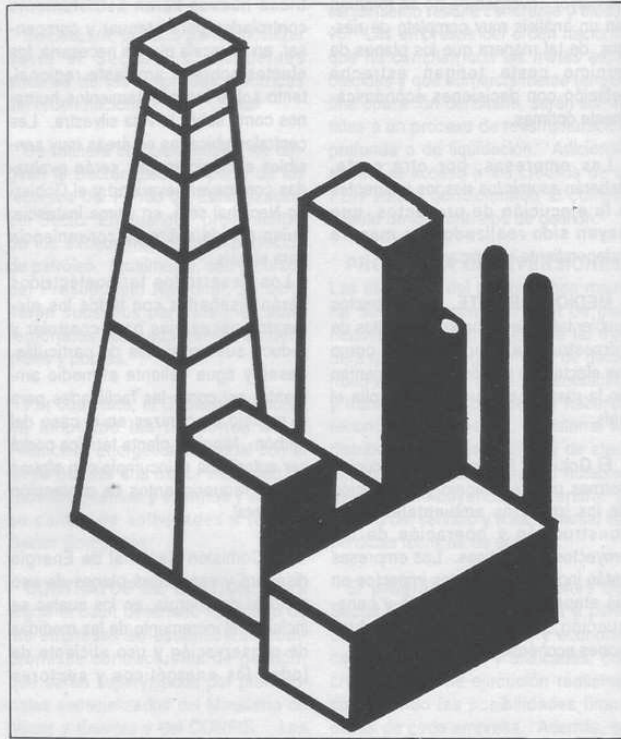


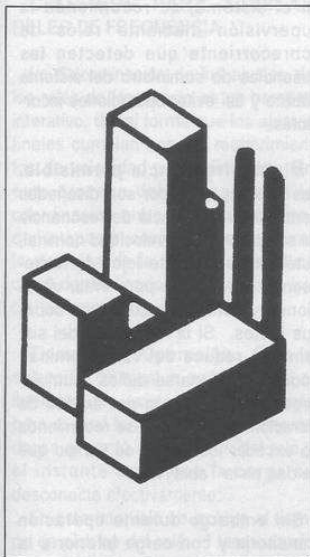
Sistema de Eyección de Carga para Plantas Industriales



RESUMEN. Este artículo presenta la fundamentación teórica y los criterios a seguir para la instalación de un sistema automático de eyección de carga con base en relés de frecuencia para una planta industrial típica que dispone de generación propia. El sistema de eyección de carga tiene por función, desconectar parte de la carga para garantizar el balance generación-carga al interior de la planta cuando se producen condiciones de pérdida parcial de la capacidad de generación disponible.

El artículo inicialmente presenta las ecuaciones y la teoría que describen el comportamiento del sistema eléctrico cuando se presenta un déficit súbito de generación. Posteriormente, se sugiere un procedimiento para el diseño de un sistema de eyección de carga, y al final se desarrolla un caso específico utilizando un programa de estabilidad.

- JUAN M. GERS.
GERS Ltda
- JORGE E. CARDENAS V.
GERS Ltda



INTRODUCCION.

Todo sistema eléctrico de potencia, que disponga de generación propia, está sometido a una variedad de condiciones anormales de operación tales como fallas, salida de generadores, apertura de líneas y otros disturbios que ocasionan reducción súbita en la capacidad de generación disponible del sistema. En tal situación debe restablecerse el balance entre la carga existente y la generación que permanece en línea antes de que la reducción de frecuencia ocasionada por la sobrecarga afecte las turbinas y los equipos auxiliares de generación, ocasionando a la postre un colapso total del sistema.

Para restablecer el balance se emplean redes de frecuencia que desconectan las cargas menos prioritarias cuando se produce reducción de la frecuencia a un nivel que indique que una pérdida de generación o una sobrecarga ha tenido lugar.

Un esquema con esta característica es particularmente útil en sistemas industriales que poseen alimentación

de la red pública y generación propia trabajando en paralelo.

En este artículo se presentan los conceptos, criterios y consideraciones aplicables para el diseño de un sistema de Eyección Automática de Carga (EAC) basado en relés de frecuencia para plantas industriales.

OPERACION DEL SISTEMA DE POTENCIA ANTE PERDIDAS DE GENERACION.

Cuando se presenta una pérdida total o parcial de generación en el sistema, los efectos más evidentes son las caídas de tensión y de frecuencia. Sin embargo dado que las caídas de voltaje son consecuencia también de presencia de fallas, es generalmente reconocido que la frecuencia es el indicador más confiable de una pérdida de generación.

Una súbita pérdida de generación en el sistema ocasionará un decremento en la frecuencia con una tasa de variación que depende de la magnitud de la sobrecarga y de la constante de inercia del sistema.

La relación que define la variación de la frecuencia con el tiempo luego de una variación súbita en carga y/o generación, se obtiene a partir de la ecuación de oscilación de un generador simple:

$$\frac{G \cdot H}{\eta F_o} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_A \quad (1)$$

En donde:

- G : MVA nominales de la máquina considerada
- H : Constante de inercia (MW · S/MVA)
- δ : Angulo del par del generador
- Fo : Frecuencia Nominal
- P : Potencia neta acelerante o desacelerante (MW)

La velocidad angular (W) de la máquina en cualquier instante viene

dada por la siguientes expresión:

$$W = W_o + \frac{d\delta}{dt} = 2\pi f \quad (2)$$

En donde Wo es la Velocidad angular de sincronismo.

Derivando la ecuación (2) respecto al tiempo se tiene:

$$\frac{2\pi df}{dt} = \frac{dw}{dt} = \frac{d^2 \delta}{dt^2} \quad (3)$$

Reemplazando la ecuación (3) en la ecuación (1) resulta:

$$\frac{df}{dt} = \frac{P_A f_o}{2GH} \quad (4)$$

La ecuación (4) define la tasa de variación de la frecuencia en Hz/seg y puede ser usada para una máquina individual o para una equivalente que represente la generación total de un sistema. En tal caso la constante de inercia se calcularía así:

$$H = \frac{H_1 MVA_1 + H_2 MVA_2 + \dots + H_n MVA_n}{MVA_1 + MVA_2 + \dots + MVA_n} \quad (5)$$

donde los subindices 1, 2 ... n se refieren a las unidades generadoras individuales. Debe aclararse que la constante H dada por la (5) está expresada en una base igual a la capacidad total de generación del sistema.

La potencia acelerante P_A en la ec. (4) es el factor que origina las variaciones de frecuencia. Puede ser calculada instantáneamente así:

$$P_A = P_M - P_{e\infty} \quad (6)$$

donde: P_M : Potencia mecánica de entrada al generador.
 $P_{e\infty}$: Potencia eléctrica de salida del generador.

En condiciones estables $P_A = 0$ y no se tienen variaciones de frecuencia. En caso de sobrecargas $P_A > P_M$ y por lo tanto $P_A < 0$ y se tendrá una reducción de frecuencia en el sistema.

METODOLOGIA PARA EL DISEÑO DEL SISTEMA DE EYECCION AUTOMATICA DE CARGA.

Para diseñar un sistema de EAC, debe en primera instancia definirse un modelo que represente las diferentes máquinas de generación del sistema y posteriormente definir los parámetros de carga y los criterios para ajustar los relés de frecuencia.

MODELO DE UNA MAQUINA SIMPLE

El sistema de eyección de carga se diseña para efectos de este trabajo utilizando para el sistema de potencia, el modelo de una sola máquina.

Esto equivale a suponer las unidades generadoras acopladas eléctricamente con oscilaciones entre ellas despreciables y frecuencia uniforme en todo el sistema, sin tener en cuenta el efecto de los equipos de regulación.

La carga se representa en este modelo con potencia constante, lo que implica considerar que la carga no disminuye por efecto de las caídas de voltaje y frecuencias después de una contingencia.

Este modelo proporciona una simulación pesimista del sistema puesto que además de despreciar la disminución de la carga que se da por las caídas de frecuencia se puede despreciar también el efecto de la regulación primaria con los reguladores de velocidad.

Para la implementación de este modelo se calcula la constante de inercia del sistema mediante el empleo de la ecuación (5).

La rata de variación de la frecuencia se estima de la ecuación (4) bajo las siguientes consideraciones:

- La potencia mecánica de entrada de los generadores permanece invariable e igual en magnitud al valor de prefalla.

- La magnitud de la carga no varía con el tiempo, el voltaje o la frecuencia. Esta sola se reduce en el momento de efectuarse una desconexión por causa del sistema EAC.

El modelo de máquina simple y cargas modeladas por potencia constante, es usado para determinación de ajustes de relés de frecuencia y la verificación del nivel de frecuencia mínima alcanzada ante contingencias, por las siguientes razones:

- Facilidad de utilización en el proceso iterativo que implica el diseño del Sistema de Eyección de carga.

- Consideración de márgenes de seguridad adecuados, al considerar que la carga no se amortigua con la caída de tensión. Esto implica introducir tasas de variación de frecuencia mucho más severas lográndose así ajustes más rápidos.

PARAMETROS PARA LA IMPLEMENTACION DE UN SISTEMA EAC.

Los siguientes aspectos deben definirse para la implementación del Sistema de Eyección de Carga.

Carga máxima a ser desconectada. Generalmente la condición más drástica corresponde a la pérdida de interconexión entre la red pública y el sistema interno de la planta. En este caso el desbalance entre generación y carga será igual a la importación máxima y debe ser compensado mediante la desconexión de similar cantidad de carga en el sistema.

Frecuencia de Inicio del Sistema EAC. El sistema de desconexión se ajusta para que inicie su operación a un valor de frecuencia que esté por debajo de cualquier frecuencia de trabajo normal del sistema. Teniendo en cuenta las variaciones de frecuencia ocasionadas por oscilaciones propias del Sistema Público, normalmente se selecciona este valor alrededor de 59 Hz. Sin embargo si se tiene la posibilidad de oscilaciones más severas

en el sistema, se recomienda la supervisión mediante relés de sobrecorriente que detecten las ausencias de suministro del sistema público y así evitar operaciones incorrectas.

Minima frecuencia permisible. Las turbinas de vapor son diseñadas para que la frecuencia de resonancia de sus paletas a la velocidad nominal, esté suficientemente lejos de la frecuencia del sistema para evitar vibraciones y esfuerzos excesivos sobre sus partes. Si la frecuencia del sistema se reduce del valor nominal, podrían ocasionarse daños acumulativos sobre la turbina por exceso de vibración. Por lo tanto se recomienda no exceder los límites de tiempo que se dan en la Tabla No.1.

Sin embargo durante operación transitoria y con carga inferior a la nominal, podría admitirse en la mayoría de los casos reducciones de frecuencia hasta 56 Hz sin ocasionar daños a la turbina y la mala operación de los sistemas auxiliares de lubricación y refrigeración de los turbogeneradores.

TABLA No.1
Tiempos Típicos para la Operación de turbinas (Plena Carga)

Frecuencia a Plena Carga (Hz)	Máximo tiempo Permisible - Minutos
59.4	Continuamente
58.4	90
58.2	10
57.6	1

NOTA: Los tiempos de operación a baja frecuencia y plena carga son acumulativos.

Energía y Computación, No.3, Primer Semestre 1992.

CRITERIOS PARA AJUSTAR RELES DE FRECUENCIA.

La determinación de los ajustes de los relés de frecuencia es un proceso interactivo, de tal forma que los ajustes finales cumplan con los requerimientos de velocidad y coordinación. En este proceso debe chequearse la coordinación entre relés que comandan etapas sucesivas para asegurar la eyección de la menor cantidad de carga dependiendo de la condición inicial de sobrecarga.

Tiempos de Operación. Para la selección de ajustes se considera el intervalo que existe entre el instante para el cual la frecuencia del sistema decae al punto de arranque del relé y el instante en el que la carga se desconecta efectivamente.

En este intervalo se incluye el tiempo de pick-up del relé, el temporizado intencional del relé si es requerido y el tiempo de apertura del interruptor.

Típicamente, para sistemas industriales se utilizan los siguientes valores:

Tiempo pick-up relé: 50mseg

Tiempo de apertura interruptores: 100 meseg.

Determinación de la Variación de la Frecuencia: La variación de la frecuencia requerida para el cálculo de ajustes, se calcula considerando para el sistema un modelo de máquina simple.

Para la carga se considera un modelo de potencia constante. Esto supone que la carga de suministrada por los generadores es la misma antes y después de la contingencia, despreciando cualquier tipo de amortiguación. Bajo tal consideración la rata de caída de frecuencia es la mayor posible en el sistema y por lo tanto los ajustes así calculados proporcionan el sistema más rápido y seguro.

EJEMPLO DE CALCULO Y AJUSTE DE LOS RELES DE FRECUENCIA EN UNA PLANTA INDUSTRIAL.

A continuación se indica el procedimiento para calcular los ajustes de los relés de frecuencia en una planta industrial típica, cuyo diagrama unifilar se muestra en la Figura 1 con los datos principales para el estudio.

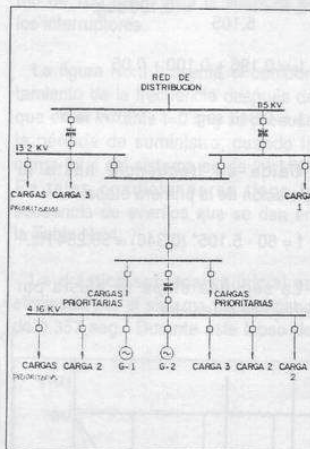


Figura N°1.
DIAGRAMA UNIFILAR - SISTEMA INDUSTRIAL TÍPICO

DEFINICION DE LA SOBRECARGA.

Las condiciones iniciales de carga se resumen a continuación:

Carga total : 24.0 MW

Generación Propia : 8.0 MW

Total importación : 16.0 MW

En la eventualidad de la desconexión del circuito de suministro los generadores experimentan la siguientes sobrecarga:

$$\% \text{ sobrecarga} = \frac{24.0 - 8.0}{8.0} \times 100 = 200\%$$

MAGNITUD DE LA CARGA A SER EYECTADA.

Con la pérdida del suministro se pierde un aporte de generación de 16 MW, el cual debe ser suministrado inicialmente por los generadores propios. Una carga igual o mayor a esta cifra deberá desconectarse para aliviar la sobrecarga. Por lo tanto la

carga a ser eyeccionada es de 16 MW (24-8).

NIVELES DE FRECUENCIA.

La desconexión de carga se inicia una vez la frecuencia del sistema alcance los 59 Hz, lo cual es indicativo inequívoco de que una pérdida de generación ha tenido lugar. Se admite una frecuencia mínima de 56 Hz.

ETAPAS DE EYECCION.

Se plantea 3 etapas de eyección que sacan de línea 15.98 MW. La definición de tales etapas se hace de acuerdo con las indicaciones de los ingenieros de operación de la planta.

La magnitud de la carga a ser desconectada se detalla en la Tabla No.2.

La carga de alta prioridad que no puede ser desconectada suma 8.02 MW, valor que no supera la capacidad conjunta de ambos generadores.

TABLA No.2
MAGNITUD DE ETAPAS DE DESCONEXION

PRIORIDAD	DESCRIPCION	MW
1	Carga 1	6.03
2	Carga 2	4.73
3	Carga 3	5.22
TOTAL CARGA A EYECCIONABLE		15.98

DETERMINACION DE AJUSTE DE RELES DE FRECUENCIA.

Los ajustes de los relés de frecuencias se determinaron de tal forma que cada etapa es desconectada solamente cuando la frecuencia del sis-

tema ha caído a un valor determinado. Dicho valor es calculado considerando la reducción de la frecuencia del sistema ocasionada por una sobrecarga de magnitud igual a la etapa considerada.

Ajustes Primera Etapa. La primera etapa es desconectada cuando la frecuencia alcance 59 Hz.

Ajustes Segunda Etapa. Se considera una sobrecarga igual a la Primera Etapa y se determina la rata de caída de frecuencia:

$$\frac{df}{dt} = \frac{-6.03}{2GH} \cdot 60 = -5.105 \text{ Hz/seg.}$$

Por lo tanto la frecuencia en función del tiempo es (Fig. No.2):

$$f = 60 - 5.105 t$$

El tiempo se dispara de la primera etapa es:

$$t_d = t_{pick-up} + T_{interruptor} + T_{relé}$$

$$t_p = \frac{60-59}{5.105} = 0.196 \text{ seg.}$$

$$t_s = 0.196 + 0.100 + 0.05$$

$$t_d = 0.346 \text{ seg.}$$

Caída de frecuencia hasta la operación de la primera etapa.

$$f = 60 - 5.105 \cdot (0.346) = 58.234 \text{ Hz.}$$

La segunda etapa se ajusta por debajo de este valor.

$$\text{Ajuste (2a. etapa)} = 58.15 \text{ Hz.}$$

Ajuste Tercera Etapa. Se ajusta para que no opere con sobrecargas hasta de 6.03 + 4.73 = 10.76 MW, las cuales desconectan únicamente las etapas 1 y 2.

$$\frac{df}{dt} = \frac{-10.76}{2GH} \cdot 60 = -9.109 \text{ Hz/seg.}$$

$$f = 60 - 9.109 t$$

Tiempo de arranque de la primera etapa:

$$t = \frac{60 - 59}{9.109} = 0.110 \text{ Seg.}$$

Tiempo de disparo de la primera etapa:

$$T_{d1} = 0.110 + 0.05 + 0.100 = 0.260 \text{ seg.}$$

Caída de frecuencia:

$$f = 60 - 9.109 \cdot (0.26) = 57.632 \text{ Hz}$$

Valor que produce pick-up de la segunda etapa:

$$t = \frac{60 - 58.15}{9.109} = 0.203 \text{ Seg.}$$

Tiempo de disparo de la segunda etapa:

$$T_{d2} = 0.203 + 0.05 + 0.100 = 0.353 \text{ Seg.}$$

En $T_{d1} = 0.26 \text{ seg.}$ la ecuación de la frecuencia tiene una variación dependiente como consecuencia de la desconexión de la primera etapa (6.03 MW), Figura 2. Después de este instante la potencia acelerante es tan sólo 4.73 MW.

$$\frac{df}{dt} = \frac{-4.73}{2GH} \cdot 57.632 = -3.846 \text{ Hz/seg.}$$

Y la ecuación de la frecuencia:

$$f - 57.632 = 3.846 \cdot (t - 0.26), t > 0.26 \text{ s.}$$

$$f = 58.632 - 3.846 \cdot t$$

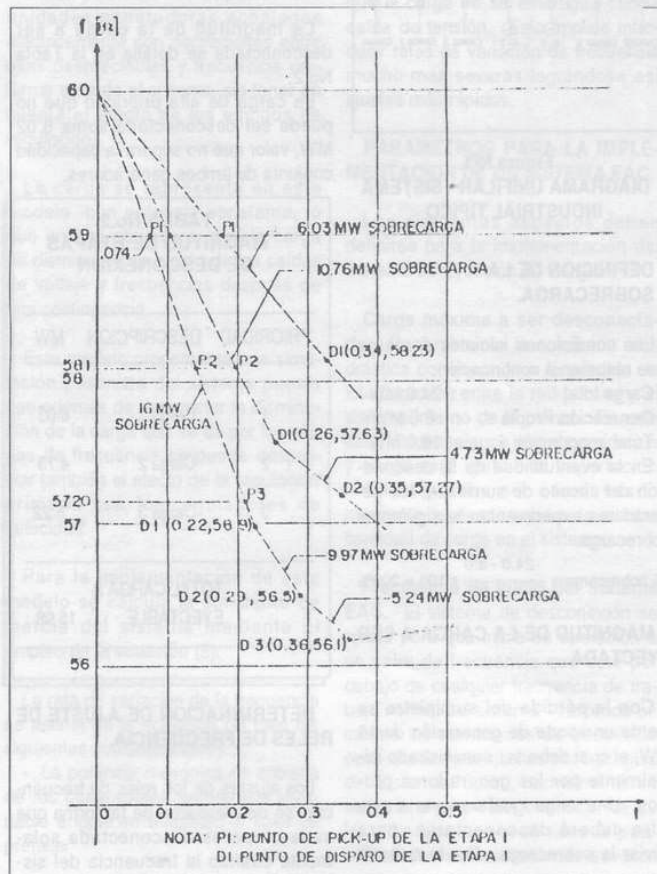


Fig. 2

La caída de frecuencia hasta la salida de la etapa 2 es:

$$f = 58.632 - 3.846 \cdot t_{d2}$$

$$f = 57.274 \text{ Hz.}$$

Por lo tanto se selecciona un ajuste de:

$$\text{Ajuste (3a. etapa)} = 57.20 \text{ Hz.}$$

Los ajustes calculados finalmente se presentan en la Tabla No.3

La operación del sistema ante una pérdida total de conexión con la red de distribución es representada por la característica inferior en la Figura No.2

TABLA No.3
AJUSTE DE RELES DE FRECUENCIA

ETAPA	AJUSTE FRECUENCIA (Hz)	TIEMPO RETARDO (seg)
Primera	59.00	Instantáneo
Segunda	58.15	Instantáneo
Tercera	57.20	Instantáneo

VERIFICACION DE OPERACION.

Para verificar la operación del sistema diseñado, se estudia la reducción de la frecuencia durante el proceso de desconexión de carga, por dos métodos diferentes: i) Modelando la carga con potencia constante y ii) modelando la carga con amortiguación por efecto de la caída de tensión. Para el último caso se utilizó un programa de estabilidad transitoria.

Modelación de la Carga con potencia constante. Para este caso se supone que la magnitud de la carga es constante y por lo tanto no depende del nivel de voltaje. Esta consideración es pesimista respecto al caso

real por lo tanto proporciona márgenes de seguridad.

El análisis de frecuencia se realizó utilizando la ec. (4), los ajustes de los relés de frecuencia dados en la Tabla No.3 y considerando un tiempo máximo de 100 mseg para la apertura de los interruptores.

La figura No.3 presenta el comportamiento de la frecuencia después de que en el instante $t=0$ seg se produce la pérdida de suministro, cuando la carga total del sistema es de 24 MW. En tales condiciones se tiene la secuencia de eventos que se dan en la Tabla No.4.

La drástica sobrecarga inicial es eliminada por el sistema EAC al cabo de 0.357 seg. Durante este lapso de

tiempo, la frecuencia caerá hasta 56.17 Hz. valor que se encuentra por encima de los estándares aceptados para los sistemas industriales operando aisladamente.

A partir del instante $t=0.357$ seg. para el cual la sobrecarga se ha eliminado, se inicia la recuperación de la frecuencia del sistema.

Modelación de la carga con amortiguamiento por la caída de tensión.

($P=kV^2$). La condición inicial de carga definida para este estudio fue llevada al programa de estabilidad, el cual permite simular la desconexión de suministro en $t=0$ seg. y posteriormente la desconexión de las cargas a medida que los relés de frecuencia van operando.

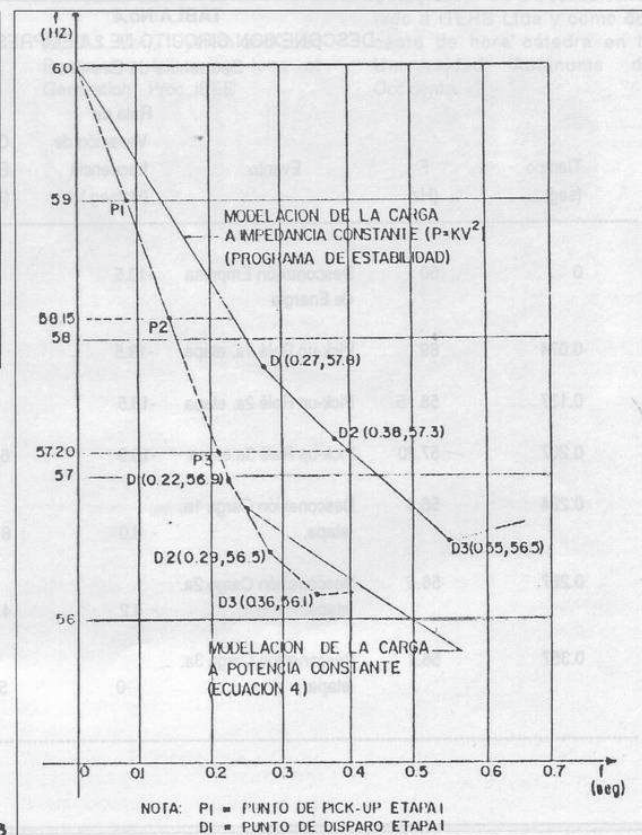


FIG 3

La Figura No.3 ilustra la característica de frecuencia obtenida mediante el computador, modelando las cargas por admitancias constantes. Esta consideración es menos drástica que la de potencia constante dado que aquí la potencia de carga se amortigua con la caída de tensión.

Al reducirse la magnitud de la carga, los generadores experimentan para cada instante una sobrecarga mas leve y por lo tanto la caída de la frecuencia es menor que la obtenida utilizando el primer modelo.

Como se aprecia en la Figura No.3 el arranque de los relés de frecuencia y por lo tanto, el disparo de los interruptores se produce en forma mas

lenta aunque finalmente el valor de frecuencia mínimo alcanzado de 56.55 Hz, el cual está por encima del límite mínimo fijado de 56 Hz.

De la Figura 3 y de los resultados del programa de estabilidad se observa que la frecuencia después de la salida de la tercera etapa tiende a recuperarse a razón de 0.67 Hz/seg. Esto implica que tomaría aproximadamente alrededor de 2.345 segs. la recuperación del nivel normal de 60 Hz.

La modelación de las cargas mediante los dos métodos expuestos, permitió obtener gráficas de la variación de frecuencia en función del tiempo, las cuales corresponden a los ex-

tremos mas adversos y favorables en el sistema. De este modo, las curvas obtenidas por los modelos, delimitan el área de operación del sistema bajo estudio, ante la pérdida de conexión con la red de suministro.

Análisis del voltaje considerando pérdida total de suministro y operación del sistema EAC. La pérdida de generación ocasionada en el sistema no solo causa caída de frecuencia sino también de voltaje. La operación del esquema de eyección automática de carga debe impedir además que los voltajes del sistema se reduzcan a tal punto que ocasionen desenganche de los contactores que atienden los motores de la planta que se deben conservar en línea.

TABLA No.4
DESCONEXION CIRCUITO DE LA EMPRESA DE ENERGIA
Secuencia de Eventos

Tiempo (seg)	F (Hz)	Evento	Rata de Variación de frecuencia (Hz/seg.)	Carga Eyectada (MW)	Sobrecarga remante sobre generadores (MW)
0	60	Desconexión Empresa de Energia	-13.5	-	16.00
0.074	69	Pick-up Relé 1a. etapa	-13.5	-	16.00
0.137	58.15	Pick-up Relé 2a. etapa	-13.5	-	16.00
0.207	57.20	Pick-up Relé 3a. etapa	-13.5	6.03	16.00
0.224	56.9	Desconexión Carga 1a. etapa.	- 8.0	6.03	9.97
0.287	56.5	Desconexión Carga 2a. etapa.	- 4.2	4.73	5.24
0.357	56.1	Desconexión Carga 3a. etapa.	0	5.22	0.22

El chequeo de la reducción en la magnitud de los voltajes se hace del siguiente modo:

1. Determinación del voltaje inicial de cada barraje, utilizando un programa de flujo de carga.

2. Determinación de las variaciones de voltaje en cada barraje después de la pérdida de conexión y durante la operación del esquema de eyección de la carga. Para ello se utiliza un programa de estabilidad transitoria en la opción que suministre los voltajes en cada barra para cada paso del análisis.

3. Elaboración de curvas de voltaje vs tiempos para los barrajes que alimentan las cargas prioritarias.

CONCLUSIONES

Se ha presentado la teoría general para el diseño de un esquema de eye-

cción de carga (EAC), incluyendo las expresiones que definen la variación de la frecuencia con el tiempo cuando ocurran variaciones súbitas en la relación carga-generación.

Se describen también los modelos de simulación de máquina simple y multimáquina.

Al final se da la metodología para el diseño de un esquema EAC y se hace una completa ilustración en una planta industrial típica, incluyendo la verificación de su correcta operación y el chequeo del perfil de voltajes.

REFERENCIAS

(1) J. Berdy, "Load Shedding - An Application Guide". General Electric Company. Publication GET-6449.

(2) G.S. Berj, "System and Load Behaviour following loss of Generation". Proc. IEEE

Vol.119, No.10, October 1972.

(3) Westinghouse Electric Co., Applied Protective Relaying. Coral Springs, Silent Sentinels, 1979.

GERS O., Juan M. Obtuvo el título de Ingeniero Electricista en la Universidad del Valle (1977) y el MSc. en la Universidad de Salford U.K. (1981). Se encuentra vinculado a GERS Ltda y como profesor de tiempo parcial en la Universidad del Valle.

CARDENAS V., Jorge E. Obtuvo el título de Ingeniero Electricista en la Universidad del Valle (1984) y el MSc. en la Universidad de Texas en Arlington USA (1989). Se encuentra vinculado a GERS Ltda y como docente de hora cátedra en la Universidad Autónoma de Occidente.