

ANÁLISIS DINAMICO DEL GRUPO DE EMERGENCIA A DIESEL DE LA FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA

Ma. de Lourdes Farinango C, Ing.
Petroproducción

Jesús A. Játiva I, Ph.D.
Escuela Politécnica Nacional

Resumen

En el presente artículo se realiza el análisis del comportamiento dinámico del Grupo de Emergencia de la Facultad de Ingeniería Eléctrica. Después de una descripción general del Grupo Electrógeno se exponen las pruebas realizadas para obtener los parámetros eléctricos y mecánicos que permitan estudiar al sistema eléctrico de la Facultad en forma aislada. Esto se consigue representando cada parte del grupo con un modelo de simulación disponible en el programa de estabilidad transitoria a utilizarse. Así por ejemplo el sistema del motor a diesel se aproxima a un sistema a vapor y el sistema de excitación se modela como tipo DC1.

El programa de estabilidad transitoria utilizado permite estudiar varias perturbaciones tales como cortocircuitos, variaciones y rechazos de carga. Los resultados de frecuencia se contrastan con valores obtenidos experimentalmente para pruebas de variaciones y rechazos de carga y se observa que éstos son muy semejantes a los obtenidos en la simulación.

Abstract

This paper analyzes the dynamic behaviour of the Electrical Engineering Department's emergency generating group. After a general description of the electrogen group, experimental tests are made to obtain mechanical and electrical parameters in order to study the Department's electric system in an isolated form. This is possible by representing each part of the group as a simulation model available in the transient stability program to be used. Thus, the diesel motor system is approximated to a steam system and the excitation system is modelled as a DC1 type.

The stability program used allows to study several disturbances such as short circuits, load changes and rejections.

Frequency results are compared with experimental tests of load changes and rejections and it is observed that these are very similar.

Introducción

Una manera de determinar las condiciones normales y anormales de funcionamiento de un grupo de emergencia a diesel es mediante su análisis dinámico, estudiando su comportamiento ante fallas de cortocircuito o variaciones de carga. Basados en este análisis se pueden determinar los requerimientos del sistema de protecciones en los rangos de tiempo

correspondientes a fenómenos transitorios. Con esto se pueden desarrollar las medidas preventivas o correctivas necesarias ante un evento similar, en condiciones reales, de manera que el grupo de emergencia cumpla con su cometido de la manera esperada.

Descripción del Grupo Electrógeno

El equipo generador de electricidad instalado es un grupo electrógeno a diesel marca Katolight de 150 kW de potencia. Los datos generales de placa son los siguientes:

Modelo D 150 MP X 8V
Motor Diesel General Motors, modelo 6045-C, 8V-71
Regulador de Velocidad tipo hidráulico marca Woodward
Generador:
Marca Kato
187 kVA
Voltaje nominal 120/208 V
Corriente nominal 519 A/fases
Tres fases
Velocidad Nominal 1800 RPM
Frecuencia 60 Hz
Factor de Potencia 0.8
Campo del Alternador 11.95 A
Sistema de Excitación Autoexcitado
Exitatriz de corriente continua
Potencia: 2.500 W
Corriente de campo de la exitatriz: 0.5 A
Voltaje: 125 V
Corriente de Campo para el generador: 20 A

Determinación de Parámetros Eléctricos y Mecánicos

La máquina sincrónica está caracterizada por un número considerable de reactancias, constantes de tiempo y resistencias. La medición de estos parámetros se hace en base a la teoría de dos ejes de la máquina sincrónica con representación aproximada de todos los circuitos adicionales al devanado de campo y circuitos estacionarios relativos. Entonces se consideran 3 reactancias (sincrónica, transitoria y subtransitoria) y dos constantes de tiempo (transitoria y subtransitoria) en el estudio de fenómenos transitorios, en el eje directo, y dos reactancias (sincrónica y subtransitoria) y una constante de tiempo (subtransitoria), en el eje en cuadratura, y la constante de tiempo de cortocircuito de la armadura. Las

constantes de tiempo se determinan considerando el decaimiento exponencial de corriente y voltaje.

Determinación de la Impedancia Base

Con los valores nominales de voltaje y corriente del generador 208 V línea-línea y 519 A, respectivamente, la impedancia base es $Z_B = 0.231385 \Omega$.

Resistencia de los Devanados

Se determina por el método voltímetro-amperímetro, obteniéndose:

Resistencia de Campo: $R_{JK} = 8.8762 \Omega$

Resistencias de Armadura:

$\bar{R}_{WN} = 0.0022338 \Omega = 0.00965 \text{ pu}$

$\bar{R}_{VN} = 0.0022115 \Omega = 0.009557 \text{ pu}$

$\bar{R}_{UN} = 0.002309236 \Omega = 0.0099799 \text{ pu}$

Entonces $R_{\text{fase-neutro}} = 0.0022 \Omega = 0.009 \text{ pu}$

Reactancia Sincrónica X_d

A partir de la ecuación:

$$X_d = \frac{V_N}{\sqrt{3} I'} \quad (1)$$

Donde I' es la corriente de cortocircuito correspondiente a la corriente de campo que produce voltaje nominal (V_N) en la línea de entrehierro.

En la línea de entrehierro de la curva de vacío del generador se tiene:

$V_N = 208 \text{ V}$ con $I_f = 7.4 \text{ A}$

De la curva de cortocircuito del generador:

$I_f = 7.4 \text{ A}$ para $I_{sc} = 610 \text{ A}$

Entonces $I' = 610 \text{ A}$

Por lo tanto:

$X_d = 0.1967 \Omega = 0.8508 \text{ pu}$

Reactancias Transitorias y Subtransitorias de Eje Directo

El procedimiento más comúnmente usado para la determinación de X_d' y X_d'' de una máquina sincrónica es por análisis de un oscilograma de cortocircuito trifásico súbito a voltaje nominal en vacío ⁴.

La prueba se realiza aplicando un cortocircuito súbito a la armadura cuando está generando un voltaje en vacío, menor al nominal para evitar sobrecalentamientos y daños por las altas corrientes que se desarrollan. La excitación de la máquina es, para la prueba como norma, una fuente de continua independiente ⁴. En este caso se usa una fuente variable de DC de 0 a 125 V_{DC} con capacidad de suministrar 20 A_{DC} . (Se usó el grupo motor de inducción- generador de DC de una de las mesas del Laboratorio de Máquinas Eléctricas de la Facultad).

El tiempo de análisis no debe ser menor que $T_d' + 0.2 \text{ s}$, que es el tiempo mínimo necesario para que los efectos subtransitorios y transitorios desaparezcan y la corriente tome su valor de estado estable o permanente.

Analizando la onda de corriente obtenida para el generador de emergencia se determina que la reactancia transitoria de eje directo X_d' es:

$X_d' = 0.03388 \Omega = 0.1464 \text{ pu}$

y la Reactancia Subtransitoria de Eje Directo X_d'' es:

$X_d'' = 0.017705 \Omega = 0.0765 \text{ pu}$

Reactancias de Eje en Cuadratura

Reactancia Sincrónica X_q

Realizando la prueba de carga, preferiblemente a factor de potencia unitario, se toman los siguientes valores por fase:

I_{as} : corriente estatórica

V_{as} : voltaje terminal del estator

E_{ao} : voltaje en vacío

Y se calcula X_q de la resolución de un sistema de ecuaciones ⁴.

Obteniéndose:

$X_q = 0.16587 \Omega = 0.7168 \text{ pu}$

Reactancia Transitoria X_q'

Se asume que $X_q' = X_d'$, entonces:

$X_q' = 0.03388 \Omega = 0.1464 \text{ pu}$

Reactancia de Secuencia Negativa X_2

Para determinar la reactancia de secuencia negativa X_2 se realiza la prueba de cortocircuito sostenido línea-línea ⁴. Cualquier par de terminales son cortocircuitados con la máquina a velocidad nominal, entonces:

$X_2 = 0.018 \Omega = 0.078 \text{ pu}$

Reactancia Subtransitoria X_q''

Para máquinas de polos salientes la reactancia de secuencia negativa es igual al promedio de las reactancias subtransitorias en el eje directo y en el eje en cuadratura. Por lo tanto:

$$X_2 = \frac{X_d'' + X_q''}{2} \quad (2)$$

De donde:

$$X_q'' = 2(X_2) - X_d'' \quad (3)$$

Entonces $X_q'' = 0.0795 \text{ pu}$

Reactancia de Secuencia Cero X_0

Para la determinación de esta reactancia se realiza la prueba de cortocircuito sostenido entre línea-línea-neutro ⁴. Este método tiene la ventaja que no requiere fuente de potencia monofásica como otras pruebas.

Las bobinas de armadura deben estar conectadas en estrella, la máquina a velocidad nominal y debe estar con el campo excitado.

Entonces:

$$X_o = 0.006 \Omega = 0.026 \text{ pu}$$

Constantes de Tiempo

Considerando una bobina que tiene una inductancia constante L y resistencia constante R. Si se cortocircuita sobre si misma a cualquier instante en el cual lleva corriente I, la corriente decae de acuerdo a la expresión exponencial:

$$i = I / e^{t/T} \quad (4)$$

Donde i es la corriente al tiempo t, $T=L/R$ y $e=2.718...$, base de logaritmos neperianos. Si $t = T$, $i = I/e = 0.368 I$, de aquí la constante de tiempo se define como la relación L/R o como el tiempo en segundos para que una corriente decayente no sostenida decrezca a 0.368 de su valor inicial, asumiendo decaimiento exponencial ⁴.

Constante de Tiempo Transitoria de Cortocircuito Td'

Esta es la constante de tiempo del circuito de campo con la armadura cortocircuitada. Td' es el tiempo para que la componente de corriente transitoria de armadura decrezca a 0.368 de su valor inicial.

Siendo Td' = 0.185 s

Constante de Tiempo Subtransitoria de Cortocircuito Td''

Td'' es el tiempo para que la componente subtransitoria de corriente de armadura baje a 0.368 de su valor inicial.

Resultando, Td'' = 0.03 s

Constante de Tiempo del Circuito de Armadura Ta

Ta es el tiempo necesario para que la componente periódica de la corriente de excitación baje a 0.368 de su valor inicial.

Conociendo la resistencia DC de la armadura r_a y la reactancia de secuencia negativa X_2 , Ta puede ser calculado de:

$$T_a = \frac{1}{2\pi f} \frac{X_2}{r_a} \quad (5)$$

Entonces:

$$T_a = 0.0217 \text{ s}$$

Constante de Tiempo Transitoria de Circuito Abierto Tdo'

Esta es la constante de tiempo del circuito de campo con la armadura abierta. Esta prueba es aplicable para máquinas de polos salientes. Con la máquina funcionando con cerca del 50% del voltaje nominal en vacío, el devanado de campo es repentinamente cortocircuitado sobre si mismo y Tdo' es determinada

desde un gráfico semilogarítmico del voltaje de armadura. Tdo' es el tiempo requerido para que la diferencia de voltaje decrezca a 0.368 de su valor inicial.

Entonces:

$$T_{do'} = 1.07514 \text{ s}$$

Constante de Tiempo Subtransitoria de Circuito Abierto Tdo''

$$T_{do''} = \frac{X_d'}{X_d''} T_{d'} \quad (6)$$

Entonces, Tdo'' = 0.05741 s

Constantes de Tiempo del Eje en Cuadratura

Constante de Tiempo Transitoria de Cortocircuito Tq'

Se asume:

$$T_{q'} = T_{d'} = 0.185 \text{ s}$$

Constante de Tiempo Subtransitoria de Cortocircuito Tq''

Se asume:

$$T_{q''} = T_{d''} = 0.03 \text{ s}$$

Constante de Tiempo Transitoria de Circuito Abierto Tqo'

$$T_{qo'} = \frac{X_q'}{X_q''} T_{q'} \quad (7)$$

Entonces Tqo' = 0.906045 s

Constante de Tiempo Subtransitoria de Circuito Abierto Tqo''

$$T_{qo''} = \frac{X_q'}{X_q''} T_{q''} \quad (8)$$

Entonces Tqo'' = 0.05524 s

Cálculo de la Potencia Mecánica del Grupo de Emergencia

Para determinar la constante de inercia H es necesario conocer la potencia mecánica que está consumiendo el generador en vacío. Para ello se determina una potencia mecánica aproximada a partir del consumo del combustible en vacío y la eficiencia térmica del combustible diesel.

η = eficiencia térmica

$$\eta = \frac{\text{Potencia en el Cigüeñal}}{\text{Potencia Disponible en el Combustible}} \quad (9)$$

1 kgr de combustible diesel = 10200 kcal de energía

1 libra de combustible diesel = 18500 BTU, 40700 BTU/kg

El grupo de emergencia considerado consume 3 galones de diesel por hora en vacío. Y considerando como valores promedio para el combustible diesel los siguientes:

Densidad = 0.7793 gr/cm³
 Calor de combustión = 43.421 MJ/kg
 Además:

$$1 \text{ kWh} = \frac{10^3 \text{ J}}{\text{s}} 3600 \text{ s} = 3.6 \cdot 10^6 \text{ J}$$

Asumiendo una eficiencia térmica del diesel y del grupo electrógeno total del 30%,

1 galón de diesel = 10.67 kWh
 3 (gal/h)(10.67 kWh) = 32.01 kWh
 Por lo tanto en el eje del rotor del generador se estima un consumo de 32.01 kWh.

Pero la potencia mecánica, presente en el cigüeñal del motor, es aquella que entregaría el grupo en el rotor del generador (32.01 kWh) más la potencia que se pierde en el núcleo, la que se asume como 10% de la potencia nominal del generador.

10% P_n = 10% (150 kW) = 15 kW
 Entonces, la potencia mecánica en vacío es:
 P_m = 47.01 kW

Constante de Inercia H

A partir de la ecuación de oscilación de la máquina sincrónica se desarrolla una expresión para evaluar el valor de H.
 Esto es:

$$H = \frac{P_m \pi f t_1}{3 \omega_r} \tag{10}$$

Donde:
 P_m está en kW
 ω_r está en rad/s
 f está en ciclos/s (Hz)
 t₁ el tiempo en segundos para que la velocidad del rotor llegue a 0.05 de la velocidad inicial.

Como:
 P_m = 47.01 kW
 ω_r = 377 rad/s
 f = 60 Hz
 t₁ = 13 s

Entonces:
 H = 101.85 [kW s]

Como los kVA nominales de la máquina son 187, el valor de H en [kW s / kVA] es:
 H = 0.54 [kW s / kVA]

Funciones de Transferencia del Grupo de Emergencia

Maquina Motriz

La máquina motriz del generador de emergencia se modela como un sistema de turbina de vapor, que es el más parecido al no existir un modelo para sistemas a diesel en los archivos del programa.

Todo sistema de turbina de vapor utiliza válvulas controladas por el regulador de velocidad para controlar el flujo de vapor. En el motor diesel también existen válvulas controladas por el regulador de velocidad que a su vez controlan el ingreso de combustible a través de los inyectores. La cámara de vapor y la tubería de ingreso para el primer cilindro de la turbina, recalentadores y, tubería crossover introducen retardos entre el movimiento de la válvula y el cambio en el flujo del vapor. En el motor diesel la cámara de vapor de la turbina tiene su equivalente en la cámara de combustión, y aquí no se consideran tuberías de alta presión y crossover ni tampoco recalentadores, pues solo existirán las tuberías del sistema de combustible para la admisión a los cilindros y las del sistema de escape de los gases quemados, los cuales no introducen retardos importantes comparados con los de la cámara de combustión. Por ésto el modelo del sistema turbina de vapor se simplifica grandemente al adaptarlo al caso específico de este motor diesel.

La configuración más simple para sistemas de turbina a vapor y que se ajusta mejor a la modelación del motor diesel es la denominada Nonreheat (sin recalentamientos), cuyo modelo lineal aproximado se presenta en la figura 1.

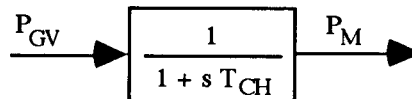


Figura 1 Aproximación Lineal

Para sistemas de turbinas de vapor de configuración sin recalentamiento, los valores de T_{CH} están entre 0.2 y 0.5 segundos, por lo que se tomará para este caso particular el valor T_{CH} = 0.3 segundos.

Sistema de Regulacion de Velocidad

El motor diesel tiene un regulador de velocidad de tipo hidráulico con válvulas eléctricas de tipo solenoide que son comandadas desde un dispositivo de control del grupo de emergencia.

En el sistema a vapor el control electro-hidráulico consiste de: un transductor y un relé de velocidad, un servomotor hidráulico y válvulas controladas del gobernador, las cuales están relacionadas funcionalmente ².

El modelo de turbina a vapor disponible en el programa de estabilidad a utilizar es el de la figura 2 y las constantes requeridas para modelar el sistema del motor a diesel del grupo de emergencia a partir de la simplificación del modelo a vapor son:

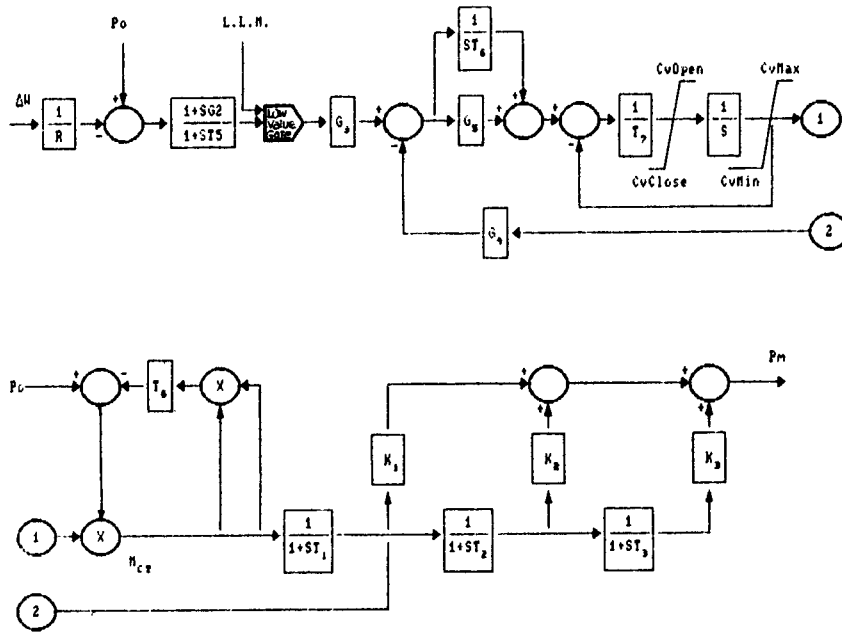


Figura 2 Modelo de Turbina a Vapor

Constantes para el Modelo:

- $T_1 = T_{CH} = 0.3$
- $T_2 = 0.01$
- $T_3 = 0.01$
- $T_4 = 0.01$
- $T_5 = 0.01$
- $T_6 = T_I = 999999$
- $T_7 = T_{SM} = 0.1$
- $T_8 = K_{PD} = 0$
- $K_1 = F_{HP} = 1$
- $K_2 = F_{IP} = 0$
- $K_3 = F_{LP} = 0$
- $G_2 = 0$
- $G_3 = 0$
- $G_4 = 0$
- $G_5 = K_{PR} = 1$
- $DCVU = C_{Vmax} = 0.167$
- $DCVL = C_{Vmin} = -0.167$
- $CVU = C_{Vopen} = 1$
- $CVL = C_{Vclose} = 0$

representado por un bloque con una función de transferencia caracterizada por una ganancia y una constante de tiempo (K_A y T_A), la excitatriz caracterizada por la constante de tiempo T_B realimentada por un bloque que representa la saturación de la excitatriz ($S_E + K_E$), el filtro de entrada al regulador representado por T_B y T_C y el estabilizador del regulador cuya función de transferencia consta de una constante de tiempo (T_F) y una ganancia (K_F).

Sistema de Excitación de la Máquina Síncrona

El sistema de excitación del grupo de emergencia es tipo DC1, pues utiliza un generador de DC como fuente de excitación del sistema de potencia.

Este modelo es descrito en el diagrama de bloques de la figura 3, y en él se observa el regulador de voltaje

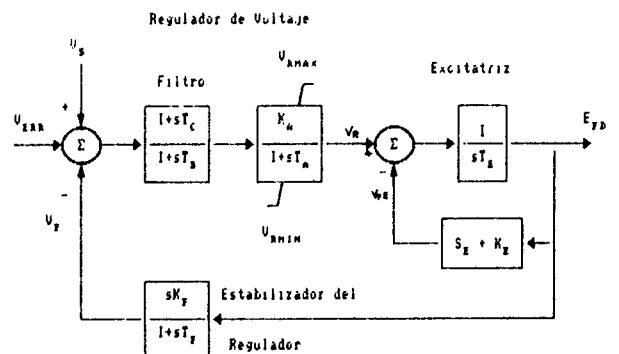


Figura 3 Sistema de Excitación tipo DC1

Siendo el sistema de excitación del grupo de emergencia tipo DC1 con excitatriz autoexcitada, se utilizan los siguientes parámetros típicos para este modelo ³:

Tabla 1 Datos Típicos Modelo DC1 ³

T_R	0 s
K_A	400
T_A	0.02 s
$E_{FD\ Máx}$	3.9 pu
$E_{FD\ Mín}$	0.0 pu
K_E	1
K_F	0.03
T_F	1.0 s

Para la velocidad de 1800 RPM:

$V_{R\ Máx}$	8.2
$V_{R\ Mín}$	-7.4
$S_{E\ Máx}$	1.1
$S_{E\ 75}$	0.5
T_E	1.3

Debiendo corregirse los valores de $E_{FD\ Máx}$, $E_{FD\ Mín}$, $V_{R\ Máx}$ y $V_{R\ Mín}$, porque en los valores típicos asumen: E_{FD} (Plena Carga) = 3.0 pu.

El factor de corrección es:

$$\frac{E_{FD} \text{ (Plena Carga)}}{3.0} \quad (11)$$

Entonces de las curvas de vacío y cortocircuito del generador, se obtiene: $E_{FD\ BASE} = 61.5\text{ V}$. Siendo $E_{FD\ BASE}$ el voltaje de campo para que haya voltaje nominal en vacío.

De la curva de cortocircuito se obtiene: E_{FD} a plena carga igual a 54V. E_{FD} (plena carga) es el voltaje de campo para obtener corriente nominal en pruebas de cortocircuito sostenido.

$$(E_{FD} \text{ (Plena Carga)}) \text{ pu} = 54/61.5 = 0.878 \text{ pu}$$

Por lo tanto, los valores corregidos son:

$$\begin{aligned} E_{FD\ Máx} &= 1.1427 \text{ pu} \\ V_{R\ Máx} &= 2.4026 \text{ pu} \\ V_{R\ Mín} &= 2.1682 \text{ pu} \end{aligned}$$

Las demás constantes se mantienen iguales.

Modelación de la Carga Alimentada

Para obtener resultados ajustados a la respuesta real del sistema se debe considerar en las características de la carga su dependencia con el voltaje y la frecuencia. Se han hecho trabajos para representar las cargas como una función polinomial del voltaje y la frecuencia

donde los coeficientes pueden ser obtenidos desde datos experimentales.

Después de realizar un estudio de la carga instalada en la Facultad de Ingeniería Eléctrica, la carga es clasificada de acuerdo a 10 tipos, cuyos polinomios de potencia activa y reactiva en función de voltaje y frecuencia se conocen ¹, para ésto se ha aproximado el comportamiento de algunas cargas a uno semejante a los que tendrían cualquiera de los diez modelos, estableciéndose los respectivos porcentajes.

Los porcentajes establecidos son:

- Sistema de aire acondicionado trifásico: 0.000 %
- Sistema de aire acondicionado monofásico: 0.021 %
- Sistema de aire acondicionado tipo ventana: 0.000 %
- Sistema de calentadores de ducto: 27.91 %
- Sistema de calentadores de agua, hornos, freidoras: 6.637 %
- Sistema de secadoras de ropa: 0.000 %
- Sistema de refrigeradores y congeladores: 0.000 %
- Sistema de iluminación incandescente: 1.677 %
- Sistema de iluminación fluorescente: 30.12 %
- Sistema de motores de inducción: 33.64 %

Determinación del Estatismo del Generador

De la prueba de carga realizada con ayuda de un analizador industrial se tiene que para un incremento de carga de 4580 W se produce una disminución de frecuencia en estado estable de 0.06 Hz sin el gobernador libre y con lazo de realimentación.

$$\begin{aligned} \Delta f &= 0.06 \text{ Hz} \\ \Delta P &= 4580 \text{ W} \\ \text{entonces, } R &= 1.31 \cdot 10^{-5} \text{ Hz/W} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Como } f_B &= 60 \text{ Hz y } P_B = 150 \text{ kW} \\ \text{entonces,} \\ R_{\text{pu}} &= 1.31 \cdot 10^{-5} \cdot (150 \cdot 10^3) \\ R_{\text{pu}} &= 0.0327 \text{ pu} \\ R\% &= 3.27\% \end{aligned}$$

Modelación del Sistema Eléctrico de la Facultad de Ingeniería Eléctrica

El sistema eléctrico de la Facultad funcionando únicamente con el grupo de emergencia se modela como un sistema de dos barras, siendo una barra de generación donde se conecta el grupo de emergencia y la otra barra de carga que físicamente está representada por el Tablero de Transferencia de la Facultad y es donde se asume conectada toda la carga eléctrica. La línea que une estas dos barras no contiene ningún transformador y físicamente es el conductor que atraviesa por debajo del piso el Laboratorio de Máquinas Eléctricas desde el grupo de emergencia hasta el Tablero de Transferencia.

Para realizar el estudio de estabilidad de este sistema es necesario correr primero un flujo de potencia, para lo cual se deben calcular los parámetros de la línea que une las barras de generación y de carga.

Los parámetros de esta línea son resistencia, inductancia y capacitancia. Por el nivel de voltaje y la distancia, se consideran efectos capacitivos nulos. Se conoce que la línea es un cable de cobre de 18 hilos que se puede aproximar a uno de tipo 2ϕ , con tres conductores por fase y que tiene una longitud de 35 m.

Con estos datos se obtienen los parámetros de la línea:

$$R = 9.44944 \cdot 10^{-3} \Omega$$

$$XL = 5.036 \cdot 10^{-3} \Omega$$

Con estos datos y los obtenidos anteriormente se completa la información que permite simular el grupo de emergencia de la Facultad de Ingeniería Eléctrica.

Simulación Dinámica y Contrastación de Resultados

Las variables a ser analizadas durante el comportamiento transitorio de la máquina son: frecuencia del generador y voltaje en las barras. El análisis de estas variables permite estudiar el desempeño de los sistemas de regulación de velocidad y de regulación de voltaje del grupo de emergencia. Las perturbaciones estudiadas son cortocircuitos, rechazos y variaciones de carga.

Rechazo de Carga

Cuando un generador de energía eléctrica está funcionando con carga, si repentinamente se le desconecta toda la carga eléctrica que tiene dejándolo en condiciones de vacío, se dice que hay rechazo de carga. En esta condición se observa una variación apreciable en la frecuencia del generador desde un valor de estado estable antes de la desconexión hasta un valor mayor de frecuencia, el cual es limitado por el regulador de velocidad, la inercia de la máquina y la fricción de las partes mecánicas. Este comportamiento se justifica porque con la condición de rechazo de carga, la corriente es cero y por ello también la potencia eléctrica, entonces la potencia de aceleración de la máquina es igual a la potencia mecánica y tiene un valor positivo mayor que cero, por ello la respuesta es la subida de frecuencia y voltaje terminal. Siendo la variable más afectada la frecuencia del generador, ésta debe ser controlada por una actuación rápida del regulador de velocidad o de los relés de sobrevelocidad si los hubiera.

De un estudio de carga realizado en la Facultad, se presenta un resumen de potencias activas y reactivas para condiciones de demanda alta, media y baja:

$$P_{\text{alta}} = 106970.9 \text{ W}$$

$$P_{\text{med}} = 36800 \text{ W}$$

$$P_{\text{baja}} = 15520 \text{ W}$$

$$Q_{\text{alta}} = 42004.16 \text{ VAR}$$

$$Q_{\text{med}} = 20000 \text{ VAR}$$

$$Q_{\text{min}} = 1510 \text{ VAR}$$

La potencia media $P = 36800 \text{ W}$ corresponde al 24.53% de la capacidad nominal del generador y la potencia baja $P = 15.520 \text{ W}$ corresponde al 13.33 %.

Se realiza el análisis de rechazo de carga en condiciones de demanda alta, media y baja, observándose en los resultados que se produce una variación mayor en la frecuencia para un rechazo de carga en condición de demanda alta, pues la frecuencia aumenta más que para los casos de rechazo de carga en condiciones de demanda media o baja (figuras 4 y 5), además el tiempo de estabilización de la frecuencia es también mayor para el rechazo de carga con demanda alta. Sin embargo no se llega a condiciones de sobrevelocidad gracias a la actuación del regulador de velocidad, la inercia de la máquina y el rozamiento de las partes mecánicas.

La variación de frecuencia más crítica (en el rechazo de carga en condición de demanda alta) no llega a una décima de Hz. Esto manifiesta una buena regulación de velocidad aunque la condición de demanda alta significa solo un 71.31% de la carga nominal del generador.

Los resultados obtenidos experimentalmente son semejantes a aquellos de la simulación (figura 6).

Variaciones de Carga Eléctrica

El caso de variación de carga eléctrica se presenta cuando el generador está cargado con un cierto valor y en un instante dado se disminuye o incrementa un porcentaje de carga eléctrica al generador. Las variaciones de carga se analizan mediante la frecuencia del generador y el voltaje en la barra de carga.

Se han analizado variaciones de carga desde la condición de demanda alta a media, alta a baja, media a baja, incrementos desde demanda baja a media, baja a alta y media a alta y se puede concluir que mientras mayor es la variación de carga mayor es la variación de frecuencia y mayor el tiempo que toma la máquina para estabilizarse. Así, en disminuciones de carga si mayor es la carga disminuida mayor es la frecuencia a la que se estabiliza, por ejemplo para variación de carga alta a media la frecuencia de estabilización es 60.05 Hz y es menor que la frecuencia de estabilización para variación de carga alta a baja cuyo valor es 60.07 Hz. El voltaje sube al disminuir la carga por exceso de potencia reactiva. Para incrementos de carga se produce una disminución de la frecuencia proporcional al incremento de carga. En cuanto al voltaje si el incremento de carga no es considerable el voltaje no cambia pero si por el contrario lo es, el voltaje disminuye.

Entonces para disminuciones de carga el sistema se comporta de manera muy semejante que para rechazos de carga. En cuanto al valor mismo de la variación de frecuencia se observa que es menor a los obtenidos para rechazos de carga, es decir no llega ni a una décima de Hz.

Cortocircuitos

El cortocircuito es una falla perjudicial para cualquier sistema eléctrico, que debido al incremento de

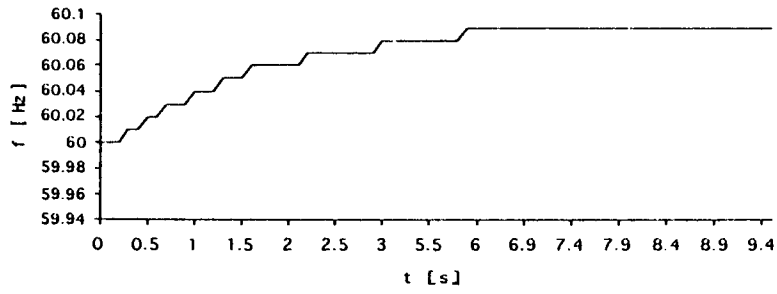


Figura 4 Frecuencia del Generador con Rechazo de Carga a Demanda Alta

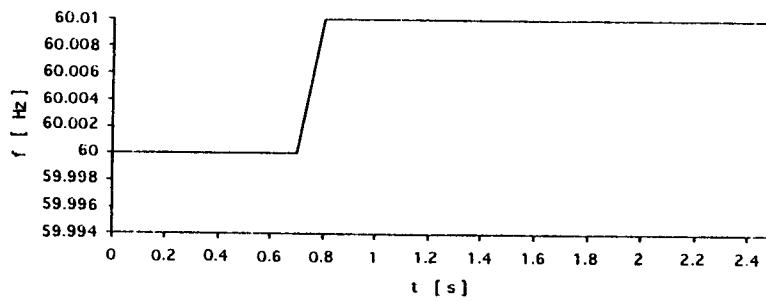


Figura 5 Frecuencia del Generador con Rechazo de Carga a Demanda Baja

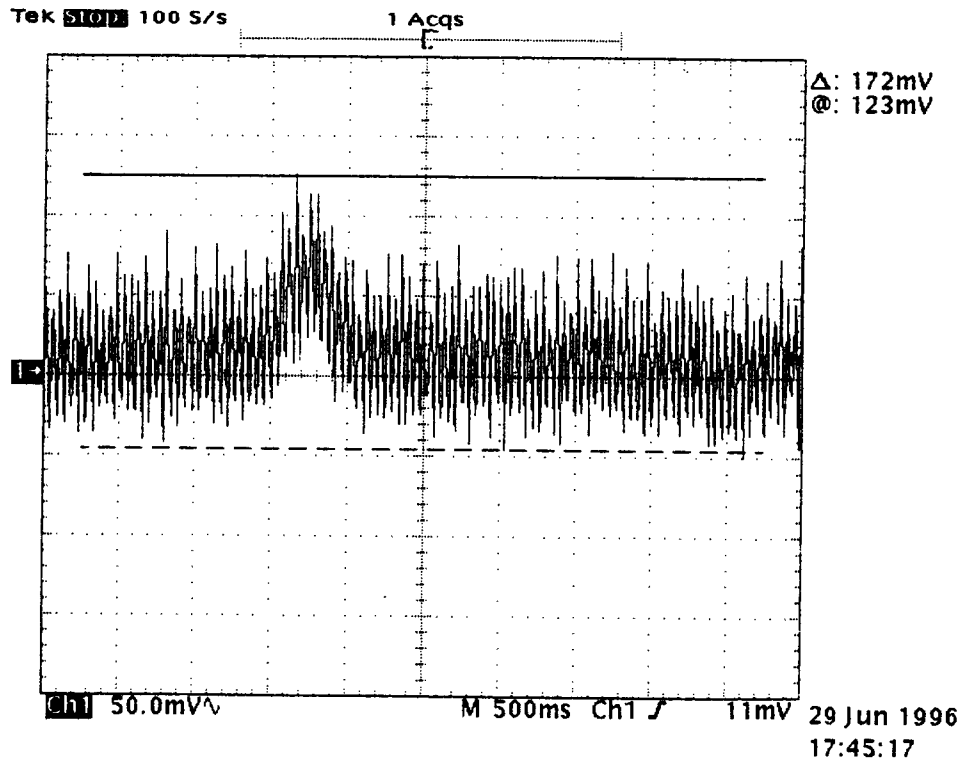


Figura 6 Velocidad del Rotor en Función del Tiempo (Rechazo de Carga)

corriente puede ocasionar daños severos en barras, líneas y equipos eléctricos, al sobrepasar su capacidad nominal de corriente. En el sistema analizado, un cortocircuito trifásico específicamente, produce elevaciones de corriente peligrosas que significan un excesivo y violento incremento de carga eléctrica en el generador de emergencia.

Los cortocircuitos trifásicos no se realizan experimentalmente por razones de seguridad, la única forma de conocer qué es lo que pasa con la máquina, es mediante simulación. Se simulan cortocircuitos trifásicos en la mitad de la línea que se encuentra entre la barra de generación y la de carga que correspondería a la que se encuentra entre el grupo de emergencia y el tablero de transferencia. En los análisis se incluye: cortocircuito trifásico con despeje de falla, cortocircuito trifásico sin despeje de falla, cortocircuito trifásico con reconexión y cortocircuito trifásico en la barra de carga.

Para este caso en que la fuente de energía es un grupo diesel pequeño, cuando se produce el cortocircuito se desarrollan altísimas corrientes transitorias, las que multiplicadas por la impedancia que existe durante el cortocircuito que sería la equivalente de las reactancias subtransitorias y transitorias de la máquina y la de la línea, producen una gran demanda de potencia eléctrica del generador, mayor que la potencia mecánica que entrega la máquina motriz, produciéndose un desequilibrio en la potencia de aceleración de la máquina, es decir la potencia de aceleración es negativa y esto hace que la frecuencia baje durante los primeros instantes del cortocircuito. Cuando se despeja la falla abriendo la línea, la potencia eléctrica es cero por lo que la potencia de aceleración será igual a la potencia mecánica que recibe el generador, es decir la potencia de aceleración es positiva, esto produce que la frecuencia suba. Debido a la actuación del regulador de velocidad, la inercia de la máquina y la fricción de las partes mecánicas, la frecuencia no sube indefinidamente sino que alcanza un valor estable

Así si el cortocircuito se realiza en la mitad de la línea la frecuencia baja hasta 58.9 Hz, si se realiza en la barra de carga baja hasta 59.5 Hz, entonces se observa que conforme más cerca de la barra de generación se realice el cortocircuito, mucho menor será la frecuencia a la que llega. Si se despeja la falla y no se reconecta la línea, la frecuencia se estabiliza en un valor mayor a la frecuencia anterior al cortocircuito, si se realiza la reconexión la frecuencia se estabiliza en un valor un poco menor que la frecuencia anterior al cortocircuito. Si no se despeja la falla la frecuencia tiende a estabilizarse en un valor muy bajo de frecuencia. Esta bajada de frecuencia se debe a que el cortocircuito se considera como una gran carga que tiende a frenar la máquina.

Si la falla se despeja y no se reconecta la línea los valores en los que se estabiliza la frecuencia son iguales con análisis de demandas media o alta, pero si se reconecta la línea, entonces si variará la frecuencia de estabilización dependiendo de la magnitud de la carga reconectada.

Se observa que para un cortocircuito en condición de demanda alta, el sistema toma más tiempo en estabilizarse, que si el cortocircuito fue a con carga media, y lo hará en un valor mayor de frecuencia después del despeje de la falla. Y si se realiza la reconexión, la frecuencia se estabiliza para carga máxima en un valor menor que para carga media. Si ocurre el cortocircuito y no se despeja la falla se observa que la frecuencia baja rápidamente y a un tiempo de 2.05 s aproximadamente, ya está en 55.94 Hz. Si el cortocircuito se produce en la barra de carga y no en la línea, el tiempo de estabilización de la frecuencia es menor que si el cortocircuito ocurriera en la mitad de la línea.

Conclusiones

En estado estable la regulación de voltaje del generador está en el orden del 18%, debido al alto valor de su reactancia sincrónica ($X_d = 0.1968$ ohmios) equivalente a 85 % en base de los datos de placa.

En el caso analizado tanto en la simulación como en las pruebas experimentales se obtiene una respuesta muy rápida del regulador de velocidad cuando se presentan variaciones de carga. Aunque debe considerarse que en la simulación no se modeló el motor diesel sino que se aproximó a un sistema a vapor la máquina motriz.

A pesar de los años de servicio que tiene el grupo de emergencia a diesel de la Facultad de Ingeniería Eléctrica su comportamiento dinámico está dentro de los límites de operación, por lo que se puede decir que se encuentra en buen estado de funcionamiento.

A partir de la simulación de varias condiciones de funcionamiento de un generador de emergencia se pueden establecer las calibraciones del sistema de protecciones para evitar el deterioro prematuro. En este caso se observa que para rechazos de carga la frecuencia no sube más de 0.1 Hz por lo que no se requiere relés de sobrevelocidad. Las variaciones de carga producen variaciones de frecuencia pequeñas que no requieren protección especial. En cuanto a la variación de frecuencia que se produce durante un cortocircuito se observa que baja rápidamente y esto puede ser perjudicial al motor que está diseñado para funcionar a velocidad de 1800 rpm, por lo que se debería tener un relé de baja frecuencia que apague el generador de emergencia cuando la frecuencia baje más de 3 Hz. Se puede también controlar ésta falla con protecciones de sobrecorriente que actúen rápidamente antes de que la frecuencia baje a valores perjudiciales para el grupo de emergencia.

Bibliografía

- [1] Armas Galo, "Características de Frecuencia y Voltaje de Carga para Estudios de Sistemas Eléctricos de Potencia", Tesis de Grado, Escuela Politécnica Nacional, 1995.

- [2] IEEE Committee Report, "Dynamic Models for Steam and Hydro Turbines in Power System Studies", IEEE Paper T 73 089-0, IEEE/PES Winter Meeting, New York, 1973.
- [3] IEEE Committee Report, "Excitation Systems Models for Power Systems Stability Studies", IEEE Trans on PAS 100 N.2, pp. 494-509, February, 1981.
- [4] Wright - Sherwin, "Determination of Synchronous Machine Constants by Test", IEEE.

Actualmente se desempeña como Ingeniera Proyectista en el Departamento de Mantenimiento Eléctrico de Petroproducción, Distrito Oriente.

Jesús Játiva Ibarra

Recibió los títulos de Ingeniero Eléctrico (1981) de la Escuela Politécnica Nacional, Master of Science in Electrical Engineering (1988) y Doctor de Philosophy (1991) de la University of Texas at Arlington (UTA).

Sus estudios de postgrado los realizó con el auspicio de Becas Fulbright y OEA. Trabajó como Asistente de Investigación y de Cátedra, y Miembro Postdoctoral en el Energy Systems Research Center de UTA.

El Dr. Játiva es coautor del libro "Analysis and Control System Techniques for Electric Power System" editado por Academic Press Inc. en 1991 y ha escrito para la PES del IEEE. Fue asesor del SSC del INECEL. Ha realizado cursos de postgrado en Conservación de Energía en la Industria, en Suecia en 1995, y de Inteligencia Artificial Aplicada a Sistemas Eléctricos de Potencia, en Colombia en 1996. Actualmente es Profesor Principal de la FIE y Jefe del Departamento de Potencia.

Biografías

Farinango, María de Lourdes

Nació en Quito el 15 de mayo de 1971. Obtuvo el Título de Bachiller en Humanidades Modernas, especialización Físico Matemático en el Colegio Experimental Simón Bolívar.

Sus estudios superiores los realizó en la Escuela Politécnica Nacional obteniendo el Título de Ingeniera en Sistemas Eléctricos de Potencia en 1996.