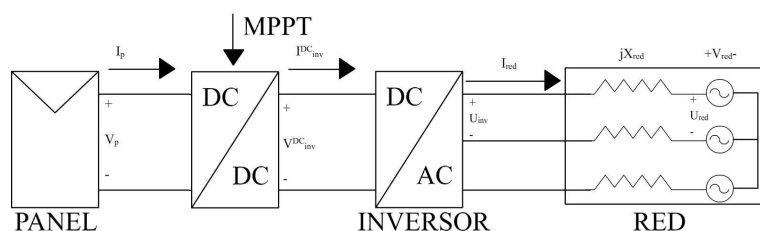


Figura 4.8: Modelo para un cortocircuito en un parque solar

Se asume que entre el inversor y los filtros se eliminan todos los armónicos preservando solo la componente fundamental U_{inv} .

4.4. Cortocircuitos

Para el estudio de la respuesta ante cortocircuitos en la red, tanto el parque solar como el generador FC se pueden representar por el esquema de la figura 4.9. Esto se debe a que ambos están conectados a la red mediante un inversor y el voltaje $E_{DC}(t)$ se mantiene casi constante por un capacitor C . Se considera que la corriente I_{inDC} por el DC-link que carga el capacitor desde el generador es la asociada a la potencia DC en el punto de operación previo a la falta y se considera constante.

Los voltajes $V_1(t)$, $V_2(t)$ y $V_3(t)$ dependen del tipo de falta y corresponden al voltaje residual de fase visto desde el generador, teniendo en cuenta el grupo de conexión del transformador de la unidad generadora y de la estación en el punto de conexión. Las impedancias R_i y L_i son las impedancias vistas por fase, que corresponden a las impedancias de las líneas del parque, de los transformadores y la impedancia de CC de la red del punto de conexión en el estado de falta.

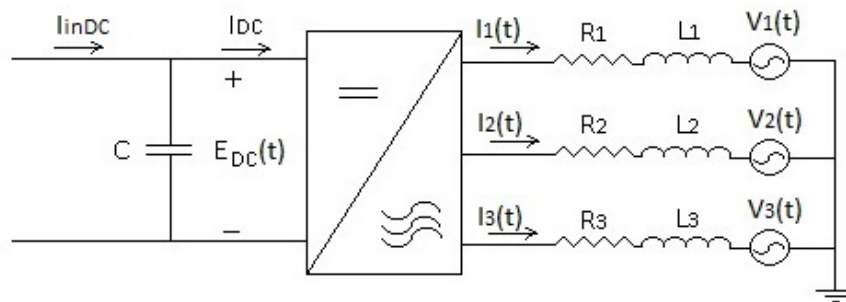


Figura 4.9: Esquema de generadores GF Y FC para el estudio de CC

Para el estudio del comportamiento frente a un CC en la red, es necesario recordar que el inversor forma una onda sinusoidal mediante la apertura y cierre de las llaves y el filtrado de la señal de salida de las ramas inversoras. Queda claro que la topología del circuito cambia con cada configuración de llaves abiertas y cerradas. Tenemos entonces un sistema que no es invariante en el tiempo y tampoco lineal.

En el estado de régimen el generador sí puede ser representado por una fuente de corriente equivalente, pero no en el período subtransitorio.

Cuando la tensión de alguna de las fases en el punto de conexión con la red baja del valor mínimo de operación normal establecido en [2], el sistema de control del generador cambia su consigna de control en cuanto a la potencia activa y reactiva de acuerdo al nuevo valor de tensión.

Antes de cambiar el voltaje de salida del inversor, debe reconocer la caída súbita de tensión y aumento de corriente, calcular el nuevo punto de operación, transmitir el nuevo voltaje de referencia δ'_{abc} al control de modulación del inversor y éste último debe calcular los nuevos ángulos de disparo. Hasta que se comienza a operar las llaves del inversor bajo la nueva consigna, se trabaja con la señal δ_{abc} de control del inversor previa al CC.

Capítulo 4. Generadores fotovoltaicos y Generadores eólicos “Full-converter”

En [4] se indica que los retardos del sistema de control son de aproximadamente medio ciclo. Debido a su duración y comportamiento de la corriente, se considera como subtransitorio el período que la máquina demora en imponer al inversor la nueva señal de control.

Se analiza entonces la respuesta al cortocircuito en las siguientes etapas:

- Estado previo al cortocircuito
- Período transitorio
- Régimen de cortocircuito

4.4.1. Previo al cortocircuito

El generador se encuentra operando con su consigna de potencia dada por el DNC cuando la tensión de red U_{red} se vuelve nula en el punto de CC. Se asume que en régimen la corriente media por el capacitor es nula para que la tensión en el DC-link se mantenga estable.

$$[\Delta V_{DC}]_t^{t+T} = \frac{1}{C} \int_t^{t+T} I_C dt = \frac{1}{C} \int_t^{t+T} (I_{inDC} - I_{DC}) dt = 0 \Rightarrow \int_t^{t+T} I_C dt = T \langle I_C \rangle = 0 \quad (4.4)$$

El control del inversor impone la tensión del lado de la red V_{inv} que satisface la consigna de potencia. Se puede resumir el comportamiento del lado de alterna del primer armónico de voltaje y corriente con un diagrama fasorial como en la figura 4.10.

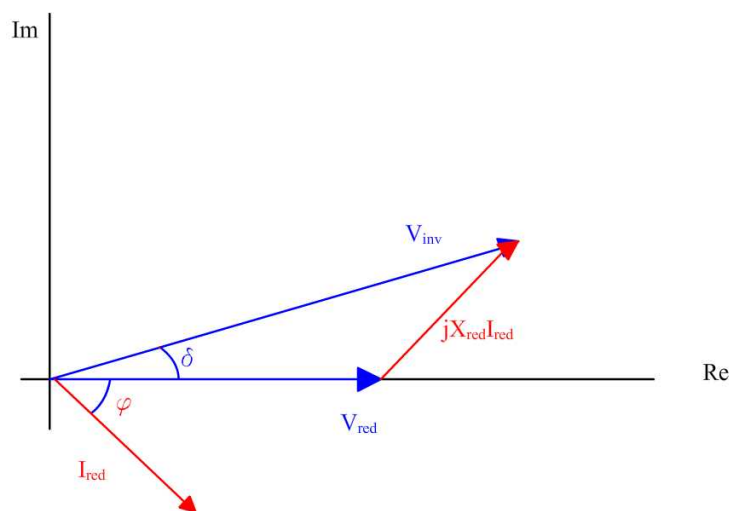


Figura 4.10: diagrama fasorial en régimen

4.4.2. Período transitorio

En el momento que ocurre el cortocircuito la tensión de red cae a un valor residual que depende de la distancia al punto del cortocircuito.

La forma de onda de corriente $I_i(t)$ ($i=1,2,3$) saliente del convertidor depende de la relación $\frac{L_i}{R_i}$ vista hacia la red, de la tensión residual V_i , de la topología y cantidad de estados del inversor así como la operación de sus llaves bajo la consigna de potencia previa al CC. El efecto del filtro a la salida del inversor y las inductancias mutuas del transformador introducen aún más complejidad al análisis dinámico desde la perspectiva de encontrar una solución analítica para la corriente.

No obstante en el momento que la tensión cae, el sistema de control mantiene la consigna de potencia en régimen y en consecuencia las corrientes de referencia del inversor aumentan. Las corrientes de fase tratan de seguir lo más fiel posible las referencias, esperando que aumenten rápidamente, llegando a valores muy por encima de las corrientes de operación normal.

Por el lado DC del inversor, la falta no tiene efecto sobre la fuente de potencia y el inversor intenta mantener la consigna de potencia previa. Por lo tanto la tensión en el DC-link dependerá estrictamente del balance de potencia presentado, se asume que durante el transitorio la tensión se mantiene cercana al valor previo a la falta debido a la duración del mismo y a la capacidad C (Capacitor del DC-link).

Según [15], la corriente instantánea de cortocircuito puede llegar a valores entre 2 y 3 veces la corriente de pico indicada por el fabricante para faltas con duración entre 1,1 y 4,25 ms, para un inversor trifásico con potencia nominal 500kVA. En la figura 4.11 se ilustra uno de los ensayos realizados con duración 1,1 ms. La línea violeta representa la corriente mientras que la línea amarilla representa la señal de disparo del interruptor que cortocircuita las fases b y c.

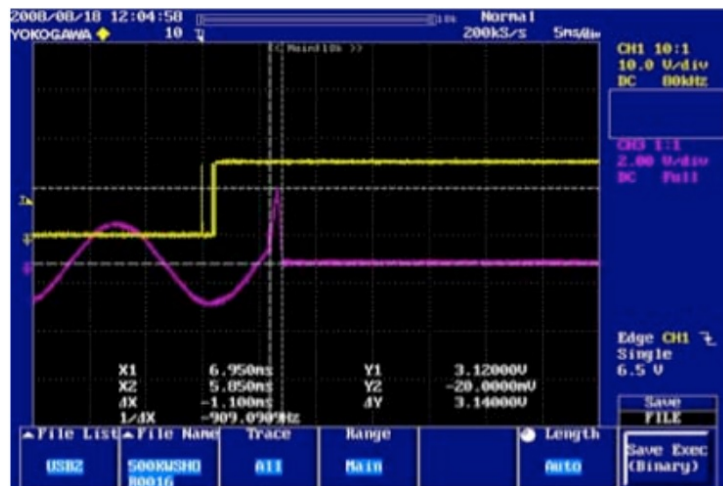


Figura 4.11: Resultado del ensayo de cortocircuito bifásico de un fabricante sobre un inversor trifásico (500kVA). Duración: 1,1 ms. [15]

Los valores máximos de corriente en p.u. expuestos en [15] fueron registrados durante un CC fase-neutro de 1,6 ms aplicado a un inversor de voltaje nominal

Capítulo 4. Generadores fotovoltaicos y Generadores eólicos “Full-converter”

120V, frecuencia $f=60\text{Hz}$ y potencia nominal 1kW. Los valores fueron $i_{pMAX} = 42,7\text{A}$ (6,28 pu) e $I_{RMSMAX} = 30,2\text{A}$ (6,28 pu). La forma de onda obtenida en el ensayo se muestra en la figura 4.12.

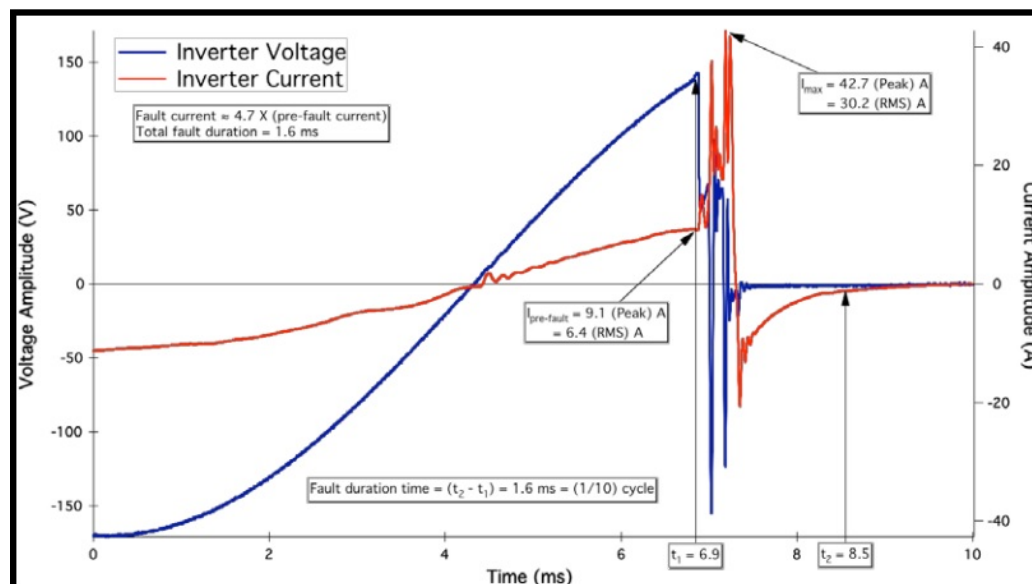


Figura 4.12: Resultado del ensayo de cortocircuito fase-neutro sobre un inversor trifásico (1kW). Duración: 1,6 ms. [15]

En ambos ensayos se sometió el inversor a cortocircuitos en bornes del mismo. Luego la corriente se extingue despejando la falta.

En [16] se presenta la validación de un modelo de simulación dinámica de valores RMS para aerogeneradores full-converter implementado en el software DigSILENT PowerFactory. Los modelos se compararon con resultados de ensayos en dos parques off-shore. Uno de los parques está conformado por aerogeneradores de 2,3MW y 690V, mientras que el otro se compone de aerogeneradores de 3,6MW y 690V. En ambos casos se ensayan cortocircuitos FF (fases B y C) en el nivel de media tensión.

Para el aerogenerador de 2,3MW se ensaya el cortocircuito FF durante 800 ms con tensión residual cero en el punto de CC.

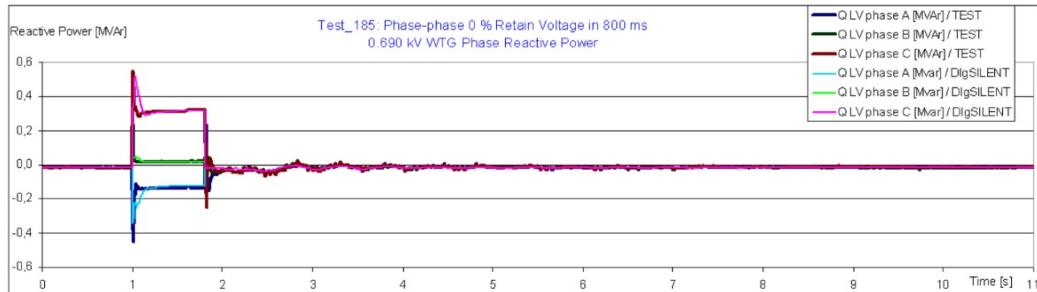
Para el aerogenerador de 3,6MW se ensaya el cortocircuito FF durante 1826 ms con tensión residual del 50% de la nominal en el punto de CC.

En ambos casos [16] compara los resultados del ensayo y de la simulación en una misma gráfica. Estas gráficas muestran para las tres fases los valores dinámicos RMS en p.u. de tensión a ambos lados del transformador, potencia activa y potencia reactiva proveniente del aerogenerador.

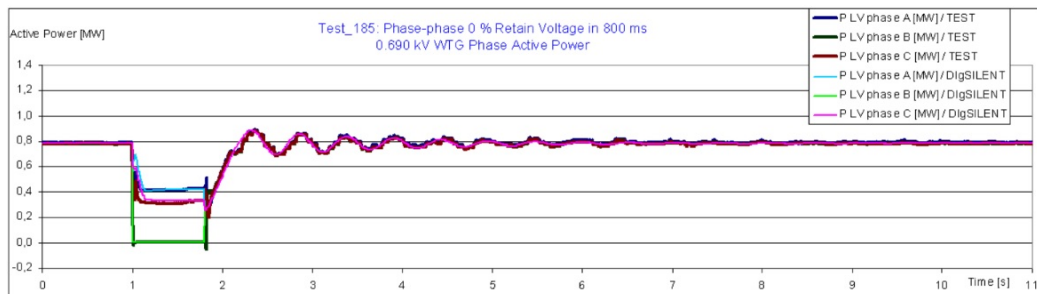
En la figura 4.13 se pueden ver los gráficos de potencia activa y reactiva para el caso con aerogenerador de 2,3MW. Donde se observa el comportamiento dinámico de la corriente activa y reactiva en sus períodos pre-falta, transitorio y de régimen.

4.4. Cortocircuitos

Inmediatamente luego de ocurrida la falta, la corriente reactiva aumenta de forma repentina hasta que el sistema de control implementa la consigna de potencia según la estrategia para LVRT.



(a)



(b)

Figura 4.13: Gráfico de valores RMS de potencia reactiva (a) y activa (b) obtenidos del ensayo y simulación de un cortocircuito entre fases B y C sobre un aerogenerador FC (2,3MW, 690V). Duración: 800 ms. [16]

En [17] se indica mediante resultados de simulaciones, que la corriente instantánea de un generador FC durante un hueco de tensión con tensión residual del 20 % de la nominal, puede alcanzar durante el período transitorio, valores entre 2 y 3 veces la corriente de pico máxima en régimen nominal.

4.4.3. Régimen

Para el análisis del transitorio se asume la estrategia LVRT de entregar solo potencia reactiva a la red.

La tensión del DC-link aumenta ya que no vale la ecuación 4.4, es decir que $I_{inDC} > 0$. Esta tensión puede superar el valor máximo en DC del inversor y puede afectar también al generador.

En el caso del PV se debe aumentar el ciclo de trabajo δ del boost para adaptar la transferencia a la nueva tensión y es posible que salga de su rango normal de trabajo. El FC puede presentar el mismo problema en caso de tener un boost luego del rectificador, pueden producirse problemas de modulación en caso de que

Capítulo 4. Generadores fotovoltaicos y Generadores eólicos “Full-converter”

el convertidor sea un back-to-back o bien pueden bloquearse el paso de corriente en un rectificador implementado como puente de diodos.

Para trabajar en estas condiciones es necesario el uso de un circuito chopper como el mencionado en B.3.3 para controlar la tensión del DC-link. El chopper conecta y desconecta una resistencia en paralelo con el capacitor para descargarlo y así evitar el aumento fuera de rango del voltaje DC. En general lo que termina sucediendo es que la tensión aumenta, el chopper comienza a actuar hasta que logra el ciclo de trabajo adecuado en el cual el capacitor se descarga y también logra compensar el desbalance de potencia.

El tiempo de actuación del chopper está limitado térmicamente, por esto el control del generador debe disminuir la potencia generada para evitar sobrecalentamiento si la falta no se despeja rápidamente.

En el régimen la potencia media transmitida debería ser nula y la reactiva Q^* proporcional a la tensión residual directa, manteniendo la corriente en su valor máximo.

Desde el inversor se ve una impedancia jX_{red} , entonces $I_{red} = \sqrt{\frac{Q^*}{3X_{red}}}$.

La corriente RMS máxima está determinada por el límite térmico que soportan las llaves IGBT del inversor. Como se menciona en [5] el inversor puede soportar una corriente máxima mayor a la nominal de las llaves durante un corto período de tiempo³, pasado este período la corriente no debería superar el valor nominal de las llaves para que éstas no se destruyan.

Es entonces la corriente RMS máxima por las llaves la que determina la máxima corriente de aporte al CC en régimen por parte de generadores conectados a la red mediante inversores.

4.4.4. Estudio cualitativo de cortocircuitos asimétricos

El estudio de los cortocircuitos asimétricos es similar al cortocircuito trifásico pero es necesario utilizar los conceptos de redes de secuencia. Si sucede una falta asimétrica es posible descomponer la red en falta en tres sistemas equilibrados diferentes. Para cada sistema de alterna el inversor y su sistema de control reacciona de distintas maneras.

Para la secuencia directa, la tensión cae en todos los tipos de cortocircuitos y el generador ve una caída en la tensión de red. Sucede algo similar al caso de un cortocircuito trifásico.

Para la secuencia inversa, el inversor se considera una fuente de secuencia directa porque el control de modulación de la tensión alterna utiliza una señal modulante de secuencia directa. Entonces la impedancia queda determinada por el sistema de control del inversor debido a que el mismo no está diseñado para una secuencia negativa.

Para la secuencia homopolar, los inversores trifásicos tienen configuraciones que impiden la circulación de corrientes armónicas múltiplo de tres. Además, para respetar las consignas de UTE, se conectan los generadores a la red a través de un

³Por ejemplo el IGBT puede soportar una corriente una sobrecarga del 20% durante 0.2 s

4.4. Cortocircuitos

transformador Dyn que no permite la circulación de corrientes homopolares desde el generador (del lado del triángulo) hacia la red. La impedancia de secuencia cero vista desde el primario del transformador hacia el generador se asume infinita.⁴

⁴Por el primario del transformador sí pueden circular corrientes homopolares por ser una estrella con neutro aterrado.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

Capítulo 5

Norma IEC-60909

5.1. Introducción

En este capítulo se plantea un estudio de la norma internacional IEC 60909 [1] y su aplicación en los generadores tratados en los capítulos 2, 3 y 4. Es una herramienta práctica donde se resumen los conceptos teóricos trabajados hasta el momento, los relaciona y estandariza mediante parámetros cuantitativos. Como se explicó en secciones previas, el andamio de las corrientes de cortocircuitos depende de diversos factores tales como el punto de falta, la tensión y la corriente previa. Dentro de los posibles valores de corriente para los distintos tipos de CC y en función de los factores mencionados, siempre existirá una corriente máxima y mínima. Determinar dichos valores es de particular interés, porque la máxima permite dimensionar el poder de corte de los interruptores y la mínima determina el ajuste de las protecciones para que actúen adecuadamente. El alcance de la norma es amplio y los métodos de cálculo presentados pueden ser aplicados tanto en redes anilladas complejas como en un ramal alimentado por un solo generador. Siendo aplicable a redes con un nivel de tensión menor a 550 kV a frecuencia 50 o 60 Hz, en particular la red uruguaya de transmisión cumple estos requisitos. El objetivo es estimar y comparar la corriente de CC mediante parámetros conocidos de los elementos de la red, aportando un sentido práctico al estudio comparativo propuesto en los objetivos del proyecto.

5.2. Curva típica de cortocircuito

La norma en su versión anterior al 2016 se orienta a los CC en el GS y presenta una forma de onda típica para las corrientes de CC. Las formas de onda propuestas en la figura 5.1 presentan las mismas características de la corriente calculada teóricamente en el capítulo 2. Para incluir los generadores no convencionales, la norma les asocia la misma curva redefiniendo sus parámetros. Por lo tanto, se comparan las corriente de CC aportada por cada generador en función de los parámetros característicos.

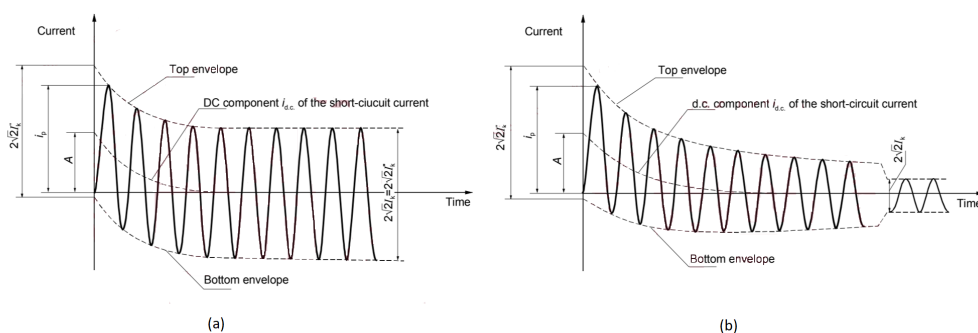


Figura 5.1: (a) Curva típica del aporte de un generador a un cortocircuito lejano, (b) Curva típica del aporte de un generador a un cortocircuito cercano. [1]

Los parámetros involucrados son:

- I_k'' : Es la corriente simétrica inicial de cortocircuito¹ que se define como “Valor RMS de la corriente alterna simétrica en el instante que ocurre el cortocircuito” (traducción al español).
- i_{DC} : Es la corriente de componente continua que se define como “Valor promedio entre la envolvente superior e inferior de la corriente de cortocircuito que decae entre un valor inicial y cero” (traducción al español).
- A : Valor inicial de la corriente i_{DC} ².
- i_p : Es la corriente de pico del cortocircuito que se define “Máximo valor instantáneo posible de la corriente de cortocircuito” (traducción al español).
- I_k : Es la corriente de régimen de cortocircuito³ que se define “Valor RMS de la corriente de cortocircuito que permanece luego de finalizado el período transitorio” (traducción al español).

¹En el capítulo 2 la corriente I_k'' es la corriente subtransitoria llamada I_d'' , a partir de aquí se utiliza la nomenclatura dada por la norma

²En el capítulo 2 el valor A se llamó I_{u0} , a partir de aquí se utiliza la nomenclatura dada por la norma

³En el capítulo 2 la corriente I_k' se llamó I_{csp} , a partir de aquí se utiliza la nomenclatura dada por la norma

5.3. Corriente simétrica inicial

Se propusieron dos formas de onda, una para CC lejanos y otro cercano. La definición de CC lejano es “Durante el cortocircuito la magnitud de la corriente alterna simétrica es esencialmente constante” (traducción al español) y de CC cercano es “Durante el cortocircuito la magnitud de la corriente alterna simétrica decrece” (traducción al español). La diferencia entre las curvas radica en la relación entre la corriente I_k'' e I_k .

En el capítulo 2, se vio que al conectar una impedancia externa Z_L entre el generador y el punto de falta, las corrientes I_k'' e I_k se decrementaban. Cuando la reactancia de eje directo X_d^4 es despreciable con respecto a Z_L , la corriente subtransitoria I_k'' es similar en magnitud a la corriente de régimen I_k , esto justifica la forma de onda para CC lejano.

Adicionalmente la norma determina las siguientes corrientes:

- I_b : Es la corriente de break que se define “Valor RMS en un ciclo de red de la componente alterna simétrica de la corriente de cortocircuito, a partir de la cual se produce la separación del primer polo del interruptor” (traducción al español).
- I_{th} : Corriente térmica que se define “Valor RMS de una corriente con el mismo efecto térmico que la corriente de cortocircuito actual, que puede tener componente DC y puede disminuir en el tiempo.” (traducción al español).

Ambas corrientes no fueron estudiadas teóricamente en capítulos previos y tampoco son parámetros de la curva característica. Su estudio es de interés para las protecciones y resistencia al estrés térmico de los equipos, realizado en el capítulo 6. En la tabla 5.1 se resume la utilidad de cada corriente definida.

Corrientes de cortocircuito	Equipamiento	Corrientes relevantes		
		3F	FF	FT
Corrientes máximas estrés:				
- dinámico	Componentes de las instalaciones	i_p	i_p	-
- Apertura	Interruptores.	i_p	-	i_p
- Cierre	Interruptores.	i_b	-	i_b
- térmico		i_{th}	-	i_{th}
Corrientes mínimas				
Disparo de relés	Protecciones	-	I_k'', I_k	I_k'', I_k

Tabla 5.1: Utilidad de las corrientes de CC

5.3. Corriente simétrica inicial

En el capítulo 2, en el período subtransitorio el punto de falta se sustituye por el CC y el generador por una fuente de tensión E_0 en serie con la reactancia sub-

⁴La reactancia de eje directo es mayor a la subtransitoria

transitoria X_d'' . La corriente que resuelve el circuito resultante es I_k'' , dependiendo del punto de operación previo y la impedancia hasta el punto de falta. Si se plantea el generador incluido en una red anillada, la resolución de I_k'' adquiere mayor complejidad y por ello se aplica el método de cálculo llamado fuente de tensión equivalente, cuyas hipótesis son:

- Durante todo el cortocircuito el tipo de falta se mantiene. Esto significa que, por ejemplo, si el cortocircuito es fase-tierra, el mismo no cambia mientras la falta esté presente.
- Durante todo el cortocircuito la topología de la red no cambia. Es decir que no sale ni entra en servicio equipamiento como transformadores, líneas, generadores, etc.
- Se deprecian las admitancias en paralelo de las cargas no rotativas en todas las secuencias.
- La capacitancia de las líneas se desprecia para la secuencia directa e inversa.
- La impedancia magnetizante de los transformadores se desprecia. El transformador se modela solo por su impedancia de cortocircuito.
- La impedancia de los transformadores con TAP es la asociada a la posición principal.

5.3.1. Diferentes tipos de red

La red genérica se clasifica en función de su topología, en las siguientes tres categorías:

1. Categoría 1: El cortocircuito es alimentado directamente por un solo generador como se indica en la figura 5.2 .

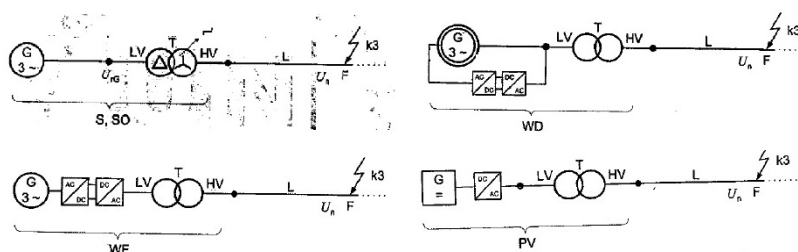


Figura 5.2: Esquema de cortocircuito alimentado por un solo generador.

Los cortocircuitos estudiados teóricamente en los capítulos 2, 3 y 4 pertenecen a esta categoría, siendo representados en la figura 5.2.

Los símbolos AC/DC y DC/AC son los convertidores de potencia mencionados en el anexo B y su conexionado se especifica en el capítulo correspondiente a cada generador.

5.3. Corriente simétrica inicial

2. Categoría 2: El cortocircuito es alimentado directamente por múltiples generadores que no se conectan entre sí, como se indica en la figura 5.3.

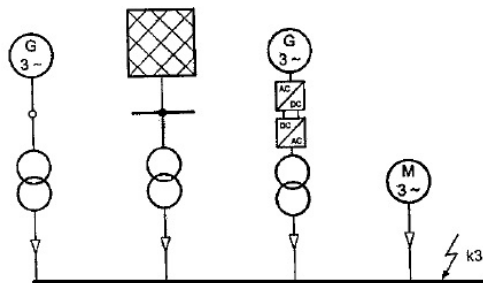


Figura 5.3: Cortocircuito es alimentado directamente por múltiples generadores, imagen extraída de [1]

En este caso cada generador aporta al CC de manera independiente y se analiza el CC como la suma de cada aporte por separado.

3. Categoría 3: El cortocircuito es alimentado por múltiples generadores que se encuentran interconectados como se representa en la figura 5.4.

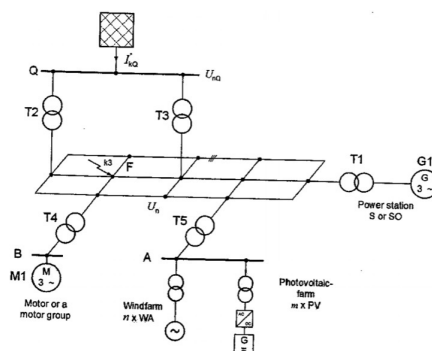


Figura 5.4: Esquema de cortocircuito de red anillada. Imagen extraída de [1]

En la figura 5.4 el CC en el punto F es alimentado por diferentes fuentes de alimentación en anillo. En la categoría 2 la corriente de CC de cada fuente tenía una única dirección, mientras que en la categoría 3 la circulación de corriente se fracciona y adiciona con otros aportes en cada nodo. Por esta razón no puede aplicarse la misma lógica que en el caso anterior y para resolver el problema se necesita un modelo de red adecuado.

Modelo de red

En el SE las barras representan nodos o vértices, mientras que las impedancias que las conectan son las aristas entre ellos y forman un sistema discreto. Para dos

Capítulo 5. Norma IEC-60909

barras j e i conectadas entre sí por medio de la impedancia $Z_{i,j}$, sus tensiones de fase son V_i y V_j respectivamente. Si $I_{i,j}$ es la corriente que circula por la impedancia que las une, aplicando la ley de Ohm se obtiene la ecuación 5.1.

$$I_{i,j} = (V_i - V_j)Y_{i,j} \quad (5.1)$$

Donde $Y_{i,j}$ es el inverso de la impedancia de conexión $Z_{i,j}$. Ahora, el nodo i se encuentra conectado a p nodos por medio de las admitancias $Y_{i,h}$ con $h = j, \dots, j + p - 1$ y estos se encuentran a tensión de fase V_h . Aplicando Kirchhoff en el nodo i se obtiene la ecuación 5.2.

$$I_{barra} = \sum_{h=j}^{h=j+p-1} V_h Y_{i,h} - V_i \sum_{h=j}^{h=j+p-1} Y_{i,h} \quad (5.2)$$

En condiciones de operación nominal, la suma de las corrientes hacia el nodo i es nula e $I_{barra} = 0$. Pero si la barra i se cortocircuita, I_{barra} es igual a la corriente de defecto I_k'' y en formato matricial se representa en la ecuación 5.3.

$$I_k'' = (V_{i,j}, \dots, V_{i,j+p-1}) \begin{pmatrix} Y_{i,j} \\ \vdots \\ Y_{i,j+p-1} \end{pmatrix} - V_i \sum_{h=j}^{h=j+p-1} Y_{i,h} \quad (5.3)$$

Si la red se representa mediante n nodos con topología arbitraria, la corriente de falta de cada barra se generaliza según la ecuación 5.4.

$$[I] = \begin{pmatrix} Y_{1,1}Y_{1,2} \dots Y_{1,n} \\ Y_{2,1}Y_{2,2} \dots Y_{2,n} \\ \vdots \\ Y_{n,1}Y_{n,2} \dots Y_{n,n} \end{pmatrix} [V] \quad (5.4)$$

Sus elementos se describen a continuación:

- $[V]$ es el vector que representa la tensión de fase de cada nodo.
- $[I]$ es el vector que representa la corriente I_k'' de cada nodo.
- $\begin{pmatrix} Y_{1,1}Y_{1,2} \dots Y_{1,n} \\ Y_{2,1}Y_{2,2} \dots Y_{2,n} \\ \vdots \\ Y_{n,1}Y_{n,2} \dots Y_{n,n} \end{pmatrix}$ es la matriz $[Y]$ llamada Y-bus.

Asumiendo que i está conectada a p nodos, la construcción de Y-bus se realiza según la ecuación 5.5.

$$\begin{aligned} Y_{i,i} &= -\sum_{h=j}^{h=j+p-1} Y_{i,h} \\ Y_{i,j} &= Y_{j,i} \end{aligned} \quad (5.5)$$

Fuera de la diagonal se ubica la admitancia que conecta el nodo i con j y en la diagonal es el opuesto de la suma de admitancias de conexión con los p nodos. Por

5.3. Corriente simétrica inicial

tanto la matriz es simétrica y en caso de querer obtener las tensiones en función de las corrientes, se utiliza el método de matriz inversa. Definiendo la matriz Z-bus como $[Z] = [Y]^{-1}$ y se utiliza en la ecuación 5.6.

$$[V] = [Z][I] \quad (5.6)$$

Un detalle importante de la matriz Z-bus, es que el término de la diagonal $Z_{i,i}$ representa la impedancia vista desde el nodo i y el término $Z_{i,j}$ es la impedancia vista desde el nodo i hasta el j . Este aspecto es sumamente importante para determinar I''_k .

En caso de ser un CC asimétrico, deben aplicarse las componentes simétricas descritas en el anexo A.2. Se construye un modelo de red equivalente para todas las secuencias por medio de la matriz Y-bus, utilizando las impedancia secuenciales correspondientes de cada elemento.

5.3.2. Método de cálculo

El método consta de las siguientes etapas:

1. Modelado de la red ante la falta:
 - Se sustituye el nodo en falta por una fuente de tensión equivalente.
 - Se sustituyen las fuentes de potencia según sea el caso, por una impedancia o fuente de corriente equivalente.
 - Se sustituyen los elementos restantes de la red como transformadores, líneas, cables y motores (entre otros) por su impedancia interna correspondiente según se muestra en el anexo C.
2. Con los cambios realizados se puede calcular la corriente I''_k .

Las características de cada generador y la topología de la red determinan el CC, así como las condiciones previas al mismo. Dentro de los posibles valores de I''_k , se destacan el máximo y mínimo debido a que se estiman las condiciones más extremas. Para calcularlos sus hipótesis principales se encuentran en la tabla 5.2 y serán justificadas en el correr de la sección.

	Cortocircuito máximo	Cortocircuito mínimo
Factor de voltaje c	c_{max}	c_{min}
Factores de corrección K	Se aplican	Valen 1
Aporte de los generadores conectados por inversor	Se consideran si $I''_{kPF} > 0,05I''_{kPF0}$	No se consideran

Tabla 5.2: Hipótesis de cortocircuitos máximos y mínimos

Factor c y fuente de tensión equivalente

El cortocircuito se sustituye por una fuente de tensión equivalente. En funcionamiento normal, no todos los puntos de la red están al mismo nivel de tensión, sino que pueden variar en un pequeño entorno de la tensión nominal de operación. La corriente I_k'' es proporcional a la tensión previa a la falta, por esta razón se introduce el factor c , llamado “factor de voltaje” y se define como el cociente entre la tensión de operación previa a la falta y la tensión nominal. Por lo tanto la tensión equivalente utilizada es $c \frac{U_n}{\sqrt{3}}$ y la selección de c , determina si el CC es máximo o mínimo. En la figura 5.5 se encuentra una tabla extraída de la norma para seleccionar c_{min} y c_{max} en función de la tensión nominal del sistema.

Nominal system voltage U_n	Voltage factor c for the calculation of	
	maximum short-circuit currents c_{max}^a	minimum short-circuit currents c_{min}^a
Low voltage 100 V to 1 000 V (IEC 60038:2009, Table 1)	1,05 ^c 1,10 ^d	0,95 ^c 0,90 ^d
High voltage ^b >1 kV to 230 kV (IEC 60038:2009, Tables 3, 4)	1,10	1,00
High voltage ^{b, e} > 230 kV (IEC 60038:2009, Table 5)	1,10	1,00

^a $c_{max} U_n$ should not exceed the highest voltage U_m for equipment of power systems.
^b If no nominal system voltage is defined $c_{max} U_n = U_m$ or $c_{min} U_n = 0,90 U_m$ should be applied.
^c For low-voltage systems with a tolerance of $\pm 6\%$, for example systems renamed from 380 V to 400 V.
^d For low-voltage systems with a tolerance of $\pm 10\%$.
^e For nominal system voltages related to $U_m > 420$ kV, the voltage factors c are not defined in this standard.

Figura 5.5: Factor de voltaje c. [1]

Impedancias

Una vez definida la fuente de tensión equivalente, se definen las impedancias de los distintos elementos de la red. Para el caso de los generadores asíncronos se estudiara solo el DFIG, con el objetivo de compararlo con el estudio teórico previo.

Generador síncrono-impedancia

El método solo será utilizado para calcular la corriente simétrica inicial I_k'' , por lo cual la impedancia interna en secuencia directa es $Z_{G(1)} = R_{G(1)} + jX_{d(sat)}''$. La norma contempla la influencia de la saturación de la máquina, que en el análisis teórico (capítulo 2) no se hizo. Una de las hipótesis para estudiar el GS es que se encuentra en zona lineal, quiere decir que el flujo magnético es directamente proporcional a la F.M.M y en consecuencia la tensión lo es a la corriente por medio de la reactancia X_d'' . En saturación, al aumentar la F.M.M el flujo magnético aumenta en menor proporción que en zona lineal y la reactancia subtransitoria X_d'' comienza a disminuir. Esto provoca corrientes de CC de mayores y al tener en cuenta este efecto la norma estima el peor caso con mayor exactitud.

La impedancia de secuencia negativa $Z_{G(2)} = R_{G(2)} + jX_{(2)}$, tiene las mismas consideraciones que el caso teórico. La reactancia se calcula a partir de la

5.3. Corriente simétrica inicial

reactancia subtransitoria del eje directo X_d'' y de cuadratura X_q'' según la ecuación 2.27 presentada en el capítulo 2. En caso de no tener el dato se la aproxima por X_d'' .

La impedancia de secuencia cero $Z_{G(0)} = R_{G(0)} + jX_{(0)}$ es un dato de fabricante.

Generador síncrono-corrección

En la teoría para calcular I_k'' el GS se sustituye por una fuente de tensión E_0 (tensión interna) en serie con la impedancia subtransitoria $Z_{G(1)}$ ⁵. Asumiendo que la máquina conserva el sincronismo debido a la inercia del rotor, E_0 depende solo de la tensión y corriente de red previa al cortocircuito.

Para un CC en bornes del estator, se calcula la corriente I_k'' teóricamente y por el método de la norma tal cual se muestra en la figura 5.6.

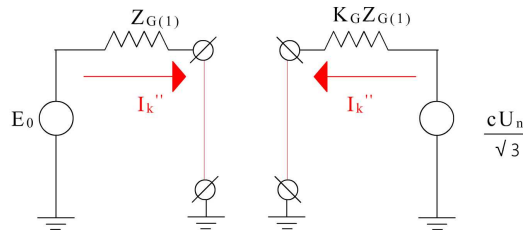


Figura 5.6: Método de cálculo de la norma para un cortocircuito en bornes del estator

La máxima I_k'' se obtiene cuando la máquina se encuentra a plena carga y la tensión de red se encuentra por encima de la tensión nominal ($c = c_{max}$). Entonces las tensiones involucradas en la figura 5.6 son distintas y para que las corrientes I_k'' sean similares debe introducirse el factor de corrección K_G . Este se calcula según la ecuación 5.7.

$$K_G = \frac{U_n}{U_{rG}} \frac{c_{max}}{1 + x_d'' \sqrt{1 - \cos(\varphi_{rG})^2}} \quad (5.7)$$

Los parámetros que la norma indica para el cálculo de la impedancia son:

- U_{rG} es la tensión nominal del generador.
- U_n es la tensión nominal del SE al que se conecta el generador.
- c_{max} es el factor c máximo.
- x_d'' es la reactancia subtransitoria saturada en pu de la máquina síncrona y es un dato aportado por el fabricante.
- $\cos(\varphi_{rG})$ es el factor de potencia nominal del generador.

⁵En el capítulo 2 se despreció $R_{G(1)}$ en comparación con X_d'' , pero en la norma se considera la impedancia total.

Capítulo 5. Norma IEC-60909

La corriente I_k'' es mínima cuando el GS se encuentra en vacío y el desbalance se encuentra por debajo de la tensión nominal ($c = c_{min}$). La tensión E_0 es igual a la de red y utilizando la fuente equivalente con $c = c_{min}$ el factor K_G es innecesario ($K_G = 1$).

Para las impedancias de secuencia del generador se aplican las mismas reglas y el factor K_G es el mismo.

Generador síncrono en serie con un transformador

Los transformadores de dos o tres devanados se modelan por su impedancia de cortocircuito y se desprecia la rama magnetizante. Cuando el generador se conecta por medio del transformador no es tan simple como adicionar la impedancia del transformador a X_d'' y modificar K_G . Es cierto que el comportamiento será similar, pero las diferencias en las características nominales de ambos equipos así como el TAP (variable o fijo) influyen la corriente I_k'' . Tornando el factor K_G obsoleto. Entonces se corrige la impedancia del grupo (transformador y GS) mediante los factores K_S y K_{SO} según corresponda.

El factor K_S considera que el transformador tiene TAP variable y se trabajan con tres cocientes de tensiones diferentes:

- $\frac{U_{rG}}{U_n}$: es el cociente entre la tensión nominal del generador y la nominal del punto de la red.
- $t_r = \frac{U_{rTLV}}{U_{rTLV}}$: es la relación de transformación nominal del transformador con el TAP en posición media.
- t es la relación de transformación previa a la falta y puede ser distinto a t_r .

La impedancia a corregir es $Z = Z_{G(1)}t_r^2 + Z_T$ y es vista desde la red según la relación de transformación es t_r^2 (posición central). La tensión E_0'' depende de la relación de transformación t y de la tensión nominal del generador. Para el CC máximo, el generador se encuentra a plena carga previo al CC y la tensión E_0'' (vista del lado del CC) difiere del valor de la fuente equivalente. El transformador no es ideal, por lo que existe una caída de tensión previa debido a su impedancia, tomando en cuenta los cocientes mencionados y adicionando los criterios de cálculo de K_G se define K_S según la ecuación 5.8.

$$K_S \approx \frac{U_n^2}{U_{rG}^2 t_r^2} \frac{c_{max}}{1 + |x_d'' - x_t| \sqrt{1 - \cos(\varphi_{rG})}} \quad (5.8)$$

La expresión hallada es una aproximación donde se considera que las impedancias involucradas son reactancias y la tensión de operación mínima del lado de la red previa a la falta se encuentra por encima de la nominal.

Los parámetros son los siguientes:

- U_{rG} es la tensión nominal del generador.
- U_n es la tensión nominal del SE al que se conecta el transformador por su lado de alta.

5.3. Corriente simétrica inicial

- t_r es la relación de transformación del transformador en la posición media.
- c_{max} es el factor c máximo.
- x_d'' es la reactancia subtransitoria saturada en pu (En base del generador) de la máquina síncrona, es un dato aportado por el fabricante.
- x_t'' es la reactancia subtransitoria saturada en pu del transformador (En base del transformador), es un dato aportado por el fabricante.
- $\cos(\varphi_{rG})$ es el factor de potencia nominal del generador.

Según [1] Utilizar el factor K_S reduce el error relativo del método de fuente equivalente desde aproximadamente un 13 % a 2.5 %.

El factor K_{SO} representa que el TAP es fijo y durante la operación este no puede variar su relación de transformación t . La tensión en bornes del generador se prevee para el peor caso $U_G = U_{rG}(1 + p_G)$ y el término p_G determina la sobretensión del generador. Como la relación de transformación t es constante se la expresa en función de t_r como $t = t_r(1 \pm p_T)$ y se define K_{SO} según la ecuación 5.9.

$$K_{SO} = \frac{U_n}{U_{rG}(1 + p_G)t_r}(1 \pm t) \frac{c_{max}}{1 + x_d''\sqrt{1 - \cos(\varphi_{rG})}} \quad (5.9)$$

Tiene los mismos parámetros que K_S a excepción de p_G y p_T que ya fueron explicados. Según [1] Utilizar el factor K_{SO} reduce el error relativo del método de fuente equivalente desde aproximadamente un 20 % a 6 %.

En resumen los factores correctivos estudiados se aplican a la impedancia compuesta por el generador y el transformador $Z = t_r^2 Z_G + Z_T$ en todas sus secuencias. En particular, la secuencia cero depende del aterramiento del transformador.

DFIG-Impedancia

En el capítulo 3 el transitorio de CC está determinado aproximadamente por el flujo natural de rotor y estator. El flujo de rotor es el que induce una corriente de alterna de frecuencia ω_m (frecuencia mecánica) y depende del deslizamiento previo a la falta⁶. La diferencia de frecuencia no se tiene en cuenta y se la considera como ω_s . El valor inicial de la componente alterna I_k'' depende del flujo magnético previo así como del control y las protecciones del convertidor del lado del rotor. El chopper y crowbar protegen al convertidor contra sobretensiones del lado de continua y alterna respectivamente. Evitando que este se sature y pierda el control sobre las corrientes rotóricas y en consecuencia sobre las de CC.

Por otra parte, la corriente de estator es inversamente proporcional a X_s' ⁷. Si la impedancia entre el punto de falta y el generador aumenta, entonces la corriente de estator se reduce.

⁶El flujo natural del rotor es estático respecto a la base mecánica y gira a ω_m visto desde el estator.

⁷Se define en el capítulo 3 como $\omega_s L_s'$ y $L_s' = L_{\sigma s} + L_{\sigma r} // L_m$

Capítulo 5. Norma IEC-60909

En resumen I_k'' depende de la impedancia hasta el punto de falta y del convertidor del lado del rotor. Se sustituye el generador por una impedancia equivalente Z_{WD} cuyo módulo es la ecuación 5.10.

$$Z_{WD} = k_{WD} \frac{\sqrt{2}U_{rTHV}}{\sqrt{3}i_{WDmax}} \quad (5.10)$$

Los parámetros son los siguientes:

- U_{rTHV} es la tensión nominal del lado de alta tensión del transformador elevador a la salida del generador
- k_{WD} es el factor para calcular el pico de la corriente de cortocircuito y se ve influenciado por las protecciones del convertidor del lado de rotor. Es un dato aportado por el fabricante y en caso de no tenerlo se lo estima como $k_{WD} = 1,7$.
- i_{WDmax} es el máximo valor instantáneo de corriente para un CC trifásico.

La expresión compleja de la impedancia directa Z_{WD} se calcula según la ecuación 5.11.

$$Z_{WD} = R_{WD} + jX_{WD} = \left(\frac{R_{WD}}{X_{WD}} + j \right) \frac{Z_{WD}}{\sqrt{1 + \left(\frac{R_{WD}}{X_{WD}} \right)^2}} \quad (5.11)$$

En caso de no conocer el valor $\frac{R_{WD}}{X_{WD}}$, se puede asumir 0, 1.

Si se planteara un CC 3F en bornes del estator, la corriente I_k'' se define según la ecuación 5.12.

$$I_k'' = c \frac{i_{WDmax}}{\sqrt{2}k_{WD}} \frac{U_n}{U_{rTHV}} \quad (5.12)$$

Los cortocircuitos máximo y mínimo se determinan a partir del factor c , si $k_{WD} = 1,7$ (en caso de desconocerlo) la corriente I_k'' máxima es aproximadamente 45% de i_{WDmax} y la mínima es 41% de i_{WDmax} . Al expresar la impedancia en función de i_{WDmax} y k_{WD} se tiene en cuenta el efecto del convertidor y sus protecciones en I_k'' .

Para la red de secuencia inversa, se mencionó que el convertidor puede inyectar una corriente desmagnetizante, que genera un flujo inverso opuesto al que existe en el estator. Además el aporte de secuencia inversa también es inversamente proporcional a la reactancia X_s' . Por lo tanto, en la norma se modela el generador como una impedancia inversa $Z_{(2)WD}$ que depende del diseño y estrategias de control del generador.

La impedancia homopolar $Z_{(0)WD}$ del generador se calculó teóricamente cuando se realizó el modelo DQ0 del mismo en el capítulo 3. El transformador que conecta el generador con la red también se considera en el cálculo de la corriente y su aterramiento determina $Z_{(0)WD}$.

Fuentes de corriente

Los GF y FC tienen diferentes fuentes de generación, pero se conectan a la red por medio de un inversor. Como se vio en el capítulo 4, la potencia intercambiada con la red pasa en su totalidad por el inversor, sus controles no lineales y consigna de potencia son los que determinan la corriente de CC. Este tipo de tecnología tiene menor robustez en comparación con los otros generadores estudiados y se dañan con mayor facilidad ante corrientes elevadas (en comparación con la nominal). Por lo cual, el fabricante aporta el dato de la corriente eficaz máxima que puede circular sin producir daño.

La norma utiliza estos conceptos para modelar al generador como una fuente de corriente de secuencia directa, el valor de corriente es dado por el fabricante y depende del tipo de CC (Figura 1.1).

El sistema de control responde en función del nivel de tensión de secuencia directa medido en bornes de la máquina. En función de la consigna correspondiente al nivel de tensión directa queda determinada la respuesta del generador a tensiones de secuencia inversa. En la norma se indica que la impedancia de secuencia inversa $Z_{(2)PF}$ es un dato aportado por el fabricante.

Por la estructura de las ramas inversoras, no hay circulación de la corriente homopolar y se modela el generador como una impedancia $Z_{(0)PF}$ infinita. El transformador que conecta con la red y su aterramiento también se considera al estimar la impedancia homopolar.

5.3.3. Cortocircuito trifásico

El análisis individual de cada generador se utilizó para determinar sus impedancias internas y fuente de corriente en la sección 5.3.2. Se extiende el análisis a una red anillada genérica con n nodos, m generadores conectados por medio de un inversor y p generadores GS o DFIG, en la cual sucede un cortocircuito trifásico en un nodo cualquiera i . El método de cálculo de la norma comienza sustituyendo el nodo en falta por una fuente de tensión equivalente y los generadores por su impedancia o fuente de corriente asociada según corresponda.

Para resolver el circuito se aplica superposición estudiando las fuente de tensión y corriente por separado. Primero se estudia la única fuente de tensión del sistema que se encuentra en el nodo i y las fuentes de corriente son circuitos abiertos. Entonces se define la corriente I''_{kPF0} como la corriente aportada por todos los generadores síncronos y asíncronos. Para ello se utiliza la matriz Z-bus planteada en 5.3.1 y el término ubicado en su diagonal $Z_{i,i}$ representa la impedancia vista desde el nodo i . Entonces la corriente se define según la ecuación 5.13.

$$\begin{aligned} I''_{kPF} &= \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_k} \\ Z_k &= |Z_{i,i}| \end{aligned} \quad (5.13)$$

Continuando con el método, se sustituye el nodo i por un CC y el aporte de todas las fuentes de corriente se define I''_{skPF} . Las corrientes de los m generadores son independientes entre sí, se estudia una fuente genérica en el nodo j y luego se amplía el concepto a los m nodos. La fuente de corriente ubicada en el nodo

Capítulo 5. Norma IEC-60909

j tiene valor I_{skPFj} y su impedancia hasta el CC $Z_{i,j}$ se obtiene desde la matriz Z-bus. El aporte de la fuente se calcula a partir del divisor de corriente entre $Z_{i,j}$ y $Z_{i,i}$. Se generaliza para los m generadores según la ecuación 5.14

$$\begin{aligned} I''_{kPF} &= \frac{1}{Z_k} \sum_{j=1}^{j=m} Z_{i,j} I_{skPFj} \\ Z_k &= |Z_{i,i}| \end{aligned} \quad (5.14)$$

Finalizando el método de superposición, la corriente I''_k total es la suma de las corrientes calculadas en la ecuación 5.14 y 5.13, dando como resultado la ecuación 5.15.

$$\begin{aligned} I''_{k3} &= \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_k} + \frac{1}{Z_k} \sum_{j=1}^{j=m} Z_{i,j} I_{skPFj} = I''_{skPF0} + I''_{kPF} \\ Z_k &= |Z_{i,i}| \end{aligned} \quad (5.15)$$

La corriente I''_k tiene dos componentes. La corriente I''_{skPF0} es la aportada por los GS y DFIG del sistema, su magnitud depende de la tensión equivalente y ubicación de la falta. Sus impedancias internas determinan la máxima corriente I''_k que puede circular por sus respectivas ramas. Según [7] la corriente subtransitoria del GS es aproximadamente $10pu$ y según [4] la corriente I''_{kWD} es aproximadamente $3,4pu$ (con $k_{WD} = 1,7$ e $i_{WDmax} = 8pu$). La corriente de este tipo de generador depende de las condiciones previas de la red, debido a que el flujo magnético previo se conserva en el instante de falta.

El término I''_{ksPF} representa la corriente de CC de los generadores FC y GF, individualmente aportan una corriente I_{ksPFj} . La corriente máxima que puede entregar cada inversor está definida por el fabricante y en caso de superarla puede dañar el equipo. La misma no difiere en gran medida de la corriente nominal y es una diferencia sustancial con respecto a los otros generadores. La consigna de potencia es un factor determinante en la corriente de CC, logrando que en algunos casos este tipo de generador tenga un aporte despreciable en comparación con los aportes de GS o DFIG y en el cálculo de un CC mínimo no deben ser considerados.

Como ya fue mencionado, el comportamiento dinámico de GS y/o DFIG depende de la impedancia Z_L entre el generador y la falta. El aporte de inversores en cambio, dependen casi totalmente de su control asignado, en general la corriente I''_{ksPF0} se utiliza siempre y I''_{ksPF} se considera en casos específicos. Las hipótesis de cortocircuitos máximos y mínimos presentes en la tabla 5.2 especifican estos casos.

Para el CC máximo el factor c es c_{max} , se utilizan los factores de corrección K correspondiente e I''_{kPF} se tiene en cuenta si $I''_{kPF} > 0,05I''_{kPF0}$. Para el CC mínimo no se considera I''_{kPF} , c es c_{min} y los factores de corrección son $K = 1$.

5.3.4. Cortocircuitos asimétricos

Teóricamente los CC asimétrico en todos los generadores se calculan mediante componentes simétricas definidas en el anexo A.2. En el caso de la secuencia directa se utiliza mismo modelo que en el cortocircuito trifásico. Para el GS, tanto en la norma como en el capítulo 2, todas las impedancias secuenciales están definidas y son datos de fabricante.

5.4. Corriente DC

Los generadores no convencionales utilizan convertidores, que tienen su estrategia de control propia y su comportamiento ante una red inversa es distinto al caso del GS. En la norma, para la red de secuencia inversa, estos generadores se modelan como una impedancia determinada por la estrategia control del generador, usualmente esta impedancia es un dato proporcionado por el fabricante. Para simplificar los cálculos, se considera que el transformador que conecta el generador con la red es Dyn⁸. Con este grupo de conexión la impedancia de secuencia cero vista hacia el generador es infinita y no depende del mismo.

Las fórmulas utilizadas para el cálculo de CC asimétrico dependen de E_d , que es la tensión de vacío del punto de falta. Para los GS y DFIG, la corriente I''_k se calcula utilizando sus impedancias de secuencia y la fuente equivalente es la tensión de secuencia directa E_d . La diferencia entre ellos, es que la impedancia del GS depende de la construcción de la máquina y el DFIG depende principalmente del convertidor. Para el caso del FC y GF, la corriente de secuencia directa I_{skPFj} depende del tipo de CC e I''_k se calcula como el divisor de corriente entre la impedancia de secuencia vista y la impedancia directa hasta el punto de falta.

Para extender los cortocircuitos asimétricos a una red anillada, se plantean las redes de secuencia equivalente y utilizando las componentes simétricas definidas en el anexo A.2 se define I''_k según las fórmulas de la tabla 5.3^{9,10}.

Corriente simétrica inicial	Fórmula
$I''_{k1}(FT)$	$\left \frac{\sqrt{3}}{Z_{(1)i,i} + Z_{(2)i,i} + Z_{(0)i,i}} \left(\frac{cU_n}{\sqrt{3}} + \sum_{j=1}^{j=m} Z_{(1)i,j} I_{(1)sk1PFj} \right) \right $
$I''_{k2}(FF)$	$\left \frac{\sqrt{3}}{Z_{(1)i,i} + Z_{(2)i,i}} \left(\frac{cU_n}{\sqrt{3}} + \sum_{j=1}^{j=m} Z_{(1)i,j} I_{(1)sk2PFj} \right) \right $
$I''_{k2EL3}(FFT)$	$\left \frac{\sqrt{3}(Z_{(0)i,i} - a^2 Z_{(2)i,i})}{Z_{(0)i,i} Z_{(2)i,i} + Z_{(0)i,i} Z_{(1)i,i} + Z_{(2)i,i} Z_{(1)i,i}} \left(\frac{cU_n}{\sqrt{3}} + \sum_{j=1}^{j=m} Z_{(1)i,j} I_{(1)sk2PFj} \right) \right $
$I''_{k2EL2}(FFT)$	$\left \frac{\sqrt{3}(Z_{(0)i,i} - a Z_{(2)i,i})}{Z_{(0)i,i} Z_{(2)i,i} + Z_{(0)i,i} Z_{(1)i,i} + Z_{(2)i,i} Z_{(1)i,i}} \left(\frac{cU_n}{\sqrt{3}} + \sum_{j=1}^{j=m} Z_{(1)i,j} I_{(1)sk2PFj} \right) \right $
$I''_{kE2E}(FFT)$	$\left \frac{3Z_{(2)i,i}}{Z_{(0)i,i} Z_{(2)i,i} + Z_{(0)i,i} Z_{(1)i,i} + Z_{(2)i,i} Z_{(1)i,i}} \left(\frac{cU_n}{\sqrt{3}} + \sum_{j=1}^{j=m} Z_{(1)i,j} I_{(1)sk2PFj} \right) \right $

Tabla 5.3: Corriente simétrica inicial para cortocircuitos desbalanceados

5.4. Corriente DC

En el capítulo 2, se dedujo que para un GS la corriente de CC tiene dos componentes: una exponencial decreciente llamada componente continua $i_{DC}(t)$ y una sinusoidal llamada alterna simétrica $I_{as}(t)$. La alterna simétrica es la respuesta

⁸Este es un requerimiento que exige UTE a los generadores que se conectan a la red de transmisión

⁹Las corrientes determinadas en la tabla son las indicadas en la figura 1.1.

¹⁰El factor a es el complejo indicado para el cálculo de componentes simétricas en el anexo A.2.

Capítulo 5. Norma IEC-60909

forzada del generador al CC y la componente continua mantiene la continuidad de la corriente en el instante de falta.

La norma plantea el cálculo de la corriente i_{DC} máxima para los distintos tipos de generador en una red anillada según la ecuación 5.16.

$$i_{DC}(t) = \sqrt{2}I_k'' e^{-2\pi f t \frac{R}{X}} \quad (5.16)$$

Donde sus parámetros son los siguientes:

- I_k'' : Corriente simétrica inicial o subtransitoria.
- f : Frecuencia eléctrica del sistema eléctrico.
- $\frac{R}{X}$: Es el cociente entre la resistencia y reactancia vista desde el punto de defecto, aplicando el modelo de red y sustituyendo cada generador por su equivalente como en la sección 5.3.

El cociente $\frac{X}{2\pi f R}$ puede considerarse como una constante de tiempo τ_{norma} y el valor inicial A de i_{DC} es $\sqrt{2}I_k''$.

Si el CC es alimentado por un GS, en la teoría la corriente DC es una exponencial decreciente que se modela según la ecuación 2.25 del capítulo 2.

Su constante de tiempo τ_i se define según la ecuación 2.50 del capítulo mencionado y es importante notar sus diferencias con τ_{norma} . Ambas constantes quedan determinadas por el cociente $\frac{R}{X}$, donde la norma sustituye el generador por la impedancia subtransitoria corregida y el cálculo teórico utiliza su impedancia inversa $Z_{G(2)}$. La diferencia de estas impedancias es en el término imaginario y determina la relación entre ambas constantes. Por lo visto en la sección 5.3.2, la reactancia inversa del GS tiene el mismo orden de magnitud que X_d'' , inclusive se las puede considerar iguales ante la falta de datos y τ_{norma} es aproximable a τ_i .

Se puede asociar la constante A a la continuidad de la corriente en el instante de falta y teóricamente se determina a partir de $I_{as}(t = 0) = \sqrt{2}I_k'' \cos(\gamma)$ ¹¹. El ángulo γ es 0 o π maximizando el valor de A e I_k'' se calcula como en la sección 5.3 para un CC máximo.

La corriente i_{DC} máxima propuesta en la norma satisface la expresión teórica del GS y debe verificar su aplicación para los generadores restantes.

Para el caso de un CC alimentado por un DFIG, la corriente de falta al igual que en el GS tiene componentes alterna simétrica y continua. Cada componente tiene igual definición que en el caso de un GS. El valor de A máximo es $\sqrt{2}I_k''$ e I_k'' se calcula para el peor caso. Su constante de tiempo es τ_s' y el comportamiento al agregar una impedancia Z_L desde el generador hasta la falta es el mismo que en GS. Entonces, utilizando el modelo de red propuesto en la norma y el factor $\frac{R}{X}$ depende de la forma binomial del complejo Z_{WD} .

Los PV y FC se conectan a la red por medio del inversor y es un dispositivo que no utiliza el campo magnético para intercambiar energía con la red. Por lo

¹¹El ángulo γ es la fase inicial de la corriente I_{as}

5.5. Corriente de pico

tanto, no hay presencia de flujo natural e i_{DC} es nula para este tipo de generadores.

Cuando se extendió el análisis de I_k'' a una red anillada, la resolución del circuito equivalente de red (sección 5.3) se realizó en régimen fasorial por medio del método de fuente equivalente. Ahora no se calcula el régimen fasorial y el aporte de cada generador es una exponencial decreciente. Al aplicar la ecuación 5.16, el factor determinante en el cálculo es $\frac{R}{X}$, la norma propone el método de frecuencia equivalente f_c para estimar este término. El método consta en obtener la impedancia $Z_c = R_c + jX_c$ vista desde el punto de la falta i a frecuencia f_c . Se determina el cociente $\frac{R}{X}$ a partir de $Z_c = R_c + jX_c$ según la ecuación 5.17.

$$\frac{R}{X} = \frac{R_c f_c}{X_c f} \quad (5.17)$$

Donde f es la frecuencia nominal del SE y la selección de la frecuencia equivalente f_c determina el cociente $\frac{R}{X}$. La norma provee la tabla 5.4 donde se determina $\frac{f_c}{f}$ en función del número de ciclos ft . A medida que los ciclos aumentan, la frecuencia f_c es menor y Z_c tiende a ser más resistiva. Entonces el cociente $\frac{R}{X}$ aumenta para los valores discretos de $\frac{f_c}{f}$ en la tabla 5.4.

ft	<1	<2.5	<5	<12.5
$\frac{f_c}{f}$	0.27	0.15	0.092	0.055

Tabla 5.4: Tabla para calcular el cociente de frecuencias en función del tiempo

5.5. Corriente de pico

En el capítulo 2 se vio que para un CC trifásico la corriente de pico depende de i_{DC} y el decrecimiento del valor eficaz depende de I_{as} . El estudio de la corriente aportada por el GS se orienta a la forma de onda teórica y los parámetros que la determinan, a partir del análisis matemático del modelo dinámico. El valor del pico es el máximo teórico de la expresión matemática. El mayor pico posible se obtiene cuando la componente de continua es máxima $A = \sqrt{2}I_k''$. Además, la corriente i_p disminuye para valores más grandes de $\frac{R}{X}$, esto se debe a que la constante de tiempo de i_{DC} es mayor y la componente continua converge a cero con mayor velocidad. Por otra parte las constantes de tiempo asociadas al valor eficaz de I_{as} aumentan, esto quiere decir que I_{as} converge con mayor velocidad a I_{ccp} . Si ambas componentes aumentan su velocidad de convergencia, el pico máximo se reduce. Entonces que la resistencia tiene un efecto amortiguador en la corriente de pico mientras que una mayor reactancia tiene el efecto contrario. De no haber resistencia, las exponenciales son constantes y el pico adquiere su valor ideal $i_{p,ideal} = 2\sqrt{2}I_k''$.

Al agregar una impedancia $Z_L = R_L + jX_L$ desde generador hasta el punto de falta, el efecto mencionado mantiene solo que en este caso se considera $Z_L =$

Capítulo 5. Norma IEC-60909

$R_L + jX_L$ para el cálculo de $\frac{R}{X}$. Si la impedancia del generador es despreciable en comparación con la línea (CC lejano), el pico de corriente depende de $\frac{R_L}{X_L}$ y no del generador.

La norma permite profundizar el análisis mediante una expresión matemática, su fundamento teórico y la utilización del factor k que se expresan en la ecuación 5.18

$$\begin{aligned} i_p &= \sqrt{2}kI''_{kmax} \\ k_{IEC} &= 1,02 + 0,98e^{-3\frac{R}{X}} \end{aligned} \quad (5.18)$$

El pico sucede en el período subtransitorio y es válido aplicar el modelo de red a un GS alimentando un CC. En consecuencia se tiene un CC en un circuito RL como el presentado en la figura 2.6 del capítulo 2. El valor de i_{DC} máxima es $A = \sqrt{2}I''_k$ y la corriente de cortocircuito total se obtiene según la ecuación 5.19.

$$\begin{aligned} I_{CC,RL}(t) &= \sqrt{2}kI''_{kmax} \\ k &= \cos(\omega t - \frac{\pi}{2} - \text{atan}(\frac{X''_d}{R_{G(1)}})) - e^{-t\omega \frac{R_{G(1)}}{X''_d}} \cos(-\frac{\pi}{2} - \text{atan}(\frac{X''_d}{R_{G(1)}})) \end{aligned} \quad (5.19)$$

En la ecuación 5.19 cociente $\frac{R_{G(1)}}{X''_d}$ determina el comportamiento de las componentes senoide y exponencial de distinta forma. Cuando el cociente es nulo (caso ideal) la fase del coseno es $-\pi$ y la constante de tiempo de la exponencial es nula. La exponencial es constante y el coseno llega a su máximo en medio período. Quiere decir que el factor k ideal vale $k_{ideal} = 2$ y el tiempo en alcanzar el pico t_p es 10 ms (medio ciclo). Al aumentar el cociente, la exponencial decrece con mayor velocidad y el pico se reduce, mientras que la fase de la senoide se atrasa y la senoide se maximiza para t_p menores. Gráficamente se muestra en la figura 5.7 la curva de k y t_p en función del cociente $\frac{R}{X}$.

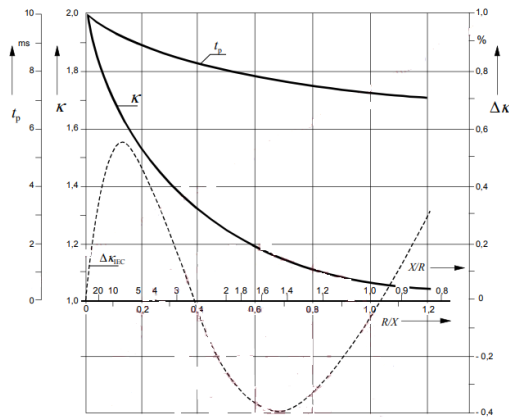


Figura 5.7: Factor k y tiempo t_p (ms)

El término Δk_{IEC} es el error relativo del factor k_{IEC} hallado en la ecuación 5.18 con respecto al k hallado en la ecuación 5.7. El error no supera el 0.6 % cuando el cociente se encuentra en los rangos estipulados en la figura 5.7.

5.5. Corriente de pico

El problema de este método es que no se considera el decrecimiento del valor eficaz de $I_{as}(t)$, por ello la norma propone sustituir la resistencia del generador por una resistencia ficticia R_{Gf} mayor a $R_{G(1)}$. Que se utiliza para modelar el amortiguamiento de pico producido por el decrecimiento de la componente alterna en el primer ciclo. A continuación se presenta los distintos valores de R_{Gf} en función de la potencia y tensión nominal del generador:

- $R_{Gf} = 0,05X_d''$ si $U_{rG} > 1kV$ y $S_{rG} > 100MVA$
- $R_{Gf} = 0,07X_d''$ si $U_{rG} > 1kV$ y $S_{rG} < 100MVA$
- $R_{Gf} = 0,15X_d''$ si $U_{rG} < 1kV$

A medida que el generador trabaja con mayor potencia y a un nivel de tensión más elevado, la resistencia ficticia es más baja y el factor k tiende a su valor ideal.

Para el DFIG se calculó teóricamente el valor de la corriente de pico y al igual que el GS depende de su componentes de alterna y continua. La componente i_{DC} en este caso también se asocia a la continuidad de la corriente de estator en el instante de falta y se maximiza con $A = \sqrt{2}I_k''$. La componente de alterna depende del flujo magnético previo y el deslizamiento previo determina el instante en que ocurre el pico¹². La resistencia de crowbar debería amortiguar el valor del pico, pero éste ocurre en los primeros ms de comenzada la falta y no modifica considerablemente el valor de i_p . En conclusión la corriente de pico depende de la impedancia vista desde el punto de falta y la norma utiliza el sistema de ecuaciones 5.18 aplicadas para el GS en el DFIG.

Para los GF y FC en la teoría (capítulo 4) tienen un período transitorio en el cual la corriente alcanza i_p . La duración del transitorio es sumamente rápida en comparación con los otros tipos de generador. El pico máximo depende de la topología del inversor, el tipo de modulación, la tensión continua en el DC-link, el factor de potencia pre-falta, la profundidad del hueco y la inductancia vista hacia la red. La corriente RMS tiene un pico de muy corta duración. Por tanto, para la norma el transitorio de corriente no se tiene en cuenta e i_p se define en la ecuación 5.20 a partir de I_{kPF}'' .

$$i_p = \sqrt{2}I_{kPF}'' = \sqrt{2}I_{skPFj} \quad (5.20)$$

En caso de un grupo de generadores que alimentan directamente el cortocircuito como en la figura 5.3, la corriente de pico resultante es la suma de las corrientes de pico de cada generador. Extendiendo el análisis para un red anillada se utiliza la ecuación 5.21.

$$i_p = k\sqrt{2}I_{kmaxPFO}'' + \sqrt{2}I_{kPF}'' \quad (5.21)$$

El aporte de todos los inversores es constante y por ende el valor de pico se maximiza al sumarlos. El aporte de los GS y DFIG es similar, debido a que el pico

¹²También determina la frecuencia ω_m de la componente alterna, pero como se explicó en la sección 5.3 esta diferencia no se tiene en cuenta.

Capítulo 5. Norma IEC-60909

depende de la componente de alterna y continua. Se calcula con las ecuaciones 5.18 y 5.20, donde el cociente $\frac{R}{X}$ se determina por medio de los tres métodos siguientes:

1. “*Uniform ratio $\frac{R}{X}$* ”

El método consta de las siguientes etapas:

- Desde el nodo en falta se selecciona las ramas por las cuales circulan las corrientes parciales de CC.
- Se calcula la impedancia de cada rama por medio de la matriz Z-bus.
- Para cada rama se calcula el cociente $\frac{R}{X}$ y se elige el más pequeño.

La estrategia del método es considerar cada rama por la cual circula una corriente parcial de CC y elegir la que impone un mayor k .

2. “*Ratio $\frac{R}{X}$ at the short-circuit location*”

Este método es un poco más parecido al caso de un único GS, el cociente $\frac{R_k}{X_k}$ se determina a partir de la impedancia vista $Z_k = R_k + jX_k$ desde el punto de falta. Una desventaja que se presenta, es la falta de precisión en el cálculo y para complementarlo se multiplica k por 1.15 en los siguientes casos:

- k es menor a 1,57 en redes de baja tensión
- k es menor a 1,74 en redes de alta tensión
- $\frac{R}{X}$ es mayor a 0,3

3. Se utiliza el método de frecuencia equivalente descrito en la sección 5.4 a frecuencia $f_c = 20Hz$ ¹³.

Para los CC asimétricos se aplica la misma lógica que en los simétricos, sustituyendo $I''_{kmaxPFO}$ e I''_{kPF} por su equivalente para CC asimétrico según la tabla 5.3.

5.6. Corriente de régimen

En el capítulo 2, se obtuvo teóricamente I_k para un CC trifásico sustituyendo la reactancia subtransitoria X''_d por la reactancia de eje directo X_d . La norma plantea un estudio diferente donde se tiene en cuenta factores adicionales como la influencia de la saturación y el sistema de excitación. En la ecuación 5.22 se determina la corriente de régimen en función de la nominal.

$$I_k = \lambda I_{rG} \quad (5.22)$$

El parámetro λ corrige I_{rG} para obtener la corriente I_k máxima y mínima. En [1] se proporcionan las figuras 5.8 y 5.9 para determinar λ en función de $X''_{d(sat)}$, el cociente $\frac{I''_{kG}}{I_{kG}}$, el tipo de rotor y de CC.

¹³La norma recomienda este método

5.6. Corriente de régimen

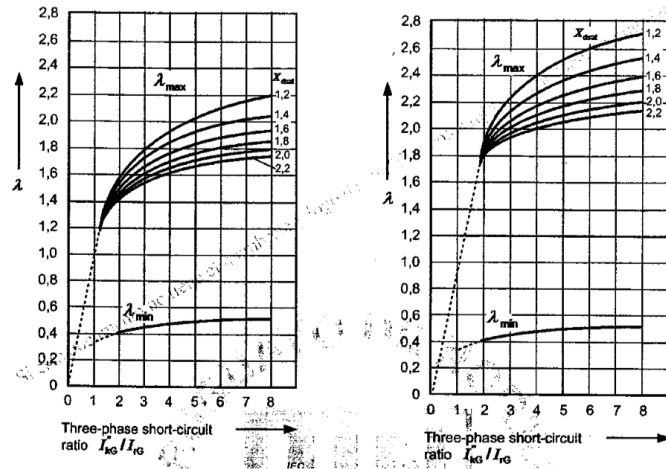


Figura 5.8: Factor λ para polos lisos [1]

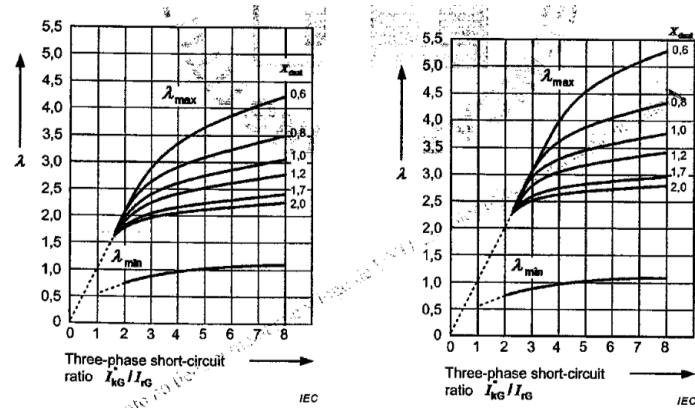


Figura 5.9: Factor λ para polos salientes [1]

Las curvas de las figuras 5.8 y 5.9 se asocian a polos lisos y salientes respectivamente. Dentro cada tipo de rotor se clasifica por la excitación del GS, las curvas situadas a la izquierda se definen serie 1 y las de la derecha como serie 2. En la tabla 5.5 se muestra el factor por el cual se multiplica la excitación nominal de la máquina en función del tipo de rotor y la serie.

Rotor	Serie 1	Serie 2
Cilíndrico	1.3	1.7
Polos salientes	1.6	2

Tabla 5.5: Excitación de la máquina en función del tipo de rotor

En las curvas 5.8 y 5.9 se distinguen dos zonas, la primera es la zona lineal donde $\lambda = \frac{I_k''}{I_{rG}}$ y es válido para CC lejanos porque $I_k = I_k''$. La segunda es el

Capítulo 5. Norma IEC-60909

caso contrario y se ramifica el valor de λ en función de la reactancia $X_{d(sat)}$ para cortocircuitos máximo y mínimos.

Para el CC mínimo se utiliza λ_{min} y el valor de I_k'' se determina con c_{min} . En caso de un CC cercano al generador o a un grupo de generadores síncronos en paralelo se utiliza la ecuación 5.23.

$$I_{kmin} = \frac{c_{min}U_n}{\sqrt{3}Z_k} \quad (5.23)$$

La ecuación 5.23 calcula Z_k por medio de la matriz Z-bus y los generadores se sustituyen por su impedancia correspondiente. En lugar de utilizar la reactancia subtransitoria se utiliza la reactancia efectiva que se define en la ecuación 5.24.

$$X_{dP} = \frac{U_{rG}}{\sqrt{3}I_{kP}} \quad (5.24)$$

Donde sus parámetros son los siguientes:

- U_{rG} : es la tensión nominal del generador
- I_{kP} : es la corriente de régimen de CC en los bornes de la máquina y este dato es aportado por el fabricante.

Este último caso es muy similar al estudio teórico, donde la reactancia efectiva X_{dP} es X_d y la corriente en régimen es la suma de los aportes de cada generador. Esto es válido para un CC mínimo, pero para el máximo, el sistema de excitación y la saturación se deben tomar en cuenta para lograr mayor precisión.

En los capítulos 3 y 4 no se obtuvo una expresión exacta del régimen de CC, para el DFIG la corriente en régimen depende del flujo de rotor que induce el back-to-back mientras que los inversores dependen de su control y consigna de potencia. Por tanto, el fabricante proporciona la corriente I_k máxima y mínima.

Se extiende el problema a una red anillada dependiendo del tipo de CC que sea. En el caso de un CC mínimo, se observó que para el GS el cálculo de I_k es igual a I_k'' , solo debe sustituirse la reactancia subtransitoria del generador por su reactancia efectiva X_{dP} ¹⁴. Los generadores conectados por inversor no aportan al CC mínimo en el cálculo de I_k'' y se mantiene el mismo criterio. Para el DFIG el fabricante aporta la mínima corriente de CC en régimen, por lo tanto el DFIG deja de ser una impedancia y se considera como fuente de corriente. Manteniendo la lógica de los GF y FC, el aporte del DFIG se desprecia en el cálculo de un CC mínimo y la corriente se define según la ecuación 5.23.

Para el caso del máximo cortocircuito, se puede calcular el régimen de cada generador. El GS depende de λ que se halla a partir de las figuras 5.8 y 5.9, mientras que los generadores restantes tienen una corriente fija. En la norma se calcula de un modo distinto y entra en juego la corriente de break I_b . La razón es que cuando las protecciones locales al punto de falta actúan, algunos generadores aún no alcanzaron el estado de régimen. La corriente I_b determina la máxima corriente en la cual se despeja el CC, teniendo en cuenta el tiempo mínimo de operación del interruptor sin considerar posibles retardos.

¹⁴Es la reactancia de eje directo X_d

5.7. Comparación de las corrientes

Durante el transitorio de corriente cada generador tiene una respuesta propia que depende de distintas características. La norma establece los parámetros más relevantes de la corriente de CC en una red genérica y un método de cálculo para la corriente. Por lo visto hasta el momento, se comparó cada generador en un mismo marco de referencia y su efecto al agregarlo en una red anillada compleja.

El generador DFIG durante el transitorio responde a la dinámica del flujo natural y tiene un comportamiento similar al GS, la corriente se conforma de componentes de continua y alterna. Estas componentes dependen de la respuesta del convertidor a la falta. La componente alterna tiene dos frecuencias involucradas Ω_m y ω_s . Durante el transitorio la componente con frecuencia mecánica es predominante y una vez extinta, la corriente de régimen permanece a frecuencia de red. Este hecho lo distingue del GS, porque el punto de operación previo a la falta determina el deslizamiento y en consecuencia Ω_m . En la norma este efecto no se tiene en cuenta, la alterna simétrica se modela como una sinusoidal a frecuencia de red, cuyo valor eficaz decrece exponencialmente según τ_r' y la corriente subtransitoria se modela mediante una impedancia Z_{WD} que depende de la electrónica en potencia.

El efecto de la resistencia de crowbar es reducir la constante τ_r' al menos treinta veces. Por lo que el período transitorio es determinado por la componente de continua, a diferencia del GS cuyo período transitorio es determinado por τ_d' . En la norma el transitorio de ambos generadores depende de la componente de continua, la cual se aproxima en función de I_k'' y la relación $\frac{R}{X}$ de la impedancia vista hacia la red.

La corriente de pico depende de las componentes alterna simétrica y continua, el máximo ocurre cuando los flujos asociados a estas corrientes son opuestos. En el caso ideal el pico alcanza valores de $2\sqrt{2}I_k''$ en medio ciclo.

Para el DFIG, el pico máximo depende del deslizamiento previo, este pico puede darse antes o después de 10ms. Adicionalmente, las resistencias del sistema disminuyen las constantes de tiempo involucradas y el pico se reduce, por lo que el cociente $\frac{R}{X}$ ($R + jX$ impedancia vista desde la falta) es quien determina la magnitud del pico. La norma provee una expresión matemática para el cálculo. Este se basa en el pico de un circuito RL donde la impedancia utilizada es la del período subtransitorio. En este caso no se considera el decrecimiento de la envolvente de la alterna simétrica, por esto se utiliza $R_{Gf} > R_{G(1)}$ para el cálculo.

En el caso de un DFIG es la resistencia de crowbar lo que determina el decrecimiento de componente de alterna, pero ésta actúa luego de producirse el máximo valor de corriente debido a los propios retardos del generador. Finalmente el efecto de la resistencia R_{cb} no se tiene en cuenta para el cálculo del pico de corriente. Entonces la resistencia utilizada es la R_{WD} , que también depende del convertidor.

En el régimen, la corriente de CC del GS depende de la tensión interna del generador E_0 . Esta tensión depende del punto de operación previo al CC. El caso del DFIG es similar, la corriente de régimen depende del flujo forzado que impone el convertidor del lado del rotor. En régimen de CC la estrategia de control del

convertidor no depende de las condiciones previas sino que es específica para huecos de tensión o CC, cumpliendo con las exigencias de [2]. El fabricante proporciona los valores de corriente máxima y mínima en régimen de CC, se puede suponer que el generador aporta una corriente con valor RMS constante durante el período de régimen. En la norma se lo considera de esta forma y su corriente en régimen no depende de la red. Existen consideraciones adicionales de la norma para estos generadores que no se tuvieron en cuenta en el estudio como: la saturación, el sistema de excitación y las condiciones previas para el CC máximo y mínimo.

Durante el transitorio del GE y FC, el comportamiento depende exclusivamente del convertidor y su control. No hay flujo interno acumulado e implica que no hay componente de continua. El comportamiento resulta complejo de abordar mediante los métodos habituales de resolución de circuitos. Habitualmente se estudia el transitorio y su forma de onda a partir de simulaciones para topologías específicas, o bien se utilizan los datos de ensayos reales aportados por el fabricante. Dentro de los datos de fábrica se especifica la máxima corriente RMS que puede soportar el convertidor. Generalmente esta corriente máxima es la que admiten las llaves y es mayor a la que puede soportar térmicamente el convertidor en régimen permanente.

Dependiendo de la consigna de potencia, el control del inversor y las tensiones de referencia son los que determinan la corriente y el flujo de potencia hacia la red. En el instante previo a la falta el generador se encuentran trabajando en su MPP y si el inversor adquiere la consigna de no transmitir potencia activa a la red, en el caso del GF la potencia generada se acumula en el capacitor del DC-link. En el caso del FC la potencia puede acumularse en el DC-link o en el rotor de la máquina (en forma de energía cinética) dependiendo del control del convertidor. Este funcionamiento no puede ser permanente, debido a que se saturan los convertidores y se pierde el control de las distintas variables eléctricas. Por ello se utiliza la curva LVTR, la cual indica el tiempo que debe soportar la falta en función de la magnitud del hueco.

En resumen para estos generadores el transitorio no puede predecirse analíticamente y se lo estima en función de la máxima corriente que pueden dar sin dañarse. Lo que suceda del DC-link y el generador durante el transitorio no afecta la corriente vista desde la red. En comparación con los otros generadores, su transitorio tiene menor duración y la magnitud de su aporte es limitada estrictamente por el convertidor. En la norma se modela su aporte como una corriente sinusoidal de módulo constante, cuyo valor es el proporcionado por el fabricante, en la práctica la corriente de régimen queda determinada por la consigna de potencia indicada por el operador de la red. Este funcionamiento es similar al del DFIG el régimen, lo cual es coherente porque el DFIG dependerá solo del convertidor una vez mitigado el flujo natural.

En una red anillada se siguen las consideraciones mencionadas para cada generador. Para los generadores GF y FC, la norma indica que aportan una corriente máxima constante. Para los restantes tanto i_{DC} e i_p dependen de I_k'' . Aplicando la matriz Z-bus se obtiene la corriente total de cortocircuito como el aporte de cada tipo de generador a la corriente I_k'' . El pico y la componente de continua se determinan en función del cociente $\frac{R}{X}$. Para i_p se recomienda el cálculo de $\frac{R}{X}$

5.7. Comparación de las corrientes

usando el método de frecuencia equivalente con $f_c = 20Hz$ y para i_{DC} solo se utiliza este método con f_c dependiendo del tiempo. Para la corriente de régimen, el DFIG mitiga su flujo natural y pasa a depender del convertidor al igual que los GE y FC. Por lo que su aporte máximo es determinado por el fabricante y se considera que aporta una corriente constante.

Para los CC asimétricos, la secuencia cero de los generadores no se tuvo en cuenta porque todos los transformadores de conexión son Dyn. La secuencia inversa para los generadores no convencionales depende del control de los convertidores.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

Capítulo 6

Consecuencias en equipamiento y protecciones

6.1. Introducción

En este capítulo se analizan los efectos de la corriente de CC en los distintos componentes de la red, comparando en forma cualitativa el impacto de los distintos tipos de generador. Además se mencionan consideraciones a tener en cuenta para el correcto funcionamiento de los sistemas de protección de la red y la central generadora, tomando como marco de trabajo las exigencias mencionadas en [2].

6.2. Impacto de la corriente de CC en componentes de la red

En la presente sección se analiza el impacto de la corriente de CC en los principales componentes de la red según el tipo de generador. Como se verá a continuación, los parámetros que caracterizan este impacto son la corriente térmica I_{th} que se define según [1] y la corriente de pico i_p definida anteriormente. Para comparar de forma práctica el impacto de las corrientes de estos generadores a los CC se toma como ejemplo los valores obtenidos en [15] y [17] mediante simulaciones.

Capítulo 6. Consecuencias en equipamiento y protecciones

El estudio presentado por [17] muestra gráficas comparativas de las formas de onda de aerogeneradores DFIG y FC, donde se puede ver la diferencia en el valor de pico i_p entre ambos aerogeneradores (figura 6.1).

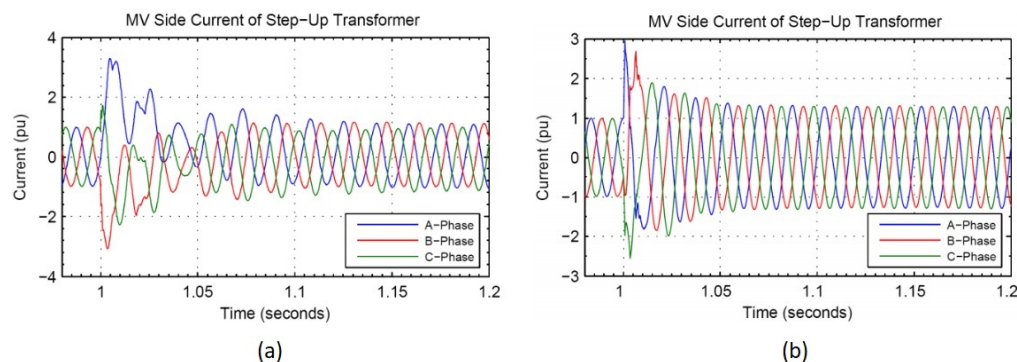


Figura 6.1: (a) Comportamiento de la corriente de CC de un aerogenerador DFIG genérico, (b) Comportamiento de la corriente de CC de un aerogenerador FC genérico. [17]

6.3. Consideraciones para sistemas de protección de la red

6.3.1. Interruptores

Poder de corte

La norma [1] propone considerar la corriente de break I_b para elegir interruptores en función de su poder de corte. En la siguiente sección se define la corriente I_b según la norma y como calcular esta corriente para cada tipo de generador.

Corriente de break

La corriente de break indica el valor RMS de la corriente alterna simétrica en el instante que se separa el primer polo del interruptor.

Para el caso de un GS, antes de involucrarse en el cálculo de la corriente I_b es preciso determinar los siguientes parámetros:

- “*minimum time delay*” (t_{min}): Se define “Mínimo tiempo entre el inicio de la corriente de cortocircuito y la separación de contactos del primer polo del interruptor”. Es la suma de los tiempos mínimos de operación del relé y del interruptor, pero no se tiene en cuenta retardos ajustables de disparo del relé.
- I_{rG} : Es la corriente nominal del generador.
- I''_{kG} : Es la corriente subtransitoria aportada por el GS.

6.3. Consideraciones para sistemas de protección de la red

Para un cortocircuito trifásico la corriente I_b se define en la ecuación 6.1.

$$I_b = \mu I''_{kmax} \quad (6.1)$$

Donde el factor μ se define según la ecuación 6.2.

$$\mu = 0,84 + 0,24e^{-0,26 \frac{I''_{kG}}{I_{rG}}} \quad t_{min} = 0,02s \quad (6.2)$$

$$\mu = 0,71 + 0,51e^{-0,3 \frac{I''_{kG}}{I_{rG}}} \quad t_{min} = 0,05s \quad (6.3)$$

$$\mu = 0,62 + 0,72e^{-0,26 \frac{I''_{kG}}{I_{rG}}} \quad t_{min} = 0,1s \quad (6.4)$$

$$\mu = 0,56 + 0,94e^{-0,26 \frac{I''_{kG}}{I_{rG}}} \quad t_{min} > 0,25s \quad (6.5)$$

Considerando la forma de onda de corriente de una MS, el valor RMS de la corriente alterna simétrica disminuye con el tiempo. Es por eso que la corriente I_b disminuye si el tiempo mínimo de apertura t_{min} aumenta, en este caso el parámetro μ disminuye. Para cualquier valor de t_{min} , si $\frac{I''_{kG}}{I_{kG}} \leq 2$ se considera $\mu \approx 1$. Entonces la función $\mu(\frac{I''_{kG}}{I_{kG}})$ es constante para $\frac{I''_{kG}}{I_{kG}} \leq 2$ y luego $\mu(\frac{I''_{kG}}{I_{kG}})$ depende del tiempo t_{min} propio del modelo de interruptor, como se muestra en la figura 6.2.

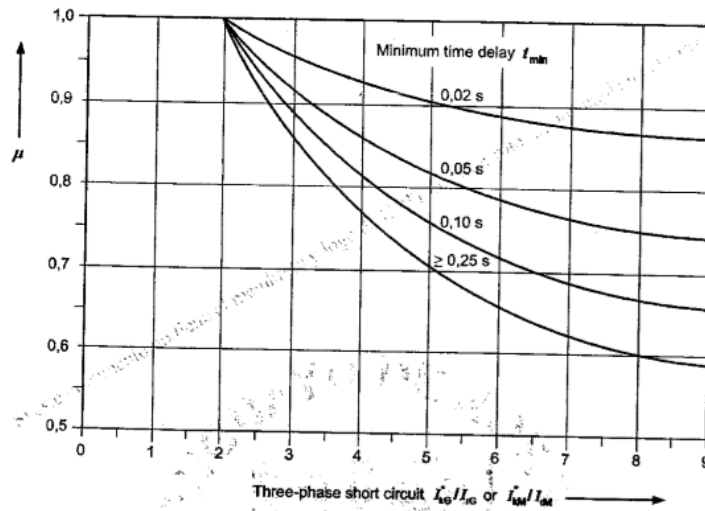


Figura 6.2: Factor μ en función de la corriente para distintos tiempos t_{min} [1]

Para el caso de un DFIG la expresión para I_b es similar, según la ecuación 6.6.

$$I_b = \mu_{WD} I''_{kWD} \quad (6.6)$$

El valor de μ se deduce a partir de los parámetros del fabricante según 6.7.

$$\mu_{WD} = \frac{I_{kWDmax}}{I''_{kWD}} \quad (6.7)$$

Capítulo 6. Consecuencias en equipamiento y protecciones

La corriente $I_{kW Dmax}$ es la corriente de cortocircuito permanente máxima y es un dato aportado por el fabricante.

En el caso del GF y FC la corriente máxima es $I_{kPFjmax}$, que es un dato aportado por el fabricante.

Si el cortocircuito se alimenta por múltiples generadores en anillo, entonces la corriente I_b es la subtransitoria máxima. Para un cortocircuito asimétrico las corrientes de break son iguales a las subtransitorias máximas, en el caso de 2FT se elige I''_{k2Emax} ¹.

Consideraciones en el caso de un DFIG

En la sección 3.6.2 se muestra una expresión para la corriente total de CC de un DFIG, que es la de la ecuación 3.42. En 3.6.3 se vio que al aumentar la resistencia de Crowbar R_{cb} , la constante de tiempo del rotor disminuye según la ecuación 3.44. Esto provoca que la componente de la corriente de estator atribuida al flujo natural del rotor se extinga más rápido. En la figura 6.3 se observa lo recién mencionado. La componente alterna simétrica decae más rápido para valores mayores de R_{cb} .

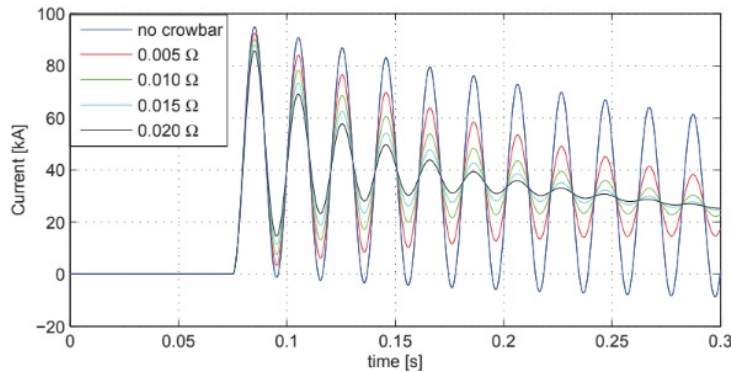


Figura 6.3: Corriente de cortocircuito de un DFIG para distintos valores de R_{cb} . [18]

Según [18], con valores grandes de R_{cb} es posible que la componente alterna simétrica disminuya mucho más rápido que la componente i_{DC} . En este caso la corriente demora varios ciclos antes del primer cruce por cero. Este fenómeno es denominado en la literatura como “*delayed current zeros*” (DCZ) y puede prolongar el tiempo del arco de corriente dentro del interruptor, provocando un mayor calentamiento durante la apertura del interruptor y posiblemente no se logre interrumpir la corriente. Esto sucede porque el arco que se forma al separar los contactos se extingue en el momento en que la corriente instantánea vale cero ($i_s(t) = 0$). En [18] se realizaron simulaciones que consideran el voltaje del arco producido en el interruptor. Mayores voltajes del arco provocan que la componente DC de la corriente decaiga más rápido. Entonces es necesario que el voltaje del arco tenga valores mínimos como para asegurar una rápida caída de la corriente DC y garantizar que el tiempo de permanencia del arco no supere el tiempo

¹Es la corriente que circula por la tierra, representado en la figura 1.1.

6.3. Consideraciones para sistemas de protección de la red

máximo de arco que soporta el interruptor. Generalmente los interruptores de SF_6 tienen voltajes de arco mayores que los interruptores de vacío ya que la resistencia durante el arco es mayor [18].

En [1] se hace referencia al fenómeno DCZ en una nota cuando se define la corriente simétrica de break I_b para una máquina síncrona, mencionando que para CC cercanos al generador se debe considerar la resistencia de arco del interruptor y calcular las componentes AC y DC de la corriente.

El aerogenerador DFIG presenta también otro problema a tener en cuenta para seleccionar correctamente el interruptor a utilizar. Este inconveniente surge de que la componente de la corriente alterna simétrica provocada por el flujo natural del rotor tiene velocidad angular $p\omega_m$, con p el número de pares de polos y ω_m es la frecuencia de giro del rotor. Dependiendo del deslizamiento previo a la falta, esta corriente puede tener frecuencia supersíncrona o subsíncrona, con una variación con respecto a la frecuencia de la red de $\pm 30\%$

Para el caso de frecuencias supersíncronas, el valor de la derivada $|\frac{di(t)}{dt}|$ más grande que para la frecuencia de la red puede provocar que el interruptor no logre extinguir exitosamente la corriente. Esto se debe a que en el instante que la corriente cruza por cero la conductividad del gas en el camino del arco aún puede tener un valor distinto de cero. Aún circula una pequeña corriente provocada por el transitorio de recomposición de voltaje (TRV). Si esta corriente aumenta rápidamente puede aumentar la temperatura y conductividad del gas y así restablecer el arco.

En el caso de frecuencias subsíncronas, la duración del arco entre dos cruces por cero podría ser suficiente para calentar el gas a una temperatura tal que, luego del cruce por cero, la conductividad del gas sea suficiente como para restablecer el arco. Para un interruptor convencional, los ensayos se realizan considerando la corriente a frecuencia nominal. Para poder interrumpir los aportes de corriente a un CC cercano a un DFIG, deben considerarse los tiempos máximos posibles de arco, la resistencia del arco y la duración máxima del mismo en base al cálculo de la corriente DC y alterna simétrica.

6.3.2. Consideraciones para protecciones

En el marco de análisis del comportamiento de los generadores estudiados frente a cortocircuitos, es importante para la configuración del esquema de protección del parque considerar las exigencias presentadas en [2] para huecos de tensión. Estas exigencias restringen el uso de las funciones de protección que puedan provocar aperturas no deseadas del interruptor en el punto de enlace. Solo se puede desconectar de la red cuando la tensión residual del hueco es menor al 20% de la tensión de operación normal, o para valores mayores respetando la curva de las figuras 1.3 o 1.4 según corresponda. Los relés numéricos utilizados actualmente son capaces de operar generando señales de disparo por subtensión (27) con distintos tiempos de retardo según el nivel de tensión residual. Considerando que los equipos del parque generador son correctamente dimensionados para soportar los transitorios de corriente mencionados para el tipo de generador que corresponda, las protecciones

Capítulo 6. Consecuencias en equipamiento y protecciones

de sobrecorriente direccional (67) solo deben disparar en el caso de existir sobrecorriente desde la red hacia el parque luego de transcurrido un tiempo de retardo. Este retardo es seleccionado de forma de lograr selectividad con las protecciones de cada generador y de las líneas colectoras dentro del parque. En la figura 6.4 se puede ver el esquema unifilar para el caso de un parque de aerogeneradores.

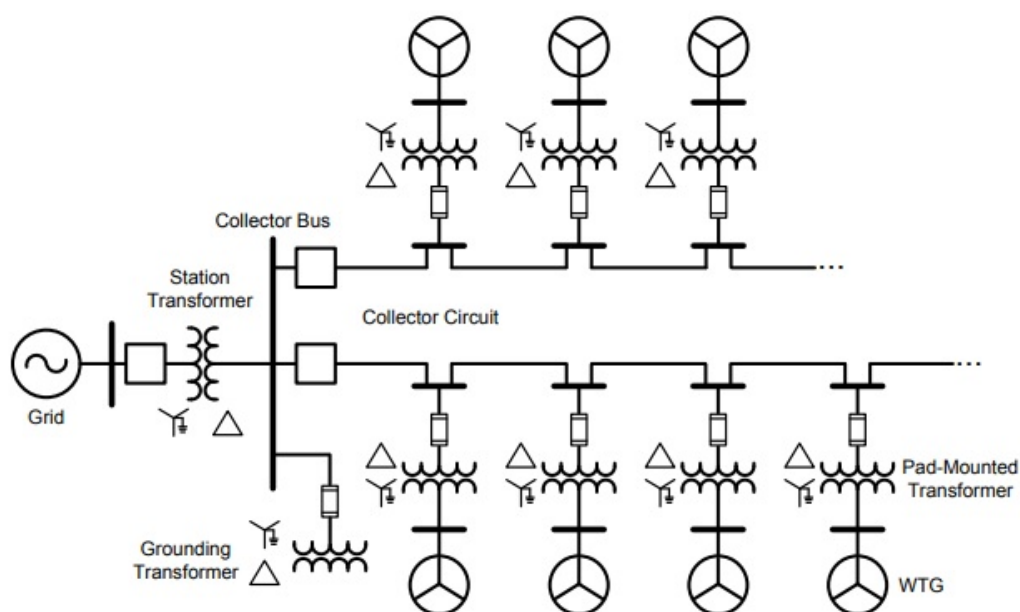


Figura 6.4: Esquema unifilar simplificado típico de un parque de aerogeneradores. [19]

En cuanto al posible mal funcionamiento de las funciones de protección de los relés, en [20] se realizó un estudio del comportamiento de las protecciones de distancia (21) en puntos de la red cercanos a parques aerogeneradores, puntualmente para DFIG y FC. Los resultados del estudio indican que la presencia de este tipo de generadores en la red no alteró la operación de las protecciones de distancia. No obstante, se menciona que los generadores DFIG son los que más alteran el cálculo de la impedancia, que es el principio de operación de la protección de distancia [21]. Esto se debe a que la corriente alterna simétrica de estos aerogeneradores pueden ser mayores a la de red en régimen supersíncrono. Dado que la impedancia de la red es mayormente inductiva, ésta aumenta con la frecuencia. En [19] se describe el sistema de protección de las líneas colectoras dentro del parque. Se afirma que los transformadores que elevan la tensión del nivel del generador a media tensión generalmente están protegidos por fusibles. Las protecciones de las líneas colectoras deben proporcionar un respaldo a las protecciones de estos transformadores previendo no disparar con la corriente de Inrush de los transformadores durante la energización. Este esquema de protección tampoco debe interferir con los requerimientos LVRT. Generalmente se utilizan protecciones direccionales en cada salida de la barra colectora de media tensión hacia las líneas colectoras en media tensión. De esta forma se detectan faltas dentro del parque. Estas protecciones también

6.3. Consideraciones para sistemas de protección de la red

deben tener bloqueo de actuación por armónicos durante la energización de los transformadores por corriente de inrush. Estos esquemas de protección se utilizan independientemente del tipo generador que se utilice en el parque. En [19] también se estudia el caso de disparos no deseados de protecciones direccionales como las recién mencionadas. El caso de estudio se trata de un parque eólico compuesto por aerogeneradores FC. En este caso se generaban señales de disparo de protecciones direccionales en líneas colectoras sin estar en falta cuando ocurría una falta F-F-T en otra línea colectora dentro del parque. Se concluyó que esta señal se produce debido a que el sistema de control de los aerogeneradores de la línea en falta busca balancear la corriente de falta en las tres fases. Esto provoca que las protecciones direccionales de las líneas que no están en falta vean un circuito capacitivo hacia la red debido a la relación de ángulos entre las corriente y voltajes de secuencia inversa, entonces se genera una señal falsa de corriente hacia la línea. La dirección de la falta es determinada por el cálculo de la impedancia de secuencia negativa Z_2 que depende del valor seteado que corresponde al argumento de la impedancia de secuencia positiva de la línea Z_1ANG . Una posible solución presentada en [19] consta de setear el ángulo Z_1ANG en un valor bajo. También se plantea proteger las líneas con esquemas de protección diferencial, que no se ven afectados por el sistema de control de los aerogeneradores.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

Capítulo 7

Conclusiones

En este proyecto se estudió el comportamiento de las corrientes de CC de distintos tipos de generadores conectados a la red uruguaya y sus consecuencias en el SE. Analizamos el desempeño dinámico para cada caso de forma teórica, para luego compararlos e incorporarlos en la red mediante la norma IEC [1]. Para poder estudiar las consecuencias en el SE uruguayo, se requirió conocer los “*grid code*” designados por UTE respecto al fenómeno hueco de tensión. El modelo dinámico y las corrientes de CC del GS han sido estudiados por muchos años debido a que esta tecnología es utilizada en todo el mundo desde hace más de un siglo. Los generadores no convencionales estudiados fueron el FC, GF y DFIG, de los cuales se obtuvieron similitudes y diferencias con respecto a la corriente de CC aportada por un GS.

El factor determinante en los generadores no convencionales es la electrónica presente en los circuitos de potencia, así como los “*grid code*” designados por UTE.

Se dedujo de la respuesta de CC de los generadores FC y GF que no tienen ninguna similitud con el GS. A pesar que el FC es una máquina síncrona conectada a la red por medio de un back-to-back, el convertidor es quien determina la dinámica de la corriente de CC. En este tipo de generador toda la potencia que se intercambia con la red pasa por el convertidor, la curva LVRT, consigna de potencia indicada por DNC, señales de referencia y el control del convertidor son quienes determinan la corriente de CC inyectada a la red. Por lo tanto la acción del generador ante un CC es independiente de la fuente de generación de energía (máquina síncrona o panel). Su transitorio es impredecible, como el inversor es un dispositivo sensible a las corrientes elevadas, el fabricante aporta la corriente máxima que puede soportar.

En el caso del GS y DFIG durante el transitorio se depende de las condiciones previas al CC, porque el flujo magnético previo de la máquina debe conservarse. Esto implica que exista una componente de continua y otra de alterna, para el GS la alterna tiene tres períodos: subtransitorio, transitorio y régimen, mientras que el DFIG tiene un período transitorio y de régimen.

En los períodos previos al régimen la corriente alterna tiene una envolvente que decrece exponencialmente, que se produce por la resistencia de cada devanado involucrado. Durante el transitorio el DFIG tiene una diferencia substancial con

Capítulo 7. Conclusiones

el GS y es el hecho que la corriente alterna tiene una componente a frecuencia de red ω_s y frecuencia mecánica $p\omega_m = \Omega_m$. El DFIG tiene una protección adicional llamada resistencia de crowbar, este dispositivo protege al convertidor del lado del rotor contra sobretensiones. Adicionalmente, cumple la función de mitigar con mayor velocidad la componente asociada al flujo natural del rotor (alterna de frecuencia Ω_m). En este caso es posible que la corriente total demore varios ciclos antes del primer cruce por cero y debe ser tenido en cuenta para la selección del interruptor, en particular la resistencia del arco. La componente de frecuencia mecánica es la predominante y quiere decir que existe un desbalance de frecuencia. Dicho desbalance depende del punto de operación previo de la máquina, cuando el deslizamiento es máximo puede provocar que el arco mitigado por el interruptor se reestablezca. El flujo natural del DFIG es mitigado y entra en estado de régimen, luego su comportamiento depende del convertidor del lado del rotor. Siendo distinto al GS y se parece más al FC o GF.

Cuando se involucran todos los generadores en una red anillada, los GF y FC son fuentes de corrientes en función de la máxima corriente que soportan. El DFIG tiene un doble comportamiento, cuando sucede el transitorio el funcionamiento es parecido al GS y cuando se encuentra el régimen es como el FC y GF. Quiere decir que ante el cálculo de la corriente máxima de cortocircuito el DFIG y GS tienen predominancia sobre los FC y GF, esto se ve reflejado en las hipótesis de la norma para cálculo de CC máximos.

Por otra parte se analizó la corriente de pico y térmica, que permite dimensionar el estrés mecánico y térmico de los distintos equipamientos de la red como las barras, conductores y el transformador. En consecuencia, el DFIG y el GS al tener una componente asociada al flujo natural su corriente de pico y térmica es superior al caso del GF y FC.

Apéndice A

Transformadas

A.1. Transformada de Park o DQ0

La transformada de Park o DQ0 se basa en una transformación lineal que permite descomponer un sistema estrellado fijo en posición en una base móvil solidaria al eje del rotor.

Las diferentes bases se pueden apreciar gráficamente mediante la imagen A.1.

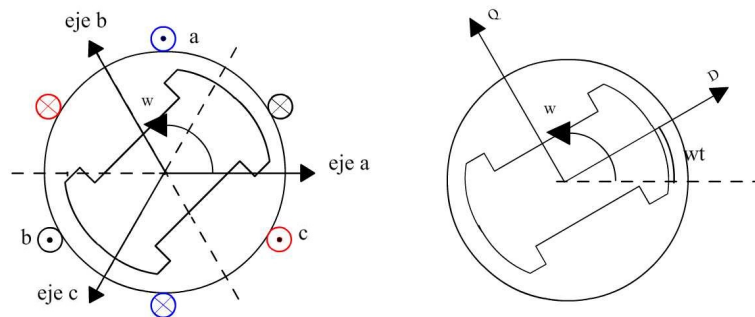


Figura A.1: Sistema de referencia ABC y DQ0

La componente 0 de la nueva base está definida como la componente homopolar, no es apreciable físicamente y solo indica el desbalance eléctrico entre las diferentes fases. La componente d se define eje directo y q eje en cuadratura.

Matemáticamente se representa la transformada como A.1

$$\begin{pmatrix} I_d \\ I_q \\ I_0 \end{pmatrix} = \frac{2}{3} \begin{pmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\text{sen}(\theta) & -\text{sen}(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\text{sen}(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ 0,5 & 0,5 & 0,5 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{pmatrix} \quad (\text{A.1})$$

La transformada inversa está definida por A.2

Apéndice A. Transformadas

$$\begin{pmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\theta) & -\text{sen}(\theta) & 1 \\ \cos(\theta) - \frac{2\pi}{3} & -\text{sen}(\theta - \frac{2\pi}{3}) & 1 \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & -\text{sen}(\theta + \frac{2\pi}{3}) & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_d \\ I_q \\ I_0 \end{pmatrix} \quad (\text{A.2})$$

Los eje d y q son ortonormales y giran a ωt , por lo tanto puede aplicarse la lógica de fasores temporales definiendo d como el eje real y q como el imaginario. Aplicando la transformada de Park a un sistema trifásico perfecto y equilibrado, la corriente en términos vectoriales (I_d, I_q) se transforma en coordenadas complejas como $I_d + jI_q$ y para la tensión es $V_d + jV_q$. Entonces la potencia se define según la ecuación A.3.

$$\begin{aligned} P &= V_d I_d + V_q I_q \\ Q &= -V_d I_q + V_q I_d \end{aligned} \quad (\text{A.3})$$

A.2. Componentes simétricas

Las componentes simétricas se basan en el teorema de Fortescue que plantea que cualquier sistema polifásico (n fases) desequilibrado puede modelarse por medio de n sistemas polifásicos equilibrados aplicando superposición. Siempre que las tensiones y corrientes se relacionen linealmente permitiendo aplicar la superposición de circuitos. En el caso de sistemas trifásicos se descompone en sus componentes directa, inversa y homopolar. Matemáticamente queda expresado el problema según la ecuación A.4.

$$\begin{pmatrix} V_h \\ V_d \\ V_i \end{pmatrix} = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{pmatrix} \quad (\text{A.4})$$

Donde $a = e^{\frac{2\pi}{3}j}$ y las componentes de fases quedan expresadas en función de las simétricas según la ecuación A.5

$$\begin{pmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_h \\ V_d \\ V_i \end{pmatrix} \quad (\text{A.5})$$

Apéndice B

Electrónica de potencia

B.1. Introducción

Los generadores no convencionales que estudiamos en el proyecto son los aerogeneradores y el generador fotovoltaico. Un punto importante que los diferencia del generador síncrono es la electrónica de potencia involucrada en sus circuitos. En la sección actual se describe el funcionamiento y aplicaciones de la electrónica involucrada.

B.2. Inversores

En esta sección se exponen algunos fundamentos sobre inversores presentados en [22] y [23].

El inversor es un dispositivo capaz de transmitir potencia entre un sistema de continua y uno de alterna. La entrada del inversor puede ser una fuente de corriente o de tensión por lo cual se definen dos tipos de inversores los VSI y los CSI. Los VSI utilizan la tensión de continua como variable de entrada y los CSI usan la corriente. Como se indica en [22], en general se utilizan con más frecuencia los VSI, que son los que se analizan en esta sección. La salida del inversor es una tensión alterna periódica cuyo contenido armónico varía según el tipo de inversor y de modulación. En general se busca controlar la amplitud del armónico fundamental y eliminar la máxima cantidad posible de armónicos.

En las aplicaciones de potencia la frecuencia fundamental es la de red y la reducción del contenido armónico de la tensión es importante por los siguientes motivos:

- En primer lugar, se debe cumplir con lo indicado en el reglamento de UTE con respecto al contenido armónico de tensión y corriente introducidos en la red.
- Por otro lado, en aplicaciones como en aerogeneradores FC y DFIG, las máquinas son conectadas directamente a los convertidores, y las corrientes

Apéndice B. Electrónica de potencia

con contenido armónico apreciable provocan sobretensiones que eventualmente dañan la aislación de los bobinados.

Durante la sección no se habla en términos temporales sino en términos angulares. La razón es que se considera una relación lineal entre tiempo y ángulo $\theta = \omega t$.

B.2.1. Rama inversora

dos niveles

Se le llama de 'dos niveles' porque la tensión del lado de alterna del convertidor es una onda rectangular que oscila entre los valores $+\frac{E}{2}$ y $-\frac{E}{2}$, con referencia al punto medio de la tensión del lado de continua E . En la figura B.1 se encuentra la topología de la rama inversora y su tensión de alterna.

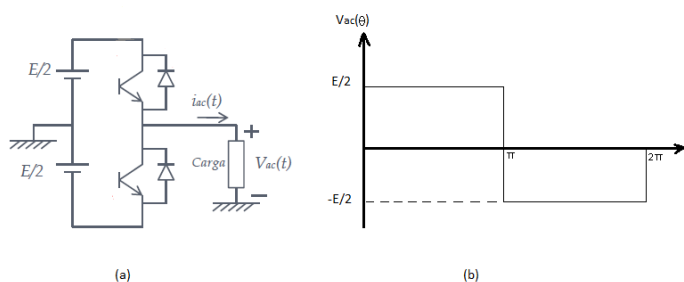


Figura B.1: (a) Topología de una rama inversora de dos estados, adaptado de [22]. (b) Tensión de alterna de la rama.

Las llaves son transistores (IGBT en general) con un diodo antiparalelo. Para lograr el punto medio se utilizan dos capacitores de igual capacidad en serie cargados a una tensión E . Al tener la misma capacidad ambos se cargan a $\frac{E}{2}$ y su objetivo es mantener la tensión cuando la llave lo conecte con la carga.

El contenido armónico de la tensión para este caso es la ecuación B.1.

$$C_n = \frac{2}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} V_{ac}(\theta) \text{sen}(n\theta) d\theta = \frac{2E}{2\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \text{sen}(\theta) d\theta = \frac{E}{n\pi} \text{sen}\left(\frac{n\pi}{2}\right) \forall n \neq 2 \quad (\text{B.1})$$

Tres niveles

La salida de la rama inversora de tres niveles puede tomar los valores $+\frac{E}{2}$, $-\frac{E}{2}$ y 0. En la figura B.2 se muestra una rama inversora de tres estados para un inversor trifásico y los posibles valores de tensión de salida.

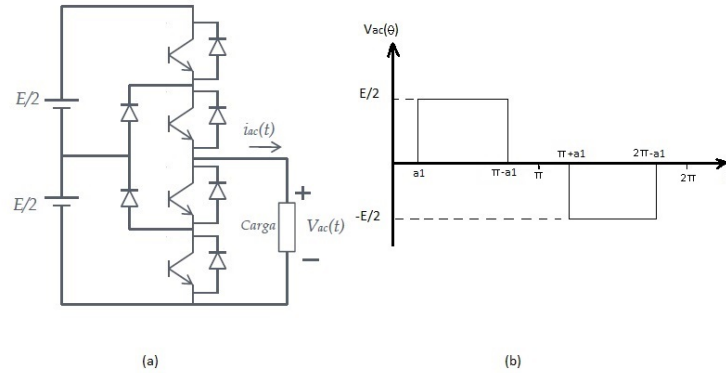


Figura B.2: (a) Topología de una rama inversora de tres estados, adaptado de [22]. (b) Tensión de salida de la rama.

Se utilizan capacitores, transistores y diodos para la construcción de la rama como se indicó en la rama de dos estados B.2.1.

El contenido armónico depende de los ángulos de conmutación entre los distintos valores de tensión. La expresión analítica para C_n en función del ángulo de conmutación a_1 de la figura B.2 es la ecuación B.2.

$$C_n = \frac{2}{\pi} \int_{a_1}^{\frac{\pi}{2}} V_{ac}(\theta) \text{sen}(n\theta) d\theta = \frac{2E}{2\pi} \int_{a_1}^{\frac{\pi}{2}} \text{sen}(\theta) d\theta = \frac{E}{n\pi} \cos(a_1 n) \forall n \neq 2 \quad (\text{B.2})$$

B.2.2. Inversor trifásico

El inversor está compuesto por tres ramas inversoras, que pueden ser de dos, tres, o incluso más estados. La tensión de alterna de las tres ramas están desfasadas 120° formando un sistema trifásico cuya fundamental es de frecuencia de la red.

Para sistemas trifásicos con carga equilibrada, las tensiones compuestas y fase-neutro de salida del inversor guardan la relación $\frac{|U_{FF}|}{V_{FN}} = \sqrt{3}$ y además no presentan armónicos $\dot{3}$, como es de esperarse en un sistema trifásico.

Generalmente se usa alguna de las técnicas de eliminación de armónicos PWM como los mencionados en B.2.3 para eliminar la mayor cantidad de armónicos posibles. La simetría respecto al cuarto período elimina los armónicos pares y la topología de las ramas elimina los armónicos $\dot{3}$.

B.2.3. Modulación por ancho de pulso

La iteración de las llaves determina la onda de tensión periódica y su espectro. Para obtener una tensión de frecuencia fundamental eliminando la mayor cantidad

Apéndice B. Electrónica de potencia

posible de armónicos no deseados, se utiliza la técnica de modulación por ancho de pulso PWM.

PWM calculado

Para la eliminación explícita de armónicos se usa el control PWM calculado. Este método consiste en el cálculo de los ángulos de conmutación necesarios para eliminar armónicos específicos. La expresión del armónico n depende de la cantidad de estados de la rama inversora y del número de conmutaciones en un cuarto de período¹.

En el caso del control PWM de 2 y 3 estados, se agregan conmutaciones en los ángulos $\theta = 0$ y $\theta = 2\pi$, estas dos conmutaciones no están presentes en el control PWM de tres estados modificado. La expresión del armónico C_n para la salida de un inversor que alterna entre $\frac{E}{2}$ y $-\frac{E}{2}$ es:

- PWM calculado 2 estados: $C_n = \frac{E}{n\pi} \sin\left(\frac{n\pi}{2}\right) [1 + 2 \sum_{k=1}^M (-1)^k \cos(n\alpha_k)] \forall n \neq \dot{2}$
- PWM calculado 3 estados: $C_n = \frac{E}{n\pi} \sin\left(\frac{n\pi}{2}\right) [1 + \sum_{k=1}^M (-1)^k \cos(n\alpha_k)] \forall n \neq \dot{2}$
- PWM calculado 3 estados modificado: $C_n = \frac{E}{n\pi} \sin\left(\frac{n\pi}{2}\right) [\sum_{k=1}^M (-1)^{k+1} \cos(n\alpha_k)] \forall n \neq \dot{2}$

En todos los casos debe cumplirse $\alpha_1 < \alpha_2 < \dots < \alpha_M < \frac{\pi}{2}$. Con M conmutaciones se puede controlar el valor del primer armónico y eliminar los primeros $M - 1$ armónicos siguientes. En el caso de PWM calculado de 2 o 3 estados, hay $4 * M + 2$ conmutaciones por período y con PWM modificado son $4 * M$ conmutaciones.

PWM sinusoidal (PWMS)

El PWMS se basa en comparar las siguientes ondas:

- Onda modulante: Señal sinusoidal cuya frecuencia es igual a la red y amplitud U_m .
- Onda portadora: Señal triangular de frecuencia pf (p es la razón de frecuencias) y amplitud U_p .

La llave conduce cuando la onda modulante es mayor a la portadora y bloquea si es menor. La técnica consta en que el primer armónico no deseado en no eliminarse es del orden p para un dos estados y $2p$ para un tres estados. Por otra parte la amplitud de la tensión de salida depende de la tensión de continua y las amplitudes de las señales mencionadas. Se define el índice de modulación según la ecuación B.3.

¹La tensión generada por el inversor es simétrica respecto al medio período para que la serie de Fourier sea de senos o cosenos exclusivamente. Agregando la restricción del cuarto período se eliminan los armónicos pares.

$$m_\alpha = \frac{U_m}{U_p} \quad (\text{B.3})$$

En general la amplitud de la onda triangular es 1 y el índice es igual a la amplitud de la onda modulante. El inversor posee tres regiones: lineal, sobremodulada y onda cuadrada que se muestra en la figura B.3. Dependiendo del índice será la relación entre la tensión de continua y de línea. La zona lineal es válida siempre que el índice sea menor a uno y la relación entre las tensiones es la ecuación B.4.

$$U = \sqrt{3} \frac{E}{2\sqrt{2}} m_\alpha = 0,612Em_\alpha \quad (\text{B.4})$$

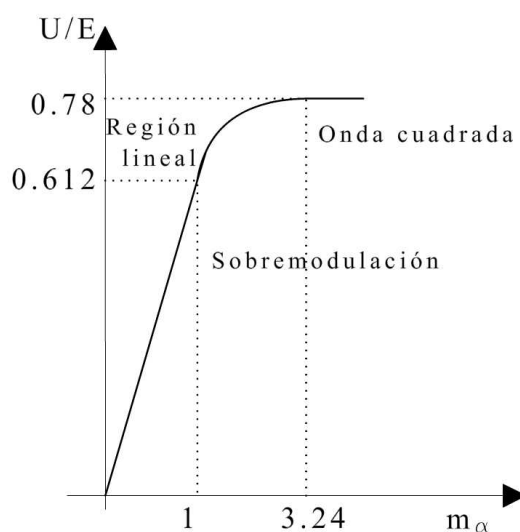


Figura B.3: Regiones de modulación

Las regiones restantes son para un índice mayor a uno e implican la pérdida de relación lineal entre la tensión de alterna y continua. En la tesis se asume el inversor en zona lineal y la máxima tensión de línea eficaz del armónico fundamental es 61.2% de la tensión de continua. Mientras que la tensión de fase es 35%.

Controlando la frecuencia de la onda portadora p se elige la cantidad de armónicos no deseados eliminados y mediante la amplitud de la onda modulante m se controla la amplitud del armónico fundamental. Por lo cual es posible controlar el valor del primer armónico y limpiar el residuo armónico inmediatamente.

Vectores espaciales (SVM)

Los tipos de modulación mencionados consisten de tres sistemas monofásicos independientes con su onda modulante respectiva. El método de modulación por vectores espaciales trata al inversor trifásico como una sola unidad y no como tres

Apéndice B. Electrónica de potencia

ramas independientes. El principio de operación se basa en el campo rotativo generado por tres bobinados desfasados 120° espacial y eléctricamente. Se transforma la tensión de referencia deseada a la salida del inversor en un vector giratorio² como el caso del campo rotativo. La modulación SVM intenta aproximar en fase y módulo, los vectores complejos de tensión de un sistema equilibrado. Esto se logra mediante un control que opera sobre la conmutación de cada llave de las tres ramas inversoras.

En cada rama de inversor solo puede conducir una llave para evitar un cortocircuito. Si el inversor trifásico se compone de seis llaves, hay dos llaves por cada rama que corresponde a cada fase. Es un inversor trifásico de dos estados y existen 2^3 combinaciones para la iteración de las llaves. Que solo las llaves superiores o inferiores conduzcan se determinan como vector nulo. Los vectores espaciales restantes se definen vectores activos con módulo $\frac{2E}{3}$ y desfasados $\frac{2\pi}{6}$ entre ellos. Los vectores se expresan en la ecuación B.5.

$$\begin{aligned} \overline{V}_k &= \frac{2E}{3} e^{j\frac{\pi}{3}(k-1)} & k = 1, 6 \\ \overline{V}_k &= 0 & k = 0, 7 \end{aligned} \quad (\text{B.5})$$

El vector de referencia se define como vector de trayectoria circular según la ecuación B.6.

$$\overline{V}_s^* = V^* e^{j\omega t} \quad (\text{B.6})$$

El vector de referencia gira en torno a los vectores fijos y tiene como origen los vectores nulos, por lo cual puede descomponerse el vector V_s^* en una base de los mismos. Se muestrea el vector de referencia con un período $\Delta T = \frac{1}{2f_{red}}$ (tiempo de subciclo) y se descompone \overline{V}_s^* en torno a $\overline{V}_a, \overline{V}_b$ y \overline{V}_N . Donde los primeros dos son los vectores activos adyacentes y el último es uno de los vectores nulos. Se define la ecuación B.7 que relaciona el tiempo de actuación de cada combinación y la descomposición del vector V_s^* .

$$\begin{aligned} t_a V_a + t_b V_b + t_0 V_N &= t_a V_a + t_b V_b = V_s^* \Delta T \\ t_a + t_b + t_0 &= \Delta T \\ \overline{V}_s^* &= v_a \overline{V}_a + v_b \overline{V}_b \end{aligned} \quad (\text{B.7})$$

Los tiempos t_a, t_b y t_N son los tiempos de actuación de cada combinación, v_a y v_b son las proyecciones de la referencia en la base. Los tiempos de actuación se pueden expresar como en la ecuación B.8.

$$\begin{aligned} t_a &= \Delta T \frac{v_a}{|\overline{V}_a|} \\ t_b &= \Delta T \frac{v_b}{|\overline{V}_b|} \\ t_0 &= \Delta T - t_a - t_b \end{aligned} \quad (\text{B.8})$$

El módulo máximo del vector es $\frac{E}{\sqrt{3}}$ y el índice de modulación se determina como la ecuación B.9.

²La frecuencia de giro es igual al sistema AC al que se conecta el inversor y el vector puede verse como un fasor que gira en el plano complejo

$$m_\alpha = \frac{\pi}{2E} V_{FN} \quad (\text{B.9})$$

La tensión V_{FN} es el armónico fundamental de la tensión de salida del inversor que se desea modular, la misma es máxima cuando se maximiza el vector de referencia $\frac{E}{\sqrt{3}}$. El índice máximo es $m_\alpha = 0,9069$. Por lo cual la máxima tensión de fase del armónico fundamental es un 90 % de la tensión de continua en zona lineal.

B.2.4. Inversor conectado a la red y parámetros de fabricante

En los generadores analizados en esta tesis el inversor se encuentra conectado a la red de potencia por medio de una reactancia. Mediante el PWM y con filtros pasivos a la salida del inversor se logra cumplir con la consigna de armónicos de los *grid code*. Si se considera que la tensión de alterna del inversor es puramente sinusoidal se analiza su conexión a la red mediante el diagrama fasorial de la figura B.4.

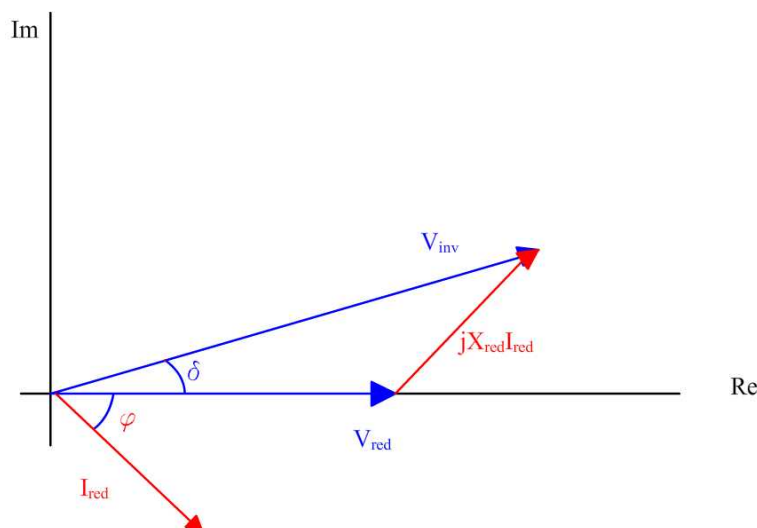


Figura B.4: Diagrama fasorial del inversor conectado a la red

En el diagrama las tensiones expresadas son de fase-neutro y X_{red} es la reactancia que conecta la red con el inversor. El intercambio de potencia depende de la magnitud y fase de la tensión del inversor, que es controlada mediante alguna de las estrategias de modulación mencionadas en la sección B.2.3. El análisis en términos fasoriales de la transmisión de potencia a la red es igual al caso presentado en la sección 2.3.3.

Los parámetros del lado de alterna son los siguientes:

- Tensión nominal: el fabricante aporta la tensión de red a la que debe conectarse el inversor.
- Tensión máxima y mínima: como la tensión de red no es constante y sufre desbalance se aporta el intervalo en el cual el inversor puede operar.

Apéndice B. Electrónica de potencia

- Corriente nominal: Es la corriente que puede circular por el inversor en condiciones nominal.
- Corriente máxima: Es la máxima corriente que puede circular por el inversor hasta producirse la falla del equipo.
- Potencia nominal: Es la potencia que es capaz de transmitir el inversor en condiciones nominales.
- Potencia máxima: Es la potencia máxima que puede transmitir el inversor.
- Factor de potencia: Es el factor de potencia en condiciones nominales.
- Distorsión armónica: Es el coeficiente THDi del inversor, que indica el contenido armónico que inyecta a la red en condiciones nominales.

Los parámetros del lado de continua son los siguientes:

- Tensión nominal: Es la tensión del bus de continua sugerida por el fabricante para poder transmitir la potencia nominal del inversor.
- Tensión de continua máxima: Es la máxima tensión del bus de continua cuando el inversor se encuentra el vacío.
- Corriente máxima: Es la corriente máxima que puede circular por el bus de continua del inversor.

Otro parámetro aportado que es afín a ambos lados es el rendimiento del inversor y se calcula como el cociente de la potencia nominal DC sobre la AC nominal.

B.3. Convertidor Back-to-Back

B.3.1. Rectificador e inversor

Es un dispositivo de conversión AC-AC que transmite potencia activa entre dos sistemas de alterna trifásica a través de un sistema de continua intermedio. Se compone de dos etapas, la primera es un rectificador (convertidor AC-DC) conectado a un puente de continua. La segunda es el puente de continua conectado a un inversor cuya salida es la red. La característica que lo diferencia de otras topologías similares es que el rectificador del Back-to-Back es un inversor que consume potencia activa.

El rectificador y el inversor son implementados con ramas de dos, tres o más niveles dependiendo del nivel de tensión para el que se construye el convertidor y el contenido armónico que se desea eliminar. Las tensiones de entrada y de salida del convertidor se construyen mediante el comando de las llaves del rectificador y del inversor con las técnicas mencionadas en la sección B.2.3.

B.3.2. Puente de continua

Es comúnmente llamado DC-link o bus de continua y es el nexo entre los sistemas de alterna en un back-to-back o simplemente la conexión de continua de un inversor solo. Por el DC-link fluye la potencia activa que el inversor transfiere al sistema de alterna trifásico (la red). La tensión de salida del inversor depende linealmente de la tensión de continua y del índice de modulación. Es preferible controlar la señal de la onda modulante a variar la tensión del DC-link, para mantener constante la tensión se utiliza un capacitor en paralelo. El valor del capacitor depende de la potencia nominal que debe transmitir, el nivel de tensión nominal, la frecuencia de la red y el rizado máximo deseado de la tensión. Evitar que la tensión del DC-link aumente permite respetar las características constructivas del inversor³ y asegura un flujo de potencia activa constante. Además la transmisión de potencia en un sistema de continua desde la tensión V_1 hacia V_2 por medio de una resistencia R se representa en la ecuación B.10.

$$P_{DC} = V_2 \frac{V_1 - V_2}{R} \quad (\text{B.10})$$

La potencia entrante al inversor es aportada por una fuente DC⁴ y la tensión del DC-link V_2 determina la potencia que puede transmitir el inversor. El no respetar la tensión de operación genera desbalances que son absorbidos por el capacitor que se carga o descarga dependiendo de la situación.

B.3.3. Circuito chopper

Durante los transitorios producidos por huecos de tensión o cortocircuitos, el generador debe cumplir con las consignas establecidas en los *grid codes*. Los desbalances de potencia de entrada y salida del DC-link pueden producir un aumento excesivo y repentino en la tensión. Para mitigar este efecto sin inyectar potencia activa a la red se implementa un circuito *chopper* (figura B.5) que mediante el comando de cierre de una llave, se habilita el paso de corriente hacia una resistencia que descarga el excedente de carga del capacitor.

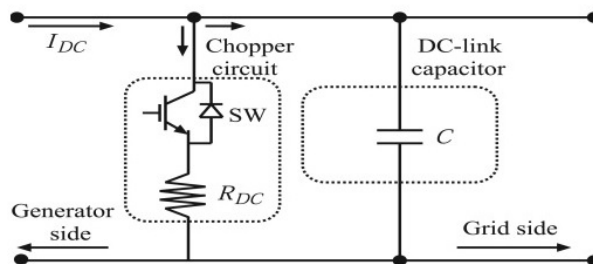


Figura B.5: Esquema del puente DC con su capacitor y circuito chopper

³La tensión de continua depende de la topología del inversor y la capacidad de bloqueo de cada llave.

⁴La fuente puede ser considerada como la salida de un rectificador en un punto de operación, o la salida de un Boost que mantenga la tensión estable

B.4. Control del back-to-back

Como se explicó en la sección B.3 el convertidor se modela como dos inversores conectados por su DC-link, donde uno funciona como inversor y otro como rectificador. Los sistemas de control son independientes y la estrategia de control de cada uno depende de su función (rectificador o inversor).

B.4.1. Control del inversor

Un inversor puede poseer múltiples lógicas de control que funcionan en paralelo y actúan en función de la situación o la consigna de funcionamiento. La técnica utilizada para establecer las consignas determinadas por la lógica de control es “control en modo corriente”, que busca que las corrientes de línea realicen un seguimiento a corrientes de referencia. Las corrientes de referencias se crean en función de consignas de potencia que pueden ser externas (impuestas por el DNC) o internas (potencia proveniente del DC-link).

Para simplificar el cálculo se utiliza la transformada de Park y la corriente de referencia se obtiene en esta este marco de referencias. Para realizar las transformada se necesita el ángulo instantáneo de la onda y para ello se utiliza un dispositivo PLL. Se realiza la transformada a la tensión de red $V = (V_d, V_q)$ y a la corriente de red $I = (I_d, I_q)$ que se obtienen a partir de transformadores de medida. Las potencias activas y reactivas quedan definidas según la ecuación B.11.

$$\begin{aligned} P &= V_d I_d + V_q I_q \\ Q &= -V_d I_q + V_q I_d \end{aligned} \quad (\text{B.11})$$

Por la topología de las ramas inversoras la corriente homopolar no puede circular y por eso no se las tiene en cuenta en las definiciones de potencia. Las corrientes de referencia se puede obtener de diferentes maneras, pero en la bibliografía consultada [24], [5] predominan dos: una de ellas busca controlar el DC-link y otra utiliza una consigna de potencia externa.

La potencia por el link de continua es la transmitida a la red, a excepción de las pérdidas del propio inversor. Si existe un desbalance de potencia entonces comienza a circular potencia por el capacitor del link de continua y se carga o descarga dependiendo del tipo de desbalance. Quiere decir que si la tensión del link de continua se mantiene constante en torno a un valor de referencia, la potencia del generador circula hacia la red y las pérdidas del inversor. Por otra parte si se alinea el fasor de la tensión de red con el eje directo la potencia directa es $V_d I_d$ y la reactiva $-V_d I_q$.

La tensión se pueden asumir como una entrada al sistema porque las corrientes son las variables que se desea controlar. La potencia activa que dependía del link de continua depende directamente de I_d . Entonces se puede establecer que la corriente directa de referencia (I_{dref}) depende del control de la tensión de continua.

B.4. Control del back-to-back

El control de la tensión se realiza mediante un controlador PI que compara la tensión instantánea con la referencia. Si la tensión aumenta es porque el capacitor se carga, la potencia del link de continua es mayor a la que se transmite hacia la red. La corriente directa de referencia debe aumentar para lograr transmitir toda la potencia del DC-link hacia la red y análogamente para el otro caso. La corriente de referencia de cuadratura es más sencilla porque depende directamente de la consigna de potencia reactiva deseada y es $I_{qref} = -\frac{Q}{V_d}$.

Una vez definidas las corrientes de referencia se utiliza un controlador PI para compararlas con las corrientes medidas y obtener la caída de tensión en la impedancia de red. La salida del bloque PI se suma a la tensión de red medida y se obtiene la tensión deseada en el inversor.

Se calcula el índice de modulación dividiendo el módulo de la tensión por el factor $0,612E$, donde E es la tensión del DC-link. La fase de la onda modulante es la fase deseada más el ángulo instantáneo de la red que se obtiene del PLL.

En el segundo método las corrientes de referencias se alinean a una consigna de potencia. La potencia reactiva y activa de referencia determina las corrientes según la ecuación B.12.

$$\begin{aligned} I_d &= \frac{PV_d + QV_q}{V_d^2 + V_q^2} \\ I_q &= \frac{PV_q - QV_d}{V_d^2 + V_q^2} \end{aligned} \quad (\text{B.12})$$

Estas lógicas de control tienen particular utilidad en generadores, ya que los generadores no convencionales utilizan algoritmos que optimizan la potencia extraída. Entonces, en su funcionamiento normal se entrega la potencia máxima a la red, en este caso la consigna para el inversor es inyectar a la red la potencia transmitida al DC-link. Por otra parte, cuando sucede un cortocircuito el generador debe seguir referencias P_{ref} y Q_{ref} establecidas por el operador de la red. A partir de estas referencias de potencia se determinan las nuevas referencias de corriente.

B.4.2. Control del rectificador

En este caso no es necesario controlar la tensión del DC-link ya que es controlada por el inversor. La función del rectificador consiste en establecer la potencia eléctrica transferida al DC-link.

En el caso de aerogeneradores full converter, el rectificador determina la eficiencia del generador como convertidor electromecánico, típicamente la referencia de potencia es determinada por la lógica del control aerodinámico que busca el punto de máxima extracción de potencia del viento.

La corriente directa de referencia depende de la consigna de potencia a inyectar al DC-link, mientras que la corriente en cuadratura, asociada a potencia reactiva depende de la tensión de operación del DC-link.⁵

⁵ El back-to-back transfiere potencia activa, la potencia reactiva puede ser diferente a cada lado del convertidor.

B.5. Boost elevador

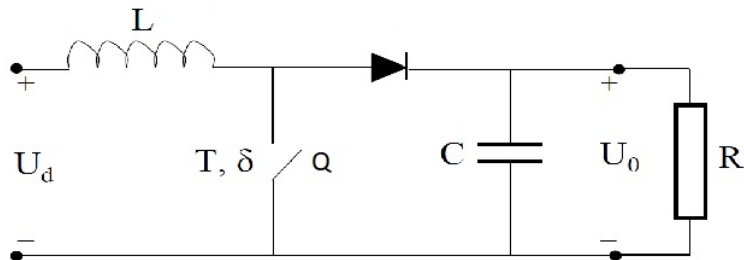


Figura B.6: Esquema del circuito del Boost elevador [22]

En algunos casos, los convertidores DC-AC incluyen un convertidor DC-DC tipo boost (figura B.6) para elevar y controlar la tensión de continua que llega al inversor. La transferencia en modo de conducción continua para la tensión de entrada y salida de este circuito se indica en la ecuación B.13 donde δ es el ciclo de trabajo de la llave Q en el período T .

$$\frac{U_o}{U_i} = \frac{\delta}{1 - \delta} \quad (\text{B.13})$$

Apéndice C

Impedancias según Norma IEC 60909

En esta sección se presenta el método de cálculo según [1], de las impedancias asociadas a los componentes de la red que no fueron mencionados en el documento de la tesis, y que inciden en el cálculo de la corriente de cortocircuito.

C.1. Transformadores

C.1.1. Dos devanados

La impedancia de secuencia positiva del transformador queda dada por $Z_T = R_T + jX_T$ Donde:

$$\begin{aligned} Z_T &= \frac{u_{Rr} \cdot U_{rT}^2}{100 \% \cdot S_{rT}} \\ R_T &= \frac{u_{Rr}}{100 \%} \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}} = \frac{P_{krT}}{3I_{rT}^2} \\ X_T &= \sqrt{Z_T^2 - R_T^2} \end{aligned} \quad (C.1)$$

Los parámetros involucrados son:

- U_{rT} Es el voltaje nominal del transformador.
- I_{rT} Es la corriente nominal del transformador.
- S_{rT} Es la potencia aparente del transformador.
- P_{krT} Es la potencia total de pérdidas en los bobinados a corriente nominal.
- u_{kr} Es el voltaje de cortocircuito a corriente nominal en %.
- u_{Rr} Es la componente resistiva del voltaje de cortocircuito en %.

Apéndice C. Impedancias según Norma IEC 60909

C.1.2. Tres devanados

Los tres devanados del transformador quedan representados según como se indica a continuación:

$$Z_{AB} = \left(\frac{U_{RrAB}}{100\%} + j \frac{U_{XrAB}}{100\%} \right) \frac{U_{rTA}^2}{S_{rTAB}} \quad (\text{Con } C \text{ Abierto})$$

$$Z_{AC} = \left(\frac{U_{RrAC}}{100\%} + j \frac{U_{XrAC}}{100\%} \right) \frac{U_{rTA}^2}{S_{rTAC}} \quad (\text{Con } B \text{ Abierto})$$

$$Z_{BC} = \left(\frac{U_{RrBC}}{100\%} + j \frac{U_{XrBC}}{100\%} \right) \frac{U_{rTA}^2}{S_{rTBC}} \quad (\text{Con } A \text{ Abierto})$$

$$\text{Donde} \quad u_{Xr} = \sqrt{u_{kr}^2 - u_{Rr}^2} \quad (\text{C.2})$$

$$Z_A = \frac{1}{2}(Z_{AB} + Z_{AC} - Z_{BC})$$

$$Z_B = \frac{1}{2}(Z_{BC} + Z_{AB} - Z_{AC})$$

$$Z_C = \frac{1}{2}(Z_{AC} + Z_{BC} - Z_{AB})$$

Los parámetros involucrados son:

- U_{rTA} El valor de voltaje desde el lado A
- S_{rTXY} Es la potencia entre X y Y (siendo A , B o C)
- u_{RrXY} Es la componente de la resistencia de cortocircuito entre X y Y (siendo A , B o C)

C.2. Impedancia de la red

si un cortocircuito trifásico es alimentado por una red de la que se conoce el valor de la corriente simétrica inicial de cortocircuito I''_{kQ} , entonces la impedancia equivalente de la red es:

$$Z_Q = \frac{c \cdot U_{nQ}}{\sqrt{3} \cdot I''_{kQ}} \quad (\text{C.3})$$

Si se conoce la relación $\frac{R_Q}{X_Q}$, se calcula X_Q como:

$$Z_Q = \frac{Z_Q}{\sqrt{1 + (R_Q/X_Q)^2}} \quad (\text{C.4})$$

Si el cortocircuito es alimentado por una red de media o alta tensión a través de un transformador, la impedancia equivalente del lado secundario es:

$$Z_{QT} = \frac{c \cdot U_{nQ}}{\sqrt{3} \cdot I''_{kQ} \cdot t_r^2} \quad (\text{C.5})$$

Donde:

- U_{nQ} Es la tensión nominal de conexión en el panel.
- I''_{kQ} Es la corriente simétrica de cortocircuito inicial
- c Es el factor de voltaje
- t_r Es la posición del cambiador de tomas del transformador

C.3. Líneas y Cables

La representación de secuencia positiva de cable y líneas será la siguiente $Z_L = R_L + jXL$.

C.4. Motores

La impedancia de secuencia positiva del motor asíncrono queda determinada por:

$$Z_M = \frac{U_{rM}^2}{\frac{I_{LR}}{I_{rM}} \cdot S_{rM}} \quad (C.6)$$

- U_{rM} es el Voltaje nominal del Motor
- S_{rM} es la potencia aparente del Motor
- $\frac{I_{LR}}{I_{rM}}$ Es la relación entre la corriente con rotor bloqueado y la corriente nominal.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

Apéndice D

Ejemplo cortocircuito en vacío alimentado por un GS

La presente sección consiste de un ejemplo de cortocircuito en vacío. Éste se presenta con el fin de ilustrar en un caso práctico el análisis teórico de un cortocircuito y mostrar numéricamente la dependencia de la corriente en función de los distintos parámetros.

La máquina propuesta es un turboalternador de dos polos, extraída de [7] y sus datos son los siguientes:

- $X_d = 1,1pu$
- $X'_d = 0,16pu$
- $X''_d = 0,09pu$
- $\tau_i = 0,09s$
- $\tau'_d = 0,6s$
- $\tau''_d = 0,035s$

Como se mencionó en 2.4.1 $X_d > X'_d > X''_d$, por otra parte τ''_d es la menor de las constantes y por ende tiene el tiempo de actuación más rápido que las restantes. Además τ_i es menor a τ'_d y el período transitorio queda determinado por la última constante.

Se realizan las gráficas de cortocircuitos a partir del software MATLAB, todos los datos son en pu y para simplificar cálculo $E_0 = 1pu$ donde la fase A es origen de fase. El orden es el siguiente:

- Variación de la fase de E_0 en el instante de CC y corroborar el pico máximo de CC.

Apéndice D. Ejemplo cortocircuito en vacío alimentado por un GS

- Aumento y disminución de las distintas reactancias, con el objetivo de ver las distintas corrientes I_d'', I_d' e I_{ccp} .
- Aumento y disminución de las constantes de tiempo, con el objetivo de ver la duración del cc.

En el primer caso de estudio se estudia la respuesta para distintos ángulos de fase de la tensión interna en el instante de CC. Se estudian los casos con ángulos: 0 , $\frac{\pi}{2}$ y $\frac{\pi}{4}$, las gráficas presentadas muestran la corriente de la fase A descompuesta en sus dos componentes.

En la figura D.1 se encuentra el caso de ángulo nulo.

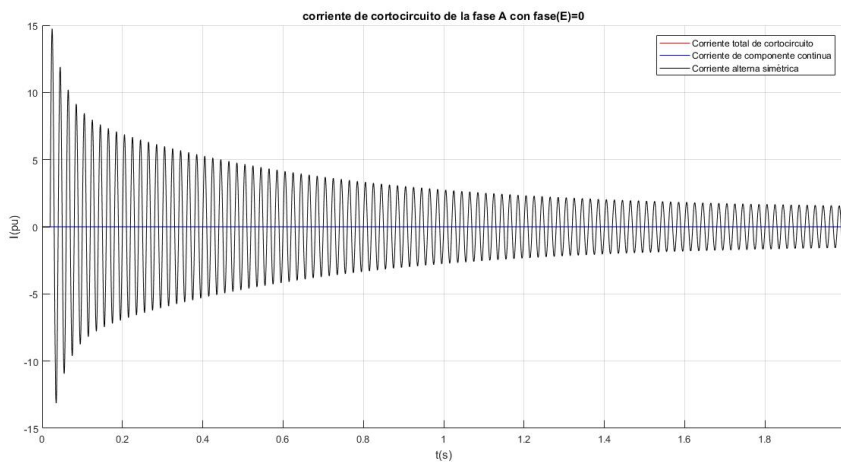


Figura D.1: Forma de onda de corriente de CC para tensión interna con $\gamma = 0$

En la figura D.2 se encuentra el caso de ángulo $\frac{\pi}{4}$.

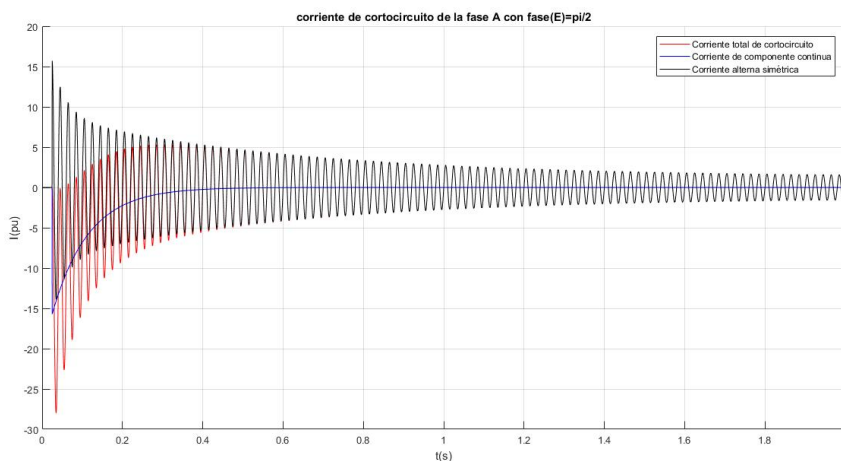


Figura D.2: Forma de onda de corriente de CC para tensión interna con $\gamma = \frac{\pi}{4}$

En la figura D.3 se encuentra el caso de ángulo $\frac{\pi}{2}$.

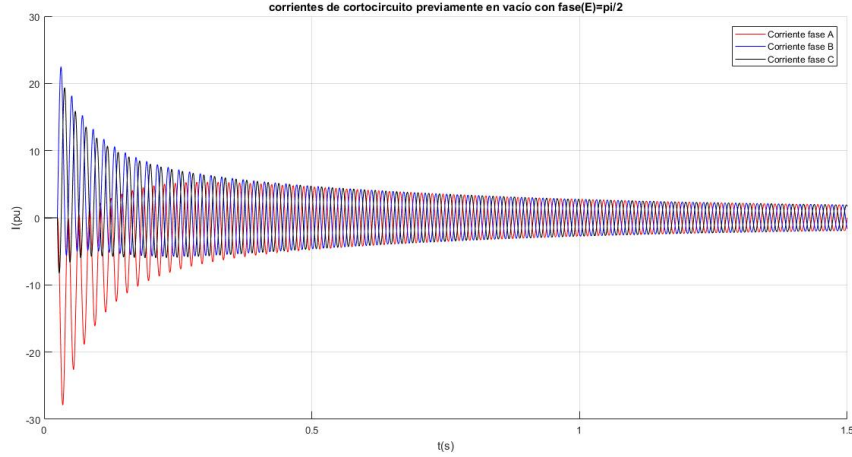


Figura D.3: Forma de onda de corriente de CC para tensión interna con $\gamma = \frac{\pi}{2}$

Las figuras D.1 D.2 y D.3 permiten ver las características de la curva que se modifican para distintos ángulos γ .

El módulo de la corriente alterna simétrica es igual para todos los casos y por lo tanto la corriente de régimen en todos los casos tienden a su valor de régimen $I_{ccp} = \frac{1pu}{1,1pu} \sqrt{2} = 1,27pu$. La tendencia al valor régimen es porque la constante transitoria es del orden de segundos, se asume que en $3\tau'_d$ converge con un error del 5%. Si la constante es 0,6s, se asume que en 1,8s converge al menos a $\sqrt{2}(I_{ccp} + 0,05(I'_d - I_{ccp})) \approx 1,66pu$.

La fase de la alterna simétrica cambia y se desfasa $\gamma = \angle E - \frac{\pi}{2}$, por lo tanto el valor instantáneo de la corriente alterna simétrica es $I''_d \cos(\gamma)$. Cuando γ es 0 o π instantáneamente la corriente es I''_d y si es $\pm \frac{\pi}{2}$ la corriente instantánea es nula. Como la componente de continua mantiene la continuidad de la corriente, la constante $I_{u0} = -I_{as}(0)$. Dentro de las hipótesis trabajadas la corriente es directa, entonces la componente continua de la fase A es máxima cuando $\angle E = \frac{\pi}{2}$ (Figura D.2) y se minimiza cuando es 0(Figura D.1)¹. El valor máximo de la constante de continua es $\sqrt{2}I''_d = \sqrt{2} \frac{1pu}{X''_d} \approx 15,71pu$. El valor mínimo de la corriente I_{u0} es cero cuando la fase nula. Las fases restantes adquieren un valor de $\frac{\sqrt{3}}{2}I''_d \approx 13,6pu$.

El valor de pico máximo se estimó como $I_{din} = 2,5I''_d \approx 27,8pu$.
para caso son los siguientes:

- $I_p @ \angle E = 0 \approx 14,73pu$

¹el valor de las fases son relativas, en este caso los ángulo son 0 y $\frac{\pi}{2}$ porque la tensión interna se modelo como un coseno. Si se hubiese modelado como un seno entonces la sería al revez.

Apéndice D. Ejemplo cortocircuito en vacío alimentado por un GS

- $I_p @ \angle E = \frac{\pi}{4} \approx 23,18 pu$
- $I_p @ \angle E = \frac{\pi}{2} \approx 27,9 pu$

El máximo se alcanza en $\angle E = \frac{\pi}{2}$ lo cual es lógico por lo mencionado. La I_{din} deriva de una aproximación práctica asumiendo que la corriente no supera $1,8\sqrt{2}I_d''$, cuando en realidad era $2\sqrt{2}I_d'' = 30 pu$. Por lo cual es razonable la aproximación por la I_{din} , inclusive el error es de 0.1pu, entonces la aproximación como tal se considera correcta. Solo se estudia la fase A, pero se puede realizar el mismo análisis para las fases restantes. El pico máximo en cada fase se da cuando I_{u0} de la fase correspondiente se maximiza, que es $\angle E = \pm \frac{\pi}{2} \pm \frac{2\pi}{3}$. El ángulo $\pm \frac{2\pi}{3}$ depende de la fase que se quiera maximizar, el pico máximo de B se da con $\angle E = \pm \frac{\pi}{2} - \frac{2\pi}{3}$ y la fase C en $\angle E = \pm \frac{\pi}{2} + \frac{2\pi}{3}$.

El ángulo de fase influye principalmente en el valor pico de la corriente de cortocircuito, debido a que la fase maximiza el flujo magnético interno instantáneo del GS.

En el segundo caso de estudio se aumentan y reducen todas las reactancias un 20% y para maximizar el pico de la fase A $\angle E = \frac{\pi}{2}$. La gráfica de la figura D.3 se considera como punto de comparación para el caso en que se modifica la reactancia.

En la figura D.4 se encuentra el caso de aumentar las reactancias.

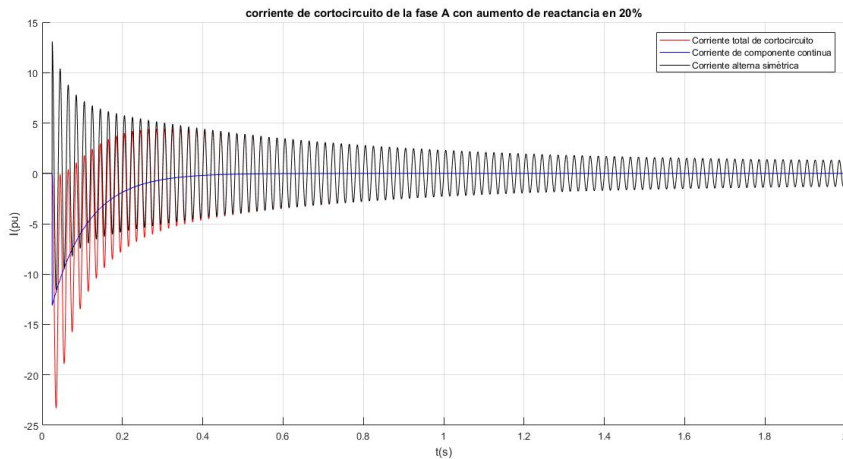


Figura D.4: Forma de onda de corriente de CC para el caso en que se aumentan las reactancias

En la figura D.5 se encuentra el caso de reducir las reactancias.

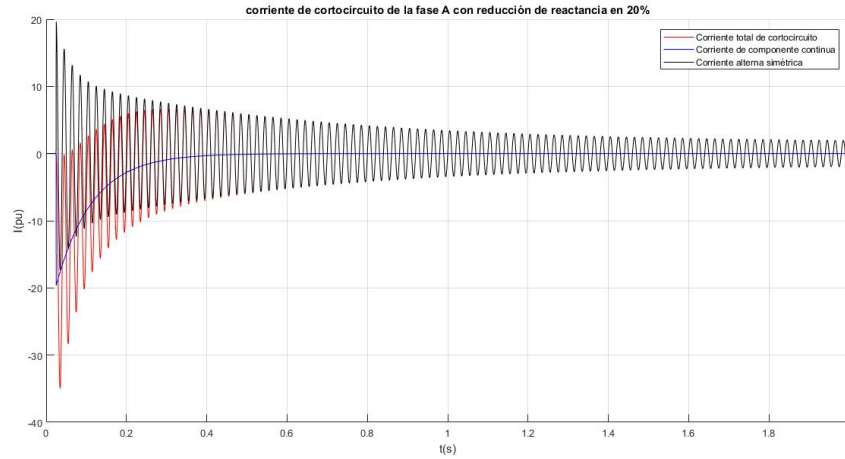


Figura D.5: Forma de onda de corriente de CC para el caso en que se reducen las reactancias

Un cambio en las reactancias modifica totalmente la curva, tanto en sus componentes de continua como alterna simétrica. La última solo modifica su magnitud, en una máquina real modificar las reactancias altera las constantes de tiempo. En el ejemplo se cambia un grupo de parámetros y se deja los otros fijos aunque estos estén relacionados.

La componente alterna simétrica es inversamente proporcional a las reactancias y la componente continua depende según $I_{u0} = -Id''^2$, por lo tanto la constante de continua es inversamente proporcional a la reactancia. Quiere decir que el pico queda determinado por X_d'' .

La magnitud de las reactancias, a niveles prácticos influye en el pico de corriente y el régimen. La I_d' permite modelar la curva en su totalidad, pero el valor máximo y mínimo lo determinan I_d'' e I_d .

²El ángulo de la tensión interna maximiza la corriente de componente continua.

Apéndice D. Ejemplo cortocircuito en vacío alimentado por un GS

A continuación se ilustra el efecto de aumentar y reducir las constantes de tiempo en un 50%. En la figura D.6 se encuentra el caso de aumentar las constantes.

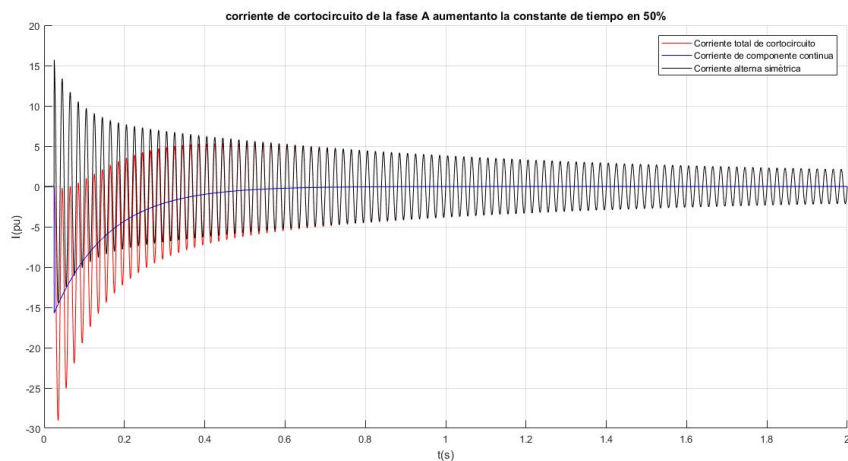


Figura D.6: Forma de onda de corriente de CC para el caso en que se aumentan las constantes

En la figura D.7 se encuentra el caso de reducir las constantes.

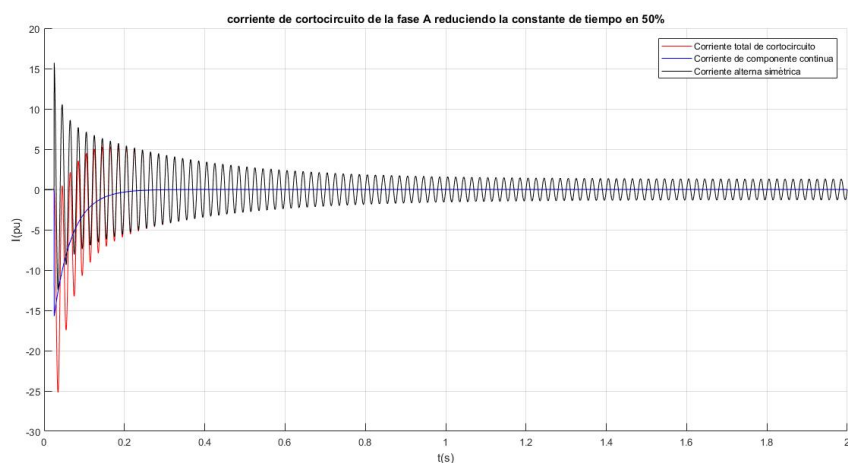


Figura D.7: Forma de onda de corriente de CC para el caso en que se reducen las constantes

Se puede observar que al aumentar las constantes, el transitorio dura más tiempo. La corriente de pico máximo depende de la hipótesis de que $\tau_i > \tau_d''$, cuanto mayor sea la diferencia, la corriente de pico se acerca a I_{din} o en su defecto a $2,8I_d''$. Aumentando la constante τ_i el valor de pico aumenta, si se aumentara solo τ_d'' la corriente de pico se reduce.

En el caso de disminuir las constantes la respuesta en régimen se alcanza con el doble de velocidad, es decir que la corriente total de cortocircuito tiende a la

simétrica en la mitad del tiempo. Mientras que la $I_{as}(t)$ tiende al régimen con el doble de tiempo.

En resumen los aspectos prácticos que determinan la corriente de cortocircuito son:

- X_d'' : Determina I_d'' , la cual es útil para determinar el pico de la corriente.
- X_d : Determina la corriente en régimen de cortocircuito.
- τ_d' : Determina la duración del cortocircuito.
- τ_d'' y τ_i : Colaboran a determinar las condiciones de pico máximo.
- I_{u0} : Depende de I_d'' y modela la componente de continua.

El resto de los parámetros determinan en su totalidad la corriente, pero con los mencionados anteriormente basta para modelarla con sus respectivas limitaciones.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

Apéndice E

Panel solar

E.1. Modelo ideal de la celda fotovoltaica

Si la irradiancia se mantiene constante y uniforme en toda la superficie del panel se tiene un movimiento o aporte constante de los electrones y huecos por el colector generando una corriente I_{ph} . La juntura n-p es un diodo sometido a una diferencia de tensión en paralelo con I_{ph} . Entonces se modela la celda ideal como una fuente de corriente I_{ph} en paralelo con un diodo n-p (figura E.1).

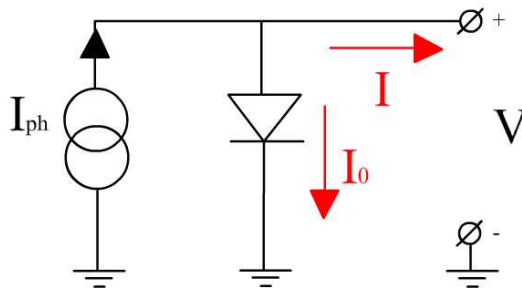


Figura E.1: Modelo ideal de la celda solar

El diodo se considera real y su ecuación característica es E.1.

$$I_d = I_{s0} \left(e^{\frac{V}{\eta V_t}} - 1 \right) \quad (\text{E.1})$$

Los parámetros influyentes en la corriente de diodo es la corriente de saturación inversa I_{s0} , el potencial térmico V_t y el factor de idealidad η . Aplicando Kirchhoff queda definida la corriente entregada a la red como E.2.

$$I(V) = I_{ph} - I_{s0} \left(e^{\frac{V}{\eta V_t}} - 1 \right) \quad (\text{E.2})$$

E.1.1. Relación I-V y P-V

Curva I-V

Otros generadores se modelan como sistemas lineales, en este caso el diodo es no lineal y es necesario observar la curva de $I - V$ para determinar la relación de potencia $P = VI$. En el modelo ideal se considera el factor de idealidad $\eta = 1$, la I_{ph} es constante.

La relación V-I es exponencial y lo principal en este estudio son tres puntos:

- Circuito abierto V_{oc}
- Cortocircuito I_{sc}
- Punto de potencia máxima(MPP) (V_{mpp}, I_{mpp})

El circuito abierto se da cuando la corriente es nula y el cortocircuito sucede cuando la tensión es nula. El punto de potencia máxima se obtiene maximizando el producto tensión corriente y se encuentra en el codo de la función $I(V)$. La relación entre la tensión y corriente que maximizan la potencia se define como resistencia característica $R_{ch} = \frac{V_{mpp}}{I_{mpp}} \approx \frac{V_{oc}}{I_{sc}}$ y es un dato proporcionado por el fabricante. Las expresiones quedan definidas en la ecuación E.3.

$$\begin{aligned} V_{oc} &= V_t \ln\left(\frac{I_{ph}}{I_{s0}} + 1\right) \\ I_{sc} &= I_{ph} \\ \frac{V_{mpp}}{I_{mpp}} &\approx \frac{V_{oc}}{I_{sc}} \end{aligned} \tag{E.3}$$

No se calcula expresión analítica del MPP debido a que $\frac{\delta}{\delta t} P(V) = 0$ no tiene solución analítica por lo que se calcula una solución computacional. Las curvas se observan en la figura E.2.

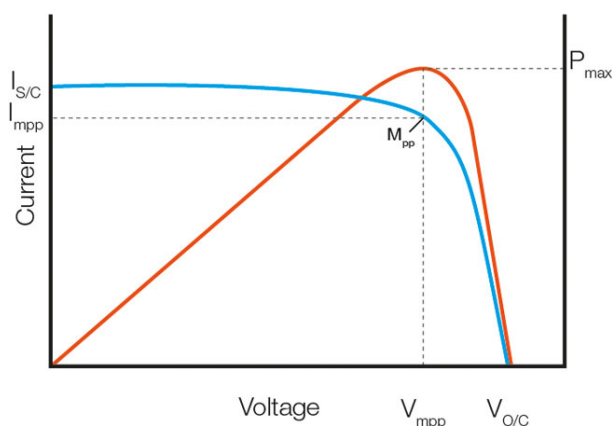


Figura E.2: Gráfica de la curva $I(V)$ y $P(V)$ [14]

E.2. Modelo real de la celda fotovoltaica

E.1.2. Dependencia de la irradiancia (G)

La variación G implica que hay una variación del aporte de fotones dentro de la juntura y de la corriente I_{ph} . La ordenada en el origen se ve afectada linealmente por los cambios mencionados porque su valor es igual a I_{ph} . La tensión de vacío se puede calcular considerando que el término de $I_{s0} \ll I_{ph}$, $V_{oc} \approx V_t(\ln(I_{ph}) - \ln(I_{s0}))$ y se puede concluir que predomina la corriente de saturación inversa $V_{oc} \approx -V_t \ln(I_{s0})$. Entonces la tensión de vacío no sufre grandes variaciones frente a cambios de G .

E.1.3. Dependencia de la temperatura (T)

Para conocer la temperatura dentro de la celda T_c a partir de la temperatura ambiente T_a se utiliza el modelo térmico de la celda, que es de la ecuación E.4.

$$T_c = T_a + G \frac{NOCT - 20}{800} \quad (E.4)$$

Donde $NOCT$ es la temperatura nominal de operación de celda que se extrae de la hoja de datos del panel solar y G es la irradiancia. El modelo presentado sirve para el panel en vacío, en carga se cambia $NOCT$ por $INOCT = NOCT - 3$. Conociendo la temperatura T_c se puede calcular como varían la tensión de vacío y corriente de cortocircuito. Si se desea una expresión para variaciones de temperaturas de la tensión de vacío se calcula el polinomio de Taylor de grado uno de la ecuación E.5.

$$V_{oc}(T_c) = V_{oc}(STC) + \frac{\delta}{\delta T} V_{oc}(T_c - 25) \quad (E.5)$$

Se define $V_{oc}(STC)$ como la tensión en vacío a temperatura $T = 25^\circ C$ y $\frac{\delta}{\delta T} V_{oc}$ se define como coeficiente de temperatura según la ecuación E.6.

$$\frac{\delta}{\delta T} V_{oc} = \frac{V_{oc} - E_{g0} - \gamma K_B T_c}{T_c} N \quad (E.6)$$

Los valores E_{g0} y γ dependen del material de la celda y de la capa de silicio. N es el número de celdas, T_c es la temperatura de la celda y K_b la constante de Boltzmann. El término $\frac{\delta}{\delta T} V_{oc}$ es negativo, para el silicio $\frac{\delta}{\delta T} V_{oc} \approx -2,2 \frac{mV}{^\circ C}$. La variación de corriente por la temperatura es muy pequeña en comparación con la tensión de vacío, para el silicio $\frac{\delta}{\delta T} I_{sc} \approx 0,0006 I_{sc} \frac{1}{^\circ C}$. Entonces se puede considerar que la temperatura afecta principalmente la tensión de vacío y si aumenta la temperatura entonces baja la tensión.

E.2. Modelo real de la celda fotovoltaica

Este modelo contempla las pérdidas Joule que tiene las celdas por los conductores y la juntura.

Se modela la celda con una resistencia R_s en serie que representa las pérdidas por los conductores y R_p en paralelo que representa la resistencia de la juntura.

Apéndice E. Panel solar

Los valores rondan el orden de $m\Omega$ para R_s y $k\Omega$ para R_p . La resistencia serie modela pérdidas de corriente y la de paralelo modela pérdidas de tensión.

Las imperfecciones del diodo se representan por su factor de idealidad, empíricamente se ha demostrado que una buena aproximación al modelo real de la celda se logra utilizando dos diodos en paralelo uno con $\eta = 1$ y otro con $\eta = 2$ como en la imagen E.3.

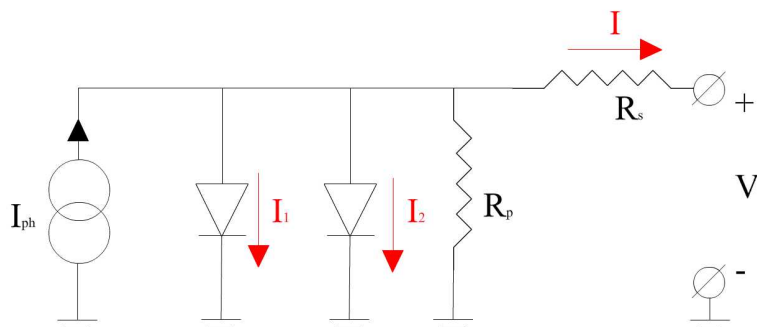


Figura E.3: Modelo real de la celda solar

En la mayoría de las bibliografías se utiliza el modelo real solo con el diodo de factor de idealidad $\eta = 1$ ya que el segundo diodo representa las posibles recombinaciones en la juntura, que se desprecian dependiendo de la dimensión del parque solar. De aquí en adelante se utilizará el modelo simplificado de un solo diodo.

E.3. Modelo de panel y parque solar

Las celdas tienen un colector y dos bornes, su interconexión se hace en paralelo o en serie como en la figura E.4.

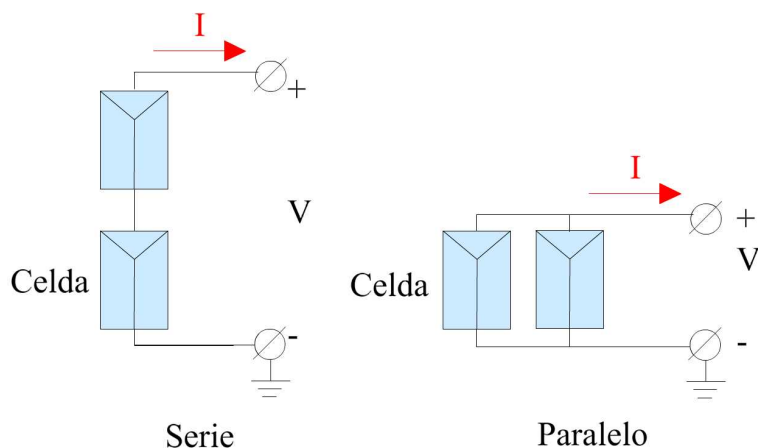


Figura E.4: Celdas en serie o en paralelo

Celdas en serie

Se estudia la relación I-V para poder determinar la potencia que aportan n celdas en serie, la idea es modelar ambas celdas como una sola. Se considera que las celdas son idénticas.

Las resistencias R_s y R_p de cada celda se encuentran en serie y se pueden sustituir por $R_s^{eq} = nR_s$ y $R_p^{eq} = nR_p$. Las fuentes de corriente I_{ph} están en serie y se las sustituye por una única fuente equivalente $I_{ph}^{eq} = I_{ph}$. Los diodos en serie se sustituyen por uno solo con el doble de tensión térmica $V_t^{eq} = nV_t$ porque se requiere el doble de tensión para poner el diodo en conducción.

E.3.1. Celdas en paralelo

Las resistencias R_s y R_p de cada celda se encuentran en paralelo y se sustituyen por $R_s^{eq} = \frac{R_s}{m}$ y $R_p^{eq} = \frac{R_p}{m}$. Las fuentes I_{ph} están en paralelo, sus aportes se suman y se las sustituye por una única fuente equivalente $I_{ph}^{eq} = mI_{ph}$. Los diodos en paralelo se puede sustituir por uno solo con el doble de corriente de saturación $I_s^{eq} = mI_s$ porque por el diodo circula el doble de corriente.

E.3.2. Modelo único del panel y parque

La generación de un parque solar está dada por el conjunto de paneles y cada panel es un conjunto de celdas. Se modela el parque como un conjunto de celdas de N_s filas y N_p columnas. Los parámetros son:

- Resistencia en serie $R_s^{eq} = R_s \frac{N_s}{N_p}$
- Resistencia en paralelo $R_p^{eq} = R_p \frac{N_s}{N_p}$
- Corriente fotoeléctrica $I_{ph}^{eq} = I_{ph} N_p$
- Tensión del diodo $V_t^{eq} = N_s V_t$
- Corriente del diodo $I_s^{eq} = N_p I_s$

La corriente de cortocircuito es $I_{ph}^{eq} N_p$, la tensión de vacío depende de V_t entonces $V_{oc}^{eq} = N_s V_{oc}$ y el punto de potencia máxima es $N_p N_s P_{max}^{celda}$.

E.3.3. Curvas V-I y P-V

El estudio de las curvas V-I y P-V que se realiza para una celda real o para un conjunto de ellas es el mismo porque se demostró que es equivalente a una celda real con modificaciones en todos sus parámetros.

Apéndice E. Panel solar

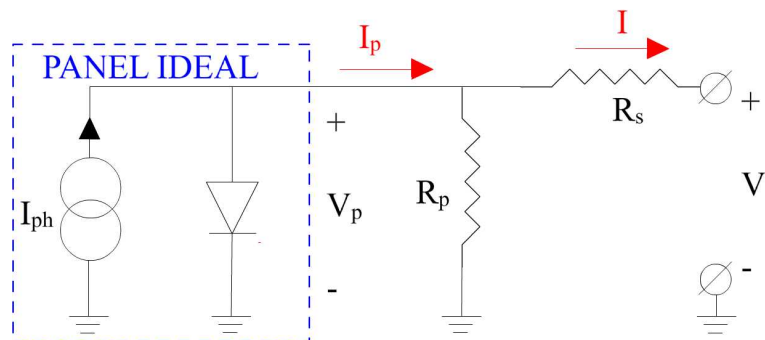


Figura E.5: Modelo del panel solar real

Se puede modelar el panel real como un panel ideal con una carga resistiva conectada a la red (Figura E.5) y su ecuación es E.7.

$$\begin{aligned} I &= I_{ph} - I_{d1} \left(e^{\frac{V^{int}}{V_t}} - 1 \right) - \frac{V^{int}}{R_p} \\ V^{int} &= V + R_s I \end{aligned} \quad (E.7)$$

E.3. Modelo de panel y parque solar

Se estudian los mismos puntos que para el caso ideal:

- Circuito abierto
- Cortocircuito
- Máxima potencia (codo)

E.3.4. Circuito abierto

En el circuito abierto $I = 0$ E.8.

$$\begin{aligned} I_{ph} &= I_{d1} \left(e^{\frac{V^{int}}{V_t}} - 1 \right) + \frac{V^{int}}{R_p} \\ V^{int} &= V_{oc} \end{aligned} \quad (\text{E.8})$$

La tensión de vacío se puede calcular resolviendo numéricamente la ecuación E.8 ya que no es posible obtener una expresión exacta analíticamente.

Se considera el panel alimentando una carga R_p . Partiendo de la hipótesis de que la resistencia en paralelo es lo suficientemente grande para que la corriente sea baja en comparación con la de carga óptima ($R_p \gg R_{ch}$), la corriente que circula por la resistencia paralelo es casi nula y la tensión en vacío se conserva.

Si se perturba el estado de vacío la corriente de carga sería $I = -\frac{-V_{panel} + V}{R_s}$. La pendiente de la curva I-V se calcula derivando la corriente en función de V obteniendo $\frac{\delta I}{\delta V} = -\frac{1}{R_s}$. Se aproxima la tensión de vacío por su valor ideal con una pendiente $-\frac{1}{R_s}$.

E.3.5. Cortocircuito

En el cortocircuito la tensión es $V = 0$ y es la ordenada en el origen de $I(V)$ E.9.

$$\begin{aligned} I_{sc} &= I_{ph} - I_{d1} \left(e^{\frac{V^{int}}{V_t}} - 1 \right) - \frac{V^{int}}{R_p} \\ V^{int} &= R_s I_{sc} \end{aligned} \quad (\text{E.9})$$

Al igual que la tensión de vacío se requiere utilizar métodos numéricos para calcular el valor específico de la corriente de cortocircuito resolviendo la ecuación E.9.

Se analiza el problema como si el panel estuviera alimentando una carga $R_s // R_p \approx R_s$. Se parte de la hipótesis que la resistencia en serie tiene un orden de magnitud lo suficientemente pequeño para que la caída de tensión en si misma sea baja en comparación con la de tensión de carga óptima ($R_s \ll R_{ch}$). Se puede afirmar que la corriente de cortocircuito prácticamente no varía.

Si se perturba el estado de cortocircuito entonces la corriente de carga sería $I = I_{ph} - \frac{V_{panel}}{R_p}$. La pendiente de la curva I-V se calcula derivando la corriente en función de la tensión $\frac{\delta I}{\delta V} = -\frac{1}{R_p}$. Se puede modelar la corriente de cortocircuito aproximando por su valor ideal y con pendiente $-\frac{1}{R_p}$.

E.3.6. Potencia máxima

Si se consideran los efectos de las resistencias paralelo y serie en el cálculo de la potencia máxima, entonces las pendientes son más pronunciadas alejando el codo de la posición inicial. Entonces el valor de la potencia máxima baja y el factor de llenado también.

La pérdida de potencia en la resistencia serie depende de la corriente saliente del panel. Un criterio práctico es asumir que la pérdida de corriente por R_p no es lo suficientemente grande para que la corriente I no se pueda aproximar a la corriente I_{mpp} . La potencia disipada en R_s se define en la ecuación E.10.

$$P_{R_s} = R_s I_{mpp}^2 \quad (\text{E.10})$$

La potencia consumida por la resistencia paralelo se calcula según la ecuación E.11.

$$P_{R_p} = \frac{V_{mpp}^2}{R_p} \quad (\text{E.11})$$

Definiendo las resistencias normalizadas $r_s = \frac{R_s}{R_{ch}}$ y $r_p = \frac{R_p}{R_{ch}}$ se calcula el factor de llenado y la potencia a partir de la resistencia serie E.12.

$$P = P_{mpp}(1 - r_s) \quad (\text{E.12})$$

Análogamente para la rama en paralelo se describe la ecuación E.13.

$$P = P_{mpp}\left(1 - \frac{1}{r_p}\right) \quad (\text{E.13})$$

E.4. Control MPPT

El sistema de control de un parque solar tiene por objetivo extraer la máxima potencia posible, este tipo de control se llama *MPPT* y existen dos categorías:

- Indirectos
 - Voltaje fijo
 - Fracción de V_{oc}
 - Fracción de I_{sc}
- Directos
 - Perturbar y observar
 - Conductancia incremental

E.4.1. Voltaje fijo

El método indirecto de voltaje fijo trata de establecer una tensión estándar para cada estación basado en registros empíricos.

E.4.2. Fracción de tensión de vacío o corriente de cortocircuito

Se demostró que el punto de operación es menor a la tensión de vacío y corriente de cortocircuito y se establece el punto de operación en voltaje y corriente como fracciones de V_{oc} e I_{sc} según la ecuación E.14.

$$\begin{aligned} V_{mpp} &\approx K_1 V_{oc} \\ I_{mpp} &\approx K_2 I_{sc} \end{aligned} \quad (\text{E.14})$$

Los valores de K_1 y K_2 dependen principalmente del material y se corrigen en para variaciones apreciables de (G, T) . En otras palabras cuando las condiciones atmosféricas alteran considerablemente la potencia entregada es necesario actualizar las constantes.

E.4.3. Perturbar y observar

Se utiliza un sistema de control más complejo que se basa en realizar una perturbación en la tensión y calcular la variación de potencia, repitiendo el proceso hasta alcanzar el valor máximo de potencia. El diagrama de flujo del método se observa en la figura E.6. Es un método iterativo que solo requiere muestrear la potencia y compararla, aunque puede provocar oscilaciones en la potencia de salida o la no convergencia en caso de cambios bruscos de G .

Conductancia incremental

Similar al método anterior pero utiliza los cocientes incrementales de la conductancia. Ésta se define como $\frac{I}{V}$ y se puede expresar la derivada de la potencia como E.15.

$$\frac{\delta}{\delta V} P = I + V \frac{\delta}{\delta V} I \quad (\text{E.15})$$

El máximo de la potencia se da cuando a derivada es nula, si es negativa entonces se está trabajando en tensiones elevadas y si es positivas son tensiones bajas. Si se divide por la tensión la derivada de la potencia sigue conservando su signo y sustituyendo por un cociente incremental discreto E.16.

$$\frac{I}{V} + \frac{\Delta I}{\Delta V} = 0 \quad (\text{E.16})$$

El diagrama de flujo del método se observa en la figura E.7.

Apéndice E. Panel solar

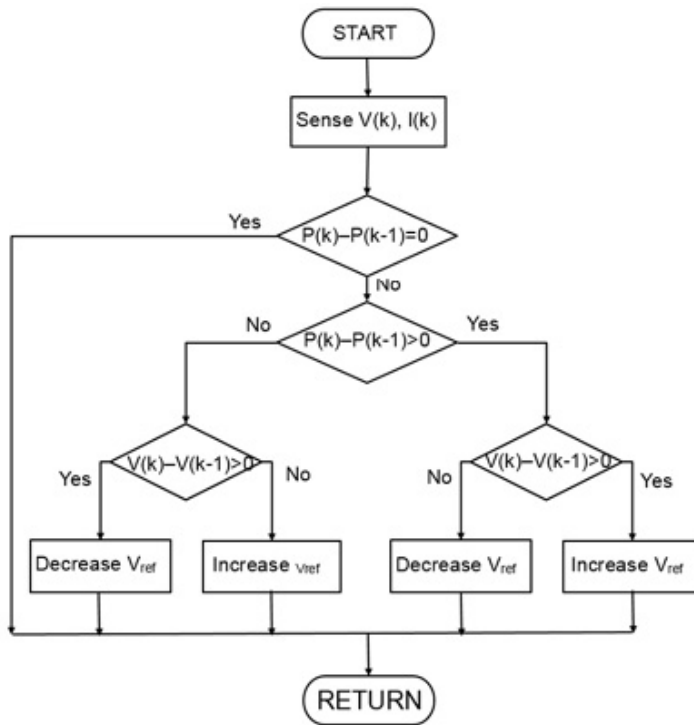


Figura E.6: Diagrama del algoritmo perturbar y observar [25]

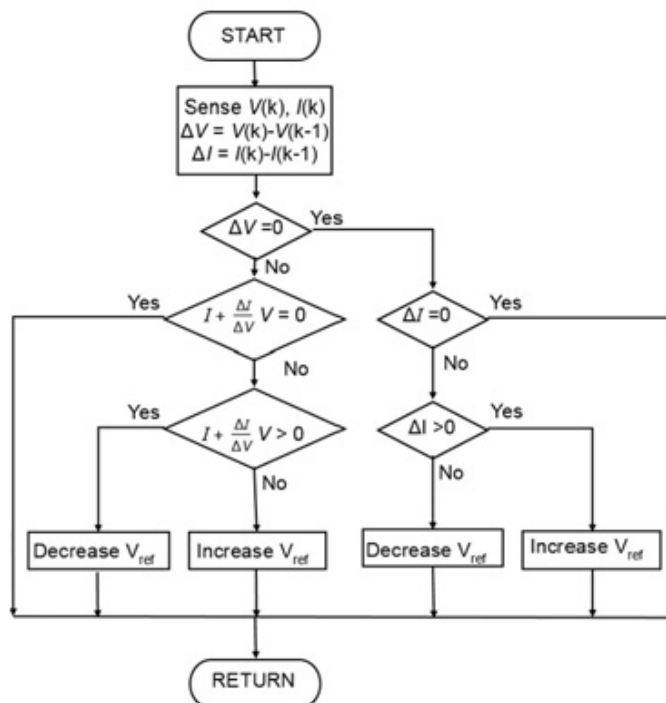


Figura E.7: Diagrama del algoritmo conductancia incremental [25]

E.4. Control MPPT

La principal ventaja es una mejor convergencia que la del método anterior y menor oscilación en torno del *MPP*, aunque su implementación implica mayor complejidad en muestreo de señales y cálculo numérico.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

Referencias

- [1] International Organization for Standardization (Geneva) International Electrotechnical Commission. *Short-circuit Currents in Three-phase Ac Systems, Part 0: Calculation of Currents*. IEC-60909 Edition 2.0, 2016-0.1.
- [2] UTE. *Anexo II - CONVENIO DE USO(Para Generadores Eólicos conectados a la red de UTE en Alta Tensión)*. UTE, 2011.
- [3] Red Eléctrica de España. Procedimientos de operación po 12.3. *REE, Madrid, España,(3)*, 2006.
- [4] Curso de generación eólica. <https://eva.fing.edu.uy/enrol/index.php?id=494>. Accessed on: Jun. 1, 2018.
- [5] S Nanou, G Tsourakis, and CD Vournas. Full-converter wind generator modelling for transient stability studies. In *PowerTech, 2011 IEEE Trondheim*, pages 1–7. IEEE, 2011.
- [6] Prabha Kundur, Neal J Balu, and Mark G Lauby. *Power system stability and control*, volume 7. McGraw-hill New York, 1994.
- [7] Miguel Angel Rodríguez. POZUETA. Máquinas síncronas: Cortocircuitos. Universidad de Cantabria Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética. available. <http://personales.unican.es/rodrigma/PDFs/Cortos> Accessed on: Jun. 1, 2018.
- [8] Reactancias y constantes de tiempo de las maquinas sincro-nas.available. <http://www.inducor.com.ar/academicos/calculo-de-maquinaselectricas/maquinas-electricas-apendice19.html>. Accessed on: Jun. 1, 2018.
- [9] Miguel Angel Rodríguez POZUETA. Máquina sincrona: Potencia activa y reactiva . Pares. Estabilidad estática.
- [10] Curso de redes electricas. Accessed on: Jun. 1, 2018.
- [11] Gonzalo Abad, Jesus Lopez, Miguel Rodriguez, Luis Marroyo, and Grzegorz Iwanski. *Doubly fed induction machine: modeling and control for wind energy generation*, volume 85. John Wiley & Sons, 2011.

Referencias

- [12] Full scale converter for synchronous wind turbine generators. Accessed on: Apr. 10, 2018.
- [13] Augustin McEvoy, Tom Markvart, Luis Castañer, T Markvart, and Luis Castaner. *Practical handbook of photovoltaics: fundamentals and applications*. Elsevier, 2003.
- [14] Welcome to the photovoltaic education. Accessed on: Jun. 1, 2018.
- [15] James Keller and Benjamin David Kroposki. *Understanding fault characteristics of inverter-based distributed energy resources*. National Renewable Energy Laboratory, 2010.
- [16] Vladislav Akhmatov, Björn Andresen, Jørgen Nygaard Nielsen, Kim Høj Jensen, Nikolaus M Goldenbaum, Jan Thisted, and Michael Frydensbjerg. Unbalanced short-circuit faults: Siemens wind power full scale converter interfaced wind turbine model and certified fault-ride-through validation. In *Proceedings of the European Wind Energy Conference and Exhibition, Warsaw, Poland*, pages 20–23, 2010.
- [17] E Gursoy and RA Walling. Representation of variable speed wind turbine generators for short circuit analysis. In *Electrical Power and Energy Conference (EPEC), 2011 IEEE*, pages 444–449. IEEE, 2011.
- [18] Alejandro Marmolejo, Mirko Palazzo, and Maurizio Delfanti. Challenges for generator circuit-breakers connected with doubly-fed induction generators. In *Energy Conversion (CENCON), 2014 IEEE Conference on*, pages 191–194. IEEE, 2014.
- [19] Bing Chen, Arun Shrestha, Fred A Ituzaro, and Normann Fischer. Addressing protection challenges associated with type 3 and type 4 wind turbine generators. In *Protective Relay Engineers, 2015 68th Annual Conference for*, pages 335–344. IEEE, 2015.
- [20] Rita Isabel Alexandre Lúcio. Behavior of distance protections near wind farms. *online*] Available: https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/395143996730/Artigo_Rita.pdf. [Accessed 24 August 24, 2016].
- [21] Curso de introducción a las protecciones de los sistemas eléctricos de potencia. Accessed on: Sep. 3, 2018.
- [22] Curso de electrónica de potencia. <https://eva.fing.edu.uy/course/view.php?id=586>. Accessed on: Sep. 3, 2018.
- [23] Mauricio Alberto Tonelli. *Modulación vectorial de inversores de potencia*. PhD thesis, Facultad de Ingeniería, 2004.
- [24] Shichao Fan, Pupu Chao, and Feifei Zhang. Modelling and simulation of the photovoltaic power station considering the lvrt and hvrt. *The Journal of Engineering*, 2017(13):1206–1209, 2017.

- [25] Algoritmo MPPT - Matlab & Simulink. Accessed on: Aug. 15, 2018.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

Nomenclatura

DNC Despacho Nacional de Carga

dq0 Transformada de Park

Dyn Transformador triángulo-estrella con neutro rígidamente aterrado

LVRT “Low voltage ride through”

SE Sistema eléctrico

UTE Administración Nacional de Usinas y Trasmisiones Eléctricas

DFIG Generador de inducción doblemente alimentado

FC Generador Full-Converter

GS Generador Síncrono

PV Generador Fotovoltaico

3F Cortocircuito trifásico

CC Cortocircuito

FF Cortocircuito bifásico

FFT Cortocircuito dos fases a tierra

FT Cortocircuito fase-tierra

I_{CC} Corriente de cortocircuito

Ω_m velocidad mecánica real del rotor

ω_m velocidad mecánica equivalente

ω_r frecuencia eléctrica del rotor

ω_s frecuencia eléctrica de sincronismo

$\overline{X(t)}$ Fasor de $X(t)$

Referencias

$\overline{X(t)}^*$	Conjugado de $\overline{X(t)}$
Φ	Flujo magnético
FMM	Fuerza magnetomotriz
U	Tensión de línea
V	Tensión de fase
I_d	Corriente de régimen de eje directo
I'_d	Corriente transitoria de eje directo
I''_d	Corriente subtransitoria de eje directo
I''_q	Corriente subtransitoria de eje cuadratura
I_u	Componente de continua
I_{as}	Corriente alterna simétrica
I_{ccp}	Corriente de cortocircuito de régimen permanente
I_{u0}	Amplitud de la componente de continua
τ'_0	Constante de tiempo transitoria de vacío
τ''_0	Constante de tiempo subtransitoria de vacío
τ'_d	Constante de tiempo transitoria de cortocircuito
τ''_d	Constante de tiempo subtransitoria de cortocircuito
τ_i	Constante de tiempo de la componente continua
τ'_r	Constante de tiempo transitoria de rotor del DFIG
τ'_s	Constante de tiempo transitoria de estator del DFIG
R_{cb}	Resistencia de crowbar
X_d	Reactancia de eje directo o de sincronismo
X'_d	Reactancia transitoria de eje directo
X''_d	Reactancia subtransitoria de eje directo
Z_0	Impedancia de secuencia cero
Z_i	Impedancia de secuencia inversa
E_0	Tensión de vacío del generador síncrono

Índice de tablas

5.1. Utilidad de las corrientes de CC	85
5.2. Hipótesis de cortocircuitos máximos y mínimos	89
5.3. Corriente simétrica inicial para cortocircuitos desbalanceados . . .	97
5.4. Tabla para calcular el cociente de frecuencias en función del tiempo	99
5.5. Excitación de la máquina en función del tipo de rotor	103

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

Índice de figuras

1.1. Tipos de cortocircuito, imagen extraída de [1]	2
1.2. Parámetros del hueco de tensión	3
1.3. Hueco de tensión en nodo de conexión, [2]	4
1.4. Hueco de tensión en nodo de conexión (circuito radial), imagen extraída de [2]	5
2.1. Modelo del rotor	9
2.2. Modelo DQ0 de los flujos de la máquina síncrona	11
2.3. Circuito final del GS en coordenadas DQ0	13
2.4. Modelo fasorial de la máquina síncrona de polos salientes	16
2.5. Modelo fasorial de Behn Eschemburg	16
2.6. Circuito RL	19
2.7. Modelo Thévenin del subtransitorio en el eje directo	21
2.8. Constante de tiempo subtransitoria	22
2.9. Constante de tiempo subtransitoria de circuito abierto	23
2.10. Modelo Thévenin del transitorio en el eje directo	24
2.11. Constante de tiempo transitoria	25
2.12. Constante de tiempo transitoria de circuito abierto	26
2.13. Modelo Thévenin del régimen en el eje directo	27
2.14. Corriente alterna simétrica [7]	29
2.15. Tensión y corriente en DQ	30
2.16. Variación de las corrientes I''_d , I'_d e I_d en función del valor de la reactancia de línea X_L	33
2.17. Variación de las constantes de tiempo τ''_d , τ'_d y τ_i en función del valor de la reactancia de línea X_L en pu.	34
2.18. Redes de secuencia	36
2.19. Modelo de reactancias de cortocircuito fase-tierra	37
2.20. Modelo de reactancias de cortocircuito fase-fase-tierra	38
2.21. Modelo de reactancias de cortocircuito fase-fase	39
2.22. Redes de secuencia	40
2.23. Equivalente Thévenin de una máquina cargada [10]	41
3.1. Distintos ángulos de ataque β para controlar la velocidad de giro según la velocidad del viento [4]	44
3.2. Mecanismo de orientación de la turbina (Yaw) [4]	44

Índice de figuras

3.3. Curva de potencia extraída según la velocidad del viento [4]	45
3.4. Tres estrategias de control según la velocidad del viento [4]	45
3.5. Diferentes Configuraciones de DFIG dependiendo conexión de Transformador [11].	48
3.6. Componentes de un aerogenerador DFIG [4]	48
3.7. Representación ideal de los tres devanados (estator y Rotor) de DFIG [11].	49
3.8. Vectores espaciales del DFIG [11]	50
3.9. Modelo del DFIG en DQ0	53
3.10. Modelo fasorial del DFIG en régimen [11]	55
3.11. Sistema DFIG con Crowbar [11]	65
3.12. Equivalente del circuito considerando resistencia de crowbar [11] .	66
4.1. Esquema general del sistema full converter [12]	68
4.2. Distintos tipos de generadores según su velocidad nominal [4] . . .	68
4.3. Convertidor con rectificador de seis pulsos con inversor de dos niveles [12]	69
4.4. Convertidor con rectificador de doce pulsos [12]	70
4.5. Convertidor back to back de dos niveles [12]	70
4.6. Convertidor back to back de tres niveles [12]	71
4.7. Esquema de funcionamiento del multilevel y gráfico de voltaje de un convertidor de cinco niveles [12]	71
4.8. Modelo para un cortocircuito en un parque solar	74
4.9. Esquema de generadores GF Y FC para el estudio de CC	75
4.10. diagrama fasorial en régimen	76
4.11. Resultado del ensayo de cortocircuito bifásico de un fabricante sobre un inversor trifásico (500kVA). Duración: 1,1 ms. [15]	77
4.12. Resultado del ensayo de cortocircuito fase-neutro sobre un inversor trifásico (1kW). Duración: 1,6 ms. [15]	78
4.13. Gráfico de valores RMS de potencia reactiva (a) y activa (b) obtenidos del ensayo y simulación de un cortocircuito entre fases B y C sobre un aerogenerador FC (2,3MW, 690V). Duración: 800 ms. [16]	79
5.1. (a) Curva típica del aporte de un generador a un cortocircuito lejano, (b) Curva típica del aporte de un generador a un cortocircuito cercano. [1]	84
5.2. Esquema de cortocircuito alimentado por un solo generador.	86
5.3. Cortocircuito es alimentado directamente por múltiples generadores, imagen extraída de [1]	87
5.4. Esquema de cortocircuito de red anillada. Imagen extraída de [1] .	87
5.5. Factor de voltaje c. [1]	90
5.6. Método de cálculo de la norma para un cortocircuito en bornes del estator	91
5.7. Factor k y tiempo $t_p(ms)$	100
5.8. Factor λ para polos lisos [1]	103
5.9. Factor λ para polos salientes [1]	103

6.1.	(a) Comportamiento de la corriente de CC de un aerogenerador DFIG genérico, (b) Comportamiento de la corriente de CC de un aerogenerador FC genérico. [17]	110
6.2.	Factor μ en función de la corriente para distintos tiempos t_{min} [1]	111
6.3.	Corriente de cortocircuito de un DFIG para distintos valores de R_{cb} . [18]	112
6.4.	Esquema unifilar simplificado típico de un parque de aerogeneradores. [19]	114
A.1.	Sistema de referencia ABC y DQ0	119
B.1.	(a) Topología de una rama inversora de dos estados, adaptado de [22]. (b) Tensión de alterna de la rama.	122
B.2.	(a) Topología de una rama inversora de tres estados, adaptado de [22]. (b) Tensión de salida de la rama.	123
B.3.	Regiones de modulación	125
B.4.	Diagrama fasorial del inversor conectado a la red	127
B.5.	Esquema del puente DC con su capacitor y circuito chopper	129
B.6.	Esquema del circuito del Boost elevador [22]	132
D.1.	Forma de onda de corriente de CC para tensión interna con $\gamma = 0$	138
D.2.	Forma de onda de corriente de CC para tensión interna con $\gamma = \frac{\pi}{4}$	138
D.3.	Forma de onda de corriente de CC para tensión interna con $\gamma = \frac{\pi}{2}$	139
D.4.	Forma de onda de corriente de CC para el caso en que se aumentan las reactancias	140
D.5.	Forma de onda de corriente de CC para el caso en que se reducen las reactancias	141
D.6.	Forma de onda de corriente de CC para el caso en que se aumentan las constantes	142
D.7.	Forma de onda de corriente de CC para el caso en que se reducen las constantes	142
E.1.	Modelo ideal de la celda solar	145
E.2.	Gráfica de la curva I(V) y P(V) [14]	146
E.3.	Modelo real de la celda solar	148
E.4.	Celdas en serie o en paralelo	148
E.5.	Modelo del panel solar real	150
E.6.	Diagrama del algoritmo perturbar y observar [25]	154
E.7.	Diagrama del algoritmo conductancia incremental [25]	154

Esta es la última página.
Compilado el martes 1 enero, 2019.
<http://iie.fing.edu.uy/>