

COMITÊ 38  
ANÁLISIS Y TÉCNICAS DE SISTEMAS DE POTENCIA

FORMACIÓN DE ISLAS ELÉCTRICAS CONFORMADAS POR UN GENERADOR,  
PARTE DE UNA DISTRIBUIDORA ELÉCTRICA Y PLANTAS INDUSTRIALES

J.L. Agüero.  
IITREE-LAT  
Facultad Ingeniería. UNLP  
La Plata. Bs. As. Argentina

M. Beroqui  
IITREE-LAT - P. P. CIC  
Facultad Ingeniería. UNLP  
La Plata. Bs. As. Argentina

B. Barbieri  
IITREE-LAT  
Faculta Ingeniería. UNLP  
La Plata. Bs. As. Argentina

RESUMEN

El objeto de este trabajo es describir, por vía de un ejemplo, los aspectos de importancia a tener en cuenta para la formación exitosa de islas eléctricas en casos donde se tenga un importante exceso de generación con respecto a la demanda y en casos donde resulta una condición equilibrada.

Este trabajo está basado en los estudios realizados ante la necesidad de una Industria Petroquímica de aumentar la confiabilidad de su suministro eléctrico.

PALABRAS CLAVES

Islas Eléctricas. Estabilidad Transitoria Modelo de Carga.

1. INTRODUCCIÓN

La formación de islas eléctricas al separarse una parte del Sistema Interconectado, requiere en principio alcanzar un equilibrio entre la demanda y la generación de la isla.

Sin embargo dado que su formación tiene generalmente su origen en una falla y pueden producirse grandes desequilibrios en los instantes iniciales, es necesario un análisis del régimen transitorio para asegurar la formación exitosa de la isla, donde se verifiquen que no actuarán durante su formación, las protecciones de los generadores y/o de las propias cargas.

El caso particular analizado en este trabajo es la formación de Islas Eléctricas en un área que esta normalmente vinculada al sistema a través de un transformador de 220/132 kV y que incluye parte de las demandas de una Distribuidora (carga tipo residencial), una Planta Petroquímica, y un conjunto de plantas industriales cuyos principales consumos están constituidos por motores de inducción.

Además en una misma subestación se conectan la planta petroquímica y un cogenerador conformado por una unidad turbogas de 123 MW que genera vapor en una caldera de recuperación y provee del mismo a la planta petroquímica.

En FIGURA 1 se presenta un esquema unifilar del sistema analizado, donde se indica el transformador

220/132 kV ubicado entre las barras 1 y 2.

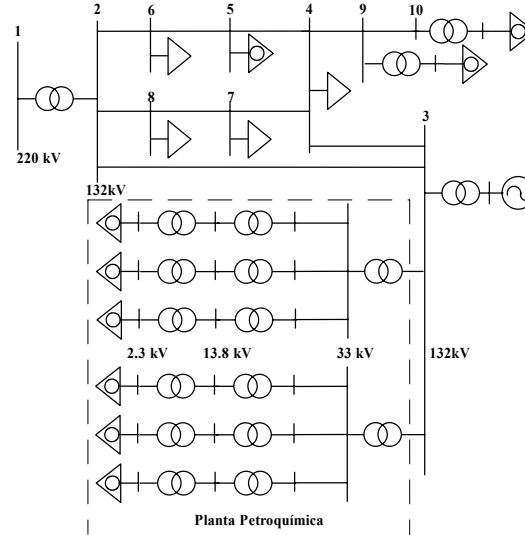


FIGURA 1: Esquema unifilar del sistema analizado

Sobre la barra 3 se conectan el generador y la Planta Petroquímica a través de dos transformadores.

Esta barra está conectada también con las barras 2 y 4 a través de líneas.

El resto de cargas industriales están conectadas a las barras 5, 9 y 10. La carga del resto de las barras pertenece a la Distribuidora.

2. ANÁLISIS PRELIMINAR

La carga pico del área resulta de 241 MW, correspondiendo 41.4 MW a la Petroquímica, 46.6 MW al resto de las cargas industriales y el resto a la distribuidora. En esta condición con una generación de 123 MW en el generador, ingresan 118 MW desde el sistema a través del transformador.

Para el caso de valle la carga total resulta de 212 MW, correspondiendo como en el caso de pico, 41.4 MW a la Petroquímica y 46.6 MW al resto de las cargas

industriales, correspondiendo la carga restante a la distribuidora.

En esta condición y con una generación de 123 MW en el generador, ingresan 89 MW desde el sistema a través del transformador.

Dado que las posibles islas tienen como primera prioridad asegurar el suministro eléctrico a la planta petroquímica, como segunda prioridad el resto de los consumos industriales y por último la demanda residencial, un análisis preliminar indica que ante la pérdida del transformador que vincula el área con el sistema debe cortarse casi la totalidad del consumo residencial para equilibrar la demanda y la generación frente a la desvinculación del sistema.

La forma de eliminar toda la carga residencial excepto la de la barra 4 consiste en producir un interdisparo de las líneas entre las barras 2 y 3, entre las barras 4 y 7 y entre las barras 5 y 6, a partir de la apertura del transformador 220/132 kV.

De esta forma queda una carga de 116.1 MW y 110.9 MW en pico y en valle respectivamente, con una capacidad del generador de 123 MW, con lo cual se daría origen a una isla equilibrada en demanda y generación. También se analiza una posible isla conformada solo por la planta Petroquímica y el generador, en este caso es necesario el interdisparo de las líneas entre las barras 2 y 3 y entre las barras 3 y 4.

De esta forma queda una carga de 41.4 MW, con una capacidad de generación de 123 MW, con lo cual se daría origen a una isla con exceso de generación.

Desde el punto de vista estático ambas islas son posibles, aunque la segunda si bien permitiría asegurar el suministro eléctrico a la petroquímica no sería capaz de suministrar todo el vapor requerido por ésta, ya que para ello la generación en la unidad turbogas debe ser de al menos 100 MW.

### 3. ANÁLISIS DINÁMICO

El análisis siguiente tiende a verificar que los transitorios de formación de la isla son tales que no alcancen los niveles de actuación de las protecciones del generador ni de las cargas remanentes en la isla.

#### 3.1. Protecciones

Las protecciones del generador son:

- Subfrecuencia: Instantánea (0,1s) por debajo de 48 Hz.
- Sobrefrecuencia: Instantánea (0,1s) por encima de 52 Hz y Temporizada (20 s) por encima de 51.5 Hz.
- Sobrecorriente estática: Temporizada (2s) por encima de 1.2 pu.
- Sobrecorriente rotórica: Curva inversa de Tiempo.

Las protecciones de los motores constituyentes de la carga pueden ser:

- De sobrecalentamiento (corriente – tiempo).
- Por baja tensión algunos motores pueden tener protecciones o contactores que desconectan el motor si la tensión permanece durante más de 300 a 500 ms por debajo del 70% del valor nominal.

#### 3.2. Modelado para simulaciones dinámicas

El sistema fue simulado con un programa para análisis de estabilidad.

Se modelaron el generador y sus reguladores de velocidad y tensión de acuerdo a los datos del fabricante.

En particular se ajustaron los parámetros del modelo del regulador de velocidad para verificar el comportamiento de este lazo con registros reales disponibles.

Una característica particular del sistema de excitación es que posee un rectificador controlado que se alimenta de la propia tensión de bornes del generador a través de un transformador.

Todas las cargas industriales fueron modeladas como motores de inducción de simple jaula, con la misma estructura y parámetros en p.u.

En el caso de la Petroquímica se modelaron todas las barras internas de 33 kV, de 13.8 kV y de 2.3 kV, agrupando en cada una de estas últimas todos los motores como uno equivalente.

El resto de las cargas industriales fueron modeladas como motores equivalentes conectados a 132 kV a través de transformadores.

#### 3.3. Perturbación analizada

La perturbación que da origen a la formación de las islas es un corto circuito trifásico en la barra 1 de 220 kV, al cabo de 100 ms se produce la apertura del transformador 220/132 kV, separándose del sistema.

#### 4. SIMULACIÓN DE LA ISLA CHICA

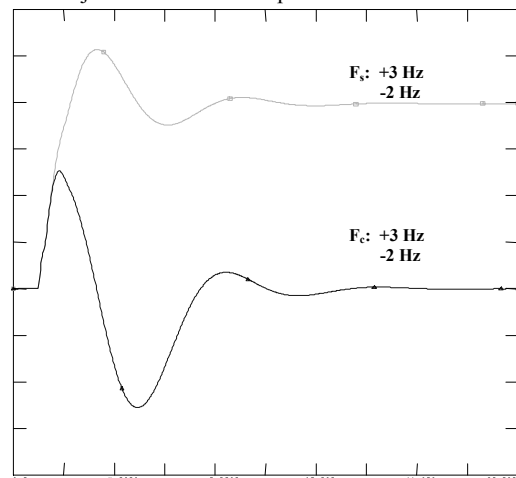
En este caso 200 ms después de la separación del sistema se disparan las líneas antes mencionadas, quedando solo la planta petroquímica y el generador.

Dado que en este caso analizado la generación inicial era de 123 MW y la demanda de 41.4 MW, no existen durante el transitorio problemas de sobrecarga en el generador aunque, debido al importante excedente de generación inicial aparece una sobrefrecuencia en la isla.

Considerando el cambio de carga y el estatismo de la unidad la frecuencia en estado estacionario se establecería en 52.2 Hz, lo que provocaría la actuación de las protecciones de sobrefrecuencia del generador.

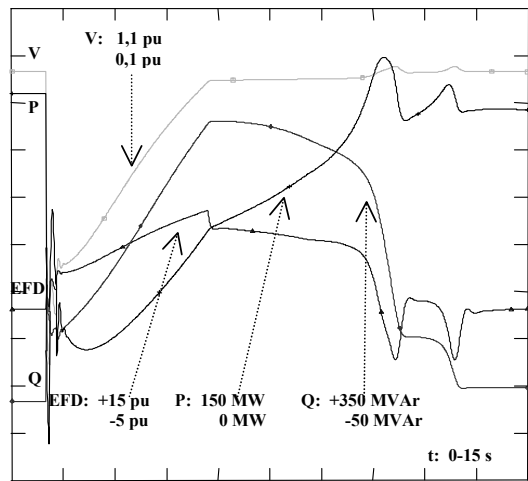
Por lo tanto producida la isla es necesario cambiar a isócrono el modo de funcionamiento del regulador de velocidad.

Este cambio de modo se debe hacer rápidamente para evitar que el primer pico de sobrefrecuencia supere el valor de ajuste de 52 Hz de la protección instantánea.



t: 0-20 s

**FIGURA 2:** Isla Chica. Frecuencia con ( $F_c$ ) y sin cambio ( $F_s$ ) de modo de funcionamiento del Regulador de Velocidad.



**FIGURA 3:** Isla Grande. Generador. Tensiones Terminal (V) y de Campo (EFD) y Potencias Activa (P) y Reactiva (Q).

En **FIGURA 2** se presenta la evolución de la frecuencia ante la formación de la isla, para el caso en que no se realice el cambio de modo en el regulador de velocidad.

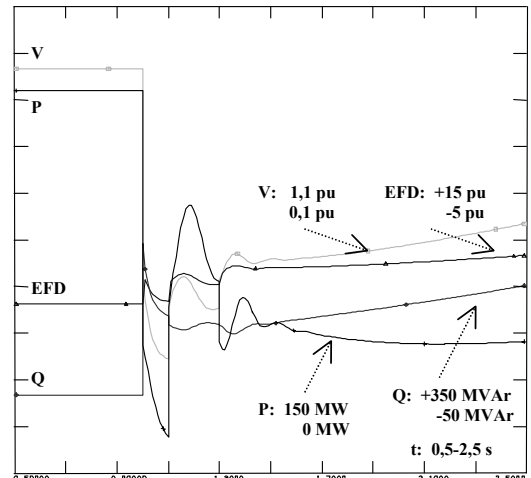
Sin cambio de modo actuarían las protecciones instantánea y temporizada de sobrefrecuencia.

Cambiando de modo a los 10s, lo cual podría suponerse como el tiempo mínimo posible a través de la intervención del operador de la unidad, se evitaría la actuación de la protección temporizada pero no la de la instantánea. Cambiando el modo lo más rápidamente posible (200 ms), a través de una señal lógica que detecte la condición de isla (la misma que produce el disparo de las líneas), la máxima frecuencia alcanza los 51.5 Hz de forma tal que se evita la actuación de las protecciones de sobrefrecuencia del generador.

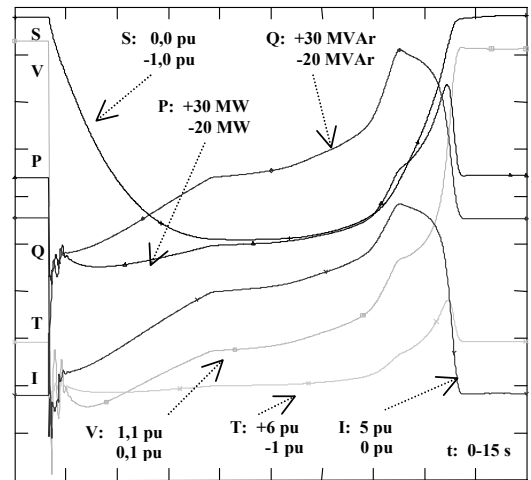
En **FIGURA 2** también se presenta la evolución de la frecuencia para este último caso.

### 5. SIMULACIÓN DE LA ISLA GRANDE

En este caso 200 ms después de la separación del sistema se disparan las líneas antes mencionadas, quedando en isla la planta petroquímica, las otras cargas industriales y el generador.



**FIGURA 4:** Isla Grande. Generador. Tensiones Terminal (V) y de Campo (EFD) y Potencias Activa (P) y Reactiva (Q).



**FIGURA 5:** Isla Grande. Motor. Potencias Activa (P) y Reactiva (Q), Tensión (V), Corriente (I), Resbalamiento (S) y Torque (T).

En **FIGURA 3** se presenta la evolución temporal de las variables del generador, la tensión de bornes, la tensión de excitación, y las potencias reactiva y activa entregadas por el generador.

En **FIGURA 4** se presenta un detalle de los primeros instantes.

Ante la aparición del cortocircuito (1 s) la tensión del generador desciende hasta 0.33 pu, recuperándose a 0.55 pu al quedar conformada la isla (1.3 s).

El regulador de tensión llega al techo, aunque dado que la excitación se alimenta de la tensión del generador, la tensión de campo solo sube hasta aproximadamente 4 pu al quedar conformada la isla.

El regulador de tensión quedará en el techo hasta aproximadamente 5.5 s, y la tensión de campo seguirá a la del generador en este período.

Al momento de formación de la isla, esta limitada tensión de campo hace que la potencia reactiva del generador crezca sólo hasta 95 MVar.

Sin embargo el reactivo generado es suficiente para comenzar a aumentar lentamente la tensión del generador, con lo cual crece la tensión de campo y el reactivo

entregado.

Este proceso de realimentación positiva continua hasta los 5.5 s aproximadamente donde la tensión del generador se ha recuperado a 0.95 p.u., la tensión de campo alcanza 6 p.u. y el reactivo alcanza a 265 MVar.

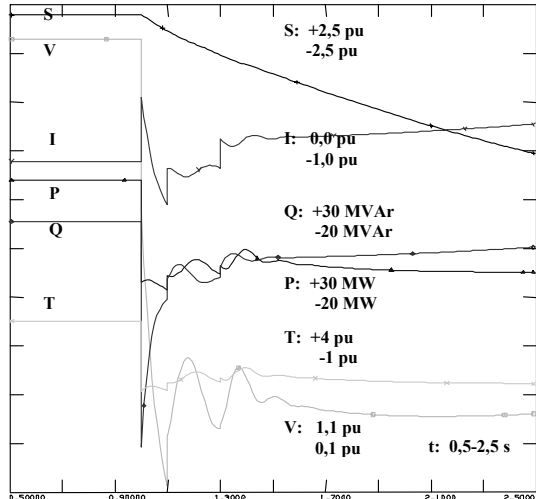
En **FIGURA 5** se presenta la respuesta de tensión, potencia activa y reactiva, resbalamiento, torque eléctrico y corriente, de uno de los motores equivalentes de 14 MVA, constituyentes de la carga de la Petroquímica.

En **FIGURA 6** se presenta un detalle de los primeros instantes.

Al producirse el cortocircuito (1s) la tensión en bornes del motor cae instantáneamente de 1p.u. a 0.66 p.u., para luego continuar descendiendo.

Como inicialmente la f.e.m. interna no varía, se produce un importante aumento de la corriente tomada por el motor, que constituye su contribución al cortocircuito.

Este aumento de corriente decae con la constante de tiempo del motor tendiendo a un valor inferior al original.



**FIGURA 6:** Isla Grande. Motor. Potencias Activa (P) y Reactiva (Q), Tensión (V), Corriente (I), Resbalamiento (S) y Torque (T).

Al inicio del corto circuito las potencias activa y reactiva disminuyen bruscamente, y la reactiva en particular se recupera parcialmente a medida que disminuye la corriente.

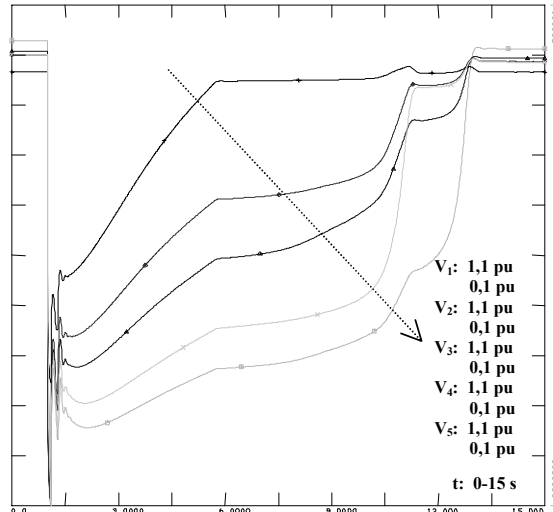
Al liberarse el cortocircuito (1.1 s) se produce una pequeña recuperación de la tensión desde 0.1 p.u., oscilando en torno de 0.3 p.u. (está presente la carga de toda el área) hasta la formación de la isla. En este período la corriente queda en un 80% del valor inicial.

Al formarse la isla (1.3 s) se produce un aumento de la corriente hasta un valor del orden de 1.2 veces el valor inicial, las potencias activas y reactivas se estabilizan en un entorno de 3.5 MVA hasta los 1.6 s.

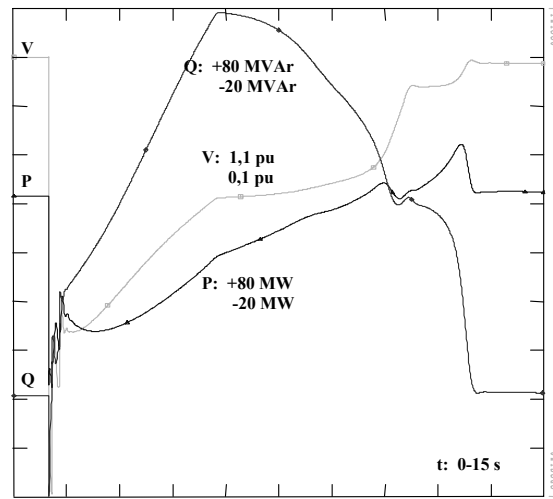
Durante este tiempo la cupla eléctrica entregada disminuye de los 0.75 iniciales prácticamente a 0,15 p.u..

Como consecuencia la velocidad del motor comienza a disminuir en forma de rampa con una pendiente inicial de aproximadamente 30%/s.

El motor continúa disminuyendo su velocidad, hasta alcanzar un mínimo de 0.5 p.u. a los 7s.



**FIGURA 7:** Isla Grande. Tensiones en 11,5 kV (V<sub>1</sub>), 132 kV (V<sub>2</sub>), 33 kV (V<sub>3</sub>), 13,2 kV (V<sub>4</sub>) y 2, 3 kV (V<sub>5</sub>).



**FIGURA 8:** Isla Grande. Demandas Activa (P) y Reactiva (Q) y Tensión en 132 kV (V) de Petroquímica.

El torque resistente disminuye con el cuadrado de la velocidad, por lo tanto en este tiempo de 7 s iguala a la cupla eléctrica del motor y comienza a reaccelerarse.

En **FIGURA 7** se muestran la evolución de las tensiones: en las barras de: 11,5 kV de generación, de 132 kV de interconexión del generador y la Petroquímica; de 33 kV interna de la Petroquímica; de 13,2 kV sobre un motor de las otras industrias y de 2,3 kV del motor antes analizado. Cuanto más lejana es la barra analizada con respecto a la del generador, mayor es su caída de tensión y menor su velocidad de recuperación.

En los motores del resto de las industrias, la caída de tensión en sus bornes es algo menor y por lo tanto terminan su reacceleración antes que los motores de la Petroquímica.

Este comportamiento se aprecia en la brusca recuperación de su tensión que se corresponde con la reducción de la corriente y el reactivo demandado por el conjunto de esos motores a los 11s.

En **FIGURA 8** se presentan la tensión de la barra de 132 kV donde se conecta el generador y la Petroquímica y las potencias activas y reactivas demandadas por la carga de la Petroquímica.

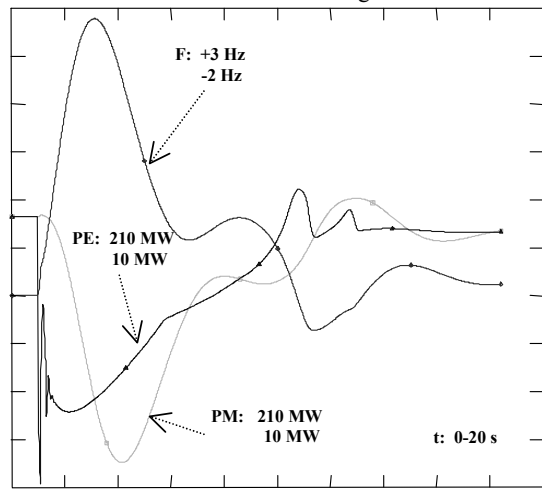
Se aprecia un gran aumento transitorio del reactivo demandado.

La reducción de la demanda de reactivo de los motores del resto de la carga a los 11 s, permite aumentar más rápidamente las tensiones.

Este comportamiento hace más rápido el proceso de reacceleración de los motores de la petroquímica, el que culmina en 12,5 s aproximadamente como se aprecia en **FIGURA 5**.

Por último en **FIGURA 9** se presenta la potencia activa entregada por el generador, la mecánica aportada por la turbina y la frecuencia resultante. Entre 1s y 3s la potencia eléctrica es menor que la mecánica y por lo tanto la frecuencia sube alcanzando los 52.9 Hz.

Entre 3 s y 12 s la potencia eléctrica es mayor que la mecánica y por lo tanto la frecuencia disminuye alcanzando los 49.4 Hz tendiendo luego a normalizarse.



**FIGURA 9:** Isla Grande. Generador. Frecuencia (F) y Potencia Eléctrica (PE) y Mecánica (PM).

A partir de que todos los motores fueron reaccelerados se retorna a los valores normales de las variables del generador.

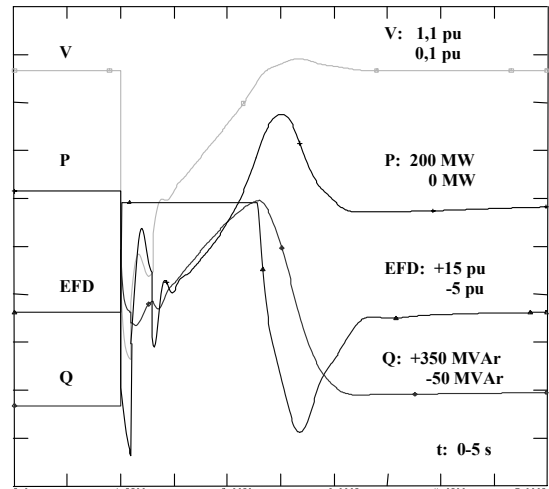
El análisis de funcionamiento anterior sirve para describir cual sería la evolución teórica, ya que si bien en la simulación se alcanza un estado estacionario final estable, el transitorio presenta una serie de características que lo harían inviable.

En primer lugar la velocidad de los motores de la Petroquímica desciende hasta cerca del 50% de su valor nominal, lo que resulta inadmisibles para los procesos a los cuales están afectados. En segundo lugar durante el transcurso del transitorio se han alcanzado los valores de actuación de casi todas las protecciones del generador:

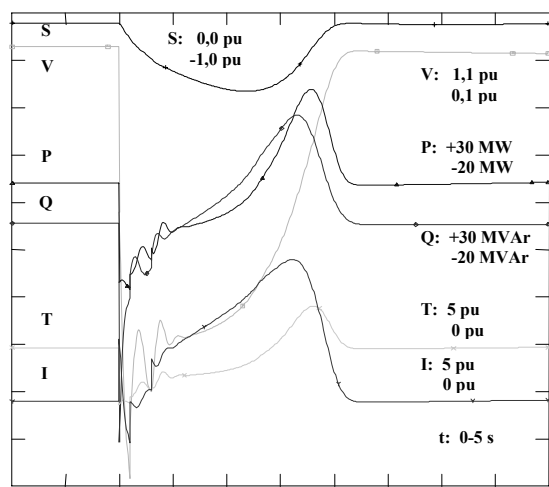
Un segundo después de iniciado el cortocircuito la frecuencia supera a los 52Hz, lo que haría actuar la protección de sobrevelocidad.

A partir de 1.4 s de iniciado el cortocircuito y durante 10 s, la corriente estática del generador permanece por

encima de 1.2 p.u. y por lo tanto haría actuar la protección de sobrecorriente.



**FIGURA 10:** Isla Grande. Generador. Tensiones Terminal (V) y de Campo (EFD) y Potencias Activa (P) y Reactiva (Q).



**FIGURA 11:** Isla Grande. Motor. Potencias Activa (P) y Reactiva (Q), Tensión (V), Corriente (I), Resbalamiento (S) y Torque (T).

El excesivo consumo transitorio de reactivo en la Petroquímica probablemente haría actuar protecciones de sobrecorriente en los transformadores de la propia planta.

Por último los motores quedan con una tensión del orden de 0.3 p.u. por varios segundos.

En algunos de ellos podrían existir contactores o protecciones que los desconecten en esta condición.

## 6. SIMULACIÓN DE LA ISLA GRANDE CON LA EXCITACIÓN FIRME

Dado que el colapso del caso anteriormente analizado es consecuencia de que el sistema de excitación no es capaz de entregar el reactivo necesario por tomar la alimentación del puente rectificador controlado de la propia tensión de bornes del generador, se analiza a continuación el mismo caso pero alimentando el puente de la excitación desde una tensión firme (p. e. generada por un generador independiente).

En **FIGURA 10** se presentan las mismas variables (del

generador) que en **FIGURA 3**.

Se observa que una vez producido el cortocircuito, la tensión de campo alcanza el techo de 6,8 p.u.

Este crecimiento produce un aumento mucho más rápido del reactivo entregado y por lo tanto es mucho más rápida la recuperación de la tensión.

La duración del transitorio se reduce en 6 veces aproximadamente.

En **FIGURA 11** se presentan las mismas variables (un motor de la Petroquímica) que en **FIGURA 5**.

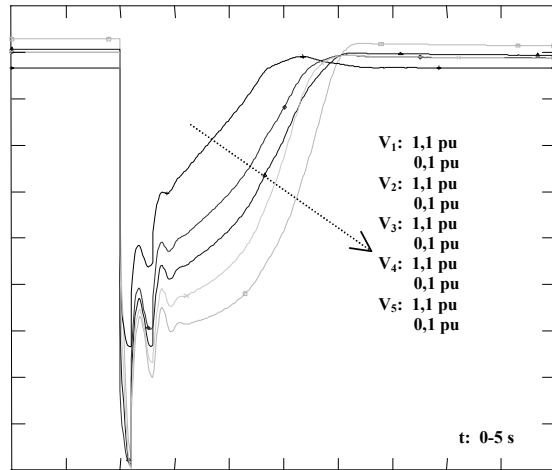
A partir de que se forma la isla (1.3 s), todas las variables del motor se recuperan mucho más rápidamente que en el caso anterior.

La velocidad del motor cae solo un 15% y recupera su velocidad normal 2s después de iniciado el cortocircuito.

En **FIGURA 12** se presentan las mismas tensiones que en **FIGURA 7**, observándose una más rápida recuperación.

En **FIGURA 13** se presentan las mismas variables que en **FIGURA 8**.

También se advierte una gran reducción en el tiempo en que se alcanza la operación normal y una menor demanda máxima de reactivo.



**FIGURA 12:** Isla Grande. Tensiones en 11,5 kV ( $V_1$ ), 132 kV ( $V_2$ ), 33 kV ( $V_3$ ), 13,2 kV ( $V_4$ ) y 2, 3 kV ( $V_5$ ).

Por último en **FIGURA 14** se presentan las mismas variables que en **FIGURA 9** (frecuencia y potencias eléctrica y mecánica del generador).

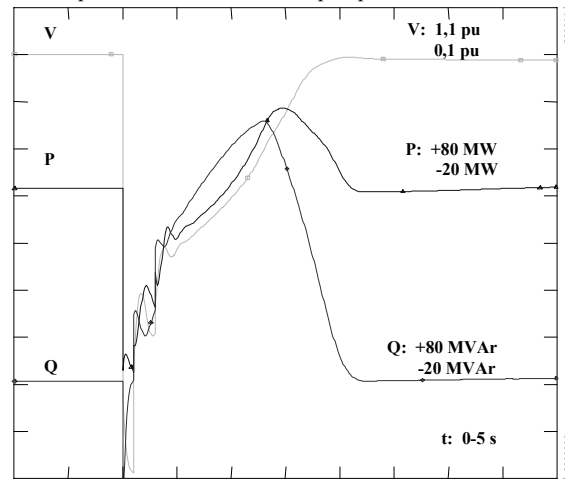
Se advierte una mucho menor excursión de las potencias eléctrica y mecánica del generador. La frecuencia alcanza un pico de aproximadamente 51 Hz. En este caso no se alcanzan los niveles de disparo de las protecciones del generador, que sí actuarían en el caso anterior.

La perturbación, consistente en una reducción máxima en la velocidad del 15% en los motores de la petroquímica durante aproximadamente dos segundos, resulta admisible para los procesos a los cuales están afectados.

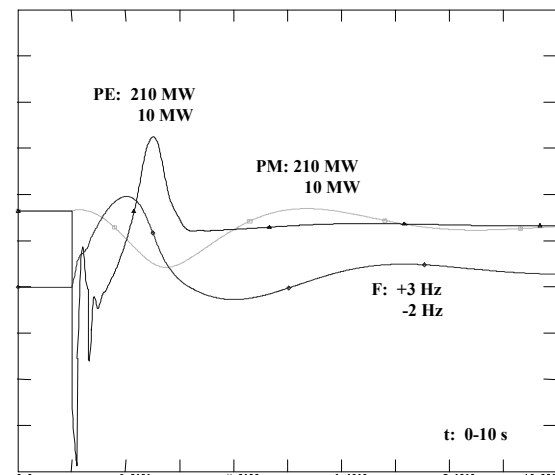
Por último los motores quedan con una tensión por debajo de 0.7 p.u. durante un tiempo cercano a 1.7s desde el inicio del cortocircuito.

Si no estuvieran presentes contactores o protecciones de los motores que los desconecten para estas condiciones, el transitorio simulado describiría la evolución del sistema.

De existir algunos contactores o protecciones que actúen en tiempos menores, su actuación produciría un alivio de carga que actuaría en el sentido de disminuir los tiempos de recuperación de los motores que quedan conectados.



**FIGURA 13:** Isla Grande. Demandas Activa (P) y Reactiva (Q) y Tensión en 132 kV (V) de Petroquímica.



**FIGURA 14:** Isla Grande. Frecuencia (F) y Potencias Eléctrica (PE) y Mecánica (PM) en el generador

Estos dispositivos, si los hubiera, no deberían estar sobre las cargas prioritarias.

## 7. CONCLUSIONES

- El primer paso para la formación exitosa de islas en un sistema eléctrico consiste en delimitar el área que abarcará, teniendo presente que siempre debe quedar un exceso de capacidad de generación. Los mecanismos de formación de islas eléctricas deben ser robustos y adecuados para todos los niveles de carga posibles (pico y valle).
- Los posibles flujos de carga (estados estacionarios) previos y posteriores a la formación de la isla no aseguran que la formación sea exitosa. Durante el transitorio pueden alcanzarse niveles de actuación de diversas protecciones. Para el adecuado modelado dinámico resulta de vital importancia el modelo de la carga y de los sistemas de control.

- Para islas con un marcado exceso de generación al momento de su formación, las protecciones más comprometidas son las de sobrevelocidad, resultando remota la posibilidad de actuación de protecciones de sobrecarga.
- Para islas relativamente equilibradas, es probable la actuación de protecciones de sobrecarga debiendo verificarse que no actúen durante el proceso de formación de la isla.
- En particular la presencia de una alta proporción de motores de inducción en la carga, producirá en el transitorio de formación de la isla, sobretodo si el origen es un cortocircuito, una demanda de reactivo importante para la reaceleración de los motores. En estos casos la capacidad de entregar reactivo de la generación resulta fundamental para la exitosa formación de la isla.