

CONEXIÓN EN PARALELO DE GENERADORES SÍNCRONOS: ANÁLISIS DE POTENCIA ACTIVA Y REACTIVA

Diana Fernanda Abril Roa, Daniel Fernando Aranda Contreras, Dairo Alexander Lobo Moreno,

Yulieth Valentina Portilla Jaimes

Escuela E3T, Universidad Industrial de Santander

Correo electrónico: {diana2212074, daniel2221648, dairo2221123, yulieth2221136}@correo.uis.edu.co

Resumen—En la formación de los estudiantes de ingeniería eléctrica es esencial el estudio de máquinas síncronas, por ende se realizó una práctica centrada en el análisis del generador síncrono y la conexión de este con la red eléctrica. Este proceso se ve reflejado en aplicaciones reales, donde la sincronización de generadores asegura la estabilidad, eficiencia y confiabilidad del sistema eléctrico.

Inicialmente, se observó el comportamiento del sistema cuando el generador entregaba y absorbía potencia, para ello, se midió la potencia activa y reactiva bajo los escenarios mencionados anteriormente. Luego, para poder analizar la distribución de potencias entre los generadores, se hizo el reparto de potencias P y Q, modificando la carga y ajustando el sistema.

I. CONDICIONES PARA CONECTAR EN PARALELO UN GENERADOR SÍNCRONO CON LA RED ELÉCTRICA O CON OTRO GENERADOR

Para lograr el acople correcto de un generador síncrono con la red eléctrica o con otro generador, se deben cumplir simultáneamente las siguientes condiciones:

I-A. Igualdad de frecuencia (f):

La frecuencia del generador debe ser igual a la de la red:

$$f_{GS} = f_{red}$$

En la práctica, se ajustó la velocidad del motor shunt para que la frecuencia del generador fuese ligeramente mayor que la de la red, logrando que, al momento del cierre del interruptor, el generador entrara en servicio entregando potencia activa a la red y no como motor. En cambio, si f_{GS} fuese menor, la red tendería a acelerarlo, haciendo que absorbiera potencia (motorizándolo).

I-B. Igualdad de tensión (V):

La tensión eficaz de línea del generador debe coincidir con la de la red:

$$V_{GS} = V_{red}$$

En el laboratorio se ajustó la corriente de excitación del generador síncrono para que las tensiones medidas en sus bornes coincidieran con las de la red, de 220 V.

I-C. Secuencia de fases idéntica:

El orden de fases del generador debe coincidir con el de la red:

$$(U - V - W)GS = (U - V - W)red$$

Ya que si la secuencia es incorrecta, las tensiones de las fases correspondientes no podrán anularse simultáneamente, imposibilitando el acople.

I-D. Instante de sincronismo:

En el momento de conexión, las tensiones instantáneas de las fases correspondientes deben ser iguales y estar en fase. Este instante se determina visualmente mediante el método de las lámparas mixtas.

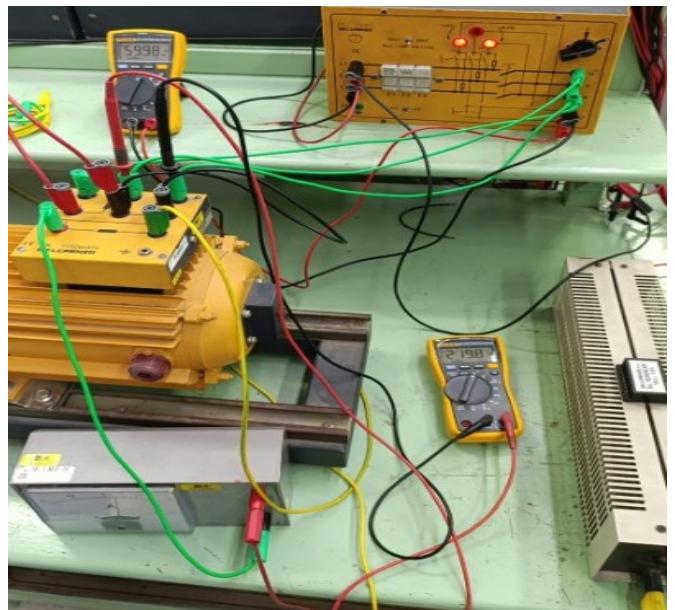


Figura 1: Sincronización mediante el método de lámparas mixtas.

En donde el instante correcto de sincronismo se alcanzó cuando la lámpara apagada coincidió con el punto en que las otras dos estaban encendidas, señalando que las tensiones

estaban prácticamente en fase y permitiendo realizar el cierre seguro del interruptor de acople. Pille parce

II. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

II-A. Verificación de Condiciones Previas al Acople

Se realizaron las siguientes mediciones antes de la conexión en paralelo:

1. Medición de tensión de red: $V_{\text{red}} = 218,7 \text{ V}$.
2. Medición de frecuencia de red: $f_{\text{red}} = 60 \text{ Hz}$.
3. Ajuste de tensión del generador: $V_{\text{gen}} = 218,1 \text{ V}$.
4. Cálculo de frecuencia del generador: $f_{\text{gen}} = \frac{4 \times 1802}{120} = 60,07 \text{ Hz}$.
5. Verificación de secuencia de fases L_1, L_2 y L_3 .

Condiciones de Sincronismo Verificadas:

- Tensión: $V_{\text{gen}} \approx V_{\text{red}}$ ($218,1 \text{ V} \approx 218,7 \text{ V}$)
- Frecuencia: $f_{\text{gen}} \approx f_{\text{red}}$ ($60,07 \text{ Hz} \approx 60 \text{ Hz}$)
- Secuencia de fases y ángulo de fase: Verificadas.

Cuadro I: Verificaciones iniciales en el generador

Parámetro	Valor
V_{L1-L2}	221.3 V
V_{L1-L3}	221.2 V
V_{L2-L3}	220.6 V
f_{L1-L2}	60.1 Hz
f_{L1-L3}	60.0 Hz
f_{L2-L3}	60.07 Hz
Potencia en el motor (P_m)	585 W

Cuadro II: Verificaciones iniciales en la red

Parámetro	Valor
V_{L1-L2}	220 V
V_{L1-L3}	220 V
V_{L2-L3}	220 V
f_{L1-L2}	59.98 Hz

II-B. Sincronización y Conexión

Una vez verificadas las condiciones, se procedió a cerrar el interruptor de acoplamiento. Durante el proceso de sincronismo se midió:

$$P_{\text{motor}} = 0,576 \text{ kW} \quad (1)$$

Cuadro III: Posterior de la prueba de bombillos (Conexión Estable)

Parámetro	Valor
n_m	1800 r.p.m.
Potencia en el motor (P_m)	642 W
Tensión de linea en la red ($V_{L\text{red}}$)	220.1 V
Frecuencia red (f_{red})	60.03 Hz
Tensión de linea en el generador (V_{LG})	220 V
Corriente generador (I_G)	0.6 A
Frecuencia generador (f_G)	60.0 Hz

II-C. Análisis Post-Acople (Motorización)

Inmediatamente después de la conexión en paralelo, la potencia consumida por el motor primo se redujo a:

$$P_{\text{motor}} = 0,497 \text{ kW} \quad (2)$$

Esta reducción indica que el generador **se motorizó**, absorbiendo potencia activa de la red ($P_{\text{red} \rightarrow \text{Gen}}$) debido a que la potencia mecánica suministrada era insuficiente para la conexión.

II-D. Generador Entregando Potencia

Se incrementó la velocidad del primer motor (aumento del par mecánico) para forzar al generador a inyectar potencia activa a la red. Se obtuvo:

- $I_{\text{generador}} = 1,33 \text{ A}$ (3)
- $f = 59,95 \text{ Hz}$ (4)
- $P_{\text{motor}} = 0,646 \text{ kW}$ (5)

El aumento en P_{motor} confirma que el motor primo está realizando **mayor esfuerzo** para inyectar potencia a la red.

II-E. Reducción de Torque del Primo Motor

Al disminuir el torque suministrado al generador, se redujo la potencia activa inyectada. Se obtuvo:

- $I_{\text{motor}} = 0,99 \text{ A}$ (6)
- $f = 59,96 \text{ Hz}$ (7)
- $P_{\text{motor}} = 0,437 \text{ kW}$ (8)
- $n_{\text{motor}} = 1748 \text{ rpm}$ (9)

La nueva reducción de P_{motor} demuestra el control de la **potencia activa** inyectada mediante la manipulación del par mecánico del motor primo.

Cuadro IV: Datos al desacelerar la máquina (menor inyección de potencia)

Parámetro	Valor
n_m	1800 r.p.m.
Potencia en el motor (P_m)	556 W
Tensión de linea en la red ($V_{L\text{red}}$)	219.1 V
Frecuencia red (f_{red})	60 Hz
Tensión de linea en el generador (V_{LG})	218.6 V
Corriente generador (I_G)	0.51 A
Frecuencia generador (f_G)	59.97 Hz

II-F. Desacoplamiento (Operación Aislada)

Finalmente, se desacopló el generador de la red, abriendo el interruptor de acoplamiento. Los parámetros medidos en esta condición de operación aislada fueron:

Cuadro V: Ahora desacoplados

Parámetro	Valor
n_m	1775 r.p.m.
Potencia en el motor (P_m)	581 W
Tensión de linea en la red ($V_{L\text{red}}$)	218.8 V
Frecuencia red (f_{red})	60 Hz
Tensión de linea en el generador (V_{LG})	208.4 V
Corriente generador (I_G)	0 A
Frecuencia generador (f_G)	59.08 Hz

La corriente nula ($I_G = 0$) confirma la desconexión. Los valores de V_{LG} y f_G son los generados por la máquina sin la restricción de la red, siendo inferiores a los de la red.

III. ANÁLISI

De lo anterior se analiza que el comportamiento del generador síncrono depende directamente del sentido del flujo de potencia activa. Cuando la potencia mecánica suministrada por el motor primo fue menor a la necesaria, el generador comenzó a absorber potencia de la red, actuando como motor síncrono; este efecto se observó por la disminución de la potencia medida en el eje del motor y por una corriente reducida. En cambio, al aumentar el par del motor primo, la máquina superó el punto de equilibrio y comenzó a entregar potencia activa a la red, evidenciado por el incremento en la corriente del generador y la potencia mecánica del motor impulsor. Este comportamiento demuestra experimentalmente que la dirección del flujo de potencia depende del equilibrio entre la potencia mecánica aplicada y la potencia eléctrica entregada o absorbida por la máquina.

IV. PRUEBA DE REPARTICIÓN DE POTENCIA ENTRE DOS GENERADORES SÍNCRONOS:

Cuadro VI: Mediciones de potencia con carga resistiva

Equipo	P [kW]	S [kVA]	f [Hz]
Carga	0.1124	0.1125	60.20
Generador 1	0.1203	0.1208	60.14
Generador 2	0.0248	0.0274	60.53

IV-A. Análisis de los datos obtenidos

De lo anterior, se obtiene lo siguiente:

- **Potencia Generada Total:** $P_{gen,total} = P_{G1} + P_{G2} = 0,1203 \text{ kW} + 0,0248 \text{ kW} = 0,1451 \text{ kW}$
- **Potencia Demandada Total:** $P_{carga} = 0,1124 \text{ kW}$
- **Excedente de Potencia:** $P_{excedente} = 0,1451 \text{ kW} - 0,1124 \text{ kW} = 0,0327 \text{ kW}$

El sistema genera 0.1451 kW y la carga solo consume 0.1124 kW. Por lo tanto, la variación se puede deber a errores de medición por el instrumento.

El factor de potencia se calcula con la siguiente ecuación:

$$FP = \frac{P}{S} \quad (1)$$

- **Carga:** $FP_{carga} = \frac{0,1124}{0,1125} = 0,999$
- **Generador 1:** $FP_{G1} = \frac{0,1203}{0,1208} = 0,996$
- **Generador 2:** $FP_{G2} = \frac{0,0248}{0,0274} = 0,905$

Con lo mencionado anteriormente, se analiza que

- El Generador 1 representa el principal aportante al sistema, suministrando el 82,9% de la potencia total generada. Por su factor de potencia tan alto ($FP = 0,996$) es posible decir que opera de manera eficiente entregando en su mayoría potencia activa.
- El Generador 2 aporta sólo el 17,1% de la generación total. Presenta un factor de potencia más bajo ($FP = 0,905$), lo que implica que, además de potencia activa, está suministrando una pequeña cantidad de potencia reactiva en comparación con el Generador 1.

También es posible decir que la operación es estable y está sincronizada con la red ya que la frecuencia medida es cercana a los 60 Hz y no presenta muchas variaciones.

V. POTENCIA AL VARIAR LA VELOCIDAD

Se tomaron los datos de potencia entregada en cada generador en el momento que se varió la velocidad, haciendo la velocidad del generador 1 reducida y aumentando la velocidad del generador 2 para compensar.

V-A. Datos de Potencia al Variar la Velocidad

Cuadro VII: Potencia al variar la velocidad

Equipo	P (kW)	Q (kVAr)	S (kVA)	FP
Generador 1	0.0754	0.0289	0.0807	-0.934
Generador 2	0.0295	0.0107	0.0314	0.940

Para poder variar la potencia reactiva entregada, se necesita la tensión interna del generador. Por lo tanto, se realiza una variación en la tensión de la excitatriz, repitiendo el mismo proceso pero con la tensión, para una tensión de referencia de 197.6 V con una frecuencia de 60.53 Hz.

V-B. Potencia Compensada

Cuadro VIII: Potencia compensada

Equipo	P (kW)	Q (kVAr)	S (kVA)	FP
Generador 1	0.0823	0.0087	0.0827	-0.995
Generador 2	0.0263	0.0213	0.0338	-0.777

A continuación, se disminuye la tensión para realizar la transferencia de potencia reactiva al generador 1, ya que el generador 2 entrega más potencia.

V-C. Potencia Compensada Transferida

Cuadro IX: Potencia compensada transferida

Equipo	P (kW)	Q (kVAr)	S (kVA)	FP
Generador 1	0.0925	0.0648	0.1129	-0.819
Generador 2	0.0135	0.0853	0.0863	-0.156

Se varían las tensiones con el objetivo de que la potencia reactiva del generador 1 y el generador 2 sean iguales.

V-D. Aproximación de Potencias

Cuadro X: Aproximación de potencias

Equipo	P (kW)	Q (kVAr)	S (kVA)	FP
Generador 1	0.0875	0.0613	0.1063	-0.819
Generador 2	0.0144	0.0742	0.0756	0.191

V-E. Limitaciones en la Medición

Se presentaron limitaciones por los equipos, ya que no se pudo reducir la tensión lo suficiente para que la potencia reactiva fuera exactamente igual.

VI. CONCLUSIONES

- En esta práctica hubo una limitación en la toma de datos ya que el medidor de potencia trifásico estaba presentando variaciones significativas en las lecturas, particularmente en la fase 1, por ende, los datos que seleccionamos para analizar fueron los de la fase 3 que era la más estable. A pesar de esto, los resultados fueron coherentes con lo esperado.
- Se verificó que para lograr la sincronización de un generador síncrono con la red se debe mantener la misma secuencia de fases, la igualdad de tensiones y una frecuencia prácticamente igual. Además, se comprobó que al ajustar el generador con una frecuencia ligeramente mayor se facilita el acople y la entrega inmediata de potencia activa al sistema.

REFERENCIAS

- [1] S. J. Chapman, *Electric Machinery Fundamentals*, 5th ed. New York: McGraw-Hill, 2012.
- [2] L. A. Díaz, "Prácticas de laboratorio de máquinas eléctricas," Universidad Industrial de Santander, Informe técnico, documento de prácticas de laboratorio no publicado.