

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Ciencias e Ingenierías

**Programación de una plataforma de simulación para estudios
dinámicos de sistemas eléctricos de potencia**

**Hugo Antonio Cañarte La
Mota**

Ingeniería Electrónica

Trabajo de integración curricular presentado como requisito
para la obtención del título de
Ingeniero Electrónico

Quito, 20 de diciembre de 2019

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ
COLEGIO DE CIENCIAS E INGENIERÍAS

**HOJA DE CALIFICACIÓN
DE TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR**

**Programación de una plataforma de simulación para estudios dinámicos de
sistemas eléctricos de potencia**

**Hugo Antonio Cañarte La
Mota**

Calificación:

Nombre del profesor, Título académico

Alberto Sánchez, Ph.D.

Firma del profesor:

Quito, 20 de diciembre de 2019

Derechos de Autor

Por medio del presente documento certifico que he leído todas las Políticas y Manuales de la Universidad San Francisco de Quito USFQ, incluyendo la Política de Propiedad Intelectual USFQ, y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo quedan sujetos a lo dispuesto en esas Políticas.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Firma del estudiante: _____

Nombres y apellidos: Hugo Antonio Cañarte La Mota

Código: 00126409

Cédula de identidad: 0924107790

Lugar y fecha: Quito 20 de diciembre de 2019

RESUMEN

En el siguiente artículo se pretende analizar el estado transitorio de generadores sincrónicos a causa de distintas perturbaciones. Se utilizará el software de SIMULINK para simular la respuesta en el tiempo de los parámetros del generador. Esto permitirá estudiar el comportamiento del generador a un evento que cambie la estabilidad de un sistema eléctrico de potencia.

Palabras clave: Generador sincrónico, transitorio, transformación en directo y cuadratura, estado estable.

ABSTRACT

The following article aims to analyze the transient state of synchronous generators due to different disturbances. Simulink software will be used to simulate the response over time of the generator parameters. This will allow studying the behavior of the generator to an event that changes the stability of an electrical power system..

Key words: Synchronous, transient generator, live and quadrature transformation, stable state.

TABLA DE CONTENIDO

Introduction.....	7
Modelo Matemático.....	8
Simulaciones.....	9
Resultados.....	10
Conclusiones.....	11
Referencias.....	12

Programación de una plataforma de simulación para estudios dinámicos de sistemas eléctricos de potencia

Hugo Cañarte

Universidad San Francisco de Quito USFQ
Colegio de Ciencias e Ingenierías
Campus Cumbayá, PO-Box 17-1200-841
Quito, Ecuador
Email: hcanarte@estud.usfq.edu.ec

Alberto Sánchez

Universidad San Francisco de Quito USFQ
Colegio de Ciencias e Ingenierías
Campus Cumbayá, PO-Box 17-1200-841
Quito, Ecuador
Email: asanchez.sanchez@usfq.edu.ec

Abstract—En el siguiente artículo se pretende analizar el estado transitorio de generadores sincrónicos a causa de distintas perturbaciones. Se utilizará el software de Simulink para simular la respuesta en el tiempo de los parámetros del generador. Esto permitirá estudiar el comportamiento del generador a un evento que cambie la estabilidad de un sistema eléctrico de potencia.

I. INTRODUCCIÓN

Un sistema eléctrico de potencia es un conjunto de elementos que se encarga de distribuir la energía en una red dependiendo de la carga en la misma. Para generar la energía necesaria para alimentar el sistema, es común el uso de generadores trifásicos sincrónicos. Un generador sincrónico es una máquina eléctrica que se mueve a la velocidad de la red a la que está conectada, es decir, que está en sincronía con el mismo.[1]

El generador sincrónico posee dos partes: rotor y estator. El rotor es el elemento móvil del generador, el cuál cambiará su velocidad dependiendo de los parámetros de la red. El estator es la parte inmóvil del generador. Es probable confundir estos elementos con el campo (field) y la armadura (armature), ambas se encuentran en el rotor y estator respectivamente. La máquina sincrónica funciona con un primer motor que lo mueve mientras el campo se excita con una corriente directa. La rotación de este campo magnético induce tres voltajes, una en cada uno de los bobinados del estator cuando se conecta una carga. La frecuencia de las cantidades eléctricas del estator dependen de la velocidad del rotor, de modo que están sincronizadas con este. Por esto se le llama generador sincrónico.

Al momento de analizar el comportamiento de un generador se pueden distinguir dos estados con comportamientos claramente distintos: transitorio y estable. El estado estable es el estado de un sistema en el que se mantiene operando en un estado de equilibrio en condiciones normales de operación y es capaz de volver a otro estado de equilibrio aceptable luego de la perturbación. El estado transitorio es el estado entre estados estables del sistema. Las perturbaciones que pueden existir en un sistema son de varios tipos, pero el sistema puede volver

al equilibrio mientras la perturbación no sea tan drástica. La definición de lo que sería una perturbación drástica o grande escapa del interés del estudio, sin embargo se puede considerar una perturbación grande aquella que hace que el sistema no regrese a un estado estable.[2]

Para el estudio del transitorio de un generador sincrónico depende en grandes rasgos de dos elementos: el sistema del que forma parte y los parámetros internos del mismo. Ambas circunstancias son las que definirán como se comportará el generador.

Al ser el estado transitorio un cambio en el estado estable, el modelo matemático para poder estudiar estos fenómenos implica el estudio de ecuaciones cambiantes en el tiempo. Se presenta un modelo usando ecuaciones diferenciales las cuales son de difícil análisis por lo cual se opta por métodos matemáticos que permitan realizar un correcto análisis de las mismas. En los casos presentados se utilizó la herramienta Simulink de Mathworks para el análisis de los distintos casos planteados. SIMULINK utiliza métodos matemáticos para la resolución de ecuaciones diferenciales.

El modelo transitorio del generador sincrónico esta basado en el modelo presentado en [1]. Este modelo nace del análisis de las pérdidas transitorias del generador que nace de los componentes físicos del transformador. Parte se pierde en los flujos magnéticos del rotor y estator, y en el enlace de flujo magnético.

Interesa el análisis del transitorio porque se puede preparar al generador para cualquier eventualidad y se puede planificar las protecciones debidas para asegurarse de que se pueda salvar el equipo frente a una falla del sistema. En [3] se muestra como el estudio del transitorio frente a la falla en uno de los buses de la red. Esta simulación permite diseñar las protecciones acorde al tiempo de reacción del generador y su respuesta eléctrica.

En este artículo se tomó la aproximación que se hace en [1] para diseñar una plataforma que permita simular la respuesta transitoria del generador frente a una perturbación. Se muestra los resultados obtenidos de las simulaciones acorde a las circunstancias descritas en varios de los casos que se habla

TABLE I: Parámetros del transformador.

Parámetro	Descripción
rs	R de la bobina de la armadura
xd	X de sincronización en directo
xp	X de sincronización en cuadratura
xls	X en secuencia 0
xpd	X de fuga del flujo en directo
xpd	X de fuga del flujo en cuadratura
xppd x_d''	X de fuga en directo
Tpdo T_{d0}'	Constante de tiempo en transiente en directo
Tppdo T_{d0}''	Subtransiente del bobinado de atenuación
Tppqo T_{q0}''	Constante de tiempo de OC del estator
H	Constante de inersia del generador
Domega D_ω	Constante de inersia del generador

en [1] y en [3].

En la sección II del artículo se desarrolla el modelo matemático de los casos presentados. En la sección III se muestra los distintos programas que se utilizaron para obtener los resultados mostrados. La sección IV se muestra la comparación de los distintos casos y las estrategias para obtener una simulación más certera.

II. MODELO MATEMÁTICO

El generador sincrónico es una máquina generalmente trifásica. Al consistir de bobinas que rodean un imán se produce un flujo magnético en cada una de las bobinas del generador. Este flujo magnético, que tiene su origen en el excitador de la máquina induce un campo electromagnético que alimenta el sistema al que el generador se encuentra conectado.

Para el estudio del transformador se cambia el sistema de referencia por el hecho de que los campos magnéticos abc cambian constantemente, por ende se utiliza la transformada a componentes dq0 que significan directo, cuadratura y 0.

El flujo magnético en una de las fase del generador es el siguiente:

$$\begin{aligned} \lambda_{aa} &= N_s(\rho_d \sin \phi_r + \rho_q \cos^2 \phi_r) \\ &= N_s F_a \left(\frac{P_d + P_q}{2} - \frac{P_d - P_q}{2} \cos 2\phi_r \right) \end{aligned}$$

Este flujo es el que produce el campo magnético que induce la corriente en el estator. Estas corrientes dependen de los parámetros del generador y son de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} i_q &= \frac{\psi_q - \psi_{mq}}{x_{ls}} \\ i_d &= \frac{\psi_d - \psi_{md}}{x_{ls}} \end{aligned}$$

Estas corrientes están directamente relacionadas con la velocidad del rotor. La cual se define de la siguiente manera:

$$T_{em(pu)} + T_{mech(pu)} - T_{damp(pu)} = 2H \frac{d[(\omega_r - \omega_e)/\omega_b] pu}{dt}$$

donde

$$T_{em(pu)} = -3 \left(\frac{2}{P\omega_e} \frac{V_a E_m}{X_d} \sin \delta + \frac{V_a^2}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\delta \right)$$

Esta ecuación es la respuesta transitoria del estator en cualquier momento del circuito. El término T_{mech} es la entrada que le da el driver al generador, T_{em} es el torque electromecánico producido por los voltajes que entran al rotor (voltaje de la red) y el T_{damp} es el torque atenuado por las pérdidas de autoinductancia del rotor.

Este modelo se debe generalizar para cuando se estudia al generador conectado a una red cualquiera. En este caso las corrientes van a cambiar dado que están afectadas por la carga que las consume. Sin embargo la ecuación II de la velocidad angular del rotor no cambia con la excepción de que (ω_e) se cambia por (ω_r) siendo esta la velocidad angular en transitorio. Esto implica que mientras se someta a una perturbación que no haga que el sistema se desbalancee lo suficiente para que pueda volver a estado estable, se puede usar la misma ecuación.

Cuando se conecta el generador a una red cambian las corrientes que ingresan al generador. De modo que el modelo del generador se plantea del siguiente modo:

$$\begin{aligned} i_q &= \frac{1}{L_{ls}} (\lambda_q - \lambda_{mq}) \\ i_d &= \frac{1}{L_{ls}} (\lambda_d - \lambda_{md}) \end{aligned}$$

A. Respuesta la red

En referencia al modelo anterior, cuando las entradas no son en un sistema aislado, sino en respuesta una red estable, cambian las respuestas del sistema.

$$\begin{aligned} T_{em} &= - \left\{ \left(\frac{E_q'' i_q + E_d'' i_d}{\omega_r / \omega_b} + \omega_b (L_q'' - L_d'') i_d i_q \right) \right\} pu \\ \frac{d\delta_e}{dt} &= \omega_r - \omega_e \\ \omega_r &= \frac{P}{2} \omega_{rm} \end{aligned}$$

En las ecuaciones anteriores se puede ver como el T_{em} depende de las ecuaciones de corriente en el plano dq0. Estas corrientes dependen de la carga que el generador tiene conectada en la red y de las inductancias propias del mismo como se puede ver a continuación:

$$\begin{aligned} T_{d0}'' \frac{\lambda'_{kd}}{dt} &= \frac{E_q'}{\omega_e} - \lambda'_{kd} - (L_d' - L_{ls}) i_d \\ T_{q0}'' \frac{\lambda'_{kq}}{dt} &= \frac{-E_d'}{\omega_e} - \lambda'_{kq} - (L_q' - L_{ls}) i_q \end{aligned}$$

Ademas los voltajes en el estator son los siguientes:

$$\begin{aligned} v_q &= -r i_q + E_q'' - \omega_e L_d'' i_d \\ v_d &= -r i_d + E_d'' - \omega_e L_q'' i_q \end{aligned}$$

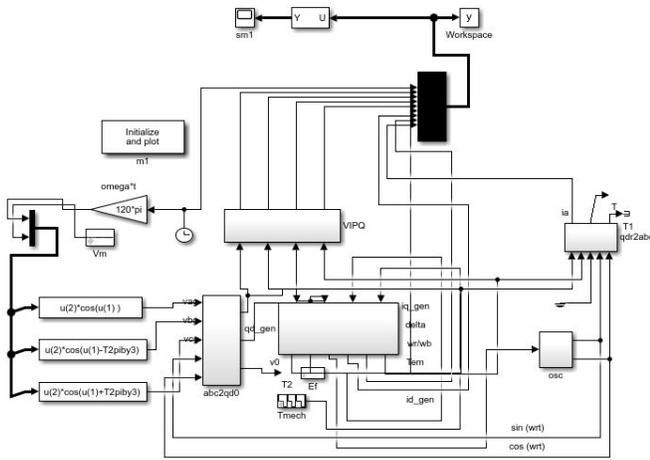


Fig. 1: Modelo de simulink de generador aislado

Este modelo se encuentra en [1]. Para poder simular los elementos de respuesta del generador se necesita incorporar los elementos de la red al generador. Esto se lo hace resolviendo las ecuaciones de la red para ver las corrientes en cada uno de los buses y luego estas corrientes son las del generador en el bus en el que se encuentren conectados. Dado que el sistema de ecuaciones diferenciales es de gran complejidad, se utiliza SIMULINK para su resolución y estudio. En el modelo planteado los cambios en los enlaces de flujo se niegan, de modo que en el estator las ecuaciones son independientes del tiempo. De modo que se vuelve una ecuación algebraica. En este sentido es el rotor el cual tiene dependencia de tiempo y va a cambiar su velocidad para compensar los cambios en la red. Dado que es un sistema estable y el sistema reacciona mecánicamente se niegan los cambios en el flujo dado que su reacción es mucho más rápida.

III. SIMULACIONES

Para la simulación del generador separado de la red se utilizó la figura 3. En esta se puede ver claramente como las corrientes y voltajes del sistema ingresan al bloque de transformación de abc a cuadratura y directo. Luego, se va al bloque del rotor donde se calcula la velocidad, el ángulo, el T_{em} y la i_q del generador. Luego se lleva a dos bloques donde se muestran las corrientes de cada una de las fases y otro que muestra el voltaje V , la corriente instantánea I_t , la potencia activa P y la potencia reactiva Q . En el modelo el bloque que contiene los elementos con ecuaciones diferenciales es el de la figura 2 El rotor esta simulado en la figura Para simular el generador aislado, se le va a ingresar una señal paso al T_{em} , es decir se va a agregar una corriente que excite el rotor cambiando el torque que tiene y de ese modo generando una respuesta distinta al sistema. El paso va a ser una senoidal cuadrada. En el caso de la simulación con la red se vuelve más complicada la simulación dado que existen muchos más parámetros que incluir, además de tener que simular la red. La figura 4 muestra la gráfica en SIMULINK.

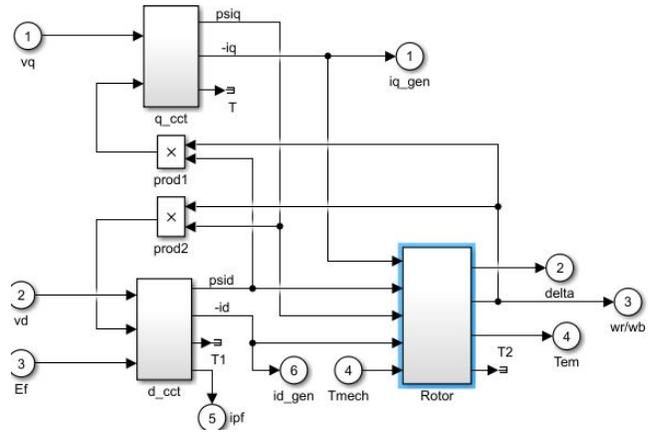


Fig. 2: QD del generador

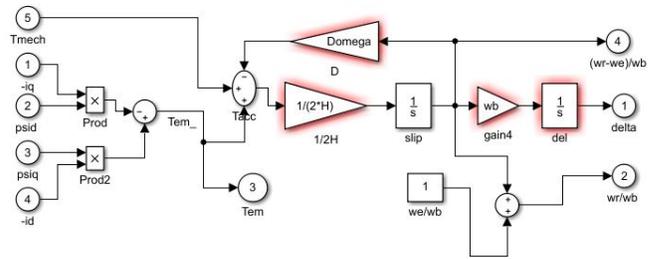


Fig. 3: Rotor

Para esta ocasión se utilizan los principios del transformador anteriormente mencionados (figura 3). Sin embargo, cambia la configuración de la máquina ingresando el elemento excitador. El excitador permitirá estabilizar al rotor para la carga asignada y regulará la velocidad del rotor acorde a la frecuencia de la red. La figura ?? muestra la máquina, la figura muestra al rotor y la figura muestra el excitador. El excitador consisten en un elemento que satura una señal para controlar el driver del motor que mueve al generador para regular la velocidad que tiene que tener. Este se muestra en modelo computacional en la figura Para la red se tomaron dos simulaciones. Una en el inicio de interconexión de la red. Dado que es un modelo de solución computacional de ecuaciones diferenciales, se utiliza el comando trim para obtener las condiciones iniciales del sistema y luego se simula las fallas que tiene. Osea es decir que desde la interconexión del sistema es la primera simulación hasta la estabilidad, y luego desde ese estado hasta la falla y su consecuencia. Para simular la falla se colocó una corriente en el bus 4. Esto simula una falla a tierra en el bus 4. Para facilitar la simulación en el bloque de red se planteo la ecuación $V = YI$ para facilitar el calculo de los voltajes y las corrientes en los buses. La simulación utiliza el metodo ode45 de matlab para la resolución de los modelos diferenciales y se simuló para 30s y 15s según sea el caso. Cabe recalcar que al tener que reaccionar mecánicamente, no se necesita un tiempo extenso para lograr encontrar las respuestas de la red

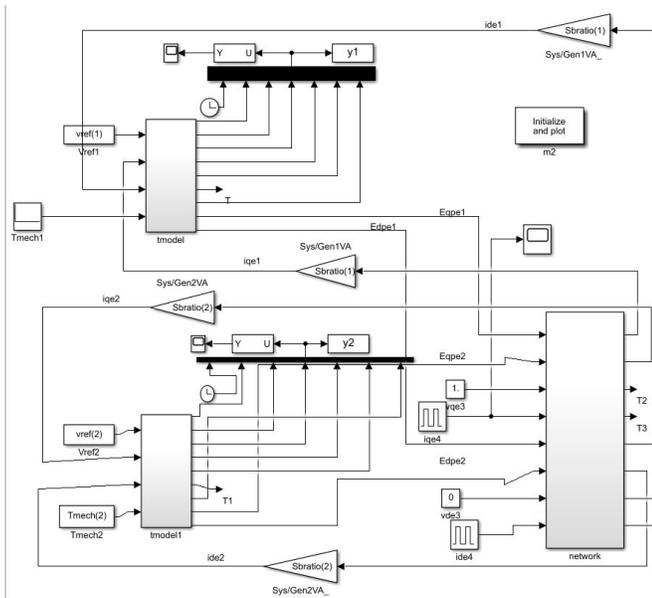


Fig. 4: Modelo Simulink de la red 7

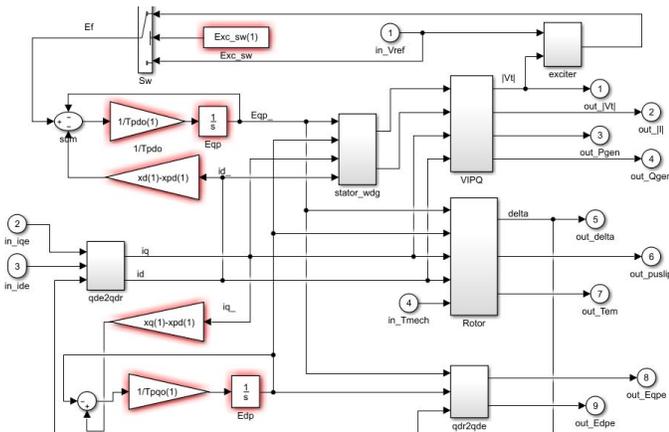


Fig. 5: Modelo Simulink del transformador en la figura 4

en estado estable.

IV. RESULTADOS

Se realizó dos clases de simulaciones para verificar los modelos y comparar la respuesta aislada del generador con la respuesta conectada a una red de 4 buses como se muestra en la figura 7. En ella se presentan dos generadores sincrónicos conectado a cuatro buses. En el bus 4 se considera que habrá una falla y será este el nodo por donde se inyectará la corriente de falla para ver la respuesta de los generadores.

Para simulación de el generador aislado se observó los resultados de la figura 8 y 9. En ellos se ven el voltaje (V), la corriente (I), la potencia activa (P) y reactiva (Q), el ángulo δ , el torque eléctrico T_{em} , el flujo de corriente I_f y la corriente instantánea de a fase a. Se puede ver que en el momento en que entra en efecto la perturbación, comienzan los disturbios. EL voltaje se mantiene constante dado que no hay perturbación en el voltaje de la red, con lo cual se mantiene constante, sin

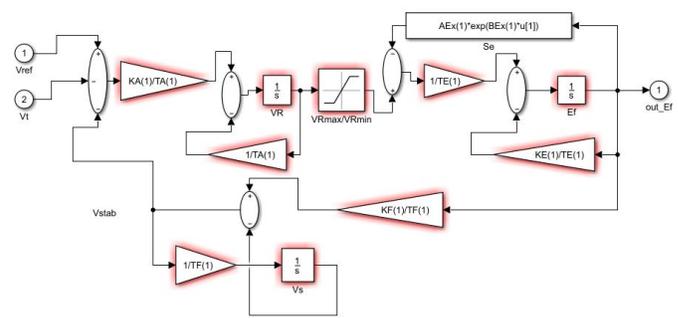


Fig. 6: Modelo Simulink del excitador en la figura 5

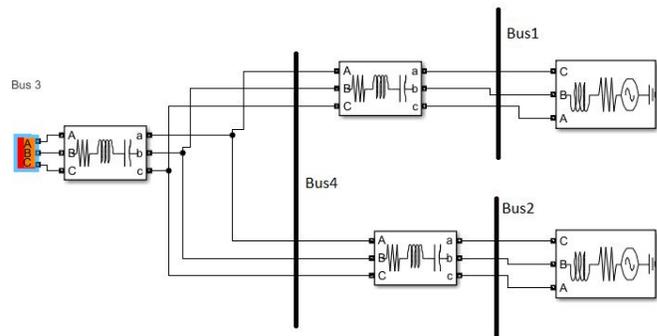


Fig. 7: Red de simulación

embargo la corriente disminuye dado que al cambiar el T_{em} a través de dicha perturbación. Basado en II-A se puede ver como al aumentar el T_{em} debe disminuir la corriente ya que es de magnitud contraria al mismo. Se observa también que el sistema queda en un nuevo estado de equilibrio luego de la perturbación dado que el sistema queda en modo oscilatorio en la respuesta del ángulo y la potencia, y el flujo magnético dado que la excitación del sistema no se atenúa en ningún momento, al no haber retroalimentación en el modelo. En las figuras 8 y 9 se nota claramente los cambios entre los distintos estados de estabilidad. De los segundos 0 a 0.5 se puede ver como está en un primer estado estable luego entra en acción la perturbación de 0.5 a 1.5, luego el transitorio de 1.5 a 3 y por último el nuevo estado estable de 3 a 5. Las transiciones se pueden ver más claramente en la figura 9.

En la simulación conectada a la red se puede ver las características de la respuesta en las figuras 10 y 16. En las figuras 10, 11 y 12 se puede ver la respuesta del sistema antes de que se introduzca la falla en el bus 4. Se ve en primera instancia como llega a estado estable y se queda en él. En todas las curvas pre-falla se pueden ver los batidos producto de la falta de sincronización entre ambos generadores producto de los distintos parámetros internos de cada transformador. El efecto de batido se produce cuando las frecuencias de dos sinusoidales son muy parecida $f_1 - f_2 \leq 5$.

En el T_{em} se puede ver claramente el efecto de batido. Sin embargo, al estar estable la red todos los valores oscilan alrededor de un punto de equilibrio. Esto es coherente por el

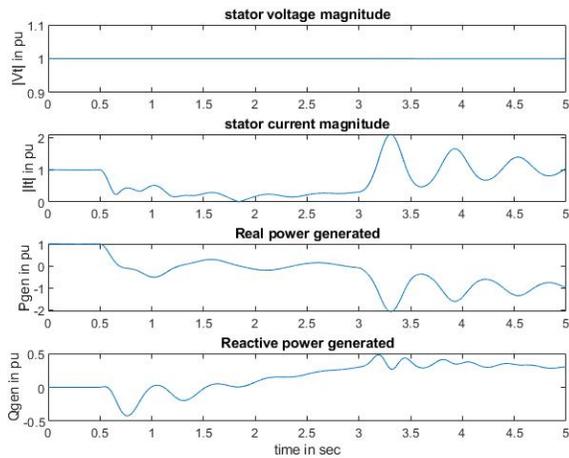


Fig. 8: Simulación de generador aislado 1

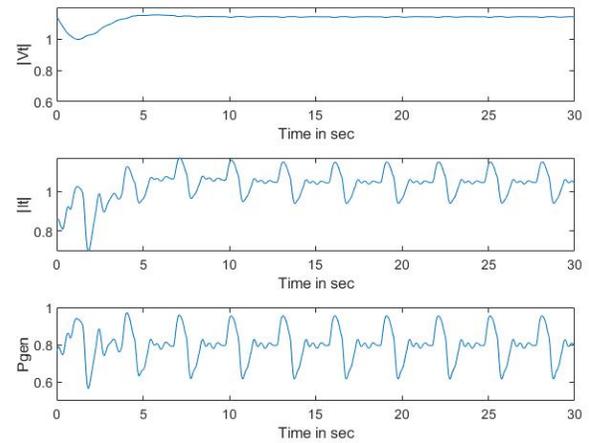


Fig. 10: Simulación de generadores en red prefalla 1

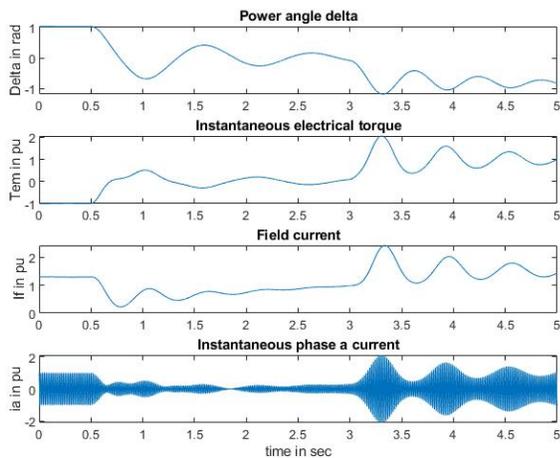


Fig. 9: Simulación de generador aislado 2

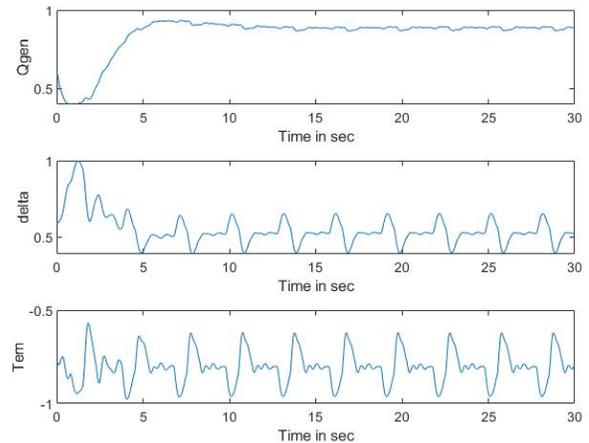


Fig. 11: Simulación de generadores en red prefalla 2

hecho de que una vez que los generadores logran abastecer a la red entera, no hay una perturbación que los cambie de su estado estable. En las figuras 13,14,?? y 16 se puede ver la respuesta del generador 1 en la figura 7. Se puede ver como al momento de la perturbación se desequilibra el sistema pero vuelve a su punto de equilibrio. Esto pasa porque en la simulación del sistema con falla se asume que el sistema ya encontró la estabilidad al paso que se había dado en la primera simulación (antes de la falla). En este caso se puede ver como la perturbación es absorbida por el sistema y luego se vuelve a un estado estable. La perturbación, al instante de ser incluida en el sistema produce una subida de corriente en el generador y un cambio en el voltaje, dado que se produjo una falla, la cual disminuye la resistencia del circuito equivalente del sistema. Como la energía producida se debe conservar, al bajar la resistencia y mantener la potencia, la corriente de subir y el voltaje bajar (Recordar que $P = VI = IR^2$). Se ve como hay un cambio en la velocidad angular del rotor

dado que si nos fijamos en la figura 15, en el gráfico del ángulo se puede observar el cambio de velocidad en el rotor recordando la ecuación de slip II-A. La velocidad del rotor aumenta instantáneamente hasta decrecer a la velocidad estable que se tenía en un principio. Dado que también hay cambio en el ángulo del generador 2 se puede comprobar que la velocidad del rotor del generador también cambia en una proporción igual a la velocidad del generador 1.

V. CONCLUSIÓN

Se diseñó una plataforma un poco versátil para simular el estado transitorio de un generador síncrono en un sistema eléctrico de potencia. Existen planteados algunos bloques que muestran la solución de las ecuaciones diferenciales propias de los distintos componentes que forman el bloque de un generador. En específico, el modelo del transformador desarrollado tiene una particular complejidad el excitador dado que plantearlo en un espacio de estados se complica por el hecho de que tiene una curva de saturación exponencial. Se

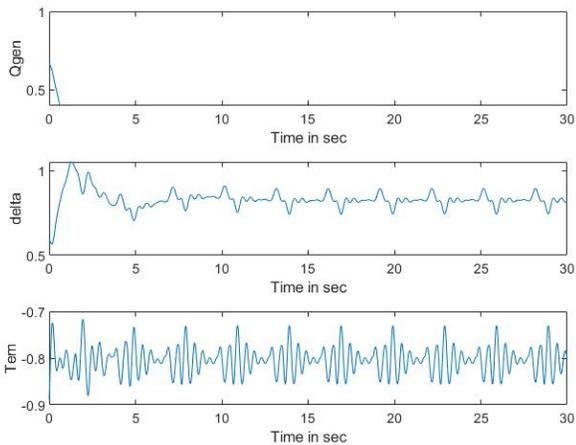


Fig. 12: Simulación de generadores en red prefalla 4

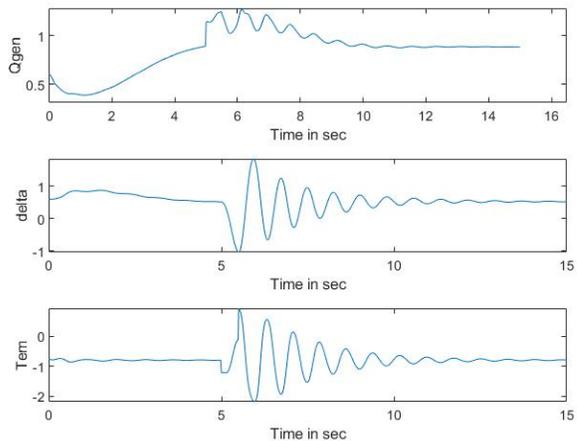


Fig. 14: Simulación de generadores en red post falla 2

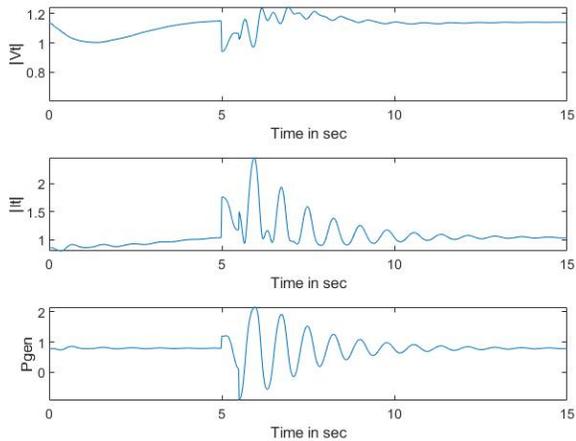


Fig. 13: Simulación de generadores en red post falla 1

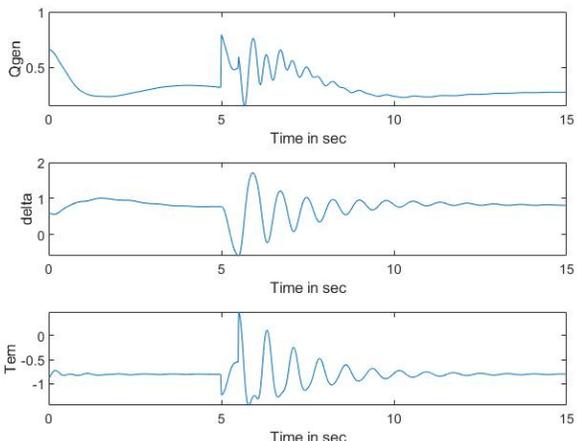


Fig. 15: Simulación de generadores en red post falla 4

muestra como una falla en un sistema eléctrico afecta el comportamiento de los generadores mostrando las características eléctricas y mecánicas del generador. Para estudios futuros se podría generalizar el modelo de la red en una función y convertir a código plano la plataforma para facilitar el ingreso de los datos. Se recomienda ser cuidadoso con los datos provistos para el estudio de una red, dado que el generador tiene varios elementos que son propio de su construcción.

REFERENCES

[1] O. Chee-Mun, *Dynamic Simulation of Electric Machinery Using Matlab/Simulink*. Prentice Hall, 2007.
 [2] A. R. Bergen and V. Vittal, *Power Systems Analysis*. Prentice Hall, 2001.
 [3] P. Kundur, *Power System Stability and Control*. McGraw-Hill, 1993.

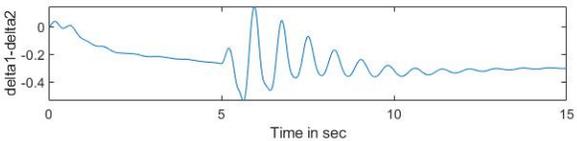


Fig. 16: Simulación de generadores en red post falla 5