



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE
SAN NICOLÁS DE HIDALGO**

**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**“FORMULACIÓN Y ANÁLISIS DE FLUJOS DE POTENCIA EN
SISTEMAS ELÉCTRICOS CON INTEGRACIÓN DE ENERGÍA
EÓLICA BASADA EN EL GENERADOR SÍNCRONO DE
IMANES PERMANENTES”**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA ELÉCTRICA**

PRESENTA

ING. JUAN CARLOS DUARTE RANGEL

ASESOR

DR. CLAUDIO RUBÉN FUERTE ESQUIVEL

MORELIA, MICHOACÁN

JULIO, 2019






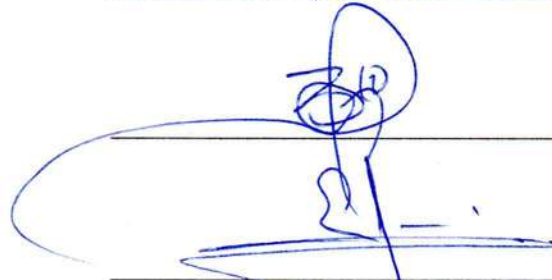
FORMULACIÓN Y ANÁLISIS DE FLUJOS DE POTENCIA EN SISTEMAS ELÉCTRICOS CON INTEGRACIÓN DE ENERGÍA EÓLICA BASADA EN EL GENERADOR SÍNCRONO DE IMANES PERMANENTES

Los Miembros del Jurado de Examen de Grado aprueban la **Tesis de Maestría en Ciencias en Ingeniería Eléctrica** de **Juan Carlos Duarte Rangel**.

Dr. Antonio Ramos Paz
Presidente del Jurado



Dr. Claudio Rubén Fuerte Esquivel
Director de Tesis




Dra. Elisa Espinosa Juárez
Vocal



Dr. J. Aurelio Medina Rios
Vocal



Dr. César Ángeles Camacho
Revisor Externo (UNAM)



Dr. Roberto Tapia Sánchez
*Jefe de la División de Estudios de Posgrado
de la Facultad de Ingeniería Eléctrica. UMSNH
(Por reconocimiento de firmas)*



Agradecimientos

En especial y en primer lugar a mi asesor de tesis Dr. Claudio Rubén Fuerte Esquivel, por apoyarme y guiarme en el desarrollo de este trabajo, brindarme la oportunidad de trabajar con él y transmitirme parte de su vasto conocimiento.

A la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH) particularmente a la Facultad de Ingeniería Eléctrica (FIE), por permitirme cursar en ella mis estudios de licenciatura y maestría.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), por el apoyo económico brindado, con el cual contribuyó de manera importante para realizar mis estudios de maestría.

A los profesores de esta facultad, por transmitirme parte de su vasto conocimiento, darme palabras de ánimo y brindarme sus consejos.

En especial al Dr. Rafael Cisneros Magaña, por el gran apoyo y los consejos recibidos tanto en lo académico como en lo personal, desde la licenciatura hasta la fecha. Por su amistad y su excelente trato.

A los integrantes de la mesa sinodal, por sus apreciables comentarios y correcciones que enriquecieron el presente trabajo y complementaron mi aprendizaje.

A mis compañeros del posgrado, por compartir conmigo parte de su conocimiento y, por su apoyo y su amistad.

A toda mi familia, en especial a mi mamá Rosario Rangel Magaña; a mis hermanos: Luis Fernando, Margarito y Rosario; a mi novia María del Pilar González Sánchez; a mi abuelo Luis Rangel Caudillo; a mis tías: Teresa Rangel, Victoria Duarte, Margarita Duarte y Socorro González; y a mis tíos: Juan Rangel, Miguel Rangel, Gavino Rangel, Martín Duarte, Eladio Duarte y Bernardo Duarte; por sus palabras de ánimo, sus consejos y en general por el gran apoyo que me han brindado.

Resumen

En este trabajo se desarrolla la formulación matemática para el estudio de flujos de potencia en sistemas eléctricos en estado estable considerando la integración de energía eólica basada en el generador síncrono de imanes permanentes. En este contexto, se presenta el modelo del circuito eléctrico para la interconexión del generador eólico, se desarrollan las ecuaciones de flujos de potencia para el mismo y se obtienen las ecuaciones de balance de potencia en cada uno de sus nodos. Este modelo contiene un enlace en corriente directa conformado por convertidores de fuentes de voltaje, en los que se incluyen el índice de modulación así como las pérdidas por conmutación y conducción. Como parte de la integración del generador eólico, se debe calcular la potencia proveniente del mismo, lo cual se hace mediante la ecuación de Betz, que incorpora la densidad del aire, el coeficiente de potencia, el área de barrido de la turbina eólica y la velocidad del viento.

Las ecuaciones no lineales que resultan del modelo del circuito para la interconexión del generador eólico, desarrolladas como parte de este trabajo, se acoplan con las ecuaciones de la red para formar un sistema unificado de ecuaciones no lineales, el cual, considerando los valores iniciales de las variables de estado, los límites de potencia de los generadores convencionales y de los convertidores de fuentes de voltaje, se soluciona utilizando el algoritmo Newton-Raphson. Finalmente, se presentan casos de estudio con sistemas de prueba de diferente tamaño con la finalidad de demostrar la efectividad de la propuesta.

Palabras Clave: CEI-PMSG, flujos de potencia, formulación unificada, Newton-Raphson, ecuaciones de flujos y generación eólica.

Abstract

In this work, the mathematical formulation suitable for power flow analysis taken into account wind energy integration based on the permanent magnet synchronous generator is developed. In this context, an electric circuit model for the interconnection of the wind generator is developed from first principles. Based on this model, the equations of power flows are developed and the power balance equations are obtained at each of its nodes. This model is developed by considering a voltage source converter-based direct current link, which includes the converters' modulation index as well as losses due to the processes of commutation and conduction. As part of the integration of the wind generator, the wind generator's power is calculated by using the Betz equation, which incorporates the air density, the power coefficient, the swept area of the wind turbine and the wind speed that is one of the main variables for the electric power generation.

The resulting set of nonlinear equations associated with the wind generator model are coupled with the network equations to form a unified system of nonlinear equations, which are solved using the Newton-Raphson algorithm. Finally, case studies are presented to demonstrate the effectiveness of the proposed model.

Índice General

Agradecimientos	I
Resumen.....	III
Abstract	V
Lista de Figuras	XI
Lista de Tablas	XIII
Lista de Símbolos y Abreviaturas	XIX
Capítulo 1 Introducción	1
1.1. Introducción	1
1.2. Estado del Arte.....	5
1.3. Objetivo.....	8
1.4. Justificación	9
1.5. Metodología	10
1.6. Estructura de la Tesis	11
Capítulo 2 Flujos de Potencia en Sistemas Eléctricos con Integración de Energía Eólica Basada en el Generador Síncrono de Imanes Permanentes	13
2.1. Introducción	13
2.2. Conceptos Generales de Flujos de Potencia	13
2.3. Clasificación de nodos y variables.....	16
2.4. Modelo del Circuito para la Interconexión del Generador Síncrono de Imanes Permanentes	17
2.4.1. Etapa de Rectificación.....	18
2.4.2. Etapa Inversora.....	19
2.4.3. Reactor de Fase y Filtro	19

2.4.4.	Etapa de Transformación	20
2.5.	Ecuaciones de Flujos de Potencia del Circuito para la Interconexión del Generador Síncrono de Imanes Permanentes	20
2.5.1.	Ecuaciones de Flujos de Potencia del Rectificador.....	21
2.5.2.	Ecuaciones de Flujos de Potencia del Inversor	23
2.5.3.	Ecuaciones de Flujos de Potencia en el Reactor de Fase y el Filtro	26
2.5.4.	Ecuaciones de Flujos de Potencia en el Transformador.....	27
2.6.	Formulación Unificada para la Solución de Flujos de Potencia utilizando el Método de Newton-Raphson.....	28
2.7.	Inicialización de Variables de Estado.....	32
2.8.	Límites de Potencia Reactiva.....	33
2.8.1.	Límites en Generadores Convencionales	33
2.8.2.	Límites en los Componentes del Circuito que Interconecta al Generador Eólico	34
2.9.	Conclusiones.....	36
Capítulo 3	Casos de Estudio	37
3.1.	Introducción	37
3.2.	Sistema de 5 Nodos del IEEE	38
3.3.	Sistema de 14 Nodos del IEEE	44
3.4.	Sistema de 57 Nodos del IEEE	52
3.5.	Sistema de 118 Nodos del IEEE	57
3.6.	Análisis de resultados	63
3.7.	Conclusiones.....	65
Capítulo 4	Conclusiones Generales, Aportaciones y Trabajos Futuros	67
4.1.	Conclusiones Generales	67
4.2.	Aportaciones	68

4.3. Trabajos Futuros	68
Apéndice A Datos de los Elementos Asociados a los CEI-PMSG en los Sistemas de Prueba de 5, 14, 57 y 118 nodos del IEEE.....	69
A.1. Sistema de 5 nodos del IEEE	69
A.2. Sistema de 14 nodos del IEEE	70
A.3. Sistema de 57 nodos del IEEE	72
A.4. Sistema de 118 nodos del IEEE	75
Apéndice B Deducción de las Ecuaciones de Flujos de Potencia en el Circuito utilizado para la Interconexión de los PMSG	77
Apéndice C Tablas Adicionales Resultantes de los Casos de Estudio de Flujos de Potencia en los Sistemas de 57 y 118 Nodos del IEEE.	81
D.1. Sistema de 57 nodos del IEEE	81
D.2. Sistema de 118 nodos del IEEE	87
Bibliografía	95

Lista de Figuras

Figura 1.1: Capacidad instalada y generación bruta de centrales eólicas, 2005-2017 (MW, GWh/año).	2
Figura 1.2: Participación en la capacidad adicional por tipo de tecnología 2018-2032.	3
Figura 1.3: Evolución de la generación de energía eléctrica 2018-2032 (Terawatt-hora).....	3
Figura 2.1: Balance de potencia en el nodo k	15
Figura 2.2: Modelo para el estudios de flujo de potencia del circuito equivalente para la interconexión del PMSG.	18
Figura 2.3: Modelo para el estudios de flujo de potencia del rectificador.....	22
Figura 2.4: Modelo para el estudios de flujo de potencia del inversor.	24
Figura 2.5: Modelo para el estudios de flujo de potencia del reactor de fase y del filtro.	26
Figura 2.6: Modelo π del transformador.....	27
Figura 3.1: Sistema de 5 nodos del IEEE con integración de un PMSG en el nodo Elm	38
Figura 3.2: Comparación de la magnitud de los voltajes nodales en el sistema de 5 nodos sin y con PMSG.	39
Figura 3.3: Comparación de los ángulos de los voltajes nodales en el sistema de 5 nodos sin y con PMSG.	40
Figura 3.4: Gráficas de convergencia del estudio de flujos de potencia realizado en el sistema de 5 nodos con integración del PMSG.	43
Figura 3.5: sistema de 14 nodos del IEEE con integración de energía eólica.	45
Figura 3.6: Comparación de la magnitud de los voltajes nodales en el sistema de 14 nodos sin y con PMSG.....	47
Figura 3.7: Comparación de los ángulos de los voltajes nodales en el sistema de 14 nodos sin y con PMSG.....	47
Figura 3.8: Gráficas de convergencia del estudio de flujos de potencia realizado en el sistema de 14 nodos con integración del PMSG.	51
Figura 3.9: Sistema eléctrico de potencia de 57 nodos del IEEE.	52
Figura 3.10: Comparación de la magnitud de los voltajes nodales en el sistema de 57 nodos sin y con PMSG.....	54

Figura 3.11: Comparación de los ángulos de los voltajes nodales en el sistema de 57 nodos sin y con PMSG.....	55
Figura 3.12: Gráficas de convergencia del estudio de flujos de potencia realizado en el sistema de 57 nodos con integración del PMSG.	56
Figura 3.13: Sistema eléctrico de potencia de 118 nodos del IEEE.	57
Figura 3.14: Comparación de la magnitud de los voltajes nodales en el sistema de 118 nodos sin y con PMSG.....	61
Figura 3.15: Comparación de los ángulos de los voltajes nodales en el sistema de 118 nodos sin y con PMSG.....	61
Figura 3.16: Gráficas de convergencia del estudio de flujos de potencia realizado en el sistema de 118 nodos con integración del PMSG.	62

Lista de Tablas

Tabla 3.1: Voltajes y ángulos nodales para el sistema de 5 nodos del IEEE, sin y con PMSG, validando estos resultados con PowerWorld.	39
Tabla 3.2: Potencia reactiva del generador convencional del sistema de 5 nodos del IEEE.	40
Tabla 3.3: Potencia reactiva del inversor en el sistema de 5 nodos del IEEE.	41
Tabla 3.4: Índices de modulación de los convertidores asociados a la interconexión del PMSG en el sistema de 5 nodos del IEEE.....	41
Tabla 3.5: Flujos de potencia en las líneas de transmisión del sistema de 5 nodos del IEEE con integración de un PMSG.....	41
Tabla 3.6: Flujos de potencia en el transformador asociado a la interconexión del PMSG en el sistema de 5 nodos del IEEE.	42
Tabla 3.7: Compensación de reactivos en el sistema de 5 nodos con integración de un PMSG. .	42
Tabla 3.8: Flujo de potencia en el CEI-PMSG y potencia total inyectada en el nodo de interconexión del sistema de 5 nodos del IEEE.....	42
Tabla 3.9: Resultados de la convergencia del estudio de flujos de potencia en el sistema de prueba de 5 nodos.....	43
Tabla 3.10: Generación, consumo y pérdida total de potencia en el sistema de 5 nodos sin y con integración del PMSG.	44
Tabla 3.11: Potencia generada por los PMSGs en el sistema de 14 nodos del IEEE.	45
Tabla 3.12: Magnitud y ángulo de voltajes nodales para el sistema de 14 nodos del IEEE, sin y con PMSG, validando estos resultados con PowerWorld.	46
Tabla 3.13: Potencia reactiva de los generadores convencionales del sistema de 14 nodos del IEEE con integración de PMSGs.	48
Tabla 3.14: Potencia reactiva de los inversores en el sistema de 14 nodos del IEEE.	48
Tabla 3.15: Índices de modulación de los convertidores asociados a la interconexión de los PMSGs en el sistema de 14 nodos del IEEE.....	48
Tabla 3.16: Flujos de potencia en las líneas de transmisión del sistema de 14 nodos del IEEE con integración de PMSGs.	49

Tabla 3.17: Flujos de potencia en los transformadores del sistema de 14 nodos del IEEE con integración de PMSGs.	49
Tabla 3.18: Compensación de reactivos en el sistema de 14 nodos con integración de PMSGs.	50
Tabla 3.19: Flujo de potencia en los CEI_PMSG y potencia total inyectada en los nodos de interconexión del sistema de 14 nodos del IEEE.....	50
Tabla 3.20: Convergencia del estudio de flujos de potencia en el sistema de prueba de 14 nodos.	51
Tabla 3.21: Generación, consumo y pérdida total de potencia en el sistema de 14 nodos sin y con integración del PMSG.	52
Tabla 3.22: Potencia generada por los PMSGs en el sistema de 57 nodos del IEEE.	52
Tabla 3.23: Voltajes nodales para el sistema de 57 nodos del IEEE, sin y con PMSGs.	53
Tabla 3.24: Convergencia del estudio de flujos de potencia en el sistema de prueba de 57 nodos.	56
Tabla 3.25: Generación, consumo y pérdida total de potencia en el sistema de 57 nodos sin y con integración del PMSG.	56
Tabla 3.26: Potencia generada por los PMSGs y potencia de los generadores convencionales que son remplazados por los PMSGs en el sistema de 118 nodos del IEEE.....	58
Tabla 3.27: Voltajes nodales para el sistema de 118 nodos del IEEE, sin y con PMSGs.	58
Tabla 3.28: Convergencia del estudio de flujos de potencia en el sistema de prueba de 118 nodos.	62
Tabla 3.29: Generación, consumo y pérdida total de potencia en el sistema de 118 nodos sin y con integración del PMSG.	63
Tabla A.1: Número de nodos y componentes del CEI-PMSG en el sistema de 5 nodos del IEEE.	69
Tabla A.2: Datos de la línea de transmisión asociada al CEI-PMSG en el sistema de 5 nodos del IEEE.....	69
Tabla A.3: Datos del transformador asociado al CEI-PMSG en el sistema de 5 nodos del IEEE.	69
Tabla A.4: Datos del compensador de potencia reactiva asociado al CEI-PMSG en el sistema de 5 nodos del IEEE.	69
Tabla A.5: Datos asociados a la generación del PMSG y potencia de los VSC en el sistema de 5 nodos del IEEE.	70

Tabla A.6: Datos asociados a los VSC en el sistema de 5 nodos del IEEE.....	70
Tabla A.7: Número de nodos y componentes de los CEI-PMSG en el sistema de 14 nodos del IEEE.....	70
Tabla A.8: Datos de las líneas de transmisión asociadas a los CEI-PMSG en el sistema de 14 nodos del IEEE.....	70
Tabla A.9: Datos de los transformadores asociados a los CEI-PMSG en el sistema de 14 nodos del IEEE.....	71
Tabla A.10: Datos de los compensadores de potencia reactiva asociados a los CEI-PMSG en el sistema de 14 nodos del IEEE.	71
Tabla A.11: Datos asociados a la generación del PMSG y potencia de los VSC en el sistema de 14 nodos con integración de energía eólica basada en el PMSG.	71
Tabla A.12: Datos asociados a los VSC en el sistema de 14 nodos con integración de energía eólica basada en el PMSG.....	71
Tabla A.13: Número de nodos y componentes de los CEI-PMSG en el sistema de 57 nodos del IEEE.....	72
Tabla A.14: Datos de las líneas de transmisión asociadas a los CEI-PMSG en el sistema de 57 nodos con integración de energía eólica basada en el PMSG.	72
Tabla A.15: Datos de los transformadores asociados a los CEI-PMSG en el sistema de 57 nodos con integración de energía eólica basada en el PMSG.	73
Tabla A.16: Datos de los compensadores de potencia reactiva asociados a los CEI-PMSG en el sistema de 57 nodos con integración de energía eólica basada en el PMSG.....	73
Tabla A.17: Datos asociados a la generación del PMSG y potencia de los VSC en el sistema de 57 nodos con integración de energía eólica basada en el PMSG.	74
Tabla A.18: Datos asociados a los VSC en el sistema de 57 nodos con integración de energía eólica basada en el PMSG.....	74
Tabla A.19: Número de nodos y componentes de los CEI-PMSG en el sistema de 118 nodos del IEEE.....	75
Tabla A.20: Datos de las líneas de transmisión asociadas a los CEI-PMSG en el sistema de 118 nodos con integración de energía eólica basada en el PMSG.	75
Tabla A.21: Datos de los transformadores asociados a los CEI-PMSG en el sistema de 118 nodos con integración de energía eólica basada en el PMSG.	75

Tabla A.22: Datos de los compensadores de potencia reactiva asociados a los CEI-PMSG en el sistema de 118 nodos con integración de energía eólica basada en el PMSG.....	76
Tabla A.23: Datos asociados a la generación del PMSG y potencia de los VSC en el sistema de 118 nodos con integración de energía eólica basada en el PMSG.	76
Tabla A.24: Datos asociados a los VSC en el sistema de 118 nodos con integración de energía eólica basada en el PMSG.	76
Tabla C.1: Potencia reactiva de los generadores convencionales del sistema de 57 nodos del IEEE con integración de PMSGs.	81
Tabla C.2: Potencia reactiva de los inversores asociados a los CEI-PMSG en el sistema de 57 nodos del IEEE.	82
Tabla C.3: Índices de modulación de los convertidores asociados a los CEI-PMSGs en el sistema de 57 nodos del IEEE.	82
Tabla C.4: Flujos de potencia en las líneas de transmisión del sistema de 57 nodos del IEEE con integración de PMSGs.	83
Tabla C.5: Flujos de potencia en los transformadores del sistema de 57 nodos del IEEE con integración de PMSGs.	85
Tabla C.6: Compensación de reactivos en el sistema de 57 nodos con integración de PMSGs..	86
Tabla C.7: Flujo de potencia en los CEI-PMSG y potencia total inyectada en los nodos de interconexión del sistema de 57 nodos del IEEE.....	86
Tabla C.8: Potencia reactiva de los generadores convencionales del sistema de 118 nodos del IEEE con integración de PMSGs.	87
Tabla C.9: Potencia reactiva de los inversores asociados a los CEI-PMSG en el sistema de 118 nodos del IEEE.	88
Tabla C.10: Índices de modulación de los convertidores asociados a los CEI-PMSG en el sistema de 118 nodos del IEEE.	88
Tabla C.11: Flujos de potencia en las líneas de transmisión del sistema de 118 nodos del IEEE con integración de PMSGs.	89
Tabla C.12: Flujos de potencia en los transformadores del sistema de 118 nodos del IEEE con integración de PMSGs.	93
Tabla C.13: Compensación de reactivos en el sistema de 118 nodos con integración de PMSGs.	93

Tabla C.14: Flujo de potencia en los CEI-PMSG y potencia total inyectada en los nodos de interconexión del sistema de 118 nodos del IEEE.	94
--	----

Lista de Símbolos y Abreviaturas

N	Número de nodos del sistema eléctrico.
V_{slack}	Magnitud de voltaje en el nodo slack.
θ_{slack}	Ángulo de voltaje en el nodo slack.
\bar{V}_k	Voltaje complejo del nodo k .
ΔP_k	Desbalance de potencia activa del nodo k .
ΔQ_k	Desbalance de potencia reactiva del nodo k .
P_{Gk}	Potencia activa inyectada por el generador conectado en el nodo k .
Q_{Gk}	Potencia reactiva inyectada por el generador conectado en el nodo k .
P_{Lk}	Potencia activa demandada por la carga conectada en el nodo k .
Q_{Lk}	Potencia reactiva demandada por la carga conectada en el nodo k .
P_k^{cal}	Potencia activa inyectada por el nodo k en los elementos de transmisión.
Q_k^{cal}	Potencia reactiva inyectada por el nodo k en los elementos de transmisión.
P_k^{esp}	Potencia activa especificada en el nodo k .
Q_k^{esp}	Potencia reactiva especificada en el nodo k .
V_k	Magnitud de voltaje en el nodo k .
θ_k	Ángulo de voltaje en el nodo k .
ΔV	Término correctivo asociado a la magnitud de voltaje nodal.
$\Delta \theta$	Término correctivo asociado al ángulo del voltaje nodal.
G_{kk}	Conductancia propia en el nodo k .
B_{kk}	Susceptancia propia en el nodo k .
G_{km}	Conductancia entre los nodos k y m .
B_{km}	Susceptancia entre los nodos k y m .
$Q_{Gk_{\min}}$	Límite inferior de generación de potencia reactiva del generador conectado al nodo k .
$Q_{Gk_{\max}}$	Límite superior de generación de potencia reactiva del generador conectado al nodo k .

K_1	Constante del rectificador que relaciona las variables de corriente alterna con las de corriente directa y que equivale a $\sqrt{3/2}$.
K_2	Constante del inversor que relaciona las variables de corriente directa con las de corriente alterna y que equivale a $\sqrt{3/2}$.
m_{a1}	Índice de modulación del rectificador.
m_{a2}	Índice de modulación del inversor.
R_{c1}	Resistencia interna del rectificador.
R_{c2}	Resistencia interna del inversor.
G_{c1}	Conductancia interna del rectificador.
G_{c2}	Conductancia interna del inversor.
Q_{inv}	Potencia reactiva a la salida del inversor del lado de la red.
\bar{Y}_r	Admitancia del reactor de fase.
\bar{Y}_f	Admitancia del filtro.
\bar{Y}_T	Admitancia del transformador.
P_{wg}	Potencia en terminales del generador eólico.
C_p	Coefficiente de potencia del generador eólico.
ρ	Densidad del aire.
S	Sección transversal marcada por las palas del generador eólico.
v	Velocidad del viento.
ε_{ind}	Voltaje inducido.
N_v	Número de vueltas de una bobina.
φ	Flujo magnético.
B	Campo magnético.
S_b	Sección transversal de las bobinas.
ω	Frecuencia angular.
t	Tiempo.
P_{wgcd}	Flujo de potencia activa que va del nodo wg al nodo cd .
P_{cdca}	Flujo de potencia activa que va del nodo cd al nodo ca .
P_{cavi}	Flujo de potencia activa que va del nodo ca al nodo vi .
Q_{cavi}	Flujo de potencia reactiva que va del nodo ca al nodo vi .

P_{vik}	Flujo de potencia activa que va del nodo vi al nodo k .
Q_{vik}	Flujo de potencia reactiva que va del nodo vi al nodo k .
X_{ca}	Vector de estado compuesto por todos los ángulos y magnitudes de voltaje nodal.
X_{wg}	Vector que agrupa a todas las variables de estado asociadas con la interconexión del generador eólico.
∂	Operador de la derivación parcial.
S_c	Potencia aparente de los convertidores.
I_c	Corriente de los convertidores.
P_c	Potencia activa de los convertidores.
Q_c	Potencia reactiva de los convertidores.
$Q_{c_{\min}}$	Límite inferior del soporte de potencia reactiva de los convertidores.
$Q_{c_{\max}}$	Límite superior del soporte de potencia reactiva de los convertidores.
p.u.	En por unidad.
J	Jacobiano o matriz jacobiana.
CA	Corriente alterna.
CD	Corriente Directa.
SEN	Sistema Eléctrico Nacional
PMSG	Generador Síncrono de Imanes Permanentes.
CEI-PMSG	Circuito Eléctrico para la Interconexión del PMSG.
VSC	Convertidor de fuente de voltaje.
FACTS	Sistemas de Transmisión en Corriente Alterna Flexibles.
SVC	Compensador Estático de Volt-Ampere-Reactivos.
TCSC	Compensador Serie Controlado por Tiristores.
STATCOM	Compensador Estático.
UPFC	Controlador de Flujo de Potencia Unificado.
HVDC-VSC	Alto Voltaje en Corriente Directa basado en Convertidores de Fuente de Voltaje.
PWM	Modulación por Ancho de Pulso.
DFIG	Generador de Inducción Doblemente Alimentado.
LTC	Cambiador de Tap con Carga.

IEEE

Instituto de Ingenieros Electricistas y Electrónicos.

NR

Newton Raphson.

Capítulo 1

Introducción

1.1. Introducción

El Sistema Eléctrico Nacional (SEN) demanda una considerable cantidad de recursos naturales no renovables para la generación de energía eléctrica, los cuales emiten importantes cantidades de gases contaminantes. El emplear más fuentes de energía renovable reduciría en gran medida los problemas que causa la dependencia a los combustibles fósiles [Secretaría de Energía (SENER), 2016], siendo la energía eólica una de las opciones más efectivas y prácticas para la generación de electricidad a partir de fuentes renovables, tal como se muestra en la Figura 1.1 para el sistema eléctrico interconectado nacional [Secretaría de Energía (SENER), 2016], [Secretaría de Energía (SENER), 2017] y [Secretaría de Energía (SENER), 2018]. En el eje vertical izquierdo de esta figura se indica la capacidad instalada en MW de las centrales eólicas de México, es decir, la potencia instantánea que se tendría si todas estas centrales estuvieran trabajando a potencia nominal. En el eje vertical derecho se indica la generación bruta en GWh/año, es decir, la potencia generada durante un año. La gráfica de barras de esta figura está relacionada con los valores del eje vertical izquierdo, mientras que, la gráfica de línea con el eje vertical derecho. De esta manera, es claro el crecimiento anual que ha tenido la generación eólica en México desde el 2005 hasta el 2017 [Secretaría de Energía (SENER), 2016], [Secretaría de Energía (SENER), 2017] y [Secretaría de Energía (SENER), 2018].

La generación anual de energía eléctrica a través de la energía eólica ha crecido significativamente desde 2005, de 5 GWh/año hasta 8,745 GWh/año en el 2015 alcanzando una capacidad instalada de 2,805 MW, lo cual se muestra en la Figura 1.1 [Secretaría de Energía (SENER), 2016].

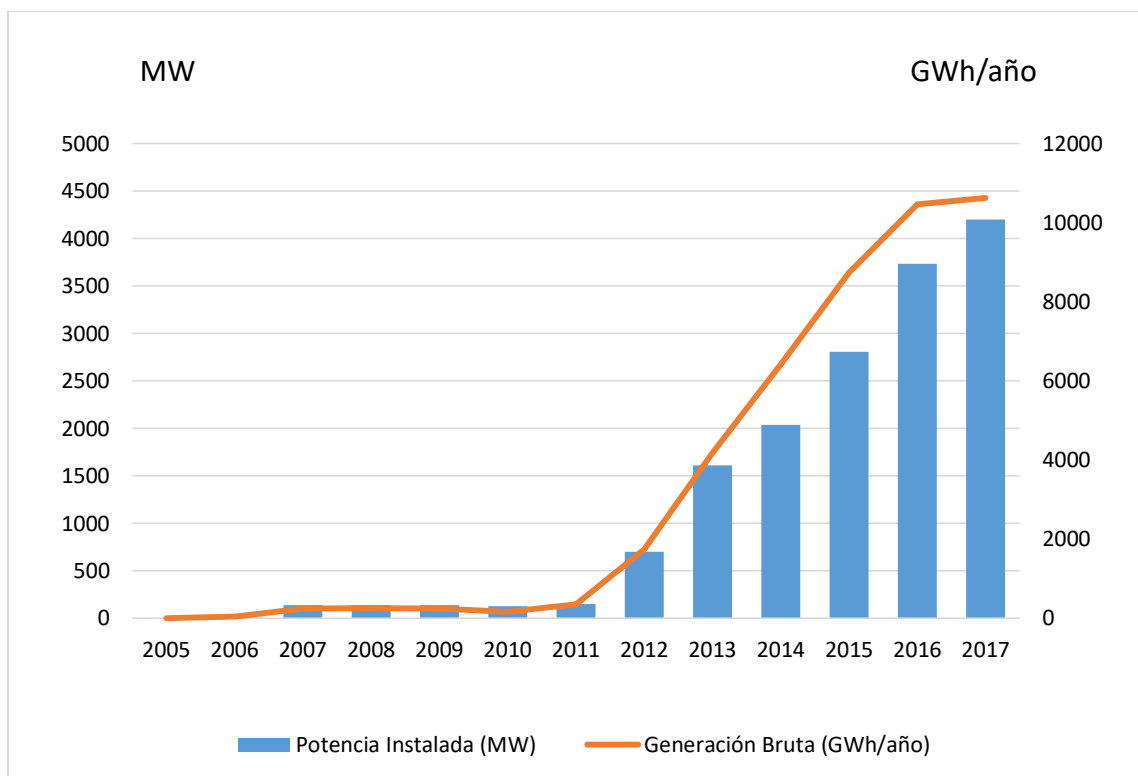


Figura 1.1: Capacidad instalada y generación bruta de centrales eólicas, 2005-2017 (MW, GWh/año).

En el año 2016 la capacidad instalada que se registró fue de 3,735 MW, representando aproximadamente el 5% de la capacidad instalada total; mientras que la generación fue de 10,463 GWh/año, representando el 3% de la generación total [Secretaría de Energía (SENER), 2017].

En el año 2017 la capacidad instalada que se registró fue de 4,199 MW, representando aproximadamente el 6% de la capacidad instalada total; mientras que la generación fue de 10,620 GWh/año, representando el 3% de la generación total [Secretaría de Energía (SENER), 2018].

Los resultados del ejercicio de planeación indican que se requieren 66,912 MW de capacidad adicional para satisfacer la demanda nacional de energía eléctrica en el periodo 2018-2032 [Secretaría de Energía (SENER), 2018]. En la Figura 1.2 se muestra la participación que tendrá la generación eólica en la capacidad adicional de generación y en la Figura 1.3 se muestra la evolución de la generación de energía eléctrica que se espera tener del 2018 al 2032.

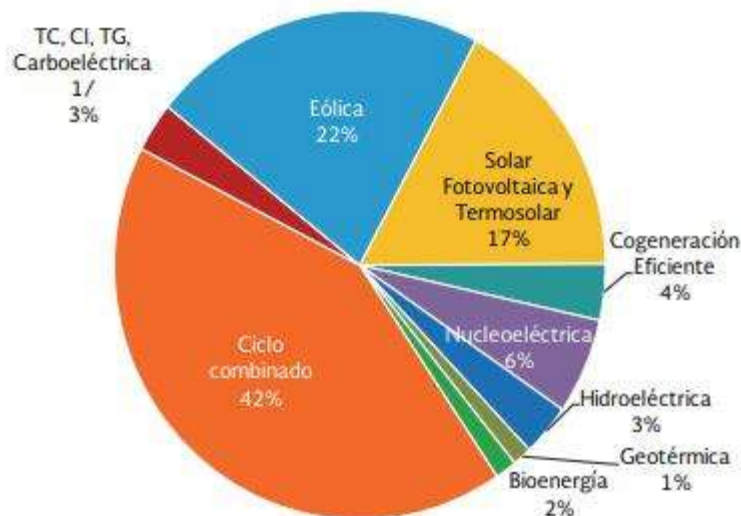


Figura 1.2: Participación en la capacidad adicional por tipo de tecnología 2018-2032.

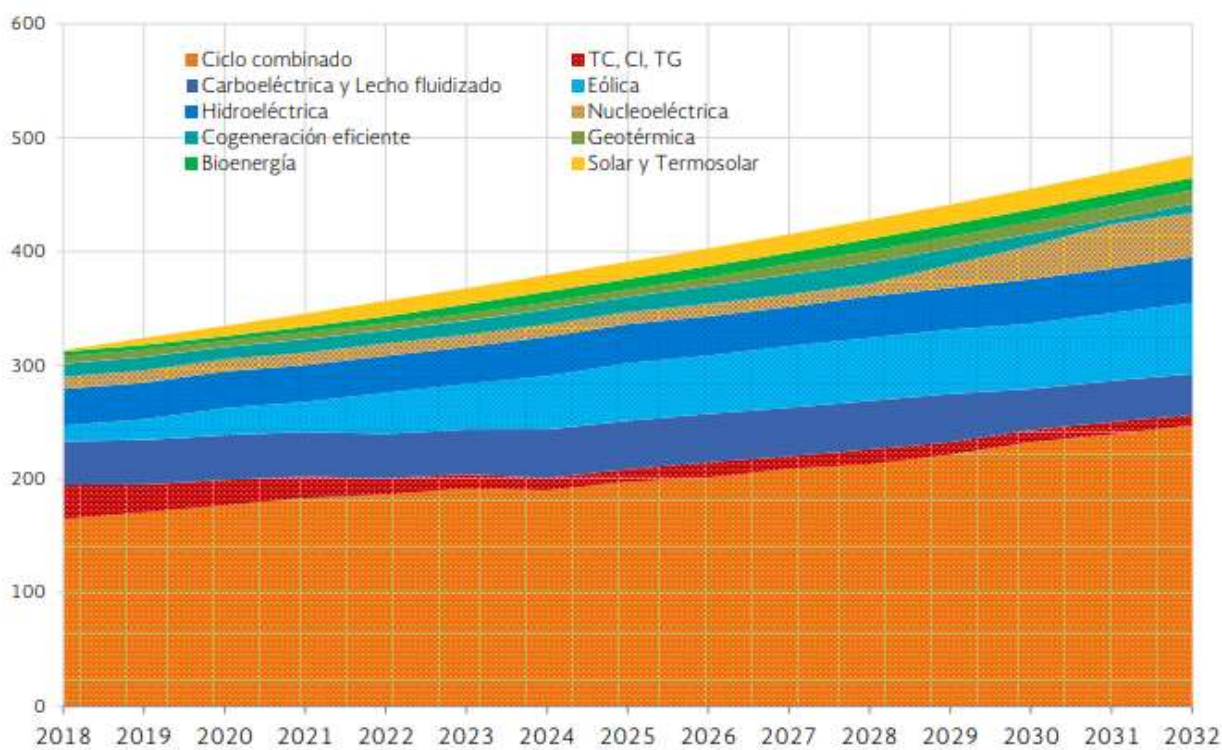


Figura 1.3: Evolución de la generación de energía eléctrica 2018-2032 (Terawatt-hora).

Los países con la mayor capacidad instalada en parques eólicos son China, Estados Unidos de América, Alemania, España y Reino Unido; generando entre ellos el 65% de la energía eólica

mundial. México se ubica dentro de los primeros 20 países con la mayor generación de electricidad por medio del viento [Secretaría de Energía (SENER), 2018].

Con base en los datos anteriores, la participación de la energía eólica se ha incrementado y se estima que lo seguirá haciendo, lo cual hace que esta sea una de las opciones más atractivas para la generación de electricidad. Sin embargo, el aumento de la penetración de energía eólica provoca que la operación de los sistemas de potencia se vuelva compleja por la generación estocástica del PMSG ante las variaciones de la velocidad del viento [Angeles Camacho y Bañuelos Ruedas, 2011]. Debido a esto, se deben realizar estudios de flujos de potencia que contemplen la integración de este tipo de generadores, ya que es de gran importancia para la planeación, diseño, control y operación de los sistemas eléctricos de potencia.

Considerando que el Generador Síncrono de Imanes Permanentes (PMSG) es una de las opciones en las que se basa la generación eólica, en este trabajo se desarrolla la formulación matemática para el estudio de flujos de potencia en sistemas eléctricos en estado estable considerando la integración de energía eólica basada en el PMSG. En este contexto, se presenta el modelo del Circuito Eléctrico para la Interconexión del PMSG (CEI-PMSG), se desarrollan las ecuaciones de flujos de potencia para el mismo y se obtienen las ecuaciones de balance de potencia en cada uno de sus nodos. Este modelo contiene un enlace en corriente directa conformado por convertidores de fuentes de voltaje (VSC por sus siglas en inglés), en los que se incluyen el índice de modulación así como las pérdidas por conmutación y conducción. Como parte de la integración del generador eólico se debe calcular la potencia proveniente del mismo, lo cual se hace mediante la ecuación de Betz que incorpora la densidad del aire, el coeficiente de potencia, el área de barrido de la turbina eólica y la velocidad del viento.

Las ecuaciones no lineales que resultan del modelo del CEI-PMSG, desarrolladas como parte de este trabajo, se acoplan con las ecuaciones de la red para formar un sistema unificado de ecuaciones no lineales que se solucionan utilizando el algoritmo Newton-Raphson. En esta solución se obtienen los voltajes nodales del sistema interconectado, con los cuales es posible encontrar los flujos de potencia activa y reactiva que fluyen a través de los transformadores y de los elementos de transmisión.

1.2. Estado del Arte

Partiendo de que el estudio de flujos de potencia es de gran importancia para la planeación, diseño, control y operación de los sistemas eléctricos de potencia, a continuación se presenta una reseña de trabajos asociados a la formulación del problema de flujos de potencia considerando dispositivos controladores y generadores basados en energías renovables.

Desde hace muchos años, el estudio de flujos de potencia ha sido una herramienta importante para tomar decisiones en la operación y planeación de los sistemas eléctricos de potencia y es una actividad que generalmente se realiza fuera de línea para analizar condiciones pasadas o futuras de un sistema eléctrico de potencia [Romero Romero, 1979].

En [Arguello Rios, 1988], se presenta un resumen de las diferentes técnicas analíticas que actualmente se disponen para la solución de problemas de flujo de potencia. La aplicación de estas técnicas depende del planteamiento del problema a ser resuelto, con el objeto de conocer el comportamiento de estado estable de sistemas eléctricos de potencia. En este contexto, el estudio de flujos de potencia es la denominación que se le da a la solución de estado estable de un sistema de potencia bajo ciertas condiciones preestablecidas de generación, carga y topología de red.

Para el estudio de flujos de potencia se presenta en [Fuerte-Esquivel y Acha, 1996], el modelado en estado estable basado en admitancias para compensadores en serie, transformadores defasadores y con cambiadores de tap bajo carga. Estos modelos se han incluido en un algoritmo de flujo de carga Newton-Raphson que es capaz de resolver grandes redes de potencia de manera confiable y tiene la característica de convergencia cuadrática que lo vuelve un método atractivo para la solución de este problema.

En el año 2004, se presentó en [Acha, Fuerte-Esquivel, Ambriz-Perez, y Angeles-Camacho, 2004] el modelo para el estudio de flujos de potencia en estado estable considerando controladores FACTS, tales como: el Compensador Estático de VARs (SVC), el Compensador Serie Controlado por Tiristores (TCSC), el Compensador Estático (STATCOM), el Controlador de Flujo de Potencia Unificado (UPFC) y el enlace de Alto Voltaje en Corriente Directa basado en Convertidores de Fuente de Voltaje (HVDC-VSC). Para realizar el estudio de flujos de potencia se utilizó un enfoque unificado que combina las variables de estado que describen el equipo controlable con las que describen la red para obtener una solución simultánea de todas las variables de estado utilizando el método de Newton-Raphson, manteniéndose la característica de

convergencia cuadrática en dicha solución. El aumento en las dimensiones del Jacobino, en comparación con el caso en el que no hay controladores del sistema de potencia, es proporcional al número y tipo de tales controladores.

En el año 2006, se presentó en [Ramirez y Gonzalez, 2006] la incorporación de un Controlador de Flujo de Potencia Unificado (UPFC) con modulación de ancho de pulso (PWM), el cual se conecta en serie con una línea de transmisión y no requiere de un enlace de Corriente Directa (CD). El sistema consiste en un transformador de desplazamiento de fase en cuadratura múltiple operado en conjunto con interruptores trifásicos de tiro múltiple, que se modulan por ancho de pulso para sintetizar un voltaje ajustable que se inyecta en el devanado conectado en serie con la línea de transmisión para controlar los flujos de potencia activa y reactiva [Ramirez y Gonzalez, 2006]. Al igual que en [Acha, Fuerte-Esquivel, Ambriz-Perez, y Angeles-Camacho, 2004], la solución del problema de flujos de potencia se realiza de una manera unificada mediante el método de Newton-Raphson.

En el año 2011, se presentó en [Castro L. M., Fuerte-Esquivel, Barrios, y Angeles-Camacho, 2011] un enfoque general de modelado en estado estable de redes eléctricas que tienen parques eólicos y dispositivos FACTS. En este enfoque, las variables de estado asociadas con los parques eólicos y los dispositivos FACTS se combinan con las magnitudes y ángulos de voltaje nodal de la red de transmisión para una solución iterativa unificada del problema de flujos de potencia. Además, se introduce un modelo de generador eólico basado en un generador síncrono de imanes permanentes para estudios de flujos de potencia, que permite un control de magnitud de voltaje en el lado de alta tensión del transformador que se utiliza para la interconexión del generador eólico.

En el año 2012, se propuso en [Castro, Fuerte-Esquivel, y Tovar-Hernández, 2012] la integración de modelos de estado estable de varios tipos de generadores eólicos en un algoritmo de flujo de potencia con control automático de frecuencia. Estos modelos se formulan dentro del enfoque de flujos de potencia utilizando un marco de referencia unificado y el algoritmo de Newton-Raphson.

En el año 2013, se presentó en [Castro, Acha, y Fuerte-Esquivel, 2013] un modelo avanzado del STATCOM que permite una representación completa de sus circuitos de CA y CD. El nuevo modelo STATCOM considera un convertidor de fuente de voltaje (VSC) en serie con un transformador LTC. El primero está representado por un transformador de tap complejo variable cuyos devanados primario y secundario corresponderían a los nodos de CA y CD del VSC,

respectivamente. La magnitud y el ángulo de fase del tap complejo variable corresponden a la amplitud del índice de modulación y al desplazamiento de fase que existiría en un inversor PWM para permitir la generación o absorción de potencia puramente reactiva mediante el procesamiento electrónico de las formas de onda de voltaje y corriente dentro del VSC. La técnica numérica empleada para resolver el modelo STATCOM es el método de Newton-Raphson para ambos regímenes operativos, el estado estable y el estado dinámico. Este modelo es extendido en [Acha, Kazemtabrizi, y Castro, 2013] para representar un enlace VSC-HVDC en el contexto del problema de flujos de potencia. En [Castro González, 2013] se presentan los dos tipos de generadores más populares con respecto a la velocidad en su turbina, es decir, los aerogeneradores de velocidad fija y de velocidad variable. También se propone un modelo mejorado del Generador de Inducción Doblemente Alimentado (DFIG) utilizando el circuito equivalente del VSC para incorporar a las ecuaciones de flujos de potencia el índice de modulación así como las pérdidas por conducción y conmutación. A excepción del modelo mejorado del DFIG, las pérdidas de potencia en los convertidores no son consideradas debido a que no se tiene una representación explícita del enlace de corriente directa, y esto no permite relacionar las variables de corriente directa con las de corriente alterna; por lo que para el estudio de flujos de potencia únicamente se combinan las ecuaciones de la red eléctrica y las ecuaciones asociadas al transformador que utiliza para la interconexión, obteniendo así, una formulación unificada con la que solucionan el problema de flujos de potencia mediante el método de Newton-Raphson.

El modelo del generador eólico de velocidad variable basado en el generador síncrono de imanes permanentes es el principal interés en esta tesis. Este tipo de generador eólico posee un PMSG y un convertidor rectificador-inversor (Back-to-Back) que permite tener control de la potencia activa y la potencia reactiva que fluye a través de él [Hong-Woo, Sung-Soo, y Hee-Sang, 2010].

En el año 2016, se presentó en [Acha y Castro, 2016] un marco de referencia generalizado para la incorporación de sistemas de múltiples terminales VSC-HVDC para soluciones iterativas unificadas de flujos de potencia utilizando el método de Newton-Raphson. Cabe resaltar que en este trabajo se presentó un modelo completo de una estación VSC compuesta por el convertidor de CA/CD con sus nodos de CA y CD representados explícitamente, un reactor de fase, un filtro en derivación y un transformador LTC que se usa para el acoplamiento. El reactor y el filtro son elementos esenciales de la estación VSC para eliminar el rizado de la señal de voltaje en el

devanado secundario del transformador y son representados como admitancias \bar{Y}_{reac} and \bar{Y}_{filter} , mientras que el transformador está representado por una admitancia \bar{Y}_T .

En el año 2018, se presentó en [Martínez-Parrales y Fuerte-Esquivel, 2018] un nuevo enfoque unificado para la estimación de estado y el análisis de datos incorrectos de los sistemas de transmisión de energía eléctrica con redes multiterminal HVDC basadas en VSC. En este trabajo, el circuito equivalente del VSC reportado en [Castro, Acha, y Fuerte-Esquivel, 2013] se acopla con los elementos auxiliares que se mencionan en [Acha y Castro, 2016], como son el reactor de fase, el filtro en derivación y el transformador cambiador de tap que permite la interconexión a la red de potencia. De esta manera, se tiene una representación explícita del modelo del circuito equivalente en secuencia positiva que va desde la fuente o enlace de CD hasta el punto de interconexión con el sistema eléctrico de potencia.

Basado en los trabajos anteriores, en esta tesis se desarrolla una formulación para el estudio de flujos de potencia en sistemas eléctricos con integración de energía eólica basada en el PMSG. Utilizando un modelo modificado del circuito equivalente del VSC [Martínez-Parrales y Fuerte-Esquivel, 2018], se hace una representación explícita de todo el circuito que se utiliza para la interconexión del PMSG a la red eléctrica; lo cual permite asociar las variables de CA del lado del PMSG, las variables del enlace de CD y las variables de CA del lado de la red. Además se incorpora el índice de modulación y las pérdidas por conmutación y conducción en las nuevas ecuaciones de flujos de potencia asociadas a dicho circuito, para posteriormente acoplar estas nuevas ecuaciones con las ecuaciones de la red en un solo marco de referencia para obtener una solución unificada utilizando el método de Newton-Raphson.

1.3. Objetivo

El objetivo general de este trabajo es la formulación y solución del problema de flujos de potencia en sistemas eléctricos considerando de manera detallada generadores eólicos de velocidad variable basados en generadores síncronos de imanes permanentes.

Para lograr el objetivo general, deben cumplirse las siguientes metas:

- ❖ Desarrollar las ecuaciones de flujos de potencia del circuito para la interconexión del generador síncrono de imanes permanentes (CEI-PMSG), considerando el índice de modulación así como las pérdidas por conmutación y conducción de los convertidores de fuentes de voltaje (VSC) que forman parte del CEI-PMSG.
- ❖ A partir de las ecuaciones de flujos de potencia del CEI-PMSG, obtener las ecuaciones de balance de potencia en cada uno de sus nodos.
- ❖ Acoplar las ecuaciones de balance de potencia que resulten del modelo del CEI-PMSG con las ecuaciones de la red para obtener una formulación unificada que nos permita realizar el estudio de flujos de potencia en sistemas eléctricos con integración de energía eólica basada en el PMSG. Estos estudios se realizarán con base a un programa de flujos de potencia previamente desarrollado en el cual se ha incluido el modelo del CEI-PMSG descrito en esta tesis.
- ❖ Realizar pruebas en sistemas eléctricos de diferente tamaño integrando generación eólica en los mismos y aplicando la formulación desarrollada en este trabajo para posteriormente hacer un análisis de los resultados.

1.4. Justificación

El Sistema Eléctrico Nacional demanda una considerable cantidad de recursos naturales no renovables como son los combustibles fósiles, los cuales generan importantes cantidades de gases contaminantes que influyen en el cambio climático, teniendo como consecuencia el calentamiento global. El emplear más fuentes de energía renovable reduciría en gran medida los problemas que causa la dependencia de los combustibles fósiles. La generación eólica es una de las opciones más efectivas y prácticas para la generación de electricidad a partir de fuentes renovables. Sin embargo, las variaciones de la velocidad del viento originan una potencia estocástica a la salida del PMSG provocando que la operación del sistema eléctrico se vuelva más compleja. Debido a esto, se debe desarrollar una formulación que permita realizar un estudio de flujos de potencia contemplando la integración de este tipo de generadores, ya que es de gran importancia para la planeación, diseño,

control y operación de los sistemas eléctricos de potencia. Además el generador síncrono de imanes permanentes presenta algunas ventajas sobre otros generadores tales como el Generador de Inducción de Jaula de Ardilla (SCWG por sus siglas en inglés) que trabaja a velocidad fija y el Generador de Inducción Doblemente Alimentado (DFIG por sus siglas en inglés) que trabaja a velocidad variable. A diferencia del primero, el PMSG aprovecha un rango de velocidades de viento para la generación de energía eléctrica; mientras que a diferencia del segundo, puede tener control total de la potencia generada y no requiere de alimentación de campo; y a diferencia de ambos el PMSG no tiene caja de engranes, por lo que no se tiene una pérdida de potencia mecánica ni se requiere mantenimiento para esa área. Esto justifica el desarrollo de una formulación matemática que nos permita realizar el estudio de flujos de potencia contemplando la integración de energía eólica basada en el PMSG.

1.5. Metodología

La metodología de este trabajo consiste en el desarrollo de una formulación unificada que permita realizar el estudio de flujos de potencia en sistemas eléctricos con la integración de energía eólica basada en el PMSG. Para lo anterior se derivan las ecuaciones de flujos de potencia del CEI-PMSG y se obtienen las ecuaciones de balance de potencia en cada uno de sus nodos; estas últimas ecuaciones son acopladas con las ecuaciones de la red eléctrica en el punto de interconexión para obtener un solo conjunto de ecuaciones no lineales que se soluciona por medio del método Newton-Raphson. Esta formulación se implementa en un programa computacional previamente desarrollado en MATLAB R2013a [Vega Fernández, 2011] y los resultados obtenidos se validan con otro programa de computadora llamado PowerWorld [PowerWorld, 2016]. En este último, no se cuenta con un modelo del PMSG por lo que este generador se modela como una fuente de inyección de potencia constante. Este valor de potencia corresponde a la potencia a la salida del inversor del CEI-PMSG, la cual es obtenida mediante un estudio de flujos de potencia con la metodología propuesta.

1.6. Estructura de la Tesis

A continuación se describe de manera general el contenido de los capítulos que conforman esta tesis.

En el Capítulo 1 se presenta una introducción de la integración de energía eólica en los sistemas eléctricos de potencia y una reseña de los trabajos existentes asociados con la formulación unificada para el estudio de flujos de potencia considerando la integración de dispositivos controladores y generadores eólicos a la red eléctrica. Aunado a lo anterior, se presenta el objetivo, la justificación, la metodología y la estructura de la tesis.

En el Capítulo 2 se presenta la formulación y solución del problema de flujos de potencia considerando la interconexión del generador síncrono de imanes permanentes.

En el Capítulo 3 se presentan estudios de flujos de potencia en los sistemas de 5, 14, 57 y 118 nodos del IEEE considerando la integración de energía eólica basada en el PMSG.

En el Capítulo 4 se presentan las conclusiones generales del presente trabajo, las aportaciones del mismo y los trabajos futuros que podrían derivarse de dicho trabajo.

Capítulo 2

Flujos de Potencia en Sistemas Eléctricos con Integración de Energía Eólica Basada en el Generador Síncrono de Imanes Permanentes

2.1. Introducción

En este capítulo se desarrolla la formulación matemática para el estudio en estado estable de flujos de potencia en sistemas eléctricos con integración de energía eólica basada en el PMSG. Para esto, se presentan los conceptos generales del problema de flujos de potencia tales como la clasificación de los nodos y variables de estado. Con la finalidad de integrar el modelo de un circuito equivalente de secuencia positiva del PMSG en la formulación del problema, se desarrollan las ecuaciones de flujos de potencia de dicho circuito y se obtienen las ecuaciones de balance de potencia en cada uno de sus nodos. En este contexto, se calcula la potencia eléctrica proveniente del generador eólico mediante la ecuación de Betz. Por último, las ecuaciones de flujo de potencia del circuito utilizado para la interconexión del PMSG y las ecuaciones de la red son integradas en un solo sistema de ecuaciones no lineales que puede solucionarse utilizando el método Newton-Raphson.

2.2. Conceptos Generales de Flujos de Potencia

El problema de flujos de potencia se resuelve para determinar los valores de voltajes nodales en una red eléctrica operando en estado estable. Estos valores de voltaje permiten calcular los flujos de potencia activa y reactiva en cada línea de transmisión y en cada transformador.

La formulación matemática del problema de flujos de potencia parte del hecho que debe existir un balance de potencia en cada nodo de un sistema eléctrico, es decir, la suma de la potencia generada, la potencia demandada por la carga y la potencia que fluye a través de los elementos de transmisión debe ser igual a cero en cada nodo, tanto para la potencia activa como para la reactiva. De tal manera, las ecuaciones de balance de potencia, o ecuaciones de desajuste de potencia, para

un nodo k son dadas por [Acha, Fuerte-Esquivel, Ambriz-Perez, y Angeles-Camacho, 2004], [Grainger y Stevenson, 1996] y [González Carranza, 2016]:

$$\Delta P_k = P_{Gk} - P_{Lk} - P_k^{cal} = P_k^{esp} - P_k^{cal} = 0 \quad (2.1)$$

$$\Delta Q_k = Q_{Gk} - Q_{Lk} - Q_k^{cal} = Q_k^{esp} - Q_k^{cal} = 0 \quad (2.2)$$

donde ΔP_k y ΔQ_k son los desajustes de potencia activa y reactiva en el nodo k , respectivamente. P_{Gk} y Q_{Gk} representan, respectivamente, las potencias activa y reactiva inyectadas en el nodo k por un generador. P_{Lk} y Q_{Lk} representan las potencias activa y reactiva consumidas por la carga conectada en el nodo k . Para propósito de la solución del problema de flujos de potencia, se considera que tanto las potencias activa y reactiva generadas, como las consumidas por la carga en el nodo k son variables conocidas. Con base a esta suposición, se obtiene lo que se conoce como potencia activa especificada P_k^{esp} y potencia reactiva especificada Q_k^{esp} [Acha, Fuerte-Esquivel, Ambriz-Perez, y Angeles-Camacho, 2004]:

$$P_k^{esp} = P_{Gk} - P_{Lk} \quad (2.3)$$

$$Q_k^{esp} = Q_{Gk} - Q_{Lk} \quad (2.4)$$

Las variables P_k^{cal} y Q_k^{cal} representan, respectivamente, la inyección de las potencias activa y reactiva netas; es decir, la suma algebraica de las potencias que son inyectadas en cada uno de los elementos de transmisión conectados al nodo k , tal como se muestra en la Figura 2.1 y como se expresa en las ecuaciones (2.5) y (2.6). Debido a que estas ecuaciones están en función de la magnitud y el ángulo de los voltaje nodales, se deben calcular por medio de las ecuaciones de flujos de potencia.

$$P_k^{cal} = P_k^{1cal} + P_k^{2cal} + \dots + P_k^{Ncal} \quad (2.5)$$

$$Q_k^{cal} = Q_k^{1cal} + Q_k^{2cal} + \dots + Q_k^{Ncal} \quad (2.6)$$

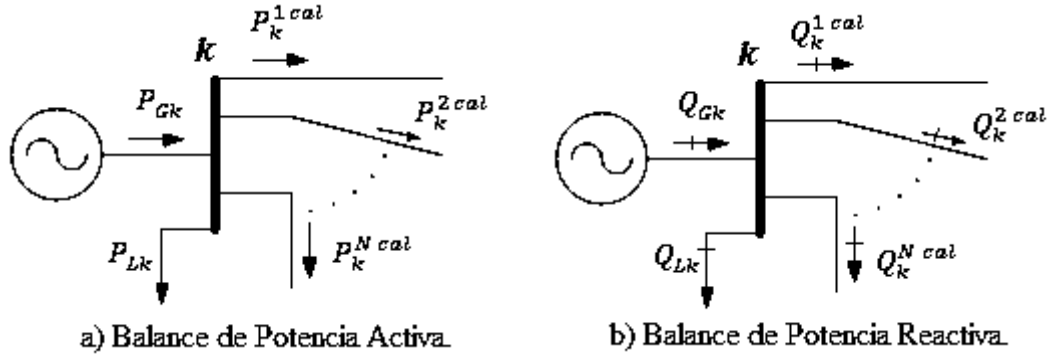


Figura 2.1: Balance de potencia en el nodo k .

Las expresiones para los flujos de potencia P_k^{cal} y Q_k^{cal} se pueden expresar para un sistema de dos nodos k y m como [Acha, Fuerte-Esquivel, Ambriz-Perez, y Angeles-Camacho, 2004]:

$$P_k^{cal} = V_k^2 G_{kk} + V_k V_m [G_{km} \cos(\theta_k - \theta_m) + B_{km} \sin(\theta_k - \theta_m)] \quad (2.7)$$

$$Q_k^{cal} = -V_k^2 B_{kk} + V_k V_m [G_{km} \sin(\theta_k - \theta_m) - B_{km} \cos(\theta_k - \theta_m)] \quad (2.8)$$

Mientras que para un sistema de N nodos, las ecuaciones se expresan como [Acha, Fuerte-Esquivel, Ambriz-Perez, y Angeles-Camacho, 2004]:

$$P_k^{cal} = V_k \sum_{m=1}^N V_m [G_{km} \cos(\theta_k - \theta_m) + B_{km} \sin(\theta_k - \theta_m)] \quad (2.9)$$

$$Q_k^{cal} = V_k \sum_{m=1}^N V_m [G_{km} \sin(\theta_k - \theta_m) - B_{km} \cos(\theta_k - \theta_m)] \quad (2.10)$$

Con las ecuaciones para flujos de potencia obtenidas, es posible reescribir las ecuaciones de balance de potencia para cada nodo de la red. Para un sistema de dos nodos, se sustituyen las ecuaciones (2.7) y (2.8) en (2.1) y (2.2) respectivamente:

$$\Delta P_k = P_{Gk} - P_{Lk} - \{V_k^2 G_{kk} + V_k V_m [G_{km} \cos(\theta_k - \theta_m) + B_{km} \sin(\theta_k - \theta_m)]\} \quad (2.11)$$

$$\Delta Q_k = Q_{Gk} - Q_{Lk} - \{-V_k^2 B_{kk} + V_k V_m [G_{km} \sin(\theta_k - \theta_m) - B_{km} \cos(\theta_k - \theta_m)]\} \quad (2.12)$$

Mientras que para las ecuaciones generales de balance de potencia en el nodo k , se sustituyen las ecuaciones (2.9) y (2.10) en (2.1) y (2.2) respectivamente:

$$\Delta P_k = P_{Gk} - P_{Lk} - \left\{ V_k \sum_{m=1}^N V_m [G_{km} \cos(\theta_k - \theta_m) + B_{km} \sin(\theta_k - \theta_m)] \right\} \quad (2.13)$$

$$\Delta Q_k = Q_{Gk} - Q_{Lk} - \left\{ V_k \sum_{m=1}^N V_m [G_{km} \sin(\theta_k - \theta_m) - B_{km} \cos(\theta_k - \theta_m)] \right\} \quad (2.14)$$

2.3. Clasificación de nodos y variables

La clasificación de los nodos se relaciona con el manejo de cuatro variables: potencia activa, potencia reactiva, magnitud y ángulo de los voltajes nodales. En cada nodo, dos de las variables son conocidas o pueden ser controladas, mientras que las otras dos son consideradas como variables de estado [Acha, Fuerte-Esquivel, Ambriz-Perez, y Angeles-Camacho, 2004] y [Vega Fernández, 2011].

De acuerdo a las variables conocidas, la clasificación de los nodos se describe de la siguiente manera:

- ❖ **Nodo PQ carga:** Las variables conocidas en este tipo de nodo son la potencia activa y la reactiva. Estas corresponden únicamente a la carga debido a que no se tiene inyección de potencia por parte de un generador. Por lo tanto, las variables a resolver o variables de estado para el estudio de flujos de potencia son la magnitud y el ángulo del voltaje nodal.
- ❖ **Nodo PV generador:** Las variables conocidas son la potencia activa y la magnitud de voltaje, esto debido a que en este tipo de nodo se tiene un generador conectado, el cual inyecta un valor especificado de potencia activa y gracias a que presenta un soporte bidireccional de potencia reactiva, mantiene un control de la magnitud de voltaje siempre y cuando los límites de potencia reactiva no sean violados. De esta manera, las variables de estado son la potencia reactiva y el ángulo de fase del voltaje nodal.

- ❖ **Nodo PQ generador:** En este tipo de nodo se tiene un generador que inyecta un valor especificado de potencia activa. Este generador no puede mantener el control de la magnitud del voltaje nodal debido a que uno de sus límites de potencia reactiva ha sido violado. Como consecuencia la potencia reactiva se fija en dicho límite. Por lo tanto, las variables conocidas son la potencia activa y la reactiva, mientras que las variables a resolver son la magnitud y el ángulo de fase del voltaje nodal.
- ❖ **Nodo Slack (Compensador):** Este tipo de nodo es único en el sistema eléctrico, en él se tiene conectado un generador que se encarga de compensar la potencia demandada por el sistema para que se cumpla el balance de energía, es decir, la potencia total consumida por las cargas más la potencia total que se pierde en los elementos de transmisión debe ser igual a la potencia total generada. Además, en este nodo se especifica la magnitud y el ángulo de fase del voltaje nodal, fijando normalmente el ángulo en cero, ya que se toma como la referencia de los ángulos de fase de los voltajes nodales de todo el sistema. Por lo tanto, las variables a resolver son la potencia activa y la reactiva que inyecta el generador del nodo Slack al sistema eléctrico.

2.4. Modelo del Circuito para la Interconexión del Generador Síncrono de Imanes Permanentes

La integración del PMSG en un sistema eléctrico de potencia debe cumplir con las condiciones eléctricas requeridas definidas en un código de red, tales como condiciones de magnitud de voltaje, frecuencia y secuencia de fases, las cuales deben ser iguales a las condiciones eléctricas que se tienen en el punto de conexión.

La potencia eléctrica del generador eólico depende directamente de la velocidad de viento, la cual tiene una variación de naturaleza aleatoria. Esto da como resultado una potencia eléctrica variable en terminales del PMSG y el incumplimiento de las condiciones eléctricas requeridas para la interconexión. Sin embargo, es posible cumplir con las condiciones de interconexión definidas por el código de red al utilizar dispositivos controladores conectados tal como se muestra en la Figura 2.2.

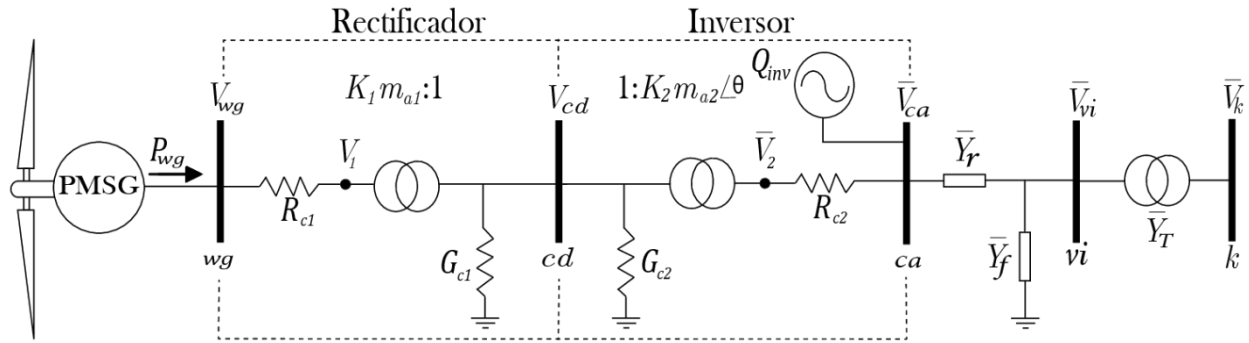


Figura 2.2: Modelo para el estudios de flujo de potencia del circuito equivalente para la interconexión del PMSG.

El circuito eléctrico utilizado para la interconexión del PMSG consta de una etapa de rectificación, una etapa inversora, un reactor de fase, un filtro y una etapa de transformación. A continuación se explica la función de cada uno de los elementos que integran el circuito representado en la Figura 2.2.

2.4.1. Etapa de Rectificación

La etapa de rectificación se encuentra comprendida entre los nodos wg y cd . Su función es convertir la energía de corriente alterna proveniente del PMSG, a corriente directa.

El rectificador se modela como un transformador ideal con tap variable para asociar las variables del lado de CA con las variables del lado de CD [Acha, Kazemtabrizi, y Castro, 2013]. En esta etapa, la relación del voltaje de CA y CD está dada por $K_1 m_{a1}$, donde K_1 es una constante utilizada para relacionar la señal RMS de un sistema trifásico con una señal de CD y tiene un valor de $\sqrt{3/2}$; y m_{a1} es el índice de modulación con el cual se puede controlar la diferencia de tensión en terminales del rectificador.

Las pérdidas por conducción y la caída de tensión interna se modelan con una resistencia en serie R_{c1} , mientras que, las pérdidas por conmutación se modelan con una conductancia G_{c1} en derivación; por lo tanto, debido a que en esta etapa solo se tienen elementos resistivos, se considera que el factor de potencia en terminales del PMSG es igual a uno, por lo que el ángulo de la señal de voltaje es igual a cero.

2.4.2. Etapa Inversora

La etapa de inversión se encuentra comprendida entre los nodos cd y ca . Su función es convertir la energía proveniente del rectificador, de CD a CA.

Al igual que en el rectificador, el Inversor también se modela como un transformador ideal con tap variable para asociar las variables del lado de CD con las variables del lado de CA [Acha, Kazemtabrizi, y Castro, 2013]. En esta etapa la relación del voltaje de CD y CA está dada por $K_2 m_{a2} \angle \theta$, donde K_2 es una constante utilizada para relacionar la señal de CD con la señal RMS de un sistema trifásico y tiene un valor de $\sqrt{3/2}$. La variable m_{a2} es el índice de modulación con el cual se puede controlar la diferencia de tensión en terminales del inversor; mientras que θ corresponde al ángulo de fase en la terminal de CA del inversor en relación con el ángulo de fase de referencia de la red de CA a la que está conectado el inversor.

$$\theta = \theta_{ca} \quad (2.15)$$

La regulación del ángulo θ permite el control de la magnitud y la dirección de la potencia activa que fluye entre el inversor y el sistema de CA. El inversor también proporciona un soporte bidireccional para la potencia reactiva al aportar o absorber potencia reactiva controlable en el lado de CA. Esto se representa por una potencia reactiva Q_{inv} inyectada al nodo ca , restringida por los límites de corriente del inversor.

Las pérdidas por conducción y la caída de tensión interna se modelan con una resistencia en serie R_{c2} , mientras que las pérdidas por conmutación se modelan con una conductancia G_{c2} en derivación.

2.4.3. Reactor de Fase y Filtro

El reactor de fase se encuentra entre los nodos ca y vi , y su admitancia está representada por \bar{Y}_r . Este reactor permite tener un control de la potencia reactiva modificando la diferencia de potencial en sus terminales mediante la manipulación del índice de modulación del inversor.

El filtro se encuentra conectado en derivación en el nodo vi y su admitancia está representada por \bar{Y}_f . Su función es eliminar el rizado que pueda tener la señal de voltaje de CA proveniente del

inversor, dicho rizado puede existir o no dependiendo de la técnica de modulación aplicada. Para el estudio de flujos de potencia solo se considera el filtro como una aportación de reactivos.

2.4.4. Etapa de Transformación

Esta etapa está comprendida entre el nodo vi y el nodo de conexión en el sistema de potencia. En esta etapa se utiliza un transformador equivalente para convertir la señal de voltaje proveniente del nodo vi a una señal del voltaje con las condiciones eléctricas requeridas para la interconexión con el sistema eléctrico de potencia. La admitancia del transformador está representada por \bar{Y}_T . El tap variante bajo carga del transformador permite el control de la magnitud del voltaje en el nodo de conexión con el sistema eléctrico.

2.5. Ecuaciones de Flujos de Potencia del Circuito para la Interconexión del Generador Síncrono de Imanes Permanentes

La potencia en el viento es proporcional a la densidad del aire, el área de la sección transversal de las palas de la turbina eólica, el coeficiente de potencia y la velocidad del viento elevada al cubo; por lo que la potencia en la turbina eólica del PMSG está dada por [Ackermann, 2005], [Gupta, Singh, y Jain, 2015] y [Zhang y Ula, 2008]:

$$P_{wg} = \frac{1}{2} C_p \rho S v^3 \quad (2.16)$$

donde P_{wg} es la potencia de la turbina eólica dada en watts (W); ρ es la densidad del aire dada en kilogramos sobre metro cúbico (kg/m^3); S es el área de barrido de las palas de la turbina eólica dada en metros cuadrados (m^2); v es la velocidad del viento dada en metros sobre segundo (m/s); y C_p es el coeficiente de potencia del generador eólico. Este coeficiente indica la relación entre la energía captada por la turbina y la energía total disponible en el viento, es decir, indica qué parte de la energía total disponible en el viento es aprovechada por la turbina del generador eólico y se determina en base a parámetros de diseño de dicha turbina.

El voltaje inducido en cada bobina del PMSG se determina mediante la ley de Faraday-Lenz como:

$$\varepsilon_{ind} = -N_v \frac{d\varphi}{dt} \quad (2.17)$$

donde ε_{ind} es el voltaje inducido en una bobina dado en volts (V), N_v es el número de vueltas de la bobina, t es el tiempo en segundos y φ es el flujo magnético a través de la bobina en webers (Wb). Este flujo magnético se calcula con la siguiente ecuación:

$$\varphi = BS_b \cos(\omega t) \quad (2.18)$$

donde B es el campo magnético de los imanes permanentes en teslas (T), el cual se mantiene constante, S_b es el área definida por la bobina en metros cuadrados (m^2) y ω es la velocidad angular del rotor en radianes sobre segundo (rad/seg). Sustituyendo la ecuación (2.18) en (2.17), la ecuación del voltaje inducido se puede reescribir como:

$$\varepsilon_{ind} = N_v BS_b \omega \sin(\omega t) \quad (2.19)$$

El máximo valor de voltaje inducido se tiene cuando $\sin(\omega t) = 1$, teniendo con esto que el máximo voltaje inducido en las bobinas del PMSG depende únicamente de la velocidad angular del rotor, ya que N , B y S se mantienen constantes.

Enseguida se presentan las ecuaciones matemáticas para obtener los flujos de potencia en el circuito de la Figura 2.2.

2.5.1. Ecuaciones de Flujos de Potencia del Rectificador

El circuito equivalente del rectificador tiene como entrada en el nodo wg la potencia generada por el PMSG. La carga en este circuito es únicamente resistiva por lo que el factor de potencia de la energía proveniente del PMSG es unitario y el ángulo del índice de modulación es cero. Esto indica que la potencia que fluye entre los nodos del rectificador es únicamente potencia activa.

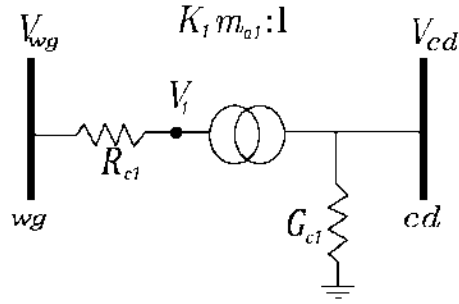


Figura 2.3: Modelo para el estudios de flujo de potencia del rectificador.

Con base en los elementos presentes en la Figura 2.3, la representación matemática para los flujos de potencia en el rectificador, está dada por las siguientes ecuaciones:

El flujo de potencia que va del nodo wg al nodo cd se obtiene de la siguiente manera:

$$P_{wgcd} = \left(\frac{V_{wg} - V_1}{R_{c1}} \right) (V_{wg}) = V_{wg}^2 R_{c1}^{-1} - V_1 V_{wg} R_{c1}^{-1} \quad (2.20)$$

donde P_{wgcd} es la potencia que fluye del nodo wg hacia el nodo cd , V_{wg} es el voltaje en el nodo wg , V_1 es el voltaje restante después de la caída de tensión interna en el rectificador y R_{c1} es la resistencia interna del rectificador.

Tomando en cuenta que,

$$V_1 = K_1 m_{a1} V_{cd} \quad (2.21)$$

donde K_1 es la constante del rectificador que relaciona las variables de CA del lado del PMSG con las variables de CD, V_{cd} es el voltaje en el nodo de cd y m_{a1} es el índice de modulación correspondiente al rectificador y es considerado como la única variable de estado de las ecuaciones de este convertidor.

Sustituyendo la ecuación (2.21) en (2.20), el flujo de potencia que va del nodo wg al nodo cd se obtiene como:

$$P_{wgcd} = V_{wg}^2 R_{c1}^{-1} - K_1 m_{a1} V_{cd} V_{wg} R_{c1}^{-1} \quad (2.22)$$

Para el flujo de potencia que va del nodo cd al nodo wg :

$$P_{cdwg} = P_{Gc1} + P_{V1} \quad (2.23)$$

donde P_{cdwg} es la potencia que fluye del nodo cd hacia el nodo wg , P_{Gc1} es la potencia consumida por la conductancia del rectificador y P_{V1} es la potencia restante después de la pérdida de potencia por conducción en el rectificador. Las dos últimas se describen de la siguiente forma:

$$P_{Gc1} = V_{cd}^2 G_{c1} \quad (2.24)$$

$$P_{V1} = \left(\frac{V_1 - V_{wg}}{R_{c1}} \right) (V_1) = V_1^2 R_{c1}^{-1} - V_1 V_{wg} R_{c1}^{-1} \quad (2.25)$$

Sustituyendo la ecuación (2.21) en la (2.25):

$$P_{V1} = K_1^2 m_{a1}^2 V_{cd}^2 R_{c1}^{-1} - K_1 m_{a1} V_{cd} V_{wg} R_{c1}^{-1} \quad (2.26)$$

Sustituyendo (2.24) y (2.26) en (2.23), se obtiene la ecuación que determina el flujo de potencia que va del nodo cd al nodo wg :

$$P_{cdwg} = V_{cd}^2 (G_{c1} + K_1^2 m_{a1}^2 R_{c1}^{-1}) - K_1 m_{a1} V_{cd} V_{wg} R_{c1}^{-1} \quad (2.27)$$

2.5.2. Ecuaciones de Flujos de Potencia del Inversor

El circuito equivalente del inversor tiene como entrada en el nodo cd la energía proveniente del rectificador. En este circuito, el ángulo del índice de modulación corresponde al ángulo del voltaje en el nodo ca y puede ser diferente de cero, ya que este circuito proporciona un soporte bidireccional para la potencia reactiva al suministrar o absorber potencia reactiva controlable en

el lado de CA, la cual se representa como una inyección independiente de potencia reactiva en el nodo ca y sus límites dependen de la capacidad de corriente del inversor.

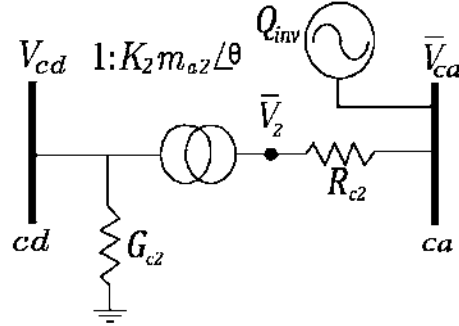


Figura 2.4: Modelo para el estudios de flujo de potencia del inversor.

Las ecuaciones para obtener el flujo de potencia del inversor representado en la Figura 2.4 corresponden únicamente a la potencia activa debido a que la potencia reactiva se modela de manera independiente. Por lo tanto, la representación matemática para el flujo de potencia en este circuito está dada por las siguientes ecuaciones:

El flujo de potencia que va del nodo cd al nodo ca se obtiene como:

$$P_{cdca} = P_{Gc2} + P_{V2} \quad (2.28)$$

donde P_{cdca} es la potencia que fluye del nodo cd hacia el nodo ca , P_{Gc2} es la potencia consumida por la conductancia del inversor y P_{V2} es la potencia restante después de la pérdida de potencia por conmutación en el inversor. Las dos últimas se describen enseguida:

$$P_{Gc2} = V_{cd}^2 G_{c2} \quad (2.29)$$

$$P_{V2} = \left(\frac{V_2 - V_{ca}}{R_{c2}} \right) (V_2) = V_2^2 R_{c2}^{-1} - V_2 V_{ca} R_{c2}^{-1} \quad (2.30)$$

donde G_{c2} es la conductancia interna del inversor, V_2 es el voltaje antes de la caída de tensión interna en el inversor, V_{ca} es el voltaje en el nodo ca y R_{c2} es la resistencia interna del inversor.

Tomando en cuenta que,

$$V_2 = K_2 m_{a2} V_{cd} \quad (2.31)$$

donde K_2 es la constante del inversor que relaciona las variables de CD con las variables de CA del lado de la red, m_{a2} es el índice de modulación correspondiente al inversor. De esta manera la ecuación (2.30) se puede reescribir como:

$$P_{V2} = K_2^2 m_{a2}^2 V_{cd}^2 R_{c2}^{-1} - K_2 m_{a2} V_{cd} V_{ca} R_{c2}^{-1} \quad (2.32)$$

Finalmente, el flujo de potencia que va del nodo cd al nodo ca se obtiene sustituyendo (2.29) y (2.32) en (2.28):

$$P_{cdca} = V_{cd}^2 (G_{c2} + K_2^2 m_{a2}^2 R_{c2}^{-1}) - K_2 m_{a2} V_{cd} V_{ca} R_{c2}^{-1} \quad (2.33)$$

Para el flujo de potencia que va del nodo ca al nodo cd :

$$P_{cacd} = \left(\frac{V_{ca} - V_2}{R_{c2}} \right) (V_{ca}) = V_{ca}^2 R_{c2}^{-1} - V_2 V_{ca} R_{c2}^{-1} \quad (2.34)$$

Sustituyendo (2.31) en (2.34), se obtiene:

$$P_{cacd} = V_{ca}^2 R_{c2}^{-1} - K_2 m_{a2} V_{cd} V_{ca} R_{c2}^{-1} \quad (2.35)$$

Las variables de estado de las ecuaciones (2.33) y (2.35) son m_{a2} y V_{ca} .

2.5.3. Ecuaciones de Flujos de Potencia en el Reactor de Fase y el Filtro

Este circuito tiene como entrada en el nodo ca la energía proveniente del inversor, de la cual una parte es potencia activa y la otra potencia reactiva debido a la presencia del reactor de fase.

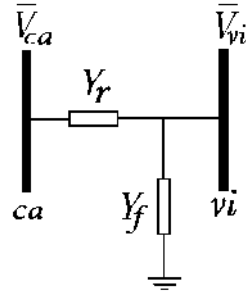


Figura 2.5: Modelo para el estudios de flujo de potencia del reactor de fase y del filtro.

Tomando en cuenta los elementos de la Figura 2.5 y las ecuaciones de flujos de potencia entre dos nodos representadas por (2.7) y (2.8), la representación matemática para obtener los flujos de potencia entre los nodos ca y vi , está dada por las siguientes ecuaciones:

$$P_{cavi} = V_{ca}^2 G_{ca} + V_{ca} V_{vi} [G_{cavi} \cos(\theta_{ca} - \theta_{vi}) + B_{cavi} \sin(\theta_{ca} - \theta_{vi})] \quad (2.36)$$

$$Q_{cavi} = -V_{ca}^2 B_{ca} + V_{ca} V_{vi} [G_{cavi} \sin(\theta_{ca} - \theta_{vi}) - B_{cavi} \cos(\theta_{ca} - \theta_{vi})] \quad (2.37)$$

$$P_{vica} = V_{vi}^2 G_{vi} + V_{vi} V_{ca} [G_{vica} \cos(\theta_{vi} - \theta_{ca}) + B_{vica} \sin(\theta_{vi} - \theta_{ca})] \quad (2.38)$$

$$Q_{vica} = -V_{vi}^2 B_{vi} + V_{vi} V_{ca} [G_{vica} \sin(\theta_{vi} - \theta_{ca}) - B_{vica} \cos(\theta_{vi} - \theta_{ca})] \quad (2.39)$$

donde P_{cavi} y Q_{cavi} son las potencias activa y reactiva, respectivamente que fluyen del nodo ca hacia el nodo vi ; θ_{ca} y θ_{vi} son los ángulos de voltaje de los nodos ca y vi , respectivamente; V_{vi} es la magnitud de voltaje en el nodo vi ; G_{ca} y B_{ca} son las partes real e imaginaria de la admitancia \bar{Y}_r del reactor de fase; G_{vi} y B_{vi} son las partes real e imaginaria de $\bar{Y}_r + \bar{Y}_f$; mientras que, $G_{cavi} = G_{vica} = -G_{ca}$ y $B_{cavi} = B_{vica} = -B_{ca}$.

2.5.4. Ecuaciones de Flujos de Potencia en el Transformador

Estas ecuaciones están asociadas al modelo π del transformador en secuencia positiva [Acha, Fuerte-Esquivel, Ambriz-Perez, y Angeles-Camacho, 2004] mostrado en la Figura 2.6. Las admitancias correspondientes a este transformador están dadas por las siguientes ecuaciones:

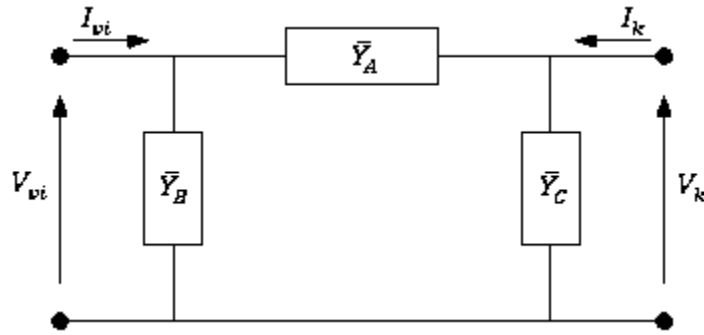


Figura 2.6: Modelo π del transformador.

$$\bar{Y}_A = \frac{\bar{Y}_T}{a} \quad (2.40)$$

$$\bar{Y}_B = \frac{1-a}{a^2} \bar{Y}_T \quad (2.41)$$

$$\bar{Y}_C = \frac{a-1}{a} \bar{Y}_T \quad (2.42)$$

donde \bar{Y}_A , \bar{Y}_B y \bar{Y}_C son las admitancias del modelo π del transformador, \bar{Y}_T es la admitancia del transformador y a es el valor del tap del transformador. Cuando el tap es unitario, las admitancias \bar{Y}_B y \bar{Y}_C no existen o son iguales a cero, mientras que $\bar{Y}_A = \bar{Y}_T$.

La representación matemática de los flujos de potencia en el transformador, está dada por las ecuaciones (2.43)-(2.46).

$$P_{vik} = V_{vi}^2 G_{vivi} + V_{vi} V_k [G_{vik} \cos(\theta_{vi} - \theta_k) + B_{vik} \sin(\theta_{vi} - \theta_k)] \quad (2.43)$$

$$Q_{vik} = -V_{vi}^2 B_{vivi} + V_{vi} V_k [G_{vik} \sin(\theta_{vi} - \theta_k) - B_{vik} \cos(\theta_{vi} - \theta_k)] \quad (2.44)$$

$$P_{kvi} = V_k^2 G_k + V_k V_{vi} [G_{kvi} \cos(\theta_k - \theta_{vi}) + B_{kvi} \sin(\theta_k - \theta_{vi})] \quad (2.45)$$

$$Q_{kvi} = -V_k^2 B_k + V_k V_{vi} [G_{kvi} \sin(\theta_k - \theta_{vi}) - B_{kvi} \cos(\theta_k - \theta_{vi})] \quad (2.46)$$

donde P_{vik} y Q_{vik} son las potencias activa y reactiva que fluyen del nodo vi hacia el nodo k , mientras que P_{kvi} y Q_{kvi} son la potencias activa y reactiva que fluyen del nodo k hacia el nodo vi ; V_{vi} y θ_{vi} son el voltaje y el ángulo del nodo vi ; V_k y θ_k son el voltaje y el ángulo del nodo k ; G_{vivi} y B_{vivi} son las partes real e imaginaria de $\bar{Y}_A + \bar{Y}_B$; G_k y B_k son las partes real e imaginaria de $\bar{Y}_A + \bar{Y}_C$; G_{vik} y G_{kvi} son el negativo de la parte real de \bar{Y}_A , mientras que B_{vik} y B_{kvi} son el negativo de la parte imaginaria de \bar{Y}_A .

2.6. Formulación Unificada para la Solución de Flujos de Potencia utilizando el Método de Newton-Raphson

La formulación unificada combina las ecuaciones que representan el equilibrio de potencia activa y reactiva en cada nodo del sistema en un solo conjunto de ecuaciones algebraicas no lineales $f(X)$ dependientes de variables desconocidas $X = [X_{ca}, X_{wg}]$, donde X_{ca} es un vector de estado compuesto por todos los ángulos y magnitudes de voltaje nodal, mientras que X_{wg} es un vector que agrupa a todas las variables de estado asociadas con la interconexión del generador eólico. El método Newton-Raphson (NR) se usa para proporcionar una solución aproximada al conjunto de ecuaciones dadas por $f(X) = 0$, resolviendo para ΔX_i en el problema lineal $f(X_i) = -J_i \Delta X_i$, donde J se conoce como la matriz jacobiana dada en forma expandida por (2.47). El método NR parte de una condición inicial para X_0 y actualiza la solución en cada iteración i , es decir, $X_{i+1} = X_i + \Delta X_i$, hasta que se cumpla una tolerancia predefinida. En esta solución unificada, las variables de estado X_{wg} se ajustan simultáneamente con las variables de estado del sistema de CA para calcular la condición de funcionamiento de estado estable del sistema de potencia [Castro González, 2013]:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \\ \vdots \\ \Delta f(X_{wg}) \end{bmatrix}^i = - \begin{bmatrix} \frac{\partial \Delta P}{\partial \theta} & \frac{\partial \Delta P}{\partial V} V & | & \frac{\partial \Delta P}{\partial X_{wg}} \\ \frac{\partial \Delta Q}{\partial \theta} & \frac{\partial \Delta Q}{\partial V} V & | & \frac{\partial \Delta Q}{\partial X_{wg}} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial \Delta f(X_{wg})}{\partial \theta} & \frac{\partial \Delta f(X_{wg})}{\partial V} V & | & \frac{\partial \Delta f(X_{wg})}{\partial X_{wg}} \end{bmatrix}^i \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V/V \\ \vdots \\ \Delta X_{wg} \end{bmatrix}^i \quad (2.47)$$

Para obtener una formulación unificada, las nuevas ecuaciones de balance de potencia asociadas con la interconexión del PMSG se deben expresar en la forma de la ecuación (2.47).

Las ecuaciones de desajuste de potencia que se toman en cuenta para formar parte del sistema de ecuaciones de la red son las correspondientes a los nodos wg , cd , ca , vi . Aunado a estos, también se toma en cuenta el nodo k debido a que sufre cambios por la inyección de potencia proveniente del generador eólico.

La representación matemática de las ecuaciones de balance de potencia asociadas a la interconexión del PMSG, está dada por (2.48)-(2.55), donde los subíndices de ΔP y ΔQ representan el nodo en el cual se hace dicho balance.

$$\Delta P_{wg} = P_{wg} - P_{wgcd} \quad (2.48)$$

$$\Delta P_{cd} = -P_{cdca} - P_{cdwg} \quad (2.49)$$

$$\Delta P_{ca} = -P_{cavi} - P_{cacd} \quad (2.50)$$

$$\Delta Q_{ca} = Q_{inv} - Q_{cavi} \quad (2.51)$$

$$\Delta P_{vi} = -P_{vica} - P_{vik} \quad (2.52)$$

$$\Delta Q_{vi} = -Q_{vica} - Q_{vik} \quad (2.53)$$

$$\Delta P_k = P_{Gk} - P_{Lk} - P_{kvi} - P_k^{cal} \quad (2.54)$$

$$\Delta Q_k = Q_{Gk} - Q_{Lk} - Q_{kvi} - Q_k^{cal} \quad (2.55)$$

Una vez establecidas las nuevas ecuaciones de balance de potencia, se pueden escribir en la forma de la ecuación (2.47) y obtener la formulación matricial asociada a la interconexión del generador eólico:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_k \\ \Delta P_{vi} \\ \Delta P_{ca} \\ \text{---} \\ \Delta Q_k \\ \Delta Q_{vi} \\ \Delta Q_{ca} \\ \text{---} \\ \Delta P_{wg} \\ \Delta P_{cd} \end{bmatrix}^i = - \begin{bmatrix} \frac{\partial \Delta P}{\partial \theta} & \frac{\partial \Delta P}{\partial V} V & \frac{\partial \Delta P}{\partial m_{a1}} & \frac{\partial \Delta P}{\partial m_{a2}} \\ \text{---} & \text{---} & \text{---} & \text{---} \\ \frac{\partial \Delta Q}{\partial \theta} & \frac{\partial \Delta Q}{\partial V} V & \frac{\partial \Delta Q}{\partial m_{a1}} & \frac{\partial \Delta Q}{\partial m_{a2}} \\ \text{---} & \text{---} & \text{---} & \text{---} \\ \frac{\partial \Delta P_{wg}}{\partial \theta} & \frac{\partial \Delta P_{wg}}{\partial V} V & \frac{\partial \Delta P_{wg}}{\partial m_{a1}} & \frac{\partial \Delta P_{wg}}{\partial m_{a2}} \\ \frac{\partial \Delta P_{cd}}{\partial \theta} & \frac{\partial \Delta P_{cd}}{\partial V} V & \frac{\partial \Delta P_{cd}}{\partial m_{a1}} & \frac{\partial \Delta P_{cd}}{\partial m_{a2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_k \\ \Delta \theta_{vi} \\ \Delta \theta_{ac} \\ \text{---} \\ \Delta V_k/V_k \\ \Delta V_{vi}/V_{vi} \\ \Delta V_{ac}/V_{ac} \\ \text{---} \\ m_{a1} \\ m_{a2} \end{bmatrix}^i \quad (2.56)$$

De manera más compacta se puede expresar como:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_k \\ \Delta P_{vi} \\ \Delta P_{ca} \\ \text{---} \\ \Delta Q_k \\ \Delta Q_{vi} \\ \Delta Q_{ca} \\ \text{---} \\ \Delta P_{wg} \\ \Delta P_{cd} \end{bmatrix}^i = \underbrace{\begin{bmatrix} AA & DD & GG \\ \text{---} & \text{---} & \text{---} \\ BB & EE & HH \\ \text{---} & \text{---} & \text{---} \\ CC & FF & II \end{bmatrix}}^{\text{Jacobiano (J)}} \begin{bmatrix} \Delta \theta_k \\ \Delta \theta_{vi} \\ \Delta \theta_{ac} \\ \text{---} \\ \Delta V_k/V_k \\ \Delta V_{vi}/V_{vi} \\ \Delta V_{ac}/V_{ac} \\ \text{---} \\ m_{a1} \\ m_{a2} \end{bmatrix}^i \quad (2.57)$$

donde,

$$AA = \begin{bmatrix} \frac{\partial (P_k^{cal} + P_{kvi})}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_{kvi}}{\partial \theta_{vi}} & 0 \\ \frac{\partial P_{vik}}{\partial \theta_k} & \frac{\partial (P_{vica} + P_{vik})}{\partial \theta_{vi}} & \frac{\partial P_{vica}}{\partial \theta_{ca}} \\ 0 & \frac{\partial P_{cavi}}{\partial \theta_{vi}} & \frac{\partial P_{cavi}}{\partial \theta_{ca}} \end{bmatrix} \quad (2.58)$$

$$BB = \begin{bmatrix} \frac{\partial(Q_k^{cal} + Q_{kvi})}{\partial\theta_k} & \frac{\partial Q_{kvi}}{\partial\theta_{vi}} & 0 \\ \frac{\partial Q_{vik}}{\partial\theta_k} & \frac{\partial(Q_{vica} + Q_{vik})}{\partial\theta_{vi}} & \frac{\partial Q_{vica}}{\partial\theta_{ca}} \\ 0 & \frac{\partial Q_{cavi}}{\partial\theta_{vi}} & \frac{\partial Q_{cavi}}{\partial\theta_{ca}} \end{bmatrix} \quad (2.59)$$

$$CC = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.60)$$

$$DD = \begin{bmatrix} \frac{\partial(P_k^{cal} + P_{kvi})}{\partial V_k} V_k & \frac{\partial P_{kvi}}{\partial V_{vi}} V_{vi} & 0 \\ \frac{\partial P_{kvi}}{\partial V_k} V_k & \frac{\partial(P_{vica} + P_{vik})}{\partial V_{vi}} V_{vi} & \frac{\partial P_{vica}}{\partial V_{ca}} V_{ca} \\ 0 & \frac{\partial P_{cavi}}{\partial V_{vi}} V_{vi} & \frac{\partial(P_{cavi} + P_{cacd})}{\partial V_{ca}} V_{ca} \end{bmatrix} \quad (2.61)$$

$$EE = \begin{bmatrix} \frac{\partial(Q_k^{cal} + Q_{kvi})}{\partial V_k} V_k & \frac{\partial Q_{kvi}}{\partial V_{vi}} V_{vi} & 0 \\ \frac{\partial Q_{vik}}{\partial V_k} V_k & \frac{\partial(Q_{vica} + Q_{vik})}{\partial V_{vi}} V_{vi} & \frac{\partial Q_{vica}}{\partial V_{ca}} V_{ca} \\ 0 & \frac{\partial Q_{cavi}}{\partial V_{vi}} V_{vi} & \frac{\partial Q_{cavi}}{\partial V_{ca}} V_{ca} \end{bmatrix} \quad (2.62)$$

$$FF = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial P_{cdca}}{\partial V_{ca}} V_{ca} \end{bmatrix} \quad (2.63)$$

$$GG = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial P_{cacd}}{\partial m_{a2}} \end{bmatrix} \quad (2.64)$$

$$HH = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.65)$$

$$H = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{wgcd}}{\partial m_{a1}} & 0 \\ \frac{\partial P_{cdwg}}{\partial m_{a1}} & \frac{\partial P_{cdca}}{\partial m_{a2}} \end{bmatrix} \quad (2.66)$$

Una vez obtenida la formulación matricial asociada a la interconexión del PMSG, esta se adiciona a la formulación obtenida de la red eléctrica para lograr una formulación unificada del sistema eléctrico contemplando la integración de energía eólica basada en el PMSG.

2.7. Inicialización de Variables de Estado

La efectividad del método Newton-Raphson para lograr una solución factible depende de la selección de valores iniciales adecuados para todas las variables de estado involucradas en el problema.

En la solución de flujos de potencia, las magnitudes de voltaje generalmente se inicializan en 1 p.u. (por unidad) en nodos PQ , esto debido a que se espera que en estado estable los valores de magnitud de voltaje estén muy cercanos a 1 p.u. Para el nodo slack (compensador) y nodos de voltaje controlado PV , los valores de magnitud de voltaje son datos conocidos y permanecen constantes durante el proceso iterativo si no hay violación de límites de potencia reactiva en los generadores. Los valores para los ángulos de fase de los voltajes nodales se inicializan en 0° para todos los nodos como se expresa en [Acha, Fuerte-Esquivel, Ambriz-Perez, y Angeles-Camacho, 2004] y [Vega Fernández, 2011]. Los índices de modulación del rectificador y del inversor pueden variar de acuerdo a la capacidad de conducción de dichos convertidores, es decir, podrían variar cuidando que la diferencia de potencial en terminales de estos convertidores no provoque una conducción mayor a la que resisten los mismos. Por lo tanto, con base a la experiencia adquirida en el desarrollo de este trabajo, el índice de modulación se inicializa en 0.8 para ambos convertidores.

2.8. Límites de Potencia Reactiva

2.8.1. Límites en Generadores Convencionales

En un nodo de voltaje controlado, también conocido como nodo PV, la ecuación de balance de potencia reactiva ΔQ_k del nodo k no es requerida en la ecuación (2.56), dado que $Q_{Gk} = Q_{Lk} + Q_k^{cal}$. De tal manera, la solución de la ecuación (2.10) para nodos PV se realiza en cada iteración para evaluar si la potencia reactiva aportada por el generador conectado al nodo k se encuentra dentro de límites operativos, lo que se puede expresar como en [Acha, Fuerte-Esquivel, Ambriz-Perez, y Angeles-Camacho, 2004]:

$$Q_{Gk_{\min}} < Q_{Gk} < Q_{Gk_{\max}} \quad (2.67)$$

Si alguna de las siguientes condiciones ocurre durante el proceso iterativo:

$$\left. \begin{array}{l} Q_{Gk} \geq Q_{Gk_{\max}} \\ Q_{Gk} \leq Q_{Gk_{\min}} \end{array} \right\} \quad (2.68)$$

El nodo k deja de ser un nodo de voltaje controlado, y en la ecuación (2.56) se toma en cuenta una de las siguientes ecuaciones de balance de potencia:

$$\left. \begin{array}{l} \Delta Q_k = Q_{Gk_{\max}} - Q_{Lk} - Q_k^{cal} \\ \Delta Q_k = Q_{Gk_{\min}} - Q_{Lk} - Q_k^{cal} \end{array} \right\} \quad (2.69)$$

Dependiendo del límite violado, es decir, si se viola el límite máximo, se utiliza la ecuación que contiene a $Q_{Gk_{\max}}$. En caso de violarse el límite mínimo, se utiliza la ecuación que contiene $Q_{Gk_{\min}}$; esto junto con los correspondientes elementos del Jacobiano. En cualquiera de los casos, se libera la magnitud del voltaje del nodo k , es decir, ya no habrá control de voltaje durante el resto del proceso iterativo, de manera que V_k se convierte en una variable de estado. Se debe notar que el nodo k puede regresar a ser un nodo PV si durante el proceso iterativo se obtiene una mejor estimación de Q_k^{cal} , calculada con valores de voltaje nodal más precisos, y que este valor indique

que está dentro de los límites del generador conectado al nodo k . Por lo tanto, la verificación de violación de límites de potencia reactiva en los generadores se realiza cada iteración.

2.8.2. Límites en los Componentes del Circuito que Interconecta al Generador Eólico

Los componentes principales para considerar los límites de potencia reactiva del generador eólico son el rectificador y el inversor.

En este contexto, se considera que el nodo vi es un nodo de voltaje controlado siempre y cuando los límites de potencia reactiva de los convertidores no sean violados por la potencia reactiva demandada por la red eléctrica. Debido a esto, la ecuación de balance de potencia reactiva ΔQ_{vi} del nodo vi no es requerida en la ecuación (2.56).

Para estos convertidores, los límites de potencia reactiva dependen de la capacidad de conducción de estos componentes y de la potencia activa que esté fluyendo en sus terminales.

La potencia total de estos convertidores está dada como:

$$S_c = V_c I_c^* \quad (2.70)$$

Y otra forma es:

$$S_c = \sqrt{P_c^2 + Q_c^2} \quad (2.71)$$

donde S_c es la potencia aparente, I_c es la corriente eléctrica que soporta el convertidor, V_c es el voltaje al que se conecta el convertidor, P_c es la potencia activa que fluye a través del convertidor y Q_c es la potencia reactiva que soporta en esas condiciones el convertidor.

Considerando que la siguiente condición siempre se cumple:

$$S_c > P_c \quad (2.72)$$

Los límites de potencia reactiva se obtienen despejando Q_c de la ecuación (2.72):

$$Q_c = \pm\sqrt{S_c^2 + P_c^2} \quad (2.73)$$

donde

$$Q_{c_{\min}} = -\sqrt{S_c^2 + P_c^2} \quad (2.74)$$

$$Q_{c_{\max}} = \sqrt{S_c^2 + P_c^2} \quad (2.75)$$

Siendo $Q_{c_{\min}}$ el límite mínimo y $Q_{c_{\max}}$ el límite máximo de potencia reactiva que soporta el convertidor.

Si alguna de las siguientes condiciones ocurre durante el proceso iterativo:

$$\left. \begin{array}{l} Q_{inv} \leq Q_{c_{\min}} \\ Q_{inv} \geq Q_{c_{\max}} \end{array} \right\} \quad (2.76)$$

El nodo vi deja de ser un nodo de voltaje controlado, y Q_{inv} se fija en el límite violado, es decir, si se viola el límite máximo $Q_{inv} = Q_{c_{\max}}$, y si se viola el límite mínimo $Q_{inv} = Q_{c_{\min}}$. En este caso, se libera la magnitud del voltaje del nodo vi , es decir, ya no habrá control de voltaje durante el resto del proceso iterativo, de manera que V_{vi} se convierte en una variable de estado. Se debe notar que el nodo vi puede regresar a ser un nodo PV si durante el proceso iterativo se obtiene que la potencia reactiva demandada por el sistema está dentro de los límites de los convertidores. Por lo tanto, la verificación de violación de límites de potencia reactiva en los convertidores se realiza cada iteración.

En la programación de algoritmos de flujos de potencia se indica que la verificación de límites debe comenzar después de la primera o la segunda iteración, esto debido a que los valores calculados al inicio del proceso iterativo pueden distar mucho de los correctos, conllevando con ello a falsos requerimientos de potencia reactiva. El cambio de nodo PV a nodo PQ y viceversa suponen esfuerzo numérico adicional en la solución iterativa y retarda la convergencia [Acha, Fuerte-Esquivel, Ambriz-Perez, y Angeles-Camacho, 2004].

2.9. Conclusiones

En el presente capítulo se desarrolló la formulación matemática para el estudio en estado estable de flujos de potencia en sistemas eléctricos con integración de energía eólica basada en el PMSG. Para esto, se presentaron conceptos generales del problema de flujos de potencia y la clasificación de los nodos y variables de estado; se presentó el modelo de un circuito equivalente de secuencia positiva que se utilizó para la interconexión del PMSG en un sistema eléctrico de potencia, y se desarrollaron las ecuaciones de flujos de potencia en dicho circuito. Con base en esta formulación, se obtuvo un sistema unificado de ecuaciones no lineales asociadas a la red eléctrica y a la interconexión del PMSG, el cual fue linealizado al aplicar el método Newton-Raphson. Por último, se reportó la manera de inicializar los valores de las variables de estado y la manera en que deben manejarse los límites de potencia reactiva de los generadores convencionales y de los convertidores de potencia.

En resumen, la contribución de este trabajo es la descripción detallada de una formulación matemática basada en el método de Newton-Raphson que permite realizar el estudio de flujos de potencia en sistemas eléctricos que incorporen generación eólica basada en el PMSG. Además, se presenta el circuito completo que permite la interconexión de un generador eólico basado en el PMSG a la red de potencia, así como la integración de este modelo en un programa previamente desarrollado en MATLAB [Vega Fernández, 2011] para el estudio de flujos de potencia.

Capítulo 3

Casos de Estudio

3.1. Introducción

En este capítulo se presentan estudios de flujos de potencia para sistemas eléctricos con integración de energía eólica basada en el PMSG. El análisis de flujos de potencia y los resultados que se presentan en este capítulo, corresponden a los sistemas de 5, 14, 57 y 118 nodos del IEEE. La tolerancia de convergencia utilizada en el análisis de los sistemas mencionados anteriormente es de 1×10^{-12} p.u. Los valores base que se usan en todos los análisis son de 100 MVA y 400 kV.

La potencia eléctrica generada por el PMSG se obtiene asumiendo que para los sistemas de 5, 14 y 57 nodos la velocidad de viento es de 12 m/s, la densidad del aire es de 1.225 kg/m^3 , el coeficiente de potencia es de 0.33445 y el área de barrido de la turbina eólica es de $11\,300 \text{ m}^2$. Para el sistema de 118 nodos se asumen los mismos datos, excepto que la velocidad de viento es de 14 m/s y el coeficiente de potencia de 0.226412. Por último, se considera que el PMSG puede representar tanto a un aerogenerador como a un parque eólico. En este último caso el PMSG corresponde a un generador equivalente que representa a todo el parque eólico.

Con base en la ecuación (2.19), y tomando en cuenta que se está trabajando con una velocidad de viento constante, se considera que el voltaje en terminales del PMSG también se mantiene constante y se asume que es de 1 p.u. De tal manera, para el nodo de corriente directa se busca el índice de modulación que nos permita obtener un voltaje de 1 p.u. sobre la misma base que el voltaje a la salida del generador eólico. Por lo tanto, se asume que V_{wg} y V_{cd} son igual a 1 p.u. y que son constantes para todos los casos de estudio. Los datos de los elementos asociados a los CEI-PMSG en los sistemas de prueba de este capítulo se encuentran en el Apéndice A.

La validación de resultados se realiza por medio del programa comercial PowerWorld [PowerWorld, 2016] únicamente para los sistemas de 5 y 14 nodos, ya que esta versión solo permite sistemas de máximo 40 nodos. En este programa se utilizó una tolerancia de convergencia de cero, ya que no presenta una opción para utilizar la misma que se utilizó en MATLAB.

3.2. Sistema de 5 Nodos del IEEE

Para este sistema se conecta un generador eólico en el nodo 5 (Elm), como se muestra en la Figura 3.1. El PMSG genera una potencia de 4 MW, calculada por la ecuación (2.16), como se reporta en la Tabla 3.8.

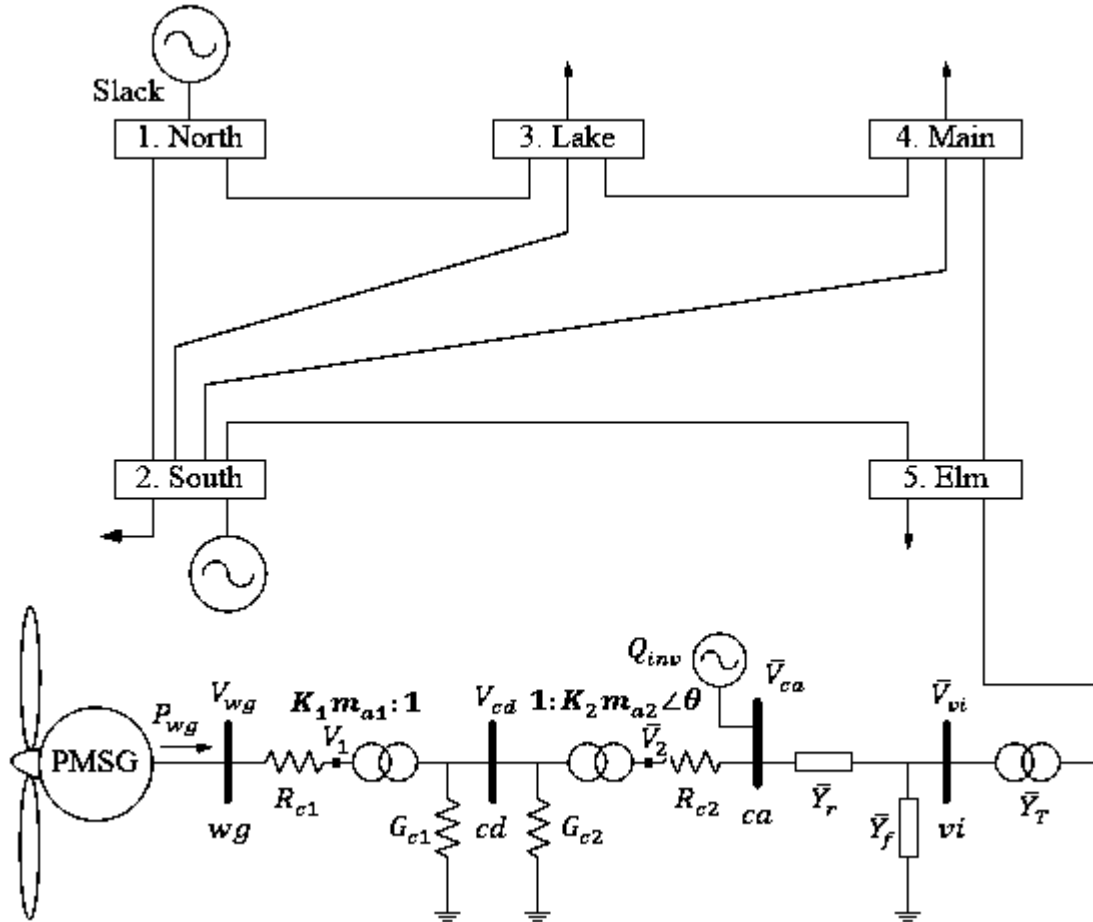


Figura 3.1: Sistema de 5 nodos del IEEE con integración de un PMSG en el nodo Elm.

Los resultados del estudio de flujos de potencia para magnitud y ángulo de voltajes nodales se muestran en la Tabla 3.1, en la cual se marca de color gris el renglón correspondiente al nodo de interconexión para ubicar fácilmente los resultados de magnitud y ángulo de voltaje nodal, y hacer una comparación de los mismos.

Tabla 3.1: Voltajes y ángulos nodales para el sistema de 5 nodos del IEEE, sin y con PMSG, validando estos resultados con PowerWorld.

Nodo	Sin PMSG		Con PMSG		Validación	
	V (p. u.)	θ°	V (p. u.)	θ°	V (p. u.)	θ°
North	1.060	0.00	1.060	0.00	1.060	0.00
South	1.000	-2.06	1.000	-1.94	1.000	-1.94
Lake	0.987	-4.63	0.989	-4.53	0.989	-4.53
Main	0.984	-4.95	0.986	-4.84	0.986	-4.84
Elm	0.972	-5.76	0.981	-5.58	0.981	-5.58
vi			0.988	-5.40	0.988	-5.40
ca			0.991	-5.17	0.991	-5.17

En la Tabla 3.1 se observa que la magnitud de los voltajes nodales, con excepción del nodo slack y del nodo PV, tuvo un cambio con tendencia a 1. Esto se debe al soporte bidireccional de potencia reactiva que presenta el inversor asociado al CEI-PMSG. Por otra parte, el ángulo de los voltajes nodales, con excepción del nodo slack, tuvo un cambio con tendencia a cero grados y es debido a la inyección de potencia activa por parte del PMSG. Otra forma de observar esto, se presenta en la Figura 3.2 y en la Figura 3.3.

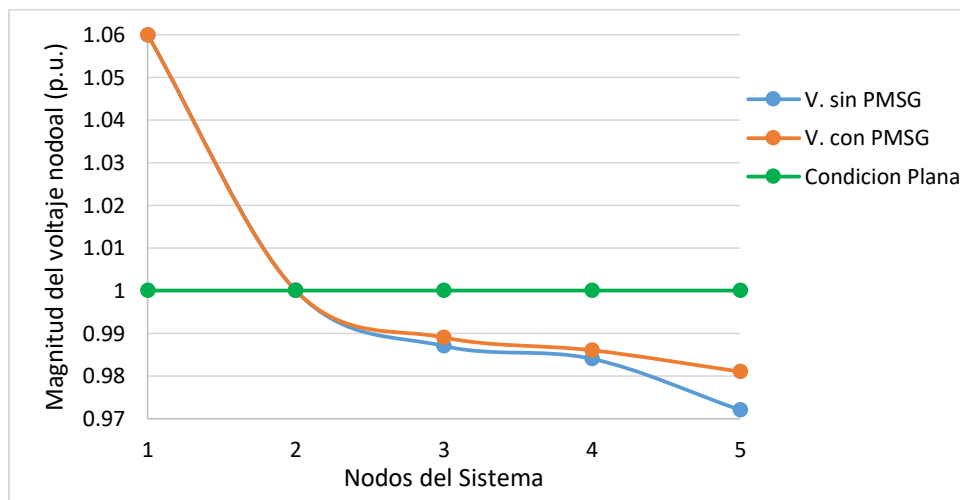


Figura 3.2: Comparación de la magnitud de los voltajes nodales en el sistema de 5 nodos sin y con PMSG.

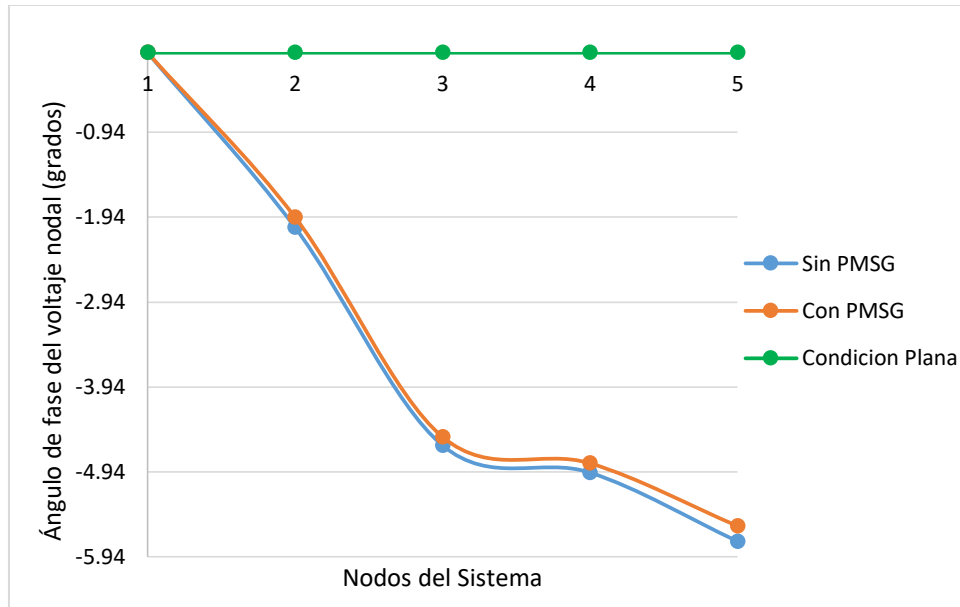


Figura 3.3: Comparación de los ángulos de los voltajes nodales en el sistema de 5 nodos sin y con PMSG.

En la Tabla 3.2 se muestra que el generador convencional conectado al nodo 2 (South) se encuentra trabajando dentro de sus límites de potencia reactiva, dados por ± 3 p.u. Es por esta razón que la magnitud de voltaje especificada se mantuvo controlada en este nodo.

Tabla 3.2: Potencia reactiva del generador convencional del sistema de 5 nodos del IEEE.

Nodo	Generación	Límites de potencia:	
	Q_G (p.u.)	Q_{min} (p.u.)	Q_{max} (p.u.)
South	-0.7191	-3	3

En la Tabla 3.3 se muestra el resultado de la potencia reactiva a la salida del inversor en el lado de CA, observándose que la potencia reactiva demandada por el sistema eléctrico hizo que el convertidor violara su límite superior de potencia reactiva. Por lo que esta se fija en el límite violado para que el inversor no sufra daños por sobrepasar sus límites de operación. Estos límites de potencia reactiva dependen de la potencia total a la que puede operar el convertidor y de la potencia activa que fluye a través de él, tal y como se establece en la ecuaciones (2.74) y (2.75).

Tabla 3.3: Potencia reactiva del inversor en el sistema de 5 nodos del IEEE.

Nodo	Generación	Límites de potencia:	
	$Q_{inv} (p. u.)$	$Q_{mín}(p. u.)$	$Q_{máx}(p. u.)$
ca	0.0311	-0.0311	0.0311

El valor de potencia al que puede operar el convertidor debe ser seleccionado de manera cuidadosa para que la potencia activa que fluya a través de él y la potencia reactiva que pueda inyectar o absorber no genere un bajo factor de potencia.

Los índices de modulación que resultan para el rectificador y el inversor están dados en la siguiente tabla:

Tabla 3.4: Índices de modulación de los convertidores asociados a la interconexión del PMSG en el sistema de 5 nodos del IEEE.

Nodo de Interconexión	Índices de Modulación	
	m_{a1}	m_{a2}
Elm	0.8002	0.8253

Los flujos de las potencias activa y reactiva en las líneas de transmisión y en el transformador asociado a la interconexión del PMSG se reportan en las Tablas 3.5 y 3.6, respectivamente.

Tabla 3.5: Flujos de potencia en las líneas de transmisión del sistema de 5 nodos del IEEE con integración de un PMSG.

De:	A:	$P (p. u.)$	$Q (p. u.)$	De:	A:	$P (p. u.)$	$Q (p. u.)$
North	South	0.86071	0.74957	South	Elm	0.5191	-0.013859
South	North	-0.8366	-0.74095	Elm	South	-0.50832	0.016757
North	Lake	0.40893	0.1624	Lake	Main	0.18422	0.015385
Lake	North	-0.39444	-0.17148	Main	Lake	-0.18386	-0.03384
South	Lake	0.24334	-0.034965	Main	Elm	0.053509	-0.019568
Lake	South	-0.23978	0.0060979	Elm	Main	-0.053271	-0.028113
South	Main	0.27416	-0.029326	vi	ca	-0.03841	-0.030815
Main	South	-0.26965	0.0034077	ca	vi	0.03841	0.031063

Tabla 3.6: Flujos de potencia en el transformador asociado a la interconexión del PMSG en el sistema de 5 nodos del IEEE.

De:	A:	P (p.u.)	Q (p.u.)
vi1	Elm	0.0384096	0.0894203
Elm	vi1	-0.0384096	-0.0886446

En la Tabla 3.6 se puede ver el flujo de potencia que finalmente se inyecta en el nodo de interconexión de la red de potencia, así como las pérdidas de transmisión en el transformador.

En la Tabla 3.7 se reporta la potencia reactiva aportada por los compensadores conectados en este sistema, los cuales funcionan como filtros para limpiar el rizado de la señal de voltaje proveniente del inversor.

Tabla 3.7: Compensación de reactivos en el sistema de 5 nodos con integración de un PMSG.

Nodo compensado	Q (p.u.)
vi1	0.0586053

En la Tabla 3.8 se reporta el flujo de potencia activa que va desde el PMSG hasta la salida del inversor en el lado de CA, así como la potencia total inyectada en el nodo de interconexión. De estos resultados se observa la pérdida de potencia activa que se tiene desde el PMSG hasta el nodo de interconexión de la red eléctrica.

Tabla 3.8: Flujo de potencia en el CEI-PMSG y potencia total inyectada en el nodo de interconexión del sistema de 5 nodos del IEEE.

PMSG	Nodo de Interconexión	P_{wgcd} (p.u.)	P_{cdca} (p.u.)	P_{cavi} (p.u.)	Potencia inyectada en el nodo de interconexión	
					P (p.u.)	Q (p.u.)
1	Elm	0.04	0.03920	0.03841	0.03841	0.08865

Los resultados en este sistema de prueba con la metodología propuesta fueron obtenidos en 5 iteraciones, lo cual se reporta en la Tabla 3.9 y se observa en la Figura 3.4.

Tabla 3.9: Resultados de la convergencia del estudio de flujos de potencia en el sistema de prueba de 5 nodos.

Iteración	Error	
	ΔP (p.u.)	ΔQ (p.u.)
1	1.2896e-02	1.4494e-01
2	1.0440e-04	4.2796e-03
3	1.2955e-07	1.2090e-05
4	3.0615e-12	4.5462e-08
5	1.9429e-15	3.9354e-13

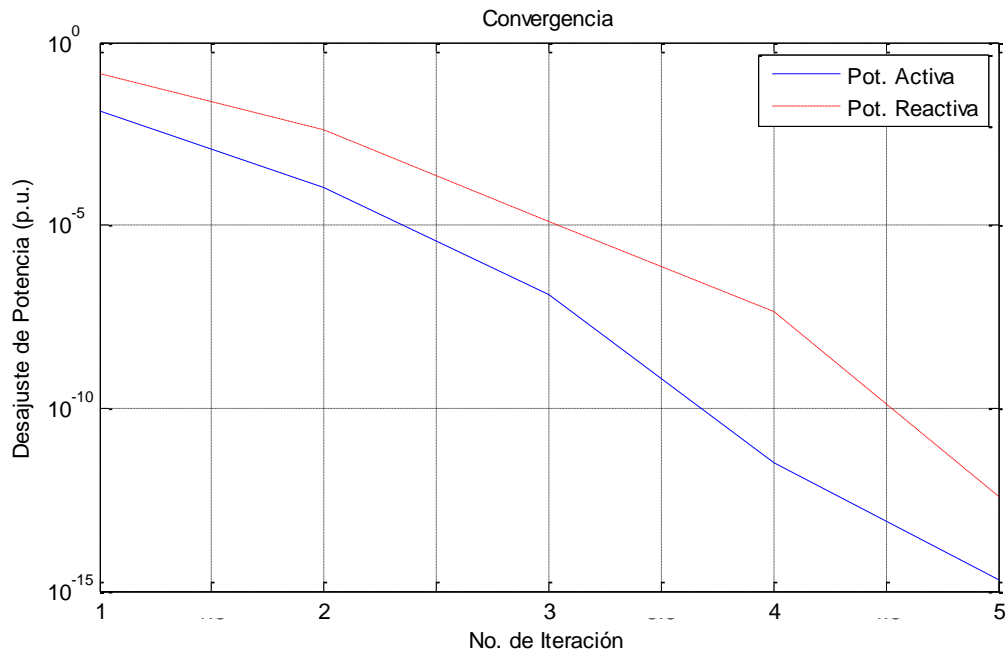


Figura 3.4: Gráficas de convergencia del estudio de flujos de potencia realizado en el sistema de 5 nodos con integración del PMSG.

Antes de la integración del PMSG, los resultados del estudio de flujos de potencia se obtenían en cuatro iteraciones, por lo que se observa en la Figura 3.4 que con la integración del PMSG fue necesario una iteración adicional. Esto se atribuye a la violación del límite de potencia reactiva del inversor asociado al CEI-PMSG.

Finalmente, en la Tabla 3.10 se expresa la suma de la potencia generada por todos los generadores del sistema incluyendo el PMSG, la suma de la potencia consumida por todas las cargas del sistema y la pérdida total de potencia en todo el sistema. En esta tabla se observa que la

pérdida de potencia activa fue menor con la integración del PMSG, lo cual se debe a que este generador contribuye a la alimentación de cargas locales, por lo que la energía que aporta a dichas cargas ya no es necesario traerla desde los generadores convencionales. De esta manera el flujo de potencia en las líneas de transmisión disminuye y junto con ello las pérdidas por efecto Joule, siendo este uno de los beneficios de la generación distribuida. En cambio la pérdida de potencia reactiva fue de mayor magnitud pero con un signo negativo, indicando con esto, la cantidad de potencia reactiva que no fue necesario generar, debido a que está siendo inyectada por el compensador asociado al CEI-PMSG y por el efecto capacitivo de los elementos de transmisión.

Tabla 3.10: Generación, consumo y pérdida total de potencia en el sistema de 5 nodos sin y con integración del PMSG.

Concepto	Sin PMSG		Con PMSG	
	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)
Potencia Total Generada	171.12	29.22	170.96	22.39
Potencia Total Consumida	165.00	40.00	165.00	40.00
Pérdida Total de Potencia	6.12	-10.78	5.96	-17.61

3.3. Sistema de 14 Nodos del IEEE

Para el sistema de 14 nodos, la integración de energía eólica se hace de forma aleatoria en los nodos 10, 11, 12, 13 y 14 como se muestra en la Figura 3.5. La potencia generada por los PMSGs se muestra en la Tabla 3.11.

Los beneficios de la generación distribuida también se verán reflejados en el sistema de la Figura 3.5, ya que al conectar los PMSG en los nodos donde no se tiene generación convencional, estos contribuyen a la alimentación de las cargas locales, tal como pasó en el sistema de prueba de 5 nodos. Además, se forman dos sub-áreas, teniendo únicamente generación convencional en una de ellas, la cual puede respaldar a la otra que solo tiene generación eólica.

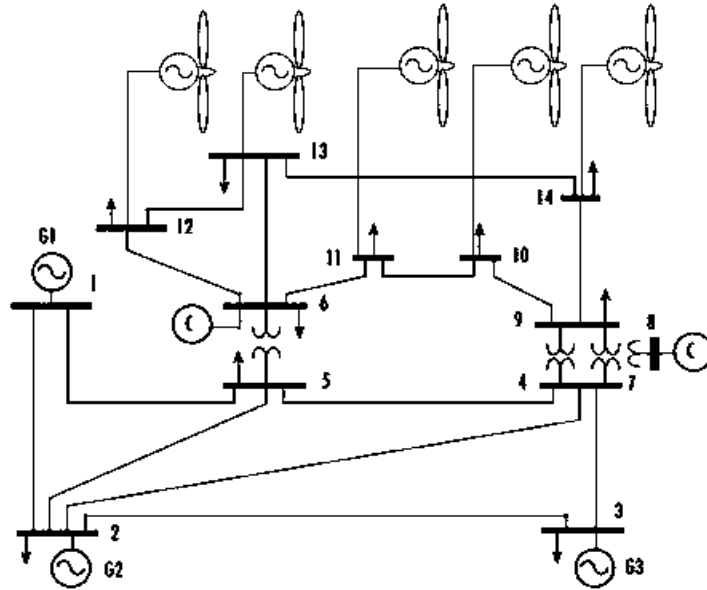


Figura 3.5: sistema de 14 nodos del IEEE con integración de energía eólica.

En la siguiente tabla se muestra la generación de potencia que se tiene por cada PMSG y los nodos a los que son interconectados:

Tabla 3.11: Potencia generada por los PMSGs en el sistema de 14 nodos del IEEE.

PMSG	Nodo de interconexión	P_{wg} (p.u.)	PMSG	Nodo de interconexión	P_{wg} (p.u.)
1	10	0.04	4	13	0.04
2	11	0.04	5	14	0.04
3	12	0.04			

Los resultados para magnitudes y ángulos de voltajes nodales se muestran en la Tabla 3.12, de la cual se observa que el ángulo de los voltajes nodales, con excepción del slack, mejoró en todos los nodos del sistema debido a la inyección de potencia activa por parte de los PMSGs. En cambio, la magnitud de voltaje tuvo un aumento en todos los nodos PQ provocado por la inyección de potencia reactiva de los compensadores asociados a los CEI-PMSG. Esto sucede porque la potencia inyectada por los compensadores es mayor que la que pueden aportar o consumir los inversores, por lo que una parte es consumida por los inversores provocando que violen su límite inferior de potencia reactiva como se expresa en la Tabla 3.14 y la otra parte se va al sistema sin

ser requerida, causando un aumento en la magnitud de los voltajes nodales. Por esta razón, es importante que el valor de potencia reactiva que inyecte el compensador asociado al CEI-PMSG no rebase el valor de potencia del inversor, ya que de lo contrario, no se estará asegurando que le sea brindado un soporte bidireccional de potencia reactiva al nodo de interconexión para que su magnitud de voltaje tenga un cambio con tendencia a la unidad.

Tabla 3.12: Magnitud y ángulo de voltajes nodales para el sistema de 14 nodos del IEEE, sin y con PMSG, validando estos resultados con PowerWorld.

Nodo	Sin PMSG		Con PMSG		Validación	
	$V (p.u)$	θ°	$V (p.u)$	θ°	$V (p.u)$	θ°
1	1.060	0.00	1.060	0.00	1.060	0.00
2	1.045	-4.98	1.045	-4.52	1.045	-4.53
5	1.020	-8.78	1.023	-7.88	1.023	-7.87
3	1.010	-12.72	1.010	-11.96	1.010	-11.96
4	1.019	-10.32	1.022	-9.35	1.022	-9.36
6	1.070	-14.22	1.070	-12.12	1.070	-12.03
11	1.057	-14.80	1.061	-12.44	1.061	-12.42
12	1.055	-15.08	1.060	-12.62	1.060	-12.50
13	1.050	-15.16	1.054	-12.83	1.054	-12.67
9	1.056	-14.95	1.058	-12.93	1.058	-13.00
10	1.051	-15.10	1.055	-12.87	1.055	-12.91
14	1.036	-16.04	1.042	-13.28	1.042	-13.55
ca1			1.052	-12.51	1.052	-12.56
vi1			1.055	-12.71	1.055	-12.76
ca2			1.058	-12.09	1.058	-12.07
vi2			1.061	-12.28	1.061	-12.26
ca3			1.057	-12.27	1.057	-12.14
vi3			1.060	-12.47	1.060	-12.34
ca4			1.051	-12.47	1.051	-12.31
vi4			1.054	-12.67	1.054	-12.51
ca5			1.039	-12.91	1.039	-13.18
vi5			1.042	-13.12	1.042	-13.39
7	1.062	-13.37	1.064	-11.71	1.064	-11.76
8	1.090	-13.37	1.090	-11.71	1.090	-11.76

En la Figura 3.6 se muestra la comparación gráfica de la magnitud de los voltajes nodales de este sistema de prueba antes y después de la integración de los PMSGs, mientras que en la Figura 3.7 se presenta la comparación entre los ángulos de fase.

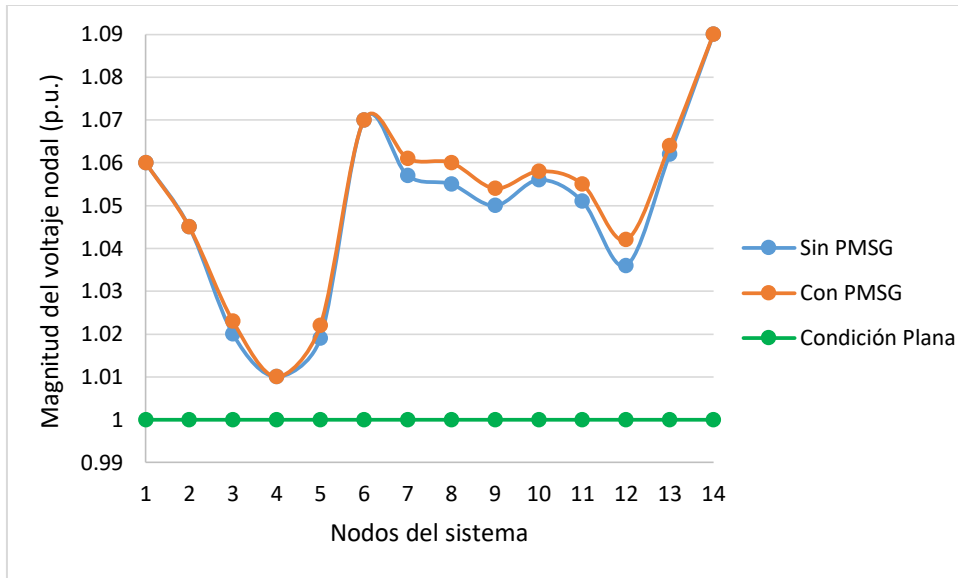


Figura 3.6: Comparación de la magnitud de los voltajes nodales en el sistema de 14 nodos sin y con PMSG.

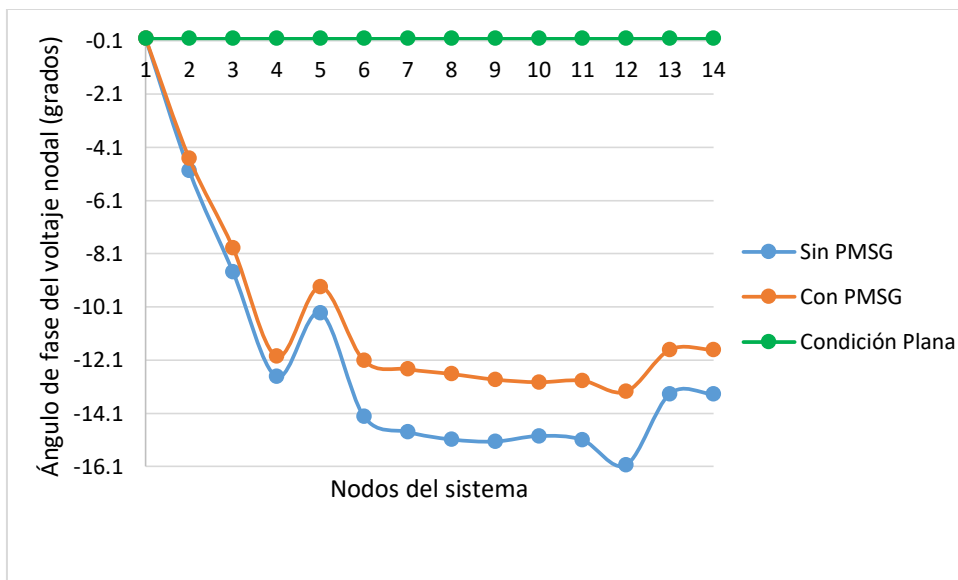


Figura 3.7: Comparación de los ángulos de los voltajes nodales en el sistema de 14 nodos sin y con PMSG.

Mientras tanto, en la Tabla 3.13 se reporta la potencia reactiva de los generadores convencionales y sus límites, mostrando también que ninguno de sus límites fue violado.

Tabla 3.13: Potencia reactiva de los generadores convencionales del sistema de 14 nodos del IEEE con integración de PMSGs.

Nodo	Generación	Límites de potencia	
	Q_G (p. u.)	Q_{\min} (p. u.)	Q_{\max} (p. u.)
2	0.360020	-0.400	0.500
3	0.216570	0.000	0.400
6	0.077767	-0.060	0.240
8	0.161700	-0.060	0.240

En la Tabla 3.14 se muestran los resultados de la potencia reactiva a la salida de los inversores en el lado de CA. En este caso, el valor de la potencia reactiva en los convertidores se encuentra sujeto al límite inferior, por lo que se puede decir, que la potencia reactiva demandada por el sistema eléctrico violó el límite inferior de potencia reactiva que soportan los convertidores.

Tabla 3.14: Potencia reactiva de los inversores en el sistema de 14 nodos del IEEE.

Nodo	Generación	Límites de potencia	
	Q_{inv} (p. u.)	Q_{\min} (p. u.)	Q_{\max} (p. u.)
ca1	-0.0311	-0.0311	0.0311
ca2	-0.0311	-0.0311	0.0311
ca3	-0.0311	-0.0311	0.0311
ca4	-0.0311	-0.0311	0.0311
ca5	-0.0311	-0.0311	0.0311

Los índices de modulación para los rectificadores son iguales debido a que las condiciones de flujo de potencia y voltaje en terminales del rectificador son iguales para todos los PMSGs. Los índices de modulación para los inversores son diferentes, ya que dependen de las condiciones eléctricas que se tengan en los nodos de interconexión, las cuales son diferentes y por consecuencia los índices de modulación también lo son. Esto se expresa en la siguiente tabla:

Tabla 3.15: Índices de modulación de los convertidores asociados a la interconexión de los PMSGs en el sistema de 14 nodos del IEEE.

Nodo de Interconexión	Índices de Modulación	
	m_{a1}	m_{a2}
10	0.8002	0.8738
11	0.8002	0.8787
12	0.8002	0.8781
13	0.8002	0.8732
14	0.8002	0.8636

Los flujos de potencia activa y de reactiva en las líneas de transmisión y en los transformadores se reportan en la Tabla 3.16 y en la Tabla 3.17, respectivamente. Siendo posible obtener de estas tablas las pérdidas de potencia en cada elemento.

Tabla 3.16: Flujos de potencia en las líneas de transmisión del sistema de 14 nodos del IEEE con integración de PMSGs.

De:	A:	P (p. u.)	Q (p. u.)	De:	A:	P (p. u.)	Q (p. u.)
1	2	1.430500	-0.171150	9	10	0.002996	0.044195
2	1	-1.394900	0.221480	10	9	-0.002940	-0.044047
1	5	0.679900	0.027260	9	14	0.045037	0.042562
5	1	-0.657520	0.011691	14	9	-0.044601	-0.041635
2	3	0.704460	0.038421	10	11	-0.048569	-0.011964
3	2	-0.682930	0.005993	11	10	0.048754	0.012396
2	4	0.507210	-0.028403	12	13	0.025307	0.004511
4	2	-0.493510	0.030006	13	12	-0.025177	-0.004393
2	5	0.366240	0.001522	13	14	0.066617	0.007782
5	2	-0.359230	-0.016471	14	13	-0.065925	-0.007182
3	4	-0.259070	0.020576	ca1	vi1	0.038491	-0.031063
4	3	0.263570	-0.044787	vi1	ca1	-0.038491	0.031284
4	5	-0.591090	0.148200	ca2	vi2	0.038498	-0.031063
5	4	0.595860	-0.146530	vi2	ca2	-0.038498	0.031282
6	11	0.045495	0.028522	ca3	vi3	0.038497	-0.031063
11	6	-0.045256	-0.028021	vi3	ca3	-0.038497	0.031282
6	12	0.048096	0.018773	ca4	vi4	0.038490	-0.031063
12	6	-0.047810	-0.018178	vi4	ca4	-0.038490	0.031285
6	13	0.139290	0.062095	ca5	vi5	0.038475	-0.031063
13	6	-0.137950	-0.059449	vi5	ca5	-0.038475	0.031290

Tabla 3.17: Flujos de potencia en los transformadores del sistema de 14 nodos del IEEE con integración de PMSGs.

De:	A:	P (p. u.)	Q (p. u.)	De:	A:	P (p. u.)	Q (p. u.)
4	7	0.218030	-0.091022	vi1	10	0.038491	0.002097
7	4	-0.218030	0.101720	10	vi1	-0.038491	-0.001990
4	9	0.125000	-0.003401	vi2	11	0.038498	0.002481
9	4	-0.125000	0.011223	11	vi2	-0.038498	-0.002375
5	6	0.344890	0.135310	vi3	12	0.038497	0.002439
6	5	-0.344890	-0.106620	12	vi3	-0.038497	-0.002333
7	8	0.000000	-0.157820	vi4	13	0.038490	0.002047
8	7	0.000000	0.161700	13	vi4	-0.038490	-0.001940
7	9	0.218030	0.056103	vi5	14	0.038475	0.001292
9	7	-0.218030	-0.051176	14	vi5	-0.038475	-0.001183

En la Tabla 3.18 se reportan los nodos que tienen compensación de potencia reactiva, así como la cantidad de la misma. Además, se observa que la potencia reactiva inyectada por los compensadores asociados a los CEI-PMSG es mayor que la que pueden aportar o consumir sus inversores, lo que ocasiona el incremento en las magnitudes de voltaje nodal en la red de transmisión.

Tabla 3.18: Compensación de reactivos en el sistema de 14 nodos con integración de PMSGs.

Nodo compensado	Q (p.u.)	Nodo compensado	Q (p.u.)
9	0.212800	vi3	0.033721
vi1	0.033381	vi4	0.033331
vi2	0.033763	vi5	0.032582

En la Tabla 3.19 se reportan los valores del flujo de potencia activa que va desde los PMSG hasta los nodos de interconexión, así como la potencia total inyectada en los mismos.

Tabla 3.19: Flujo de potencia en los CEI_PMSG y potencia total inyectada en los nodos de interconexión del sistema de 14 nodos del IEEE.

PMSG	Nodo de Interconexión	P_{wgca} (p.u.)	P_{cdca} (p.u.)	P_{cavi} (p.u.)	Potencia Inyectada en el nodo de interconexión	
					P (p.u.)	Q (p.u.)
1	10	0.04	0.039200	0.038491	0.038491	0.031284
2	11	0.04	0.039200	0.038498	0.038498	0.031282
3	12	0.04	0.039200	0.038497	0.038497	0.031282
4	13	0.04	0.039200	0.038490	0.038490	0.031285
5	14	0.04	0.039200	0.038475	0.038475	0.031290

Los resultados del estudio de flujos de potencia realizado para este sistema antes de la integración de los PMSGs se obtenían en 4 iteraciones, mientras que considerando la integración de estos, los resultados se obtuvieron en dos iteraciones más. Estos se reportan en la Tabla 3.20 y se observan en la Figura 3.8, donde la gráfica de color azul corresponde a la convergencia del desajuste de potencia activa, mientras que la roja a la convergencia del desajuste de potencia reactiva.

Tabla 3.20: Convergencia del estudio de flujos de potencia en el sistema de prueba de 14 nodos.

Iteración	Error	
	ΔP (p.u.)	ΔQ (p.u.)
1	5.1668e-02	2.2897e-01
2	1.3362e-02	1.5776e-02
3	1.2382e-04	4.1924e-04
4	2.5583e-08	4.0379e-06
5	3.8404e-12	4.4389e-10
6	2.9421e-15	9.8116e-14

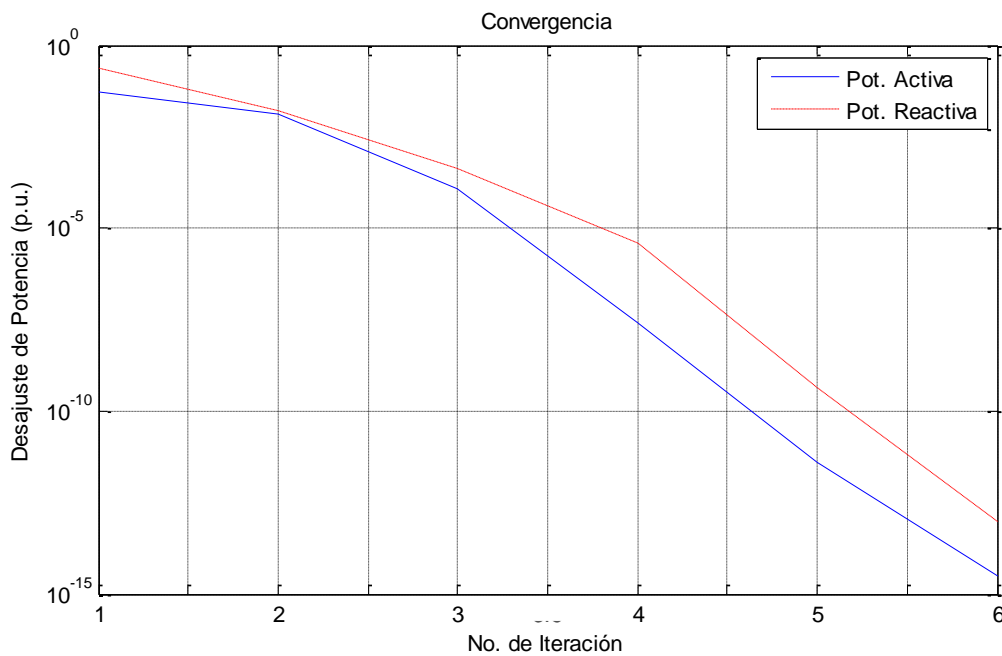


Figura 3.8: Gráficas de convergencia del estudio de flujos de potencia realizado en el sistema de 14 nodos con integración del PMSG.

En la Tabla 3.21, se reporta la potencia total generada y la consumida, así como la pérdida total de potencia en este sistema de prueba. En esta tabla se muestra que la potencia total generada y la pérdida total de potencia activa fueron mayores antes de la integración de los PMSGs. También se observa que con la integración de los PMSGs la demanda de potencia reactiva fue mayor que la generada, lo que indica que parte de la potencia reactiva consumida por la carga fue aportada por los compensadores en derivación y por el efecto capacitivo de las líneas de transmisión.

Tabla 3.21: Generación, consumo y pérdida total de potencia en el sistema de 14 nodos sin y con integración del PMSG.

Concepto	Sin PMSG		Con PMSG	
	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)
Potencia Total Generada	272.39	78.50	271.04	51.68
Potencia Total Consumida	259.00	73.50	259.00	73.50
Pérdida Total de Potencia	13.39	5.00	12.04	-21.82

3.4. Sistema de 57 Nodos del IEEE

La integración de energía eólica se hace de forma aleatoria en 20 nodos del sistema de 57 nodos mostrado en la Figura 3.9. Los nodos de interconexión y la potencia generada por los PMSGs se reportan en la Tabla 3.22.

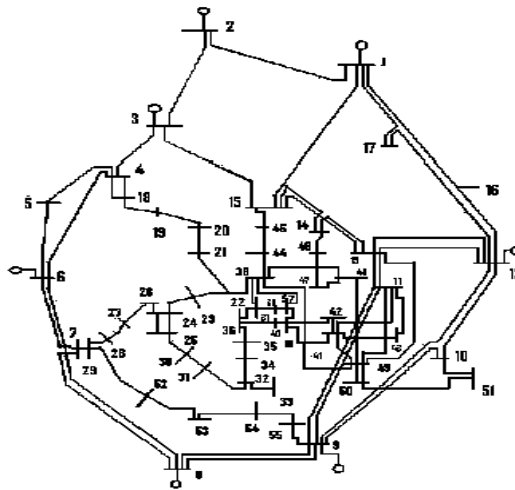


Figura 3.9: Sistema eléctrico de potencia de 57 nodos del IEEE.

Tabla 3.22: Potencia generada por los PMSGs en el sistema de 57 nodos del IEEE.

PMSG	Nodo de Interconexión	P_{wg} (p. u.)	PMSG	Nodo de Interconexión	P_{wg} (p. u.)
1	14	0.04	11	45	0.04
2	20	0.04	12	46	0.04
3	26	0.04	13	47	0.04
4	30	0.04	14	48	0.04
5	31	0.04	15	49	0.04
6	32	0.04	16	50	0.04
7	33	0.04	17	51	0.04
8	34	0.04	18	55	0.04
9	35	0.04	19	56	0.04
10	42	0.04	20	57	0.04

Tabla 3.23: Voltajes nodales para el sistema de 57 nodos del IEEE, sin y con PMSGs.

Nodo	Sin PMSG		Con PMSG		Nodos	Sin PMSG		Con PMSG	
	$V (p.u)$	θ°	$V (p.u)$	θ°		$V (p.u)$	θ°	$V (p.u)$	θ°
1	1.040	0.00	1.040	0.00	52	0.980	-11.50	0.982	-8.52
2	1.010	-1.19	1.010	-0.81	53	0.971	-12.25	0.972	-9.28
3	0.985	-5.99	0.986	-4.40	54	0.996	-11.71	0.996	-8.73
4	0.981	-7.34	0.982	-5.47	55	1.031	-10.80	1.029	-7.82
5	0.977	-8.55	0.977	-6.34	45	1.036	-9.27	1.038	-6.54
6	0.980	-8.67	0.980	-6.30	56	0.969	-16.07	1.001	-10.16
7	0.984	-7.60	0.986	-4.89	57	0.965	-16.58	1.000	-10.27
8	1.005	-4.48	1.005	-1.81	ac1			0.982	-6.43
9	0.980	-9.58	0.980	-6.87	vi1			0.979	-6.66
10	0.986	-11.45	0.985	-8.73	ac2			1.009	-8.91
11	0.974	-10.19	0.978	-7.41	vi2			1.006	-9.12
12	1.015	-10.47	1.015	-8.39	ac3			0.995	-8.16
13	0.979	-9.80	0.983	-7.34	vi3			0.992	-8.38
14	0.970	-9.35	0.976	-6.85	ac4			0.996	-9.66
15	0.988	-7.19	0.992	-5.32	vi4			0.999	-9.88
16	1.013	-8.86	1.015	-7.37	ac5			1.003	-9.25
17	1.018	-5.40	1.019	-4.62	vi5			1.000	-9.47
18	1.001	-11.73	1.005	-9.38	ac6			0.998	-7.73
19	0.970	-13.23	0.996	-9.77	vi6			1.000	-7.95
20	0.964	-13.45	1.003	-9.30	ac7			0.999	-7.69
21	1.009	-12.93	1.027	-9.08	vi7			1.000	-7.91
22	1.010	-12.88	1.025	-8.95	ac8			0.999	-7.55
23	1.009	-12.94	1.024	-8.98	vi8			1.000	-7.77
24	0.999	-13.29	1.030	-8.77	ac9			0.998	-7.80
26	0.959	-12.98	0.989	-8.56	vi9			1.000	-8.02
27	0.982	-11.51	0.995	-8.01	ac10			1.002	-9.67
28	0.997	-10.48	1.004	-7.32	vi10			1.000	-9.89
29	1.010	-9.77	1.013	-6.80	ac11			1.033	-6.17
25	0.983	-18.17	1.012	-10.59	vi11			1.036	-6.38
30	0.963	-18.72	1.002	-10.05	ac12			1.059	-7.63
31	0.936	-19.38	0.998	-9.65	vi12			1.062	-7.82
32	0.950	-18.51	1.001	-8.13	ac13			1.034	-8.52
33	0.948	-18.55	1.000	-8.08	vi13			1.037	-8.72
34	0.959	-14.15	1.001	-7.94	ac14			1.030	-8.51
35	0.966	-13.91	1.001	-8.19	vi14			1.033	-8.72
36	0.976	-13.64	1.005	-8.42	ac15			1.035	-9.01
37	0.985	-13.45	1.009	-8.57	vi15			1.038	-9.21
38	1.013	-12.74	1.025	-8.86	ac16			1.019	-9.43
39	0.983	-13.49	1.008	-8.59	vi16			1.022	-9.64
40	0.973	-13.66	1.002	-8.42	ac17			1.044	-9.15
41	0.996	-14.08	1.009	-9.54	vi17			1.047	-9.35
42	0.967	-15.53	0.998	-10.06	ac18			1.023	-7.44
44	1.017	-11.86	1.026	-8.35	vi18			1.027	-7.65
46	1.060	-11.12	1.064	-7.98	ac19			0.999	-9.76
47	1.033	-12.51	1.039	-8.89	vi19			1.000	-9.98
48	1.028	-12.61	1.035	-8.88	ac20			1.000	-9.87
49	1.037	-12.94	1.040	-9.37	vi20			1.000	-10.09
50	1.024	-13.41	1.024	-9.81	43	1.010	-11.35	1.017	-8.11
51	1.052	-12.53	1.049	-9.51					

En la Tabla 3.23 se observa que la magnitud de los voltajes nodales tuvo un cambio con tendencia a la unidad en la mayoría de los nodos donde se interconectaron los PMSGs, esto se debe a que la potencia reactiva inyectada por los compensadores asociados a los CEI-PMSGs fue menor que la potencia que pueden aportar o consumir los inversores, asegurando de esta manera un soporte bidireccional de potencia reactiva a los nodos de interconexión para que la magnitud de voltaje tenga un cambio con tendencia a un perfil plano en los mismos. Cabe mencionar que la magnitud de voltaje en los nodos PQ en los que no se integró ningún PMSG se elevó debido a la potencia reactiva inyectada por los compensadores asociados a los CEI-PMSGs y por no tener ningún soporte bidireccional de potencia reactiva. Por otra parte, el ángulo de los voltajes nodales, con excepción del nodo slack, tuvo un cambio con tendencia a cero grados gracias a la inyección de potencia activa proveniente de los PMSGs. Esto se observa también en la Figura 3.10 y en la Figura 3.11, respectivamente.

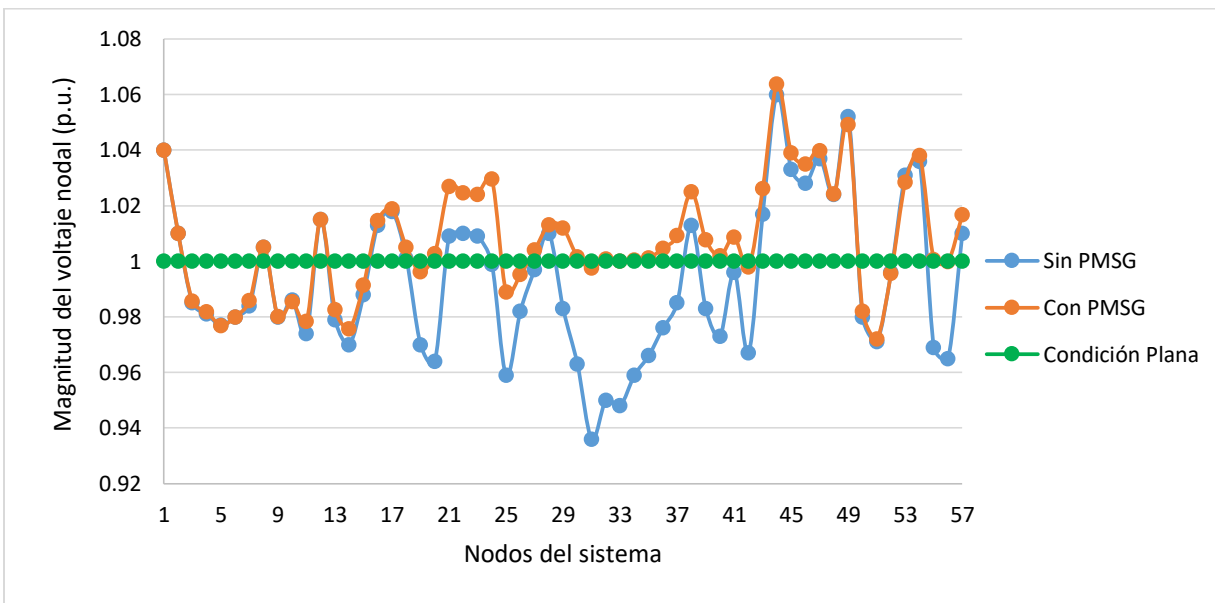


Figura 3.10: Comparación de la magnitud de los voltajes nodales en el sistema de 57 nodos sin y con PMSG.

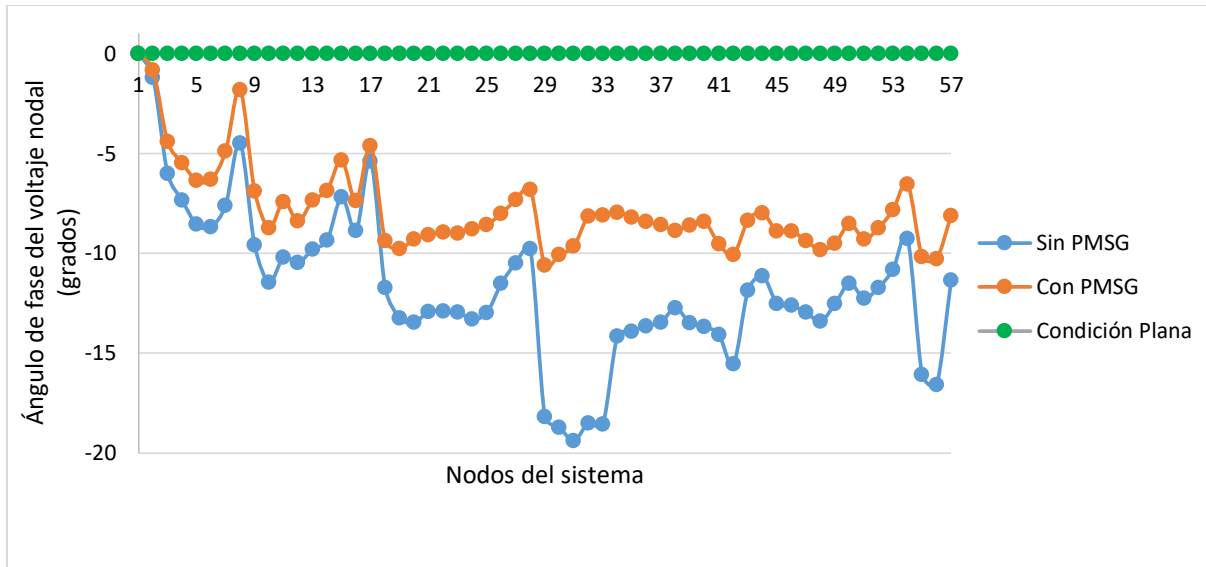


Figura 3.11: Comparación de los ángulos de los voltajes nodales en el sistema de 57 nodos sin y con PMSG.

El problema de flujos de potencia fue solucionado en cuatro iteraciones antes de la integración de los PMSGs, mientras que al integrarlos, la solución se obtuvo en ocho iteraciones debido a la violación de límites de potencia reactiva en algunos de los inversores asociados a los CEI-PMSG, lo cual se observa en la Tabla 3.24 y en la Figura 3.12.

En la Tabla 3.25 se muestra la generación total de potencia antes y después de la integración de los PMSGs, así como la demanda y la pérdida total de potencia en ambos casos. En esta tabla se observa que la pérdida de potencia activa fue menor con la integración de los PMSGs, lo cual se debe a que estos generadores contribuyen a la alimentación de cargas locales, por lo que la potencia aportada a dichas cargas ya no es necesario traerla desde los generadores convencionales, disminuyendo con esto las pérdidas por efecto Joule. También se observa que la potencia reactiva inyectada por los compensadores asociados a los CEI-PMSGs y por el efecto capacitivo de los elementos de transmisión se elevó, teniendo como consecuencia un decremento en la generación de potencia reactiva.

Tabla 3.24: Convergencia del estudio de flujos de potencia en el sistema de prueba de 57 nodos.

Iteración	Error	
	ΔP (p. u.)	ΔQ (p. u.)
1	1.7755e-02	4.2283e-01
2	1.6252e-03	1.3975e-01
3	4.7364e-04	5.1648e-03
4	3.4715e-07	7.1787e-05
5	9.9055e-12	1.6363e-06
6	1.0920e-14	5.0781e-09
7	6.2034e-15	2.0318e-11
8	5.3536e-15	8.1712e-14

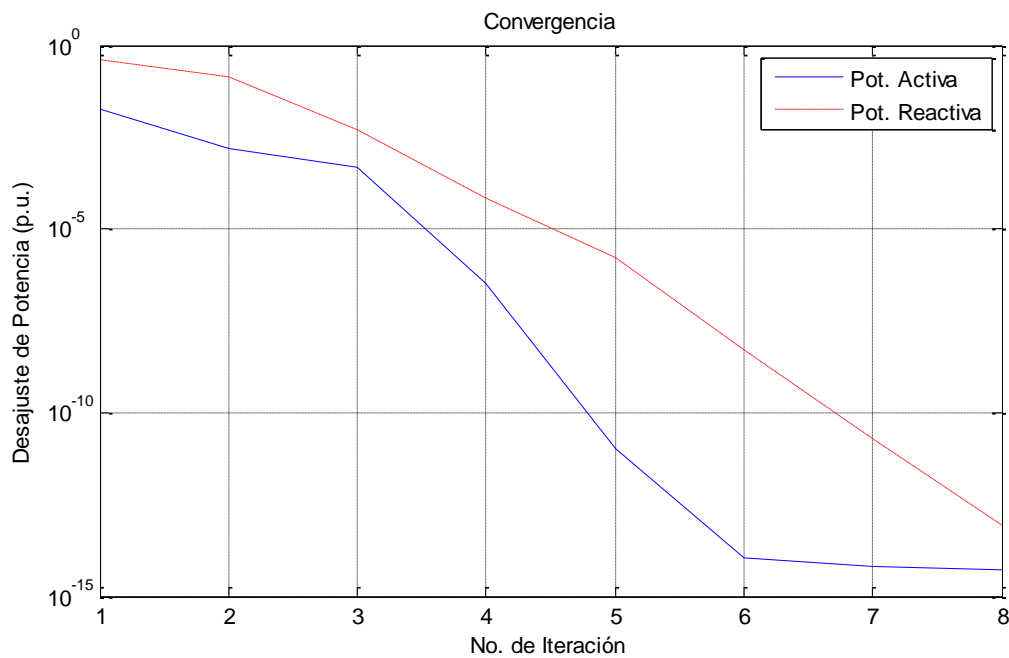


Figura 3.12: Gráficas de convergencia del estudio de flujos de potencia realizado en el sistema de 57 nodos con integración del PMSG.

Tabla 3.25: Generación, consumo y pérdida total de potencia en el sistema de 57 nodos sin y con integración del PMSG.

Concepto	Sin PMSG		Con PMSG	
	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)
Potencia Total Generada	1278.66	320.72	1273.32	275.40
Potencia Total Consumida	1250.80	336.40	1250.80	336.40
Pérdida Total de Potencia	27.86	-15.68	22.52	-61.00

El flujo de potencia en las líneas de transmisión y en los transformadores, la potencia reactiva aportada por los generadores convencionales y por los inversores asociados a los CEI-PMSG, los índices de modulación de los convertidores asociados a la integración de los PMSGs, la compensación de potencia reactiva en algunos nodos del sistema, así como el flujo de potencia activa en los CEI-PMSG y la potencia total inyectada en los nodos de interconexión, se muestran en el Apéndice C de esta tesis.

3.5. Sistema de 118 Nodos del IEEE

La integración de energía eólica en el sistema de 118 nodos, mostrado en la Figura 3.13, se hace sustituyendo 8 de sus generadores convencionales por PMSGs. La potencia generada por los PMSGs se reporta en la Tabla 3.26. En esta Tabla también se muestra la generación que aportaban los generadores convencionales que son remplazados por los generadores eólicos.

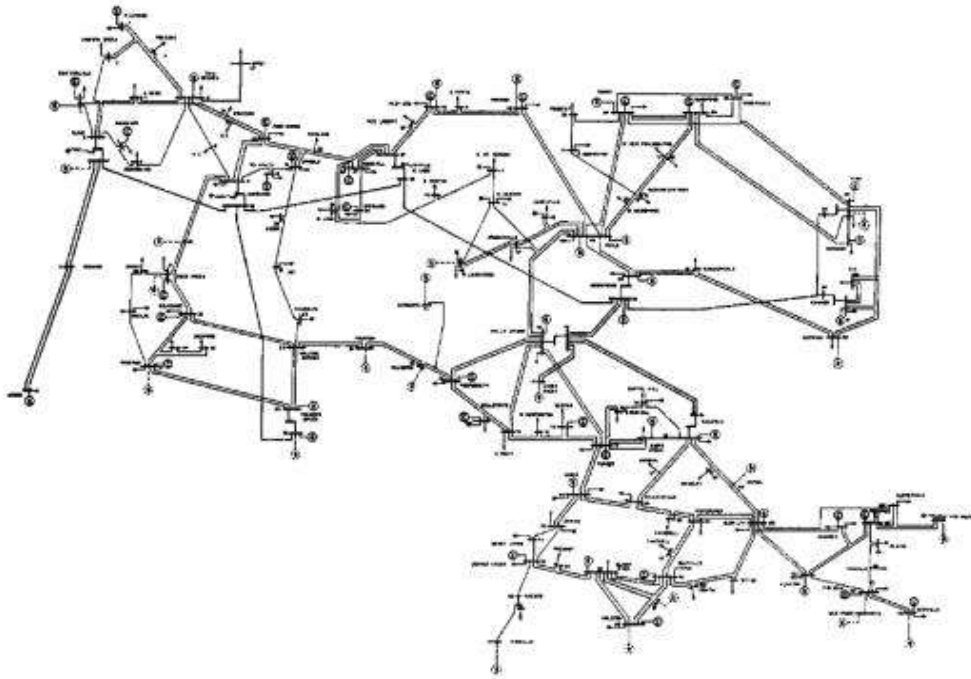


Figura 3.13: Sistema eléctrico de potencia de 118 nodos del IEEE.

Tabla 3.26: Potencia generada por los PMSGs y potencia de los generadores convencionales que son remplazados por los PMSGs en el sistema de 118 nodos del IEEE.

PMSG	Nodo de Interconexión	P_{wg} (p. u.)	P_G (p. u.)
1	87	0.043	0.040
2	31	0.086	0.070
3	46	0.215	0.190
4	111	0.387	0.360
5	103	0.430	0.400
6	54	0.516	0.480
7	12	1.032	0.850
8	59	2.064	1.550

En la Tabla 3.27 se reportan los resultados obtenidos para la magnitud y el ángulo de los voltajes nodales antes y después de la integración de los PMSGs. Observando los resultados en los nodos de interconexión 12, 31, 87, 103 y 46 se tiene que la magnitud de los voltajes disminuyó. La disminución de voltaje en los primeros cuatro se debe a que la inyección de potencia reactiva por parte de los generadores convencionales era mayor que la aportada por los PMSGs, mientras que para el quinto nodo se debe a que la potencia absorbida por el generador convencional fue de menor magnitud comparada con la absorbida por el PMSG que lo remplazó. Por el contrario, para los nodos de interconexión 54, 59 y 111 la magnitud de los voltajes aumentó debido a que la inyección de potencia reactiva por parte de los PMSGs fue mayor que la potencia que aportaban los generadores convencionales que fueron remplazados en esos nodos. Por otra parte, el ángulo de los voltajes en los nodos de interconexión, con excepción del nodo 111, tuvo un pequeño aumento debido a que la inyección de potencia activa por parte de los PMSGs fue ligeramente mayor que la potencia que inyectaban los generadores remplazados. Mientras tanto, en el nodo 111 el ángulo tuvo un pequeño decremento debido a que la inyección de potencia reactiva por parte del PMSG fue mucho mayor que la potencia que proporcionaba el generador convencional remplazado en ese nodo.

Tabla 3.27: Voltajes nodales para el sistema de 118 nodos del IEEE, sin y con PMSGs.

Nodo	Sin PMSG		Con PMSG		Nodo	Sin PMSG		Con PMSG	
	V (p. u.)	θ°	V (p. u.)	θ°		V (p. u.)	θ°	V (p. u.)	θ°
69	1.035	0.00	1.035	0.00	67	1.020	-5.08	1.020	-4.84
1	0.955	-19.02	0.955	-18.70	68	1.003	-2.40	1.003	-2.28
2	0.971	-18.48	0.968	-18.09	70	0.984	-7.38	0.984	-7.31

3	0.968	-18.13	0.967	-17.79	71	0.987	-7.79	0.987	-7.71
4	0.998	-14.42	0.998	-14.08	72	0.980	-8.89	0.980	-8.74
5	1.002	-13.97	1.002	-13.63	73	0.991	-8.00	0.991	-7.92
6	0.990	-16.70	0.990	-16.35	74	0.958	-8.33	0.958	-8.27
7	0.989	-17.14	0.987	-16.76	75	0.967	-7.07	0.967	-7.01
8	1.015	-8.95	1.015	-8.63	76	0.943	-8.20	0.943	-8.13
9	1.043	-1.70	1.043	-1.37	77	1.006	-3.24	1.006	-3.16
10	1.050	5.88	1.050	6.21	78	1.003	-3.55	1.003	-3.47
11	0.985	-16.98	0.981	-16.59	79	1.009	-3.25	1.009	-3.16
12	0.990	-17.50	0.984	-17.06	80	1.040	-1.00	1.040	-0.90
13	0.968	-18.36	0.965	-17.99	81	0.997	-1.85	0.997	-1.74
14	0.984	-18.22	0.979	-17.82	82	0.989	-2.72	0.989	-2.62
15	0.970	-18.51	0.970	-18.22	83	0.985	-1.53	0.985	-1.43
16	0.984	-17.80	0.979	-17.41	84	0.980	1.00	0.980	1.12
17	0.995	-15.99	0.994	-15.69	85	0.985	2.55	0.985	2.67
18	0.973	-18.21	0.973	-17.92	86	0.987	1.19	0.980	1.43
19	0.963	-18.69	0.963	-18.41	87	1.015	1.44	0.996	1.81
20	0.958	-17.81	0.958	-17.54	88	0.987	5.69	0.987	5.81
21	0.959	-16.23	0.959	-15.95	89	1.005	9.74	1.005	9.86
22	0.970	-13.67	0.970	-13.41	90	0.985	3.34	0.985	3.46
23	1.000	-8.75	1.000	-8.49	91	0.980	3.36	0.980	3.48
24	0.992	-8.88	0.992	-8.66	92	0.992	3.85	0.992	3.98
25	1.050	-1.82	1.050	-1.54	93	0.987	0.84	0.987	0.96
27	0.968	-14.39	0.968	-14.09	94	0.991	-1.31	0.991	-1.19
28	0.962	-16.11	0.957	-15.74	95	0.981	-2.28	0.981	-2.17
29	0.963	-17.10	0.954	-16.65	96	0.993	-2.45	0.993	-2.34
30	0.986	-10.96	0.985	-10.66	97	1.011	-2.08	1.011	-1.97
26	1.015	-0.04	1.015	0.25	98	1.024	-2.55	1.024	-2.44
31	0.967	-16.99	0.956	-16.49	99	1.010	-2.92	1.010	-2.79
32	0.964	-14.94	0.964	-14.64	100	1.017	-1.92	1.017	-1.79
33	0.972	-19.14	0.972	-18.86	101	0.992	-0.35	0.992	-0.22
34	0.986	-18.49	0.986	-18.23	102	0.991	2.35	0.991	2.47
35	0.981	-18.92	0.981	-18.66	103	1.001	-5.51	0.995	-5.28
36	0.980	-18.92	0.980	-18.66	104	0.971	-8.26	0.971	-8.13
37	0.992	-18.03	0.992	-17.77	105	0.966	-9.38	0.966	-9.25
39	0.970	-21.40	0.970	-21.14	106	0.962	-9.63	0.962	-9.50
40	0.970	-22.48	0.970	-22.22	107	0.952	-12.42	0.952	-12.29
38	0.962	-12.89	0.962	-12.63	108	0.967	-10.57	0.968	-10.44
41	0.967	-22.92	0.967	-22.66	109	0.967	-11.02	0.969	-10.89
42	0.985	-21.33	0.985	-21.07	110	0.973	-11.86	0.975	-11.73

43	0.978	-18.54	0.978	-18.28	111	0.980	-10.22	0.998	-10.37
44	0.985	-16.05	0.983	-15.79	112	0.975	-14.96	0.975	-14.78
45	0.987	-14.22	0.984	-13.95	113	0.993	-16.00	0.993	-15.71
46	1.005	-11.42	1.001	-11.11	114	0.960	-15.27	0.960	-14.97
47	1.017	-9.20	1.016	-8.96	115	0.960	-15.28	0.960	-14.98
48	1.021	-9.98	1.020	-9.71	116	1.005	-2.83	1.005	-2.72
49	1.025	-8.97	1.025	-8.72	117	0.974	-19.04	0.968	-18.62
50	1.001	-11.01	1.003	-10.74	118	0.949	-8.05	0.949	-8.00
51	0.967	-13.63	0.971	-13.34	ac1			0.998	2.24
52	0.957	-14.58	0.962	-14.29	vi1			1.001	2.00
53	0.946	-15.56	0.953	-15.25	ac2			0.970	-15.60
54	0.955	-14.65	0.964	-14.34	vi2			0.964	-16.09
55	0.952	-14.94	0.958	-14.58	ac3			0.977	-9.11
56	0.954	-14.75	0.961	-14.42	vi3			0.992	-10.24
57	0.971	-13.55	0.975	-13.24	ac4			1.031	-6.71
58	0.959	-14.40	0.965	-14.09	vi4			1.014	-8.71
59	0.985	-10.55	0.994	-10.22	ac5			1.029	-1.22
60	0.993	-6.77	0.994	-6.49	vi5			1.010	-3.45
61	0.995	-5.88	0.995	-5.60	ac6			1.022	-8.68
62	0.998	-6.49	0.998	-6.23	vi6			0.987	-12.00
63	0.969	-7.17	0.973	-6.92	ac7			1.111	-7.96
64	0.984	-5.40	0.986	-5.17	vi7			1.032	-13.15
65	1.005	-2.28	1.005	-2.10	ac8			1.240	4.97
66	1.050	-2.44	1.050	-2.22	vi8			1.084	-3.33

La variación en la magnitud de los voltajes nodales antes y después de hacer el remplazo de los generadores convencionales por PMSGs, fue mayor que la de los ángulos de fase debido a que el soporte bidireccional que proporcionaban los generadores convencionales era mayor que el brindado por los PMSGs. Mientras tanto, la variación en los ángulos de fase fue muy poca debido a que la potencia activa que se inyectó con los PMSGs fue ligeramente mayor a la potencia que inyectaban los generadores convencionales sustituidos. Esto se observa en la Figura 3.14 y en la Figura 3.15, respectivamente.

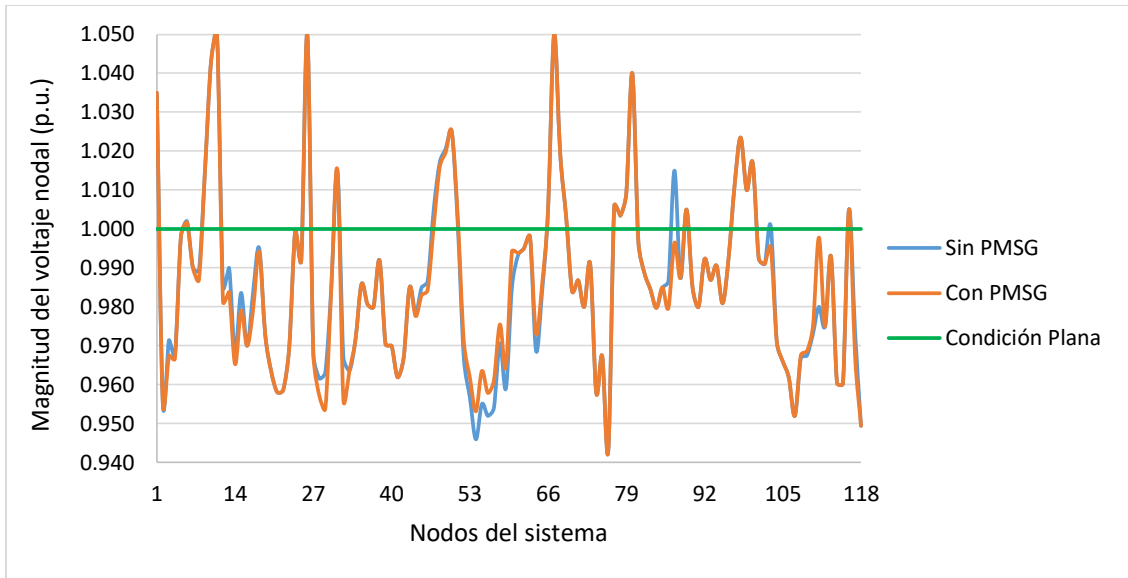


Figura 3.14: Comparación de la magnitud de los voltajes nodales en el sistema de 118 nodos sin y con PMSG.

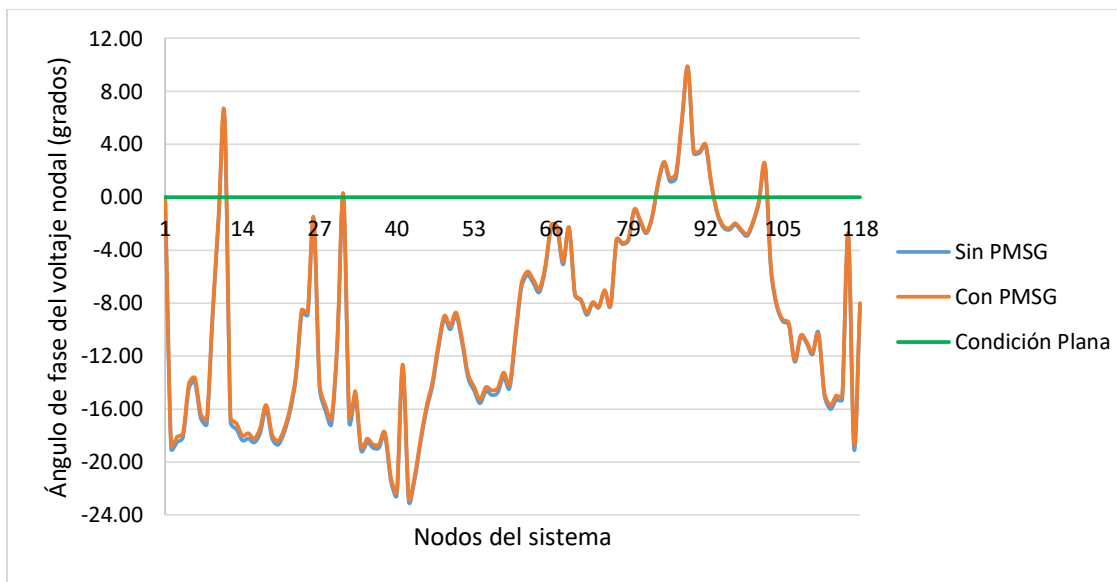


Figura 3.15: Comparación de los ángulos de los voltajes nodales en el sistema de 118 nodos sin y con PMSG.

Una vez reemplazados los generadores convencionales por PMSGs, la solución al problema de flujos de potencia se obtuvo en nueve iteraciones como se observa en la Tabla 3.28 y en la Figura 3.16.

Tabla 3.28: Convergencia del estudio de flujos de potencia en el sistema de prueba de 118 nodos.

Iteración	Error	
	ΔP (p.u.)	ΔQ (p.u.)
1	2.5721e-01	8.2538e-01
2	2.5491e-02	1.1480e+00
3	1.2294e-01	2.6647e-01
4	5.6596e-03	1.2002e-01
5	1.4770e-04	1.9382e-03
6	2.0812e-07	6.7794e-05
7	1.6902e-10	1.0381e-07
8	9.9920e-15	1.0204e-10
9	8.2712e-15	2.7311e-14

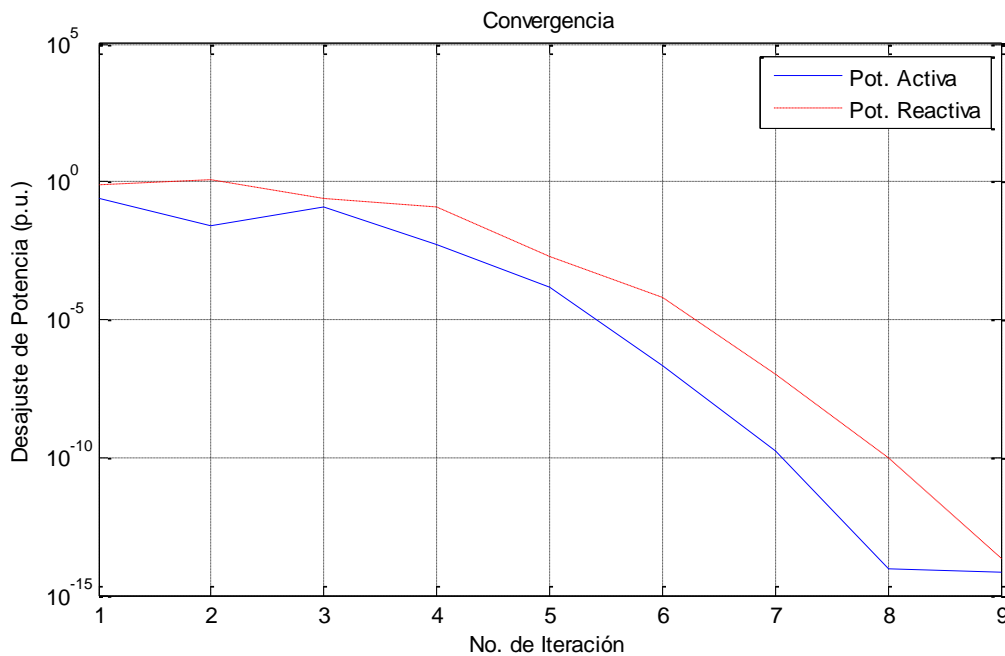


Figura 3.16: Gráficas de convergencia del estudio de flujos de potencia realizado en el sistema de 118 nodos con integración del PMSG.

En la Tabla 3.29 se muestra la generación total de potencia antes y después de la sustitución de los generadores convencionales por los PMSGs, así como la demanda y la pérdida total de potencia en ambos casos. También se observa que la pérdida de potencia activa fue mayor con la integración de los PMSGs. Esto se debe a que la potencia activa generada por los PMSGs, la cual es similar a la potencia que inyectaban los generadores convencionales, ahora tiene que ser transmitida a través

de los CEI-PMSGs hasta los nodos de interconexión, teniendo pérdidas adicionales en el sistema. Por otro lado, la potencia total que se tuvo que generar fue mayor cuando los PMSGs remplazaron a los generadores convencionales.

Tabla 3.29: Generación, consumo y pérdida total de potencia en el sistema de 118 nodos sin y con integración del PMSG.

Concepto	Sin PMSG		Con PMSG	
	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)
Potencia Total Generada	4374.48	793.92	4445.82	865.11
Potencia Total Consumida	4242.00	1438.00	4242.00	1438.00
Pérdida Total de Potencia	132.48	-644.08	203.82	-572.89

Los resultados restantes son reportados en el Apéndice C.

3.6. Análisis de resultados

En el sistema de 5 nodos con integración de PMSG, la magnitud de los voltajes nodales, con excepción del nodo slack y del nodo PV, tuvo un cambio con tendencia a uno debido a que la magnitud de voltaje en los nodos PQ era menor a la unidad, aprovechando así la inyección de potencia reactiva del compensador asociado al CEI-PMSG y la potencia aportada por el inversor para elevar su magnitud de voltaje.

Para el caso del sistema de 14 nodos con integración de PMSGs, la magnitud de voltaje tuvo un aumento en todos los nodos PQ provocado por la inyección de potencia reactiva de los compensadores asociados a los CEI-PMSG. Esto sucede porque la potencia inyectada por los compensadores es mayor que la que pueden aportar o consumir los inversores, por lo que una parte es consumida por los inversores provocando que violen su límite inferior de potencia reactiva, mientras que la otra parte se va al sistema sin ser requerida, causando un aumento en la magnitud de los voltajes nodales.

Debido a que se aseguró que los PMSGs brindaran a los nodos de interconexión un soporte bidireccional de potencia reactiva, en el sistema de 57 nodos la magnitud de los voltajes nodales

tuvo un cambio con tendencia a uno en la mayoría de los nodos de interconexión. En los nodos donde la magnitud de voltaje era menor a uno, se aprovechó tanto la inyección de potencia reactiva de los compensadores como la potencia que pudieran aportar los inversores, asegurando así un incremento en la magnitud del voltaje. Mientras tanto, en los nodos donde la magnitud del voltaje era mayor a uno no se asegura un cambio con tendencia a la unidad debido a que una parte del soporte bidireccional de potencia reactiva de los inversores se utiliza para consumir la inyección de potencia por parte de los compensadores, mientras que la parte restante se usa para consumir la potencia reactiva del sistema. Además, cabe mencionar que la magnitud de voltaje en los nodos PQ en los que no se integró ningún PMSG, se elevó debido a la potencia reactiva inyectada por los compensadores asociados a los CEI-PMSGs y por no tener ningún soporte bidireccional de potencia reactiva.

En el sistema de 118 nodos donde se sustituyeron generadores convencionales por PMSGs no se pudieron mantener las magnitudes especificadas de voltaje en los nodos donde se hizo la sustitución, esto debido a que el soporte bidireccional de potencia reactiva que aportan los PMSGs es menor que el soporte de los generadores convencionales.

El ángulo de fase de los voltajes nodales se incrementa en todos los sistemas eléctricos de potencia en los que se tenga una inyección adicional de potencia activa, como se observó en todos los casos de estudio presentados en este trabajo.

Para los sistemas de 5, 14 y 57 nodos donde se agregaron PMSGs como generación adicional, la pérdida de potencia activa fue menor con la integración de los PMSG, lo cual se debe a que estos generadores alimentan de manera parcial o total a las cargas locales, por lo que la energía que aportan a dichas cargas ya no es necesario traerla desde los generadores convencionales. De esta manera, el flujo de potencia en las líneas de transmisión disminuye al igual que las pérdidas por efecto Joule, siendo este uno de los beneficios de la generación distribuida. Mientras tanto, en el sistema de 118 nodos donde se sustituyeron algunos generadores convencionales por PMSGs, la pérdida de potencia activa fue mayor debido a que la potencia que se inyectaba en los nodos de interconexión por los generadores convencionales, ahora debe pasar antes por los CEI-PMSGs, teniendo con esto pérdidas adicionales.

3.7. Conclusiones

En este capítulo se presentan los resultados de los casos de estudio en los que se reportan magnitudes y ángulos de voltaje nodal, flujos de potencia en las líneas de transmisión y en los transformadores, potencia generada por los generadores convencionales y por los PMSGs, así como las pérdidas de potencia, entre otras cosas.

Antes de la integración de los PMSGs a estos sistemas de prueba, los resultados del estudio de flujos de potencia se obtenían en cuatro iteraciones, mientras que posterior a la integración de estos se tuvieron iteraciones adicionales, lo cual se atribuye a la violación de límites de potencia reactiva de los inversores asociados a los CEI-PMSG.

Finalmente, se hace un análisis de resultados de los que se concluye que es muy importante que el valor de potencia reactiva que inyecte el compensador asociado al CEI-PMSG no rebase el valor de potencia reactiva del inversor, ya que de lo contrario, no se estará asegurando que le sea brindado un soporte bidireccional de potencia reactiva al nodo de interconexión para que su magnitud de voltaje tenga un cambio con tendencia a un perfil plano. Además, la integración de PMSGs al funcionar como generación distribuida, reduce los flujos de potencia en los generadores convencionales, los transformadores y las líneas de transmisión, teniendo como consecuencia un decremento en las pérdidas de potencia por efecto Joule, entre otros beneficios.

Capítulo 4

Conclusiones Generales, Aportaciones y Trabajos Futuros

4.1. Conclusiones Generales

En este trabajo, se desarrolló la formulación matemática para el estudio en estado estable de flujos de potencia en sistemas eléctricos con integración de energía eólica basada en el PMSG. Para esto, se presentó el modelo del circuito equivalente de secuencia positiva del CEI-PMSG a partir del cual se hizo todo el desarrollo matemático: se desarrollaron las ecuaciones de flujos de potencia en dicho circuito y se obtuvieron las ecuaciones de balance de potencia en cada uno de sus nodos. Combinando estas ecuaciones con las de la red eléctrica, fue posible obtener una solución unificada del problema de flujos de potencia utilizando el método Newton-Raphson. Para obtener dicha solución de manera numérica, la formulación propuesta se implementó en un programa de MATLAB R2013a [Vega Fernández, 2011] previamente desarrollado en el cual se tomó en cuenta los valores iniciales de las variables de estado, los límites de potencia de los generadores convencionales del sistema y de los convertidores del circuito modelado.

En los casos de estudio presentados en el Capítulo 3 se obtuvieron soluciones que aseguraron la operación de los VSCs dentro de sus límites de potencia, lo cual evita que sufran daño por sobrepasar sus límites de operación. Además, se hizo un análisis de los resultados obtenidos, en el que se encontró que el ángulo de fase de los voltajes nodales se incrementa en todos los sistemas eléctricos de potencia en los que se tiene una inyección adicional de potencia activa, mientras que la magnitud de voltaje solo lo hace si se le brinda un soporte bidireccional de potencia reactiva. Por último, cabe mencionar que la integración de PMSGs, apoya la regulación del voltaje nodal y la reducción de pérdidas de potencia en el sistema eléctrico.

4.2. Aportaciones

Se describe de manera detallada una formulación matemática basada en el método de Newton-Raphson que permite realizar el estudio de flujos de potencia en sistemas eléctricos que incorporen generación eólica basada en el PMSG. Además, se presenta el circuito completo que permite la interconexión de un generador eólico basado en el PMSG a la red de potencia, así como la integración de este modelo en un programa previamente desarrollado en MATLAB R2013a [Vega Fernández, 2011] para el estudio de flujos de potencia.

4.3. Trabajos Futuros

Partiendo de lo presentado en esta tesis, los trabajos futuros que se podrían desarrollar son los siguientes:

- ❖ Agregar en este trabajo restricciones de complementariedad para sujetar la potencia activa y reactiva en los VSCs a los límites internos de corriente.
- ❖ Regulación de frecuencia con generación eólica basada en los PMSGs aplicando el control de potencia que permiten los VSCs.
- ❖ Considerar las técnicas de control para dar soporte a la estabilidad de voltaje.
- ❖ Extender la formulación desarrollada para hacer estudios de flujos de potencia considerando variaciones en la velocidad del viento.
- ❖ Considerar la integración de generación eólica basada en otro tipo de generadores.

Apéndice A

Datos de los Elementos Asociados a los CEI-PMSG en los Sistemas de Prueba de 5, 14, 57 y 118 nodos del IEEE

A.1. Sistema de 5 nodos del IEEE

Los datos de los elementos asociados al CEI-PMSG en este sistema se muestran en la Tabla A.1:

Tabla A.1: Número de nodos y componentes del CEI-PMSG en el sistema de 5 nodos del IEEE.

Nodos	Líneas de transmisión	Transformadores	PMSGs	Compensadores fijos en derivación
2	1	1	1	1

Tabla A.2: Datos de la línea de transmisión asociada al CEI-PMSG en el sistema de 5 nodos del IEEE.

Nodo de envío	Nodo de Recepción	R (p.u.)	X_L (p.u.)	G_{sh} (p.u.)	B_{sh} (p.u.)
vi	ca	0.00	0.10	0	0.00

Tabla A.3: Datos del transformador asociado al CEI-PMSG en el sistema de 5 nodos del IEEE.

Nodo de envío	Nodo de recepción	Primario				Secundario				Rama de magnetización	
		R_1 (p.u.)	X_{L1} (p.u.)	V_{tap1} (p.u.)	θ_{tap1} (p.u.)	R_2 (p.u.)	X_{L2} (p.u.)	V_{tap2} (p.u.)	θ_{tap2} (p.u.)	G_{sh} (p.u.)	B_{sh} (p.u.)
vi	Elm	0	0	1	0	0	0.08	1	0	0	0

Tabla A.4: Datos del compensador de potencia reactiva asociado al CEI-PMSG en el sistema de 5 nodos del IEEE.

Nodo compensado	G_{sh} (p.u.)	B_{sh} (p.u.)
vi	0	0.06

Tabla A.5: Datos asociados a la generación del PMSG y potencia de los VSC en el sistema de 5 nodos del IEEE.

PMSG	Nodos asociados		Capacidad de los VSC (MVA)	Coeficiente de potencia	Densidad del aire (kg/m^3)	Área de Barrido (m^2)	Velocidad del viento (m/s)
	ca	vi					
1	ca	vi	5	0.33445	1.225	11300	12

Tabla A.6: Datos asociados a los VSC en el sistema de 5 nodos del IEEE.

V_{wg} (p.u.)	V_{cd} (p.u.)	R_{c1} (p.u.)	K_1	G_{c1} (p.u.)	R_{c2} (p.u.)	K_2	G_{c2} (p.u.)
1	1	0.5	1.2247	0.00002	0.5	1.2247	0.00002

A.2. Sistema de 14 nodos del IEEE

En la Tabla A.7 se muestran los datos de los elementos asociados a los CEI-PMSG:

Tabla A.7: Número de nodos y componentes de los CEI-PMSG en el sistema de 14 nodos del IEEE.

Nodos	Líneas de transmisión	Transformadores	PMSGs	Compensadores fijos en derivación
10	5	5	5	5

Tabla A.8: Datos de las líneas de transmisión asociadas a los CEI-PMSG en el sistema de 14 nodos del IEEE.

Nodo de envío	Nodo de recepción	R (p.u.)	X_L (p.u.)	G_{sh} (p.u.)	B_{sh} (p.u.)
ca1	vi1	0	0.1	0	0
ca2	vi2	0	0.1	0	0
ca3	vi3	0	0.1	0	0
ca4	vi4	0	0.1	0	0
ca5	vi5	0	0.1	0	0

Tabla A.9: Datos de los transformadores asociados a los CEI-PMSG en el sistema de 14 nodos del IEEE.

Nodo de envío	Nodo de recepción	Primario				Secundario				Rama de magnetización	
		R_1 (p.u.)	X_{L1} (p.u.)	V_{tap1} (p.u.)	θ_{tap1} (p.u.)	R_2 (p.u.)	X_{L2} (p.u.)	V_{tap2} (p.u.)	θ_{tap2} (p.u.)	G_{sh} (p.u.)	B_{sh} (p.u.)
vi1	10	0	0	1	0	0	0.08	1	0	0	0
vi2	11	0	0	1	0	0	0.08	1	0	0	0
vi3	12	0	0	1	0	0	0.08	1	0	0	0
vi4	13	0	0	1	0	0	0.08	1	0	0	0
vi5	14	0	0	1	0	0	0.08	1	0	0	0

Tabla A.10: Datos de los compensadores de potencia reactiva asociados a los CEI-PMSG en el sistema de 14 nodos del IEEE.

Nodo compensado	G_{sh} (p.u.)	B_{sh} (p.u.)
vi1	0	0.03
vi2	0	0.03
vi3	0	0.03
vi4	0	0.03
vi5	0	0.03

Tabla A.11: Datos asociados a la generación del PMSG y potencia de los VSC en el sistema de 14 nodos con integración de energía eólica basada en el PMSG.

PMSG	Nodos asociados		Capacidad de los VSC (MVA)	Coefficiente de Potencia	Densidad del aire (kg/m ³)	Área de barrido (m ²)	Velocidad del viento (m/s)
1	ca1	vi1	5	0.33445	1.225	11300	12
2	ca2	vi2	5	0.33445	1.225	11300	12
3	ca3	vi3	5	0.33445	1.225	11300	12
4	ca4	vi4	5	0.33445	1.225	11300	12
5	ca5	vi5	5	0.33445	1.225	11300	12

Tabla A.12: Datos asociados a los VSC en el sistema de 14 nodos con integración de energía eólica basada en el PMSG.

V_{wg} (p.u.)	V_{cd} (p.u.)	R_{c1} (p.u.)	K_1 (p.u.)	G_{c1} (p.u.)	R_{c2} (p.u.)	K_2 (p.u.)	G_{c2} (p.u.)
1	1	0.5	1.2247	0.00002	0.5	1.2247	0.00002
1	1	0.5	1.2247	0.00002	0.5	1.2247	0.00002
1	1	0.5	1.2247	0.00002	0.5	1.2247	0.00002
1	1	0.5	1.2247	0.00002	0.5	1.2247	0.00002
1	1	0.5	1.2247	0.00002	0.5	1.2247	0.00002

A.3. Sistema de 57 nodos del IEEE

Los datos de los elementos asociados a los CEI-PMSG en este sistema se muestran en la Tabla A.13:

Tabla A.13: Número de nodos y componentes de los CEI-PMSG en el sistema de 57 nodos del IEEE.

Nodos	Líneas de transmisión	Transformadores	PMSGs	Compensadores fijos en derivación
40	20	20	20	20

Tabla A.14: Datos de las líneas de transmisión asociadas a los CEI-PMSG en el sistema de 57 nodos con integración de energía eólica basada en el PMSG.

Nodo de envío	Nodo de recepción	R (p.u.)	X_L (p.u.)	G_{sh} (p.u.)	B_{sh} (p.u.)
ac1	vi1	0	0.1	0	0
ac2	vi2	0	0.1	0	0
ac3	vi3	0	0.1	0	0
ac4	vi4	0	0.1	0	0
ac5	vi5	0	0.1	0	0
ac6	vi6	0	0.1	0	0
ac7	vi7	0	0.1	0	0
ac8	vi8	0	0.1	0	0
ac9	vi9	0	0.1	0	0
ac10	vi10	0	0.1	0	0
ac11	vi11	0	0.1	0	0
ac12	vi12	0	0.1	0	0
ac13	vi13	0	0.1	0	0
ac14	vi14	0	0.1	0	0
ac15	vi15	0	0.1	0	0
ac16	vi16	0	0.1	0	0
ac17	vi17	0	0.1	0	0
ac18	vi18	0	0.1	0	0
ac19	vi19	0	0.1	0	0
ac20	vi20	0	0.1	0	0

Tabla A.15: Datos de los transformadores asociados a los CEI-PMSG en el sistema de 57 nodos con integración de energía eólica basada en el PMSG.

Nodo de envío	Nodo de recepción	Primario				Secundario				Rama de magnetización	
		R_1 (p.u.)	X_{L1} (p.u.)	V_{tap1} (p.u.)	θ_{tap1} (p.u.)	R_2 (p.u.)	X_{L2} (p.u.)	V_{tap2} (p.u.)	θ_{tap2} (p.u.)	G_{sh} (p.u.)	B_{sh} (p.u.)
vi1	14	0	0	1	0	0	0.08	1	0	0	0
vi2	20	0	0	1	0	0	0.08	1	0	0	0
vi3	26	0	0	1	0	0	0.08	1	0	0	0
vi4	30	0	0	1	0	0	0.08	1	0	0	0
vi5	31	0	0	1	0	0	0.08	1	0	0	0
vi6	32	0	0	1	0	0	0.08	1	0	0	0
vi7	33	0	0	1	0	0	0.08	1	0	0	0
vi8	34	0	0	1	0	0	0.08	1	0	0	0
vi9	35	0	0	1	0	0	0.08	1	0	0	0
vi10	42	0	0	1	0	0	0.08	1	0	0	0
vi11	45	0	0	1	0	0	0.08	1	0	0	0
vi12	46	0	0	1	0	0	0.08	1	0	0	0
vi13	47	0	0	1	0	0	0.08	1	0	0	0
vi14	48	0	0	1	0	0	0.08	1	0	0	0
vi15	49	0	0	1	0	0	0.08	1	0	0	0
vi16	50	0	0	1	0	0	0.08	1	0	0	0
vi17	51	0	0	1	0	0	0.08	1	0	0	0
vi18	55	0	0	1	0	0	0.08	1	0	0	0
vi19	56	0	0	1	0	0	0.08	1	0	0	0
vi20	57	0	0	1	0	0	0.08	1	0	0	0

Tabla A.16: Datos de los compensadores de potencia reactiva asociados a los CEI-PMSG en el sistema de 57 nodos con integración de energía eólica basada en el PMSG.

Nodo compensado	G_{sh} (p.u.)	B_{sh} (p.u.)	Nodo compensado	G_{sh} (p.u.)	B_{sh} (p.u.)
vi1	0	0.005	vi11	0	0.005
vi2	0	0.005	vi12	0	0.005
vi3	0	0.005	vi13	0	0.005
vi4	0	0.005	vi14	0	0.005
vi5	0	0.005	vi15	0	0.005
vi6	0	0.005	vi16	0	0.005
vi7	0	0.005	vi17	0	0.005
vi8	0	0.005	vi18	0	0.005
vi9	0	0.005	vi19	0	0.005
vi10	0	0.005	vi20	0	0.005

A.4. Sistema de 118 nodos del IEEE

En la Tabla A.19 se muestran los datos de los elementos asociados a los CEI-PMSG:

Tabla A.19: Número de nodos y componentes de los CEI-PMSG en el sistema de 118 nodos del IEEE.

Nodos	Líneas de transmisión	Transformadores	PMSGs	Compensadores fijos en derivación
16	8	8	8	8

Tabla A.20: Datos de las líneas de transmisión asociadas a los CEI-PMSG en el sistema de 118 nodos con integración de energía eólica basada en el PMSG.

Nodo de envío	Nodo de recepción	R (p.u.)	X_L (p.u.)	G_{sh} (p.u.)	B_{sh} (p.u.)
ac1	vi1	0	0.1	0	0
ac2	vi2	0	0.1	0	0
ac3	vi3	0	0.1	0	0
ac4	vi4	0	0.1	0	0
ac5	vi5	0	0.1	0	0
ac6	vi6	0	0.12	0	0
ac7	vi7	0	0.12	0	0
ac8	vi8	0	0.12	0	0

Tabla A.21: Datos de los transformadores asociados a los CEI-PMSG en el sistema de 118 nodos con integración de energía eólica basada en el PMSG.

Nodo de envío	Nodo de recepción	Primario				Secundario				Rama de magnetización	
		R_1 (p.u.)	X_{L1} (p.u.)	V_{tap1} (p.u.)	θ_{tap1} (p.u.)	R_2 (p.u.)	X_{L2} (p.u.)	V_{tap2} (p.u.)	θ_{tap2} (p.u.)	G_{sh} (p.u.)	B_{sh} (p.u.)
vi1	87	0	0	1	0	0	0.08	1	0	0	0
vi2	31	0	0	1	0	0	0.08	1	0	0	0
vi3	46	0	0	1	0	0	0.08	1	0	0	0
vi4	111	0	0	1	0	0	0.08	1	0	0	0
vi5	103	0	0	1	0	0	0.08	1	0	0	0
vi6	54	0	0	1	0	0	0.08	1	0	0	0
vi7	12	0	0	1	0	0	0.08	1	0	0	0
vi8	59	0	0	1	0	0	0.08	1	0	0	0

Tabla A.22: Datos de los compensadores de potencia reactiva asociados a los CEI-PMSG en el sistema de 118 nodos con integración de energía eólica basada en el PMSG.

Nodo compensado	G_{sh} (p.u.)	B_{sh} (p.u.)
vi1	0	0.08
vi2	0	0.05
vi3	0	0.05
vi4	0	0.03
vi5	0	0.02
vi6	0	0.03
vi7	0	0.02
vi8	0	0.03

Tabla A.23: Datos asociados a la generación del PMSG y potencia de los VSC en el sistema de 118 nodos con integración de energía eólica basada en el PMSG.

Capacidad de los VSC (MVA)	Coefficiente de Potencia	Densidad del aire (kg/m ³)	Área de barrido (m ²)	Velocidad del viento (m/s)
5	0.22641	1.225	11300	14
10	0.22641	1.225	22600	14
25	0.22641	1.225	56500	14
42	0.22641	1.225	101700	14
46	0.22641	1.225	113000	14
59	0.22641	1.225	135600	14
120	0.22641	1.225	271200	14
245	0.22641	1.225	542400	14

Tabla A.24: Datos asociados a los VSC en el sistema de 118 nodos con integración de energía eólica basada en el PMSG.

V_{wg} (p.u.)	V_{cd} (p.u.)	R_{c1} (p.u.)	K_1	G_{c1} (p.u.)	R_{c2} (p.u.)	K_2	G_{c2} (p.u.)
1	1	0.4	1.2247	0.00002	0.4	1.2247	0.00002
1	1	0.4	1.2247	0.00002	0.4	1.2247	0.00002
1	1	0.3	1.2247	0.00002	0.3	1.2247	0.00002
1	1	0.08	1.2247	0.00002	0.08	1.2247	0.00002
1	1	0.08	1.2247	0.00002	0.08	1.2247	0.00002
1	1	0.06	1.2247	0.00002	0.06	1.2247	0.00002
1	1	0.1	1.2247	0.00002	0.1	1.2247	0.00002
1	1	0.075	1.2247	0.00002	0.075	1.2247	0.00002

Apéndice B

Deducción de las Ecuaciones de Flujos de Potencia en el Circuito utilizado para la Interconexión de los PMSG

En este Apéndice se describe la derivación matemática detallada de las ecuaciones de flujos de potencia asociadas al circuito que se utiliza para la interconexión del PMSG, las cuales se presentan en el Capítulo 2.

Enseguida se muestra el desarrollo de las ecuaciones para los flujos de potencia en el rectificador, el cual se encuentra entre los nodos wg y cd .

Para el flujo de potencia que va del nodo wg al nodo cd :

$$P_{wgcd} = \left(\frac{V_{wg} - V_1}{R_{c1}} \right) (V_{wg}) = V_{wg}^2 R_{c1}^{-1} - V_1 V_{wg} R_{c1}^{-1} \quad (\text{B.1})$$

$$\frac{V_1}{K_1 m_{a1}} = V_{cd} \quad (\text{B.2})$$

$$V_1 = K_1 m_{a1} V_{cd} \quad (\text{B.3})$$

$$P_{wgcd} = V_{wg}^2 R_{c1}^{-1} - K_1 m_{a1} V_{cd} V_{wg} R_{c1}^{-1} \quad (\text{B.4})$$

Para el flujo de potencia que va del nodo cd al nodo wg :

$$P_{cdwg} = P_{Gc1} + P_{V1} \quad (\text{B.5})$$

$$P_{Gc1} = V_{cd}^2 G_{c1} \quad (\text{B.6})$$

$$P_{V1} = \left(\frac{V_1 - V_{wg}}{R_{c1}} \right) (V_1) = V_1^2 R_{c1}^{-1} - V_1 V_{wg} R_{c1}^{-1} \quad (\text{B.7})$$

$$P_{V1} = K_1^2 m_{a1}^2 V_{cd}^2 R_{c1}^{-1} - K_1 m_{a1} V_{cd} V_{wg} R_{c1}^{-1} \quad (\text{B.8})$$

$$P_{cdwg} = V_{cd}^2 G_{c1} + K_1^2 m_{a1}^2 V_{cd}^2 R_{c1}^{-1} - K_1 m_{a1} V_{cd} V_{wg} R_{c1}^{-1} \quad (\text{B.9})$$

$$P_{cdwg} = V_{cd}^2 (G_{c1} + K_1^2 m_{a1}^2 R_{c1}^{-1}) - K_1 m_{a1} V_{cd} V_{wg} R_{c1}^{-1} \quad (\text{B.10})$$

Enseguida se muestra el desarrollo de las ecuaciones para los flujos de potencia en el inversor, el cual se encuentra entre los nodos cd y ca .

Para el flujo de potencia que va del nodo cd al nodo ca :

$$P_{cdca} = P_{Gc2} + P_{V2} \quad (\text{B.11})$$

$$P_{Gc2} = V_{cd}^2 G_{c2} \quad (\text{B.12})$$

$$P_{V2} = \left(\frac{V_2 - V_{ca}}{R_{c2}} \right) (V_2) = V_2^2 R_{c2}^{-1} - V_2 V_{ca} R_{c2}^{-1} \quad (\text{B.13})$$

$$V_2 = K_2 m_{a2} V_{cd} \quad (\text{B.14})$$

$$P_{V2} = K_2^2 m_{a2}^2 V_{cd}^2 R_{c2}^{-1} - K_2 m_{a2} V_{cd} V_{ca} R_{c2}^{-1} \quad (\text{B.15})$$

$$P_{cdca} = V_{cd}^2 G_{c2} + K_2^2 m_{a2}^2 V_{cd}^2 R_{c2}^{-1} - K_2 m_{a2} V_{cd} V_{ca} R_{c2}^{-1} \quad (\text{B.16})$$

$$P_{cdca} = V_{cd}^2 (G_{c2} + K_2^2 m_{a2}^2 R_{c2}^{-1}) - K_2 m_{a2} V_{cd} V_{ca} R_{c2}^{-1} \quad (\text{B.17})$$

Para el flujo de potencia que va del nodo ca al nodo cd :

$$P_{cacd} = \left(\frac{V_{ca} - V_2}{R_{c2}} \right) (V_{ca}) = V_{ca}^2 R_{c2}^{-1} - V_2 V_{ca} R_{c2}^{-1} \quad (\text{B.18})$$

$$P_{cacd} = V_{ca}^2 R_{c2}^{-1} - K_2 m_{a2} V_{cd} V_{ca} R_{c2}^{-1} \quad (\text{B.19})$$

Debido a que no hay convertidores de potencia entre los nodos ca y vi , y entre los nodos vi y k , donde k es el nodo de interconexión en la red, las ecuaciones para los flujos de potencia se expresan basadas en la formulación convencional que se presenta en el apartado de conceptos generales de flujos de potencia.

$$P_{cavi} = V_{ca}^2 G_{ca} + V_{ca} V_{vi} [G_{cavi} \cos(\theta_{ca} - \theta_{vi}) + B_{cavi} \sin(\theta_{ca} - \theta_{vi})] \quad (\text{B.20})$$

$$Q_{cavi} = -V_{ca}^2 B_{ca} + V_{ca} V_{vi} [G_{cavi} \sin(\theta_{ca} - \theta_{vi}) - B_{cavi} \cos(\theta_{ca} - \theta_{vi})] \quad (\text{B.21})$$

$$P_{vica} = V_{vi}^2 G_{vi} + V_{vi} V_{ca} [G_{vica} \cos(\theta_{vi} - \theta_{ca}) + B_{vica} \sin(\theta_{vi} - \theta_{ca})] \quad (\text{B.22})$$

$$Q_{vica} = -V_{vi}^2 B_{vi} + V_{vi} V_{ca} [G_{vica} \sin(\theta_{vi} - \theta_{ca}) - B_{vica} \cos(\theta_{vi} - \theta_{ca})] \quad (B.23)$$

$$P_{vik} = V_{vi}^2 G_{vivi} + V_{vi} V_k [G_{vik} \cos(\theta_{vi} - \theta_k) + B_{vik} \sin(\theta_{vi} - \theta_k)] \quad (B.24)$$

$$Q_{vik} = -V_{vi}^2 B_{vivi} + V_{vi} V_k [G_{vik} \sin(\theta_{vi} - \theta_k) - B_{vik} \cos(\theta_{vi} - \theta_k)] \quad (B.25)$$

$$P_{kvi} = V_k^2 G_k + V_k V_{vi} [G_{kvi} \cos(\theta_k - \theta_{vi}) + B_{kvi} \sin(\theta_k - \theta_{vi})] \quad (B.26)$$

$$Q_{kvi} = -V_k^2 B_k + V_k V_{vi} [G_{kvi} \sin(\theta_k - \theta_{vi}) - B_{kvi} \cos(\theta_k - \theta_{vi})] \quad (B.27)$$

Las nuevas ecuaciones de desajuste de potencia que se agregarán al sistema de ecuaciones de la red, son las siguientes:

$$\Delta P_{wg} = P_{wg} - P_{wgcd} \quad (B.28)$$

$$\Delta P_{cd} = -P_{cdca} - P_{cdwg} \quad (B.29)$$

$$\Delta P_{ca} = -P_{cavi} - P_{cacd} \quad (B.30)$$

$$\Delta P_{vi} = -P_{vica} - P_{vik} \quad (B.31)$$

$$\Delta P_k = P_{Gk} - P_{LK} - P_{kvi} - P_k^{cal} \quad (B.32)$$

$$\Delta Q_{ca} = Q_{inv} - Q_{cavi} \quad (B.33)$$

$$\Delta Q_{vi} = -Q_{vica} - Q_{vik} \quad (B.34)$$

$$\Delta Q_k = Q_{Gk} - Q_{Lk} - Q_{kvi} - Q_k^{cal} \quad (B.35)$$

Apéndice C

Tablas Adicionales Resultantes de los Casos de Estudio de Flujos de Potencia en los Sistemas de 57 y 118 Nodos del IEEE.

D.1. Sistema de 57 nodos del IEEE

En la Tabla C.1 se muestra el resultado de la potencia reactiva inyectada por los generadores convencionales, así como sus límites de potencia reactiva. De esta manera, se observa con facilidad si los generadores se encuentran dentro de sus límites de potencia reactiva o si están sujetos en alguno de ellos como es el caso de los generadores conectados a los nodos 3 y 9.

Tabla C.1: Potencia reactiva de los generadores convencionales del sistema de 57 nodos del IEEE con integración de PMSGs.

Nodo	Generación	Límites de potencia	
	Q_G (p.u.)	Q_{\min} (p.u.)	Q_{\max} (p.u.)
2	-0.0251	-0.17	0.50
3	-0.1000	-0.10	0.60
6	-0.0316	-0.08	0.25
8	0.5965	-1.40	2.00
9	-0.0300	-0.03	0.09
12	1.2013	-1.50	1.55

En la Tabla C.2 se muestran los resultados de la potencia reactiva a la salida de los inversores en el lado de CA. También se observa cuáles de estos convertidores violaron alguno de sus límites de potencia reactiva, ya que esta se sujeta al límite violado asegurando con esto, que los convertidores trabajen dentro de sus límites de potencia para que no sufran daño alguno por sobrepasar sus límites de operación.

Los índices de modulación para los rectificadores son iguales en este caso, debido a que las condiciones como el flujo de potencia, el voltaje y el ángulo en terminales del rectificador son iguales para todos los rectificadores. Los índices de modulación que resultan para los convertidores asociados a la interconexión de los PMSGs, y con los que se cumple el valor de potencia a la salida de los inversores, están dados en la Tabla C.3.

Tabla C.2: Potencia reactiva de los inversores asociados a los CEI-PMSG en el sistema de 57 nodos del IEEE.

Nodo	Generación	Límites de potencia	
	$Q_{inv} (p. u.)$	$Q_{min} (p. u.)$	$Q_{max} (p. u.)$
ca1	0.0311	-0.0311	0.0311
ca2	0.0311	-0.0311	0.0311
ca3	0.0311	-0.0311	0.0311
ca4	-0.0311	-0.0311	0.0311
ca5	0.0258	-0.0311	0.0311
ca6	-0.0155	-0.0311	0.0311
ca7	-0.0064	-0.0311	0.0311
ca8	-0.0110	-0.0311	0.0311
ca9	-0.0194	-0.0311	0.0311
ca10	0.0208	-0.0311	0.0311
ca11	-0.0311	-0.0311	0.0311
ca12	-0.0311	-0.0311	0.0311
ca13	-0.0311	-0.0311	0.0311
ca14	-0.0311	-0.0311	0.0311
ca15	-0.0311	-0.0311	0.0311
ca16	-0.0311	-0.0311	0.0311
ca17	-0.0311	-0.0311	0.0311
ca18	-0.0311	-0.0311	0.0311
ca19	-0.0119	-0.0311	0.0311
ca20	-0.0037	-0.0311	0.0311

Tabla C.3: Índices de modulación de los convertidores asociados a los CEI-PMSGs en el sistema de 57 nodos del IEEE.

Nodo de Interconexión	Índices de Modulación		Nodo de Interconexión	Índices de Modulación	
	m_{a1}	m_{a2}		m_{a1}	m_{a2}
14	0.8002	0.8176	45	0.8002	0.8588
20	0.8002	0.8392	46	0.8002	0.8794
26	0.8002	0.8281	47	0.8002	0.8595
30	0.8002	0.8293	48	0.8002	0.8562
31	0.8002	0.8343	49	0.8002	0.8601
32	0.8002	0.8310	50	0.8002	0.8476
33	0.8002	0.8317	51	0.8002	0.8676
34	0.8002	0.8313	55	0.8002	0.8510
35	0.8002	0.8306	56	0.8002	0.8313
42	0.8002	0.8339	57	0.8002	0.8319

El flujo de potencia en las líneas de transmisión y en los transformadores de este sistema de prueba, se reportan en la Tabla C.4 y en la Tabla C.5, respectivamente.

Tabla C.4: Flujos de potencia en las líneas de transmisión del sistema de 57 nodos del IEEE con integración de PMSGs.

De:	A:	P (p.u.)	Q (p.u.)	De:	A:	P (p.u.)	Q (p.u.)
1	2	0.7915	0.8137	37	38	-0.0363	-0.1365
2	1	-0.7807	-0.9128	38	37	0.0376	0.1364
2	3	0.7507	0.0077	37	39	0.0222	0.0220
3	2	-0.7341	-0.0420	39	37	-0.0222	-0.0219
3	4	0.4822	-0.0608	36	40	0.0267	0.0402
4	3	-0.4795	0.0329	40	36	-0.0266	-0.0401
4	5	0.1044	-0.0239	22	38	-0.0472	0.0151
5	4	-0.1037	0.0007	38	22	0.0472	-0.0151
4	6	0.0902	-0.0297	41	42	0.0330	0.0116
6	4	-0.0899	-0.0025	42	41	-0.0327	-0.0111
6	7	-0.2340	-0.0200	38	44	-0.1342	0.0479
7	6	0.2351	-0.0009	44	38	0.1347	-0.0489
6	8	-0.4525	-0.0581	46	47	0.3485	0.2675
8	6	0.4598	0.0489	47	46	-0.3446	-0.2594
8	9	1.7649	0.1973	47	48	0.0860	0.1173
9	8	-1.7339	-0.0930	48	47	-0.0857	-0.1168
9	10	0.1717	-0.0866	48	49	0.0332	-0.0624
10	9	-0.1704	0.0500	49	48	-0.0329	0.0578
9	11	0.1029	-0.0218	49	50	0.1021	0.0618
11	9	-0.1026	0.0018	50	49	-0.1010	-0.0601
9	12	0.0610	-0.1652	50	51	-0.0705	-0.0711
12	9	-0.0597	0.0945	51	50	0.0718	0.0732
9	13	0.0412	-0.0476	29	52	0.1828	0.0300
13	9	-0.0411	0.0089	52	29	-0.1779	-0.0238
13	14	-0.1299	0.1915	52	53	0.1289	0.0018
14	13	0.1307	-0.1996	53	52	-0.1276	-0.0001
13	15	-0.3866	0.0156	53	54	-0.0724	-0.0404
15	13	0.3908	-0.0245	54	53	0.0737	0.0421
1	15	1.1260	0.3294	54	55	-0.1147	-0.0561
15	1	-1.1027	-0.3124	55	54	0.1176	0.0598
1	16	0.6625	-0.0051	44	45	-0.2547	0.0309
16	1	-0.6440	0.0312	45	44	0.2586	-0.0273
1	17	0.8034	0.0426	56	41	-0.0172	0.0026
17	1	-0.7891	-0.0081	41	56	0.0174	-0.0024
3	15	0.2419	-0.2072	56	42	-0.0001	0.0075
15	3	-0.2404	0.1590	42	56	0.0002	-0.0075

5	6	-0.0263	-0.0407	57	56	-0.0064	0.0017
6	5	0.0263	0.0290	56	57	0.0064	-0.0017
7	8	-0.7667	-0.1058	38	49	-0.0007	-0.0875
8	7	0.7753	0.1304	49	38	0.0014	0.0823
10	12	-0.0930	-0.2266	38	48	-0.0900	-0.1517
12	10	0.0945	0.2006	48	38	0.0909	0.1531
11	13	-0.0307	-0.0560	ac1	vi1	0.0384	0.0311
13	11	0.0308	0.0382	vi1	ac1	-0.0384	-0.0308
12	13	-0.1279	0.5769	ac2	vi2	0.0384	0.0311
13	12	0.1346	-0.6154	vi2	ac2	-0.0384	-0.0308
12	16	-0.2132	0.0427	ac3	vi3	0.0384	0.0311
16	12	0.2140	-0.0612	vi3	ac3	-0.0384	-0.0308
12	17	-0.3638	0.0465	ac4	vi4	0.0384	-0.0311
17	12	0.3691	-0.0719	vi4	ac4	-0.0384	0.0313
14	15	-0.5073	-0.1232	ac5	vi5	0.0384	0.0258
15	14	0.5121	0.1244	vi5	ac5	-0.0384	-0.0256
18	19	0.0128	0.0042	ac6	vi6	0.0384	-0.0155
19	18	-0.0127	-0.0041	vi6	ac6	-0.0384	0.0156
19	20	-0.0203	-0.0019	ac7	vi7	0.0384	-0.0064
20	19	0.0204	0.0021	vi7	ac7	-0.0384	0.0065
21	22	-0.0049	0.0231	ac8	vi8	0.0384	-0.0110
22	21	0.0050	-0.0231	vi8	ac8	-0.0384	0.0111
22	23	0.0422	0.0080	ac9	vi9	0.0384	-0.0194
23	22	-0.0422	-0.0079	vi9	ac9	-0.0384	0.0196
23	24	-0.0208	-0.0131	ac10	vi10	0.0384	0.0208
24	23	0.0209	0.0043	vi10	ac10	-0.0384	-0.0206
26	27	-0.0372	-0.0004	ac11	vi11	0.0385	-0.0311
27	26	0.0375	0.0008	vi11	ac11	-0.0385	0.0313
27	28	-0.1305	-0.0058	ac12	vi12	0.0385	-0.0311
28	27	0.1315	0.0074	vi12	ac12	-0.0385	0.0313
28	29	-0.1775	-0.0304	ac13	vi13	0.0385	-0.0311
29	28	0.1789	0.0323	vi13	ac13	-0.0385	0.0313
25	30	-0.0083	0.0574	ac14	vi14	0.0385	-0.0311
30	25	0.0087	-0.0567	vi14	ac14	-0.0385	0.0313
30	31	-0.0063	0.0122	ac15	vi15	0.0385	-0.0311
31	30	0.0063	-0.0121	vi15	ac15	-0.0385	0.0313
31	32	-0.0259	0.0135	ac16	vi16	0.0384	-0.0311
32	31	0.0264	-0.0129	vi16	ac16	-0.0384	0.0313
32	33	-0.0004	0.0207	ac17	vi17	0.0385	-0.0311
33	32	0.0004	-0.0207	vi17	ac17	-0.0385	0.0313
34	35	0.0349	-0.0335	ac18	vi18	0.0385	-0.0311
35	34	-0.0348	0.0304	vi18	ac18	-0.0385	0.0313
35	36	0.0132	-0.0752	ac19	vi19	0.0384	-0.0119
36	35	-0.0130	0.0739	vi19	ac19	-0.0384	0.0121
36	37	-0.0137	-0.1141	ac20	vi20	0.0384	-0.0037
37	36	0.0141	0.1146	vi20	ac20	-0.0384	0.0038

Tabla C.5: Flujos de potencia en los transformadores del sistema de 57 nodos del IEEE con integración de PMSGs.

De:	A:	P (p.u.)	Q (p.u.)	De:	A:	P (p.u.)	Q (p.u.)
4	18	0.1249	0.0176	vi2	20	0.0384	0.0359
18	4	-0.1249	-0.0090	20	vi2	-0.0384	-0.0357
4	18	0.1599	0.0032	vi3	26	0.0384	0.0357
18	4	-0.1599	0.0077	26	vi3	-0.0384	-0.0355
21	20	0.0049	-0.0231	vi4	30	0.0384	-0.0263
20	21	-0.0049	0.0236	30	vi4	-0.0384	0.0265
24	25	0.0279	0.0159	vi5	31	0.0384	0.0306
25	24	-0.0279	-0.0148	31	vi5	-0.0384	-0.0304
24	25	0.0268	0.0153	vi6	32	0.0384	-0.0106
25	24	-0.0268	-0.0142	32	vi6	-0.0384	0.0108
24	26	-0.0757	-0.0356	vi7	33	0.0384	-0.0015
26	24	0.0757	0.0359	33	vi7	-0.0384	0.0017
7	29	0.5316	0.1067	vi8	34	0.0384	-0.0061
29	7	-0.5316	-0.0883	34	vi8	-0.0384	0.0062
34	32	0.0035	0.0272	vi9	35	0.0384	-0.0146
32	34	-0.0035	-0.0266	35	vi9	-0.0384	0.0148
11	41	0.0512	0.0226	vi10	42	0.0384	0.0256
41	11	-0.0512	-0.0204	42	vi10	-0.0384	-0.0254
41	43	-0.0622	-0.0187	vi11	45	0.0385	-0.0259
43	41	0.0622	0.0204	45	vi11	-0.0385	0.0261
15	45	0.2202	0.0034	vi12	46	0.0385	-0.0256
45	15	-0.2202	0.0013	46	vi12	-0.0385	0.0258
14	46	0.3100	0.3051	vi13	47	0.0385	-0.0259
46	14	-0.3100	-0.2933	47	vi13	-0.0385	0.0261
10	51	0.2134	0.1566	vi14	48	0.0385	-0.0260
51	10	-0.2134	-0.1522	48	vi14	-0.0385	0.0261
13	49	0.2122	0.3383	vi15	49	0.0385	-0.0259
49	13	-0.2122	-0.3130	49	vi15	-0.0385	0.0261
11	43	0.0822	0.0316	vi16	50	0.0384	-0.0261
43	11	-0.0822	-0.0304	50	vi16	-0.0384	0.0262
40	56	0.0266	0.0401	vi17	51	0.0385	-0.0258
56	40	-0.0266	-0.0375	51	vi17	-0.0385	0.0260
39	57	0.0222	0.0219	vi18	55	0.0385	-0.0260
57	39	-0.0222	-0.0207	55	vi18	-0.0385	0.0262
9	55	0.1471	0.1241	vi19	56	0.0384	-0.0071
55	9	-0.1471	-0.1200	56	vi19	-0.0384	0.0072
vi1	14	0.0384	0.0356	vi20	57	0.0384	0.0012
14	vi1	-0.0384	-0.0354	57	vi20	-0.0384	-0.0011

En la Tabla C.6 se reporta la lista de los nodos que tienen compensación de potencia reactiva, así como la cantidad de la misma. Mientras que en la Tabla C.7, se presenta el flujo de potencia en los CEI-PMSG y la potencia total inyectada en los nodos de interconexión.

Tabla C.6: Compensación de reactivos en el sistema de 57 nodos con integración de PMSGs.

Nodo compensado	Q (p.u.)	Nodo compensado	Q (p.u.)
18	0.1010	vi10	0.0050
25	0.0604	vi11	0.0054
53	0.0595	vi12	0.0056
vi1	0.0048	vi13	0.0054
vi2	0.0051	vi14	0.0053
vi3	0.0049	vi15	0.0054
vi4	0.0050	vi16	0.0052
vi5	0.0050	vi17	0.0055
vi6	0.0050	vi18	0.0053
vi7	0.0050	vi19	0.0050
vi8	0.0050	vi20	0.0050
vi9	0.0050		

Tabla C.7: Flujo de potencia en los CEI-PMSG y potencia total inyectada en los nodos de interconexión del sistema de 57 nodos del IEEE.

PMSG	Nodo de Interconexión	P_{wgcd} (p.u.)	P_{cdca} (p.u.)	P_{cavi} (p.u.)	Potencia Inyectada en el nodo de interconexión	
					P (p.u.)	Q (p.u.)
1	14	0.04	0.0392	0.0384	0.0384	-0.0354
2	20	0.04	0.0392	0.0384	0.0384	-0.0357
3	26	0.04	0.0392	0.0384	0.0384	-0.0355
4	30	0.04	0.0392	0.0384	0.0384	0.0265
5	31	0.04	0.0392	0.0384	0.0384	-0.0304
6	32	0.04	0.0392	0.0384	0.0384	0.0108
7	33	0.04	0.0392	0.0384	0.0384	0.0017
8	34	0.04	0.0392	0.0384	0.0384	0.0062
9	35	0.04	0.0392	0.0384	0.0384	0.0148
10	42	0.04	0.0392	0.0384	0.0384	-0.0254
11	45	0.04	0.0392	0.0385	0.0385	0.0261
12	46	0.04	0.0392	0.0385	0.0385	0.0258
13	47	0.04	0.0392	0.0385	0.0385	0.0261
14	48	0.04	0.0392	0.0385	0.0385	0.0261
15	49	0.04	0.0392	0.0385	0.0385	0.0261
16	50	0.04	0.0392	0.0384	0.0384	0.0262
17	51	0.04	0.0392	0.0385	0.0385	0.0260
18	55	0.04	0.0392	0.0385	0.0385	0.0262
19	56	0.04	0.0392	0.0384	0.0384	0.0072
20	57	0.04	0.0392	0.0384	0.0384	-0.0011

D.2. Sistema de 118 nodos del IEEE

La potencia reactiva de los generadores convencionales en este sistema, se muestra enseguida:

Tabla C.8: Potencia reactiva de los generadores convencionales del sistema de 118 nodos del IEEE con integración de PMSGs.

Nodo	Generación	Límites de potencia		Nodo	Generación	Límites de potencia	
	Q_G (p.u.)	Q_{\min} (p.u.)	Q_{\max} (p.u.)		Q_G (p.u.)	Q_{\min} (p.u.)	Q_{\max} (p.u.)
1	0.03024	-0.05	0.15	66	-0.01747	-0.67	2.00
4	-0.05437	-3.00	3.00	70	0.09342	-0.10	0.32
6	0.27626	-0.13	0.50	72	-0.11142	-1.00	1.00
8	0.64570	-3.00	3.00	73	0.09645	-1.00	1.00
10	-0.51042	-1.47	2.00	74	-0.05677	-0.06	0.09
15	0.08665	-0.10	0.30	76	0.05262	-0.08	0.23
18	0.27355	-0.16	0.50	77	0.11963	-0.20	0.70
19	-0.08000	-0.08	0.24	80	1.04860	-1.65	2.80
24	-0.15142	-3.00	3.00	85	-0.00218	-0.08	0.23
25	0.49744	-0.47	1.40	89	-0.11793	-2.10	3.00
26	0.10283	-10.00	10.00	90	0.59299	-3.00	3.00
27	0.07757	-3.00	3.00	91	-0.14847	-1.00	1.00
32	-0.03435	-0.14	0.42	92	-0.03000	-0.03	0.09
34	-0.08000	-0.08	0.24	99	-0.17540	-1.00	1.00
36	-0.00815	-0.08	0.24	100	1.20640	-0.50	1.55
40	0.26978	-3.00	3.00	104	0.09101	-0.08	0.23
42	0.40998	-3.00	3.00	105	-0.05673	-0.08	0.23
49	1.08720	-0.85	2.10	107	0.05695	-2.00	2.00
55	-0.08000	-0.08	0.23	110	-0.08000	-0.08	0.23
56	-0.08000	-0.08	0.15	112	0.38558	-1.00	10.00
61	-0.57908	-1.00	3.00	113	0.09385	-1.00	2.00
62	0.00062	-0.20	0.20	116	0.51543	-10.00	10.00
65	0.74208	-0.67	2.00				

En la Tabla C.8 se muestra el resultado de la potencia reactiva inyectada por los generadores convencionales, así como sus límites de potencia reactiva. De esta manera, se observa con facilidad si los generadores se encuentran dentro de sus límites de potencia reactiva o si están sujetos en alguno de ellos.

En la siguiente tabla se muestra el resultado de la potencia reactiva que se tiene a la salida de los inversores asociados a los CEI-PMSGs.

Tabla C.9: Potencia reactiva de los inversores asociados a los CEI-PMSG en el sistema de 118 nodos del IEEE.

Nodo	Generación	Límites de potencia	
	$Q_{inv} (p. u.)$	$Q_{min} (p. u.)$	$Q_{max} (p. u.)$
ca1	-0.02675	-0.02675	0.02675
ca2	0.05574	-0.05574	0.05574
ca3	-0.14851	-0.14851	0.14851
ca4	0.18915	-0.18915	0.18915
ca5	0.19804	-0.19804	0.19804
ca6	0.31320	-0.31320	0.31320
ca7	0.76387	-0.76387	0.76387
ca8	1.72030	-1.72030	1.72030

En la Tabla C.9 se muestran los resultados de la potencia reactiva a la salida de los inversores en el lado de CA. Esto nos indica que los convertidores están trabajando dentro de sus límites de potencia reactiva.

Los índices de modulación que resultan para los convertidores asociados a la interconexión de los PMSGs, y con los que se cumple el valor de potencia a la salida de los inversores, están dados en la siguiente tabla:

Tabla C.10: Índices de modulación de los convertidores asociados a los CEI-PMSG en el sistema de 118 nodos del IEEE.

Nodo de Interconexión	Índices de Modulación		Nodo de Interconexión	Índices de Modulación	
	m_{a1}	m_{a2}		m_{a1}	m_{a2}
87	0.8025	0.8285	103	0.7884	0.8657
31	0.7884	0.8191	54	0.7912	0.8582
46	0.7639	0.8451	12	0.7323	0.9705
111	0.7912	0.8652	59	0.6901	1.0921

Los flujos de las potencias activa y reactiva en las líneas de transmisión de este sistema, están dados en la siguiente tabla:

Tabla C.11: Flujos de potencia en las líneas de transmisión del sistema de 118 nodos del IEEE con integración de PMSGs.

De:	A:	P (p.u.)	Q (p.u.)	De:	A:	P (p.u.)	Q (p.u.)
1	2	-0.12333	-0.09351	66	49	1.34510	0.08382
2	1	0.12405	0.07243	62	66	-0.36815	-0.17368
1	3	-0.38667	-0.14625	66	62	0.37572	0.14729
3	1	0.38907	0.14414	62	67	-0.23957	-0.14511
4	5	-1.03060	-0.22771	67	62	0.24149	0.12228
5	4	1.03250	0.23453	66	67	0.52804	0.19320
3	5	-0.68076	-0.15140	67	66	-0.52149	-0.19228
5	3	0.69321	0.17966	65	68	0.21014	-0.22948
5	6	0.88042	0.03579	68	65	-0.21007	-0.41295
6	5	-0.87120	-0.00811	47	69	-0.54616	0.10568
6	7	0.35120	0.06437	69	47	0.57221	-0.09452
7	6	-0.35060	-0.06703	49	69	-0.45262	0.10031
8	9	-4.40640	-0.89734	69	49	0.47377	-0.11860
9	8	4.45250	0.24429	69	70	1.07400	0.16176
9	10	-4.45250	-0.24429	70	69	-1.04030	-0.14330
10	9	4.50000	-0.51042	24	70	-0.05590	-0.02993
4	11	0.64056	0.05335	70	24	0.05591	-0.06814
11	4	-0.63186	-0.04186	70	71	0.16062	-0.12242
5	11	0.76897	0.08137	71	70	-0.16026	0.11536
11	5	-0.75684	-0.05771	24	72	0.02051	0.03162
11	12	0.33673	-0.23249	72	24	-0.02034	-0.07837
12	11	-0.33570	0.23103	71	72	0.10013	-0.00804
2	12	-0.32405	-0.16243	72	71	-0.09967	-0.03306
12	2	0.32663	0.15596	71	73	0.06012	-0.10732
3	12	-0.09831	-0.09274	73	71	-0.06000	0.09645
12	3	0.09909	0.05671	70	74	0.16342	0.12854
7	12	0.16060	0.04703	74	70	-0.16144	-0.15379
12	7	-0.16035	-0.05453	70	75	0.00033	0.09873
11	13	0.35198	0.10206	75	70	0.00027	-0.13104
13	11	-0.34883	-0.10949	69	75	1.09260	0.20618
12	14	0.18468	0.00302	75	69	-1.04460	-0.18620
14	12	-0.18392	-0.01802	74	75	-0.51856	-0.06285
13	15	0.00883	-0.05051	75	74	0.52220	0.06531
15	13	-0.00879	-0.00804	76	77	-0.61317	-0.20974
14	15	0.04392	0.00802	77	76	0.63381	0.24355
15	14	-0.04373	-0.05509	69	77	0.60787	0.07133
12	16	0.07893	0.02255	77	69	-0.59675	-0.14309
16	12	-0.07877	-0.04254	75	77	-0.34828	-0.09462
15	17	-1.03690	-0.22332	77	75	0.35640	0.07313
17	15	1.05260	0.23233	77	78	0.45073	0.06694
16	17	-0.17123	-0.05746	78	77	-0.44995	-0.07714
17	16	0.17267	0.01782	78	79	-0.26005	-0.18286
17	18	0.80363	0.22981	79	78	0.26059	0.17871
18	17	-0.79490	-0.20652	77	80	-0.97239	-0.37151

18	19	0.19490	0.14007	80	77	0.99031	0.37320
19	18	-0.19420	-0.14770	77	80	-0.44688	-0.20442
19	20	-0.10551	0.05383	80	77	0.45376	0.20513
20	19	0.10594	-0.07936	79	80	-0.65059	-0.29501
15	19	0.11553	0.12212	80	79	0.65832	0.31026
19	15	-0.11516	-0.13033	68	81	-0.43642	-0.04660
20	21	-0.28594	0.04936	81	68	0.43698	-0.75502
21	20	0.28764	-0.06131	77	82	-0.03491	0.17502
21	22	-0.42764	-0.01869	82	77	0.03633	-0.25228
22	21	0.43180	0.01513	82	83	-0.47328	0.24594
22	23	-0.53180	-0.06513	83	82	0.47665	-0.27187
23	22	0.54216	0.07413	83	84	-0.24823	0.14772
23	24	0.09496	0.10500	84	83	0.25386	-0.16072
24	23	-0.09461	-0.15311	83	85	-0.42842	0.12107
23	25	-1.63140	-0.25731	85	83	0.43741	-0.12389
25	23	1.67370	0.38324	84	85	-0.36386	0.09072
25	27	1.43260	0.30049	85	84	0.36832	-0.09317
27	25	-1.36880	-0.15357	85	86	0.16972	-0.01765
27	28	0.32499	0.04467	86	85	-0.16868	-0.00533
28	27	-0.32277	-0.05477	86	87	-0.04132	-0.09467
28	29	0.15277	-0.01523	87	86	0.04153	0.05275
29	28	-0.15217	-0.00410	85	88	-0.50351	0.07587
8	30	0.75123	0.28405	88	85	0.50890	-0.07522
30	8	-0.74761	-0.75591	85	89	-0.71194	0.00665
26	30	2.23380	-0.11312	89	85	0.72444	0.03734
30	26	-2.19410	-0.36823	88	89	-0.98890	-0.02478
17	31	0.14558	0.17965	89	88	1.00280	0.07701
31	17	-0.14266	-0.20796	89	90	0.58172	-0.04717
29	31	-0.08784	-0.03590	90	89	-0.56435	0.05796
31	29	0.08794	0.02865	89	90	1.10740	-0.05431
23	32	0.92428	0.04818	90	89	-1.07850	0.07041
32	23	-0.89682	-0.06136	90	91	0.01285	0.04463
31	32	-0.29501	0.00911	91	90	-0.01276	-0.06501
32	31	0.29786	-0.02281	89	92	2.01760	-0.06593
27	32	0.12597	0.00991	92	89	-1.97770	0.21489
32	27	-0.12557	-0.02657	89	92	0.63594	-0.06487
15	33	0.07391	-0.04902	92	89	-0.62013	0.08718
33	15	-0.07364	0.01980	91	92	-0.08724	-0.08346
19	34	-0.03513	-0.10580	92	91	0.08773	0.05330
34	19	0.03571	0.04765	92	93	0.57747	-0.10755
35	36	0.00677	0.06124	93	92	-0.56848	0.11573
36	35	-0.00676	-0.06377	92	94	0.52288	-0.14313
35	37	-0.33677	-0.15124	94	92	-0.50878	0.14953
37	35	0.33831	0.14536	93	94	0.44848	-0.18573
33	37	-0.15636	-0.10980	94	93	-0.44317	0.18485
37	33	0.15781	0.07948	94	95	0.41156	0.09292
34	36	0.30419	0.11180	95	94	-0.40915	-0.09579
36	34	-0.30324	-0.11438	80	96	0.18832	0.20875

34	37	-0.94548	-0.38689	96	80	-0.18533	-0.24451
37	34	0.94822	0.38733	82	96	-0.10304	-0.06814
37	39	0.54982	0.03700	96	82	0.10325	0.01542
39	37	-0.53987	-0.03015	94	96	0.20118	-0.09513
37	40	0.44115	-0.02977	96	94	-0.19988	0.07672
40	37	-0.42942	0.02260	80	97	0.26288	0.25560
30	38	0.63702	0.17591	97	80	-0.26048	-0.27009
38	30	-0.63439	-0.54528	80	98	0.28663	0.08370
39	40	0.26987	-0.07985	98	80	-0.28461	-0.10497
40	39	-0.26835	0.07026	80	99	0.19280	0.08221
40	41	0.15530	0.01167	99	80	-0.19071	-0.13013
41	40	-0.15492	-0.02187	92	100	0.31404	-0.15807
40	42	-0.11753	-0.06474	100	92	-0.30635	0.14541
42	40	0.11846	0.02325	94	100	0.03921	-0.49216
41	42	-0.21508	-0.07813	100	94	-0.03530	0.44403
42	41	0.21727	0.05260	95	96	-0.01085	-0.21421
43	44	-0.16451	-0.00617	96	95	0.01162	0.20231
44	43	0.16626	-0.04507	96	97	-0.10965	-0.19994
34	43	0.01559	0.02348	97	96	0.11048	0.18009
43	34	-0.01549	-0.06383	98	100	-0.05539	0.02497
44	45	-0.32626	0.06170	100	98	0.05561	-0.07356
45	44	0.32885	-0.07296	99	100	-0.22929	-0.04527
45	46	-0.36071	-0.01924	100	99	0.23024	0.02737
46	45	0.36608	0.00475	100	101	-0.16688	0.22059
46	47	-0.30755	-0.03826	101	100	0.16913	-0.24342
47	46	0.31116	0.01820	92	102	0.44575	-0.07663
46	48	-0.14877	-0.07557	102	92	-0.44321	0.07379
48	46	0.15026	0.03208	101	102	-0.38913	0.09342
47	49	-0.10499	-0.12387	102	101	0.39321	-0.10379
49	47	0.10545	0.10865	100	103	1.20260	0.06464
42	49	-0.64786	0.05206	103	100	-1.18010	-0.04505
49	42	0.67944	0.00370	100	104	0.56434	0.10620
42	49	-0.64786	0.05206	104	100	-0.54966	-0.09332
49	42	0.67944	0.00370	103	104	0.32216	0.04440
45	49	-0.49814	-0.03090	104	103	-0.31708	-0.06647
49	45	0.51566	0.03372	103	105	0.42673	0.03214
48	49	-0.35026	0.01389	105	103	-0.41674	-0.04105
49	48	0.35238	-0.02106	100	106	0.60573	0.09172
49	50	0.52695	0.11334	106	100	-0.58338	-0.06783
50	49	-0.51950	-0.11165	104	105	0.48674	0.00080
49	51	0.65439	0.17607	105	104	-0.48425	-0.00055
51	49	-0.63284	-0.14941	105	106	0.08681	0.04547
51	52	0.28238	0.05092	106	105	-0.08666	-0.05819
52	51	-0.28059	-0.05879	105	107	0.26733	-0.01854
52	53	0.10059	0.00879	107	105	-0.26327	-0.01086
53	52	-0.10012	-0.04407	105	108	0.23684	-0.11544
53	54	-0.12988	-0.06593	108	105	-0.23495	0.10329
54	53	0.13045	0.04008	106	107	0.24004	-0.03398

49	54	0.37048	0.10223	107	106	-0.23673	0.00219
54	49	-0.35956	-0.13203	108	109	0.21495	-0.11329
49	54	0.36920	0.08436	109	108	-0.21430	0.10796
54	49	-0.35668	-0.11467	103	110	0.60413	-0.00790
54	55	0.06798	0.05094	110	103	-0.58972	0.03002
55	54	-0.06783	-0.06895	109	110	0.13430	-0.13796
54	56	0.18527	0.19057	110	109	-0.13327	0.12169
56	54	-0.18505	-0.19661	110	111	-0.36113	-0.19677
55	56	-0.21142	-0.13359	111	110	0.36496	0.19046
56	55	0.21175	0.13117	110	112	0.69413	-0.27791
56	57	-0.22141	-0.07397	112	110	-0.68000	0.25558
57	56	0.22338	0.05682	17	113	0.02020	0.02981
50	57	0.34950	0.07165	113	17	-0.02019	-0.03735
57	50	-0.34338	-0.08682	32	113	0.04145	-0.17540
56	58	-0.05943	-0.02475	113	32	-0.03981	0.13120
58	56	0.05956	0.00270	32	114	0.09308	0.02179
51	58	0.18046	0.01849	114	32	-0.09294	-0.03623
58	51	-0.17956	-0.03270	27	115	0.20787	0.04656
54	59	-0.31105	-0.07787	115	27	-0.20706	-0.06122
59	54	0.31643	0.04507	114	115	0.01294	0.00623
56	59	-0.28600	-0.04912	115	114	-0.01294	-0.00878
59	56	0.29335	0.01709	68	116	1.84130	-0.66578
56	59	-0.29986	-0.04672	116	68	-1.84000	0.51543
59	56	0.30771	0.01887	12	117	0.20155	0.05250
55	59	-0.35075	-0.09745	117	12	-0.20000	-0.08000
59	55	0.35737	0.07379	75	118	0.40046	0.23654
59	60	-0.41930	0.09043	118	75	-0.39706	-0.23629
60	59	0.42532	-0.10005	76	118	-0.06683	-0.09764
59	61	-0.50343	0.10722	118	76	0.06706	0.08629
61	59	0.51237	-0.10472	ac1	vi1	0.04153	-0.02675
60	61	-1.11100	0.13077	vi1	ac1	-0.04153	0.02700
61	60	1.11430	-0.12804	ac2	vi2	0.08026	0.05574
60	62	-0.09434	-0.06073	vi2	ac2	-0.08026	-0.05473
62	60	0.09449	0.04683	ac3	vi3	0.18977	-0.14851
61	62	0.25747	-0.13911	vi3	ac3	-0.18977	0.15459
62	61	-0.25677	0.13258	ac4	vi4	0.36496	0.18915
63	64	-1.50530	-0.55528	vi4	ac4	-0.36496	-0.17326
64	63	1.50980	0.40026	ac5	vi5	0.40290	0.19804
38	65	-1.80090	-0.57468	vi5	ac5	-0.40290	-0.17900
65	38	1.83260	-0.09094	ac6	vi6	0.48641	0.31320
64	65	-1.79390	-0.61083	vi6	ac6	-0.48641	-0.27478
65	64	1.80340	0.34005	ac7	vi7	0.86483	0.76387
49	66	-1.31540	0.04109	vi7	ac7	-0.86483	-0.63434
66	49	1.34510	0.08382	ac8	vi8	1.61690	1.72030
49	66	-1.31540	0.04109	vi8	ac8	-1.61690	-1.28500

Los flujos de potencia en los transformadores de este sistema, se expresan en la siguiente tabla:

Tabla C.12: Flujos de potencia en los transformadores del sistema de 118 nodos del IEEE con integración de PMSGs.

De:	A:	P (p.u.)	Q (p.u.)	De:	A:	P (p.u.)	Q (p.u.)
8	5	3.3751	1.2590	80	81	0.4370	-0.7303
5	8	-3.3751	-0.9327	vi1	87	0.0415	0.0531
26	25	0.9062	0.2160	87	vi1	-0.0415	-0.0528
25	26	-0.9062	-0.1863	vi2	31	0.0803	0.1012
30	17	2.3047	0.9482	31	vi2	-0.0803	-0.0998
17	30	-2.3047	-0.7194	vi3	46	0.1898	-0.1054
38	37	2.4353	1.1200	46	vi3	-0.1898	0.1092
37	38	-2.4353	-0.8654	vi4	111	0.3650	0.2041
63	59	1.5053	0.5553	111	vi4	-0.3650	-0.1905
59	63	-1.5053	-0.4586	vi5	103	0.4029	0.1994
64	61	0.2842	0.2106	103	vi5	-0.4029	-0.1836
61	64	-0.2842	-0.2072	vi6	54	0.4864	0.3040
65	66	0.0639	0.7224	54	vi6	-0.4864	-0.2770
66	65	-0.0639	-0.7056	vi7	12	0.8648	0.6557
68	69	-1.1948	1.1253	12	vi7	-0.8648	-0.5673
69	68	1.1948	-1.0388	vi8	59	1.6169	1.3203
81	80	-0.4370	0.7550	59	vi8	-1.6169	-1.0239

La potencia reactiva aportada por los compensadores en derivación conectados en este sistema, se expresa en la siguiente tabla:

Tabla C.13: Compensación de reactivos en el sistema de 118 nodos con integración de PMSGs.

Nodo compensado	Q (p.u.)	Nodo compensado	Q (p.u.)
5	-0.40133	105	0.18663
34	0.13605	107	0.05438
37	-0.24597	110	0.05703
44	0.09664	vi1	0.08011
45	0.09689	vi2	0.04650
46	0.10013	vi3	0.04921
48	0.15597	vi4	0.03082
74	0.11013	vi5	0.02042
79	0.20371	vi6	0.02924
82	0.19552	vi7	0.02132
83	0.09693	vi8	0.03528

El flujo de potencia activa que va desde los PMSGs hasta la salida de los inversores en el lado de CA y la potencia total inyectada en los nodos de interconexión, están expresadas en la siguiente tabla:

Tabla C.14: Flujo de potencia en los CEI-PMSG y potencia total inyectada en los nodos de interconexión del sistema de 118 nodos del IEEE.

PMSG	Nodo de Interconexión	P_{wgcd} (p.u.)	P_{cdca} (p.u.)	P_{cavi} (p.u.)	Potencia Inyectada en el nodo de interconexión	
					P (p. u.)	Q (p. u.)
1	87	0.043	0.0422	0.041528	0.041528	0.052752
2	31	0.086	0.0830	0.080263	0.080263	0.099796
3	46	0.215	0.2011	0.18977	0.18977	-0.10922
4	111	0.387	0.3750	0.36496	0.36496	0.19046
5	103	0.430	0.4152	0.4029	0.4029	0.18358
6	54	0.516	0.5000	0.48641	0.48641	0.27703
7	12	1.032	0.9255	0.86483	0.86483	0.56725
8	59	2.064	1.7445	1.6169	1.6169	1.0239

En la Tabla C.14 se observa la pérdida de potencia activa que se tienen desde los PMSG hasta los nodos de interconexión de la red eléctrica, así como la potencia total inyectada en dichos nodos.

Bibliografía

- Acha, E., & Castro, L. (2016). A Generalized Frame of Reference for the Incorporation of, Multi-terminal VSC-HVDC Systems in Power Flow Solutions. *Electric Power Systems Research*, 136, 415-424.
- Acha, E., Fuerte-Esquivel, C. R., Ambriz-Perez, H., & Angeles-Camacho, C. (2004). *FACTS Modelling and Simulation in Power Networks*. Chichester: John Wiley & Sons Ltd.
- Acha, E., Kazemtabrizi, B., & Castro, L. M. (2013). A New VSC-HVDC Model for Power Flows Using the Newton-Raphson Method. *IEEE Transactions on Power Systems*, 28(3), 2602-2612.
- Ackermann, T. (2005). *Wind Power in Power Systems*. Stockholm: John Wiley & Sons, Ltd.
- Angeles Camacho, C., & Bañuelos Ruedas, F. (2011). Incorporación de un Modelo de Generador Eólico al Análisis de Flujos Dinámicos de Potencia. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 12(3), 311-320.
- Arguello Rios, G. (1988). *Análisis y Control de Sistemas Eléctricos de Potencia*. Quito, Ecuador.
- Castro González, L. M. (2013). *PhD Thesis, Modeling of Wind Generators for Power Flows and Dynamic Simulations*. Morelia, Michoacán.
- Castro, L. M., Fuerte-Esquivel, C., Barrios, E., & Angeles-Camacho, C. (2011). An Integrated Power Flow Solution of Flexible AC Transmission Systems Containing Wind Energy Conversion Systems. *IET Conference on Renewable Power Generation (RPG 2011)*. Edinburgh, UK.
- Castro, L., Acha, E., & Fuerte-Esquivel, C. (2013). A Novel STATCOM Model for Dynamic Power System Simulations. *IEEE Transactions on Power Systems*, 28(3), 3145-3154.
- Castro, L., Fuerte-Esquivel, C., & Tovar-Hernández, J. (2012). Solution of Power Flow With Automatic Load-Frequency Control Devices Including Wind Farms. *IEEE Transactions on Power Systems*, 27(4), 2186-2195.
- Fuerte-Esquivel, C., & Acha, E. (1996). Newton-Raphson Algorithm for the Reliable Solution of Large Power Networks with Embedded FACTS Devices. *IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution*, 143(5), 447 - 454.

- González Carranza, M. A. (2016). Incorporación de Dispositivos FACTS y Transmisión HVDC en el Cálculo de Flujos de Potencia. República del Ecuador.
- Grainger, J. J., & Stevenson, W. D. (1996). *Análisis de Sistemas de Potencia*. México: McGRAW-HILL.
- Gupta, R. A., Singh, B., & Jain, B. B. (2015). Wind Energy Conversion System using PMSG. *International Conference on Recent Developments in Control, Automation and Power Engineering (RDCAPE)*. Noida, India.
- Hong-Woo, K., Sung-Soo, K., & Hee-Sang, K. (2010). Modeling and Control of PMSG-based Variable-speed Wind Turbine. *Electric Power Systems Research*, 80(1), 46-52.
- Martínez-Parrales, R., & Fuerte-Esquivel, C. (2018). A New Unified Approach for the State Estimation and Bad Data Analysis of Electric Power Transmission Systems with Multi-terminal VSC-based HVDC Networks. *Electric Power Systems Research*, 160, 251-260.
- PowerWorld. (julio de 2016). Obtenido de <https://www.powerworld.com>.
- Ramirez, J. M., & Gonzalez, J. M. (2006). Incorporating AC/AC Controllers into a Power Flow Formulation. *2006 IEEE/PES Transmission & Distribution Conference and Exposition: Latin America*. Caracas, Venezuela.
- Romero Romero, D. (1979). *Tesis de maestría, Nuevas Formulaciones del Estudio de Flujos para la Operación de Sistemas Eléctricos de Potencia*. México.
- Secretaría de Energía (SENER). (2016). *Prospectiva de Energías Renovables 2016-2030*. México.
- Secretaría de Energía (SENER). (2017). *Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional 2017-2031*. México.
- Secretaría de Energía (SENER). (2018). *Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional 2018-2032*. México.
- Vega Fernández, V. A. (2011). *Tesis de Maestría, Solución al Problema de Flujos de Potencia en Sistemas Eléctricos mediante las Formulaciones de Inyecciones de Corriente y Expansión en Fracciones continuas*. Morelia, Michoacán.
- Zhang, Y., & Ula, S. (2008). Comparison and Evaluation of Three Main Types of Wind Turbines. *IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition*. Chicago, IL, USA.