

LA OPTIMIZACIÓN MEDIANTE ALGORITMOS GENÉTICOS DEL PROCESO DE DESLASTRE Y REPOSICIÓN DE CARGA

La satisfacción de los consumidores de electricidad está muy correlacionada con las frecuencias de las interrupciones del suministro de energía eléctrica y con la duración de las mismas.

Actualmente los deslastres de potencia, entendiéndolos como el conjunto de cortes de suministro de energía eléctrica en ciertas zonas por causa de fallos imprevistos en el sistema eléctrico, se realizan con relés de subfrecuencia mediante criterios de cortes fijos.

Este proyecto de investigación propone nuevas pautas de actuación para deslastrear y reponer, enmarcadas de forma no tan rígida y acorde al estado del sistema en cada momento.

The satisfaction of the consumers of electricity is highly correlated to the frequencies of the interruptions of the electric energy supply and to their duration. At present, the automatic load shedding is achieved using relays of subfrequency. These relays detect the beginning of the system frequency decay, and shed a certain quantity of the load, until the generation and the load re-establish a new equilibrium and the system can return to its normal frequency of operation. This research project proposes new guidelines to load shedding and reloading, considered in a more flexible way and in agreement with the state of the system at each moment.

PRESENTACIÓN

Se proponen nuevas pautas de actuación para minimizar la carga fuera de servicio ante incidencias en un sistema eléctrico aislado que derivan en pérdidas de generación.

INTRODUCCIÓN

A consecuencia de un defecto en uno de los elementos del sistema, actúan los dispositivos de protección aislando el mismo, produciéndose así en la mayoría de los casos, un desequilibrio en el balance carga-generación, causando variaciones de los parámetros eléctricos de la red que pueden sobrepasar los límites admitidos.

En un sistema eléctrico de potencia, pueden ocurrir gran número de escenarios distintos por posibles defectos en cada uno de sus elementos y a su vez, cada uno de estos defectos depende de la topología de la red en ese momento, de la carga-generación en cada instante

y de los grupos generadores de potencia que estén acoplados.

Actualmente los deslastres de potencia, entendiéndolos como el conjunto de cortes de suministro de energía eléctrica en ciertas zonas a causa de fallos imprevistos en el sistema eléctrico, se realizan con relés de frecuencia mediante criterios de cortes fijos (proceso automático en el que no interviene el operador). No obstante, al ser las cargas variables a lo largo del día (curva de carga) y dependiendo del momento en que suceda la incidencia y del grupo disparado, este modo de deslastre puede incurrir en ser excesivo en muchas situaciones.

Las pautas (decisiones) de actuación para deslastrear se pueden elaborar a través de procedimientos no tan deterministas o rígidos, de forma automática pero no fija, y acorde al estado del sistema en el momento de ejecutar las decisiones. Por ello, se ha elaborado una metodología y su implementación teniendo en cuenta las múltiples combi-

**Miguel Martínez
Melgarejo**

**Gabriel Winter
Althaus**

**Bernardino Martín
del Toro**

**Blas Galván
González**

**Pedro Cuesta
Moreno**

**Jesús Abderraman
Marrero**

naciones posibles de minimizar la carga fuera de servicio, teniendo presente la reserva rodante disponible y los grupos con disponibilidad de acoplamiento, y siempre sujeto a verificarse las restricciones operativas que deben ser consideradas para asegurar la calidad del servicio. Esto ha sido posible con los algoritmos genéticos, no ha sido tarea inmediata o fácil, pero se ha conseguido con éxito.

Por otra parte, los operadores del sistema eléctrico necesitan restablecer el servicio en las áreas cortadas de suministro eléctrico considerando prioridades, y minimizando los tiempos de corte, cuestión que también se aborda en este proyecto con los algoritmos genéticos, atendiendo a las múltiples combinaciones posibles que definan la mejor secuencia de reposición, y sujeta a los márgenes reales de capacidad de suministro.

Para ello se ha elaborado un proceso automatizado de toma de decisiones dotado de inteligencia artificial suministrada por dos algoritmos genéticos (métodos estocásticos dinámicos de estados convergiendo a las soluciones óptimas globales), uno para cada problema descrito anteriormente, insertados en los códigos informáticos GENET1 y GENET2 [25] con copyright del CEANI, y a utilizarse en el contexto de la elaboración de este proyecto de investigación demostrativo.

PLANTEAMIENTO

Puesto que los problemas de deslastre y de reposición son problemas de optimización con restricciones y de naturaleza altamente combinatoria, con múltiples óptimos locales, es preciso utilizar para resolverlos apropiadamente métodos estocásticos de búsqueda y optimización global como lo son los algoritmos genéticos, los cuales son robustos y muy eficientes en la exploración y búsqueda en espacios con gran número de posibles soluciones. La adaptación de los algoritmos genéticos, para la obtención de las soluciones óptimas globales o estrechamente cercanas a

éstas en los problemas de deslastre y reposición, nos permitirá mejorar los procedimientos simplificados actuales usados.

El programa informático que ha sido diseñado e implementado en ordenador permite distinción de categorías o preferencias para el deslastre de carga dependiendo de la potencia real total a deslstrar, de forma que ante incidencias de menor entidad se excluya del deslastre aquella carga que se considera clasificada como perteneciente a suministros prioritarios. Así se han establecido cinco posibles grupos o categorías para el sistema eléctrico de la compañía Unión Eléctrica de Canarias I (Unelco) en la isla de Gran Canaria.

El proceso inverso, que también se acomete en este proyecto de investigación aplicada, corresponde a establecer la secuencia óptima de conexión de cargas al sistema, conforme a las curvas de aceptación de los grupos conectados a la red en cada instante del proceso. Éste es un problema puramente combinatorio y cuya solución será la mejor actuación de la secuencia de funcionamiento de los grupos.

ESTADO DE ANÁLISIS EN PRE-FALLO

En este estado, al ordenador central llega toda la información de las cargas de las líneas de media tensión y de los grupos conectados con su reserva rodante disponible. Con esta información se evalúan las posibles hipótesis de fallos de grupos generadores, y en función de éstos son analizados qué desequilibrios de potencia activa y reactiva se van a producir en barras de generación (considerando las pérdidas de la red) cuando se produzca el disparo de un grupo generador de potencia eléctrica, y así determinar qué deslastre se debe acometer y en dónde hay que realizarlo.

Ante una incidencia y con la implementación de los programas de Flujo de Cargas, se elabora una decisión candi-

Actualmente los deslastes de potencia se realizan con relés de frecuencia mediante criterios de cortes fijos (proceso automático en el que no interviene el operador).

data a ser la de mejor actuación (contemplando la reserva rodante, etc.), aceptándose su mantenimiento en la población de las mejores soluciones caso de que los parámetros en toda la red se hayan mantenido dentro de sus adecuados márgenes. En tales casos se le asignan una puntuación premiando a las mejores decisiones, y en la medida en que éstas sean mejores respecto a las demás entre un conjunto o población de soluciones que dinámicamente evolucionan de forma rápida convergiendo con optimalidad global.

La configuración normal de carga y su cambio, y la adecuación de la generación de los grupos a ésta, es pues seguida y controlada pero no intervenida por el ordenador, actuando en función de las variaciones de la carga, de acuerdo a la gravedad de repercusión de la respuesta de los generadores, y sí conforme a los datos de que se dispone se va a ser capaz de responder adecuadamente a los requisitos que les estamos imponiendo.

VARIACIONES DE LA FRECUENCIA. CONTROL DE LA GENERACIÓN

Un aspecto determinante en el análisis del proceso de la incidencia en el sistema, es el efecto que tiene en la frecuencia el desplazamiento de la característica propia de generación o de carga ante una perturbación, y cómo determinará la reserva rodante de los grupos el efecto y la secuencia del deslastre de carga y la lógica posterior reposición de la misma.

Las curvas características de carga y generación de un grupo o sistema, tienen unas pendientes como las indicadas en el gráfico adjunto (Figura 1). Partiendo de unas condiciones de equilibrio "1", ante un supuesto cambio en la demanda total $P_{demanda}$, corresponderá un cambio en la carga característica y el punto de equilibrio inicial se moverá de "1" a "2".

El incremento en la carga del sistema es compensado de dos formas.

Primeramente, mediante un incremento de la generación de las turbinas, mostrado por un PT, y en segundo lugar, mediante la reducción de la demanda de las cargas del sistema PL desde la que se requiere en el punto "3" a la requerida en el punto "2".

El nuevo valor de la frecuencia en el sistema f_2 es mas bajo que el anterior f_1 . Acorde al dibujo, y en orden a retornar a la frecuencia inicial, la característica de generación debe ser trasladada a una posición mostrada en puntos suspensivos. Tal cambio se puede llevar a cabo mediante un cambio en el ajuste de la P_{de} (potencia de referencia) del sistema de gobierno de la turbina.

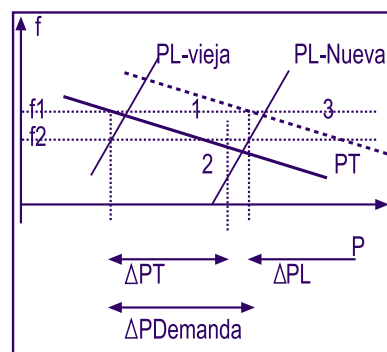


Figura 1

La frecuencia de operación del sistema se determina por el punto de intersección entre estas dos características, la característica típica de la generación y la de la carga.

Ante una pérdida de una unidad generadora (Figura 2), la característica de generación del sistema PT se mueve a la izquierda por el valor de la potencia perdida P_0 . Antes de que la perturbación ocurra, el sistema opera en el punto "1" correspondiente a la intersección de PL y PT-. Después de que el generador es desconectado, la frecuencia inicialmente permanece inalterable, y el punto de operación de generación se desplazará al punto "2". Entonces, la generación tiende al punto III, el cual corresponde a la intersección de PL y PT+.

Al ser el deslastre una medida de control algo drástica, generalmente es implementada en estadios de diferentes niveles de frecuencias, para permitir así deslastar la menor cantidad posible.

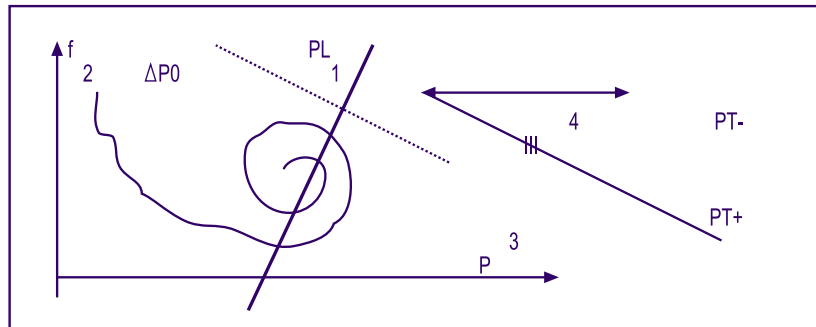


Figura 2

Muchos sistemas de potencia pueden protegerse de un colapso de frecuencia, mediante la importación de grandes cantidades de potencia desde los sistemas cercanos para reconciliarse con la generación perdida. Sin embargo, en un sistema aislado esto no va a ser posible y la única forma para prevenir un colapso de frecuencia siguiente a una gran perturbación es aplicar un deslastre automático.

El deslastre automático de carga tal y como se comentó, es implementado usando relés de frecuencia. Estos relés detectan el comienzo del decaimiento de la frecuencia del sistema, y sueltan una determinada cantidad de la carga, hasta que la generación y la carga estén otra vez en equilibrio y la potencia del sistema puede retornar a su normal frecuencia de operación.

Al ser el deslastre una medida de control algo drástica, generalmente es

implementada en estadios de diferentes niveles de frecuencias, para permitir así deslastar la menor cantidad posible.

La Figura 3 muestra, el efecto del deslastre cuando aparece un desequilibrio P0 en el sistema con baja reserva rodante. Sin carga que deslastar, el sistema podría sufrir un colapso de frecuencia.

La Figura 4 muestra un ejemplo de cómo las variaciones de frecuencia dependen del valor del coeficiente de la reserva rodante. En los dos primeros casos (1,2), con una valor de “r” (reserva rodante) 14% , la frecuencia vuelve a su valor de referencia, gracias a la operación del control primario (mediante los sistemas de gobierno de la turbina) y del control secundario (mediante el regulador central). El tercer y cuarto caso (3), (4), corresponde a un colapso de frecuencia, donde no hay punto de intersección

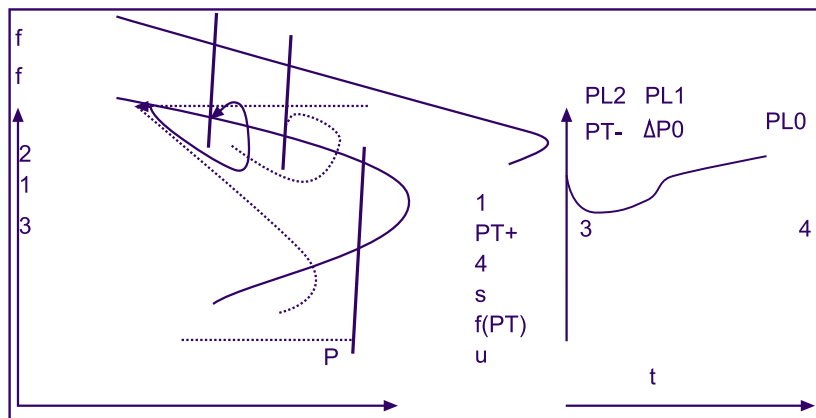


Figura 3

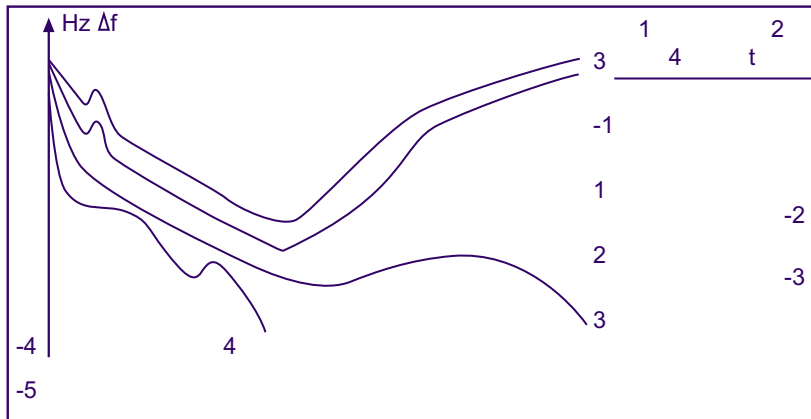


Figura 4

entre las características de generación y carga.

ÁREA DE CONTROL

El control frecuencia - Potencia se mejora colectivamente, mediante un esfuerzo al unisono de todas las unidades generadoras incluidas en un mismo área. La sobreenergación de potencia será absorbida por el sistema de tres formas:

1.-Incrementando la energía cinética de área $W_{cin,i}$ en la proporción $(d/dt)W_{cin,i}$.

2.-Mediante un incremento del consumo de potencia. Todas las cargas típicas (debido a la predominancia en éstas de las cargas tipo motor) sufren un incremento $D=PD/f$ MW/Hz con las variaciones de la velocidad o frecuencia. Este incremento D se halla empíricamente.

3.-En caso de tener áreas cercanas (caso que no es el nuestro), incrementando la potencia exportada $P_{tie,i}$ Mw.

Considerando el caso de un sistema sin control, (con $PC=0$, que significa que no se ha alterado la posición del acelerador o cambiador de velocidad o lo que es lo mismo, no actúa PC para coger cambios) en los instantes iniciales, la demanda adicional total se obtiene a partir de la energía cinética almacenada, que se desprende mediante una reducción de velocidad. Puesto que la

velocidad cae, la válvula del generador se abre y la salida del generador aumenta también, puesto que la velocidad cae con la carga inicial al decrecer ésta a razón de D (MW/Hz).

Debido a la aparición en escena de esta potencia "liberada" necesitamos generar menos potencia.

En resumen, el incremento viene: de la energía cinética prestada por el sistema, del incremento de la generación y finalmente, de la carga liberada por los consumidores.

Si consideramos un sistema con control, con regulación secundaria, lo que buscamos es que el error en la frecuencia sea cero. Aquí, K_i (ganancia o amplitud del integrador) influye en la velocidad de respuesta del lazo.

ESCALONES DE DESLASTRE. EFECTO EN LA FRECUENCIA

En un primer instante, si no consideramos regulación primaria ni secundaria, al producirse un desequilibrio, el sistema funciona pero la generación es inferior a la demanda, y este equilibrio es posible porque al disminuir la generación disminuye la frecuencia y consiguientemente disminuye la carga.

El desequilibrio entre la generación y la carga inicial, está compuesta de

una componente de la variación de la energía cinética de los generadores y otro de la variación de la carga función de la disminución de la frecuencia.

Para el cálculo de la potencia inicial en cada uno de los tramos, tendremos que ir actualizando sus valores base en cada uno de los escalones de deslastre. Se efectuará, por consiguiente, un análisis incremental por tramos, que se hará coincidir con los puntos de deslastre. Se detendrá el cálculo cuando se alcance la frecuencia de disparo del siguiente escalón, determinándose el tiempo "t" en que esto ocurre.

En nuestro caso consideraremos el efecto de los generadores, tanto sin regulación, como con regulación primaria, como con la posibilidad de regulación secundaria. a través del control integral.

PLANTEAMIENTO PARA EL MODELADO

El planteamiento respecto a la respuesta de los grupos restantes que queden en red cuando se produce una pérdida de uno de ellos, va a ser el considerar una generación concentrada en una unidad generadora, de potencia nominal igual a la suma de las diversas unidades individuales.

Inicialmente, son iguales las potencias generadas y de carga, siendo la frecuencia la nominal del sistema. Se supone la pérdida de una parte de la producción y se representa la variación temporal de la frecuencia, en varios supuestos de deslastre de cargas en función de la frecuencia.

Asimismo, se dará opción a analizar las variantes con diferentes coeficientes de variación de la carga en función de la frecuencia y distintas constantes de inercia.

ALGORITMOS GENÉTICOS PARA OBTENER DECISIONES GLOBALES ÓPTIMAS EN LOS PROCESOS DE DESLASTRE Y REPOSICIÓN DE CARGA E IMPLEMENTACIÓN

Los algoritmos genéticos (AGs) surgen inspirados en el fenómeno evolutivo y selectivo, sucediendo en una dinámica de poblaciones y ciertas propiedades de los sistemas biológicos: la capacidad de autorreplicación de los ácidos nucleicos transmitiendo información genética entre generaciones, la mutación aumentando la diversidad, la competición de seres vivos por recursos limitados del entorno. Si bien esto sucede en nuestro planeta desde hace 3500 millones de años, fue en 1944 cuando Oswald Avery y colaboradores conjeturaron que el soporte físico de la información genética transmitida entre generaciones es una molécula de ADN. Es en 1975 cuando John Holland pone en escena los algoritmos genéticos.

Entre las capacidades de los algoritmos genéticos (AGs) en optimización, podemos destacar las siguientes:

- Son métodos iterativos que convergen a partir de un conjunto inicial y arbitrario de puntos del espacio de búsqueda.
- La convergencia no está condicionada por requisitos de continuidad o diferenciabilidad del funcional a maximizar o minimizar.
- En su convergencia al óptimo global escapan de la atracción de múltiples óptimos locales.
- Son aplicables y eficientes en la optimización multicriterio.

A partir de una población inicial de "n" cromosomas generados aleatoriamente, se forma en cada iteración "t" del algoritmo una población de igual tamaño, $P(t+1)$, aplicando las denominadas operaciones de selección, cruce y mutación a la población obtenida en la iteración anterior, $P(t)$.

La selección genera una población intermedia $P'(t)$ que serán los individuos aptos para dar descendencia, con la asignación para cada individuo de $P(t)$ de una probabilidad a ser seleccionado, llamada probabilidad de selección, al imponerse que la población $P'(t)$ y la población $P(t)$ son de igual tamaño " n ", entonces implicará que no forman parte en $P'(t)$ los individuos de menor aptitud (candidatos de soluciones o decisiones finales de actuación en nuestro problema), existiendo por otro lado copias o duplicados de los mejores cromosomas. El número esperado de duplicados en $P'(t)$ de un cromosoma es $n \cdot s = np_s$ ($s \ll 1$)

A los elementos de $P'(t)$, les aplicamos el operador cruce de un punto: con probabilidad "X" son elegidos aleatoriamente mediante distribución uniforme, los individuos a cruzarse, intercambiándose en cada pareja los bits a partir de una posición de corte aleatoria, dando nuevos individuos que sustituyen a sus progenitores.

A la población resultante, les aplicamos mutación: con probabilidad " μ ", aleatoriamente y distribución uniforme, cada bit $a_1, a_2, \dots, a_j, \dots, a_n$ es sujeto a cambiar su valor por otro del alfabeto $S = \{0, 1\}$, es decir de 1 a 0 o viceversa.

CODIFICACIÓN ELEGIDA

Inicialmente, en cuanto a los aspectos de control y definición de escalones, se ha procedido a desarrollar un modelo con variables reales. Nuestro individuo en cuestión tiene $2 \cdot n$ variables, siendo "n" el número de escalones teóricos máximo a considerar.

En este caso, este vector tiene dos partes bien diferenciadas, una primera que corresponde a los valores sucesivos del valor de la frecuencia en que se activará el deslástre de carga del sistema, y una segunda parte con igual número de variables que corresponden a los sucesivos paquetes de deslástre que se activarán a las frecuencias indicadas.

La generación de las variables de los individuos de la población es totalmente aleatoria, delimitada en la primera parte por un valor máximo de la frecuencia, el nominal, y un valor mínimo determinado por las características mecánicas de los generadores del sistema. La segunda parte del vector son proporciones de carga generadas en base a la referencia de la potencia desconectada por el grupo generador. La sumatoria de las potencias de la segunda parte del individuo nunca podrá sobrepasar la potencia desconectada.

Una vez definida la potencia a deslástre, se entra en la fase de definición de qué interruptores actuarán. Aquí se ha empleado, por ser la forma más natural adaptada al problema del deslástre, la codificación usual binaria en la que cada alelo de los genes de un cromosoma es referido a los estados de los interruptores (1/0), así, constituyendo el cromosoma "o" una posible solución el conjunto de los estados de todas las líneas y baterías de condensadores del sistema en análisis.

Finalmente, se ha optado por una codificación con números reales en el proceso de optimización del problema de la reposición, a fin de adaptarse la secuencia de reposición a la curva típica de aceptación de cargas de los grupos generadores de potencia.

EVALUACIÓN DEL SISTEMA

En cada iteración del algoritmo genético, como se ha visto anteriormente se necesita identificar los cromosomas o soluciones candidatas las cuales tienen mejores valores de la función aptitud, por ello es necesario diseñar dicha función de evaluación de la aptitud en consonancia al objetivo del problema de optimización

El objetivo del programa en la primera etapa será aquella configuración que minimizando la carga a deslástre, la curva de la secuencia de la frecuencia en función del tiempo en ningún caso descienda por debajo de un valor mínimo que garantiza la estabilidad del sistema,

y a su vez su recuperación sea tal que antes de un determinado tiempo el valor de la frecuencia se encuentre dentro de una estipulada franja de garantía.

Para la determinación del valor, que nos acerque a nuestra función objetivo, sustituiremos sucesivamente los valores de las frecuencias y cargas a deslazar en nuestra ecuación de evolución de la frecuencia en función del tiempo, actualizando en cada una de las etapas los valores de carga del sistema, ya que la carga en cada etapa aunque se considere constante no lo será, cambiando por la propia variación de la frecuencia. Así pues actualizaremos por un lado la carga conectada en red y por otro los sucesivos escalones de deslazar que estamos desconectando en cada etapa.

La población en análisis tendrá una valoración proporcional al acercamiento a la función objetivo, que no es otro que el mínimo deslazar.

Una vez determinada la potencia que hay que deslazar, en este proceso, las distintas combinaciones darán como resultado propuestas de soluciones, siendo cada una de ellas el conjunto de líneas o baterías de condensadores a poner fuera de servicio, cuya suma de potencias aparentes condicionada por la separación al punto consigna obtenido en la primera fase, y contemplando las pérdidas en el transporte, determinará la aproximación a la diferencia entre la potencia indicada en la primera parte de programa y la obtenida.

En el proceso de reposición, esta evaluación se realizará a partir de una curva definida de aceptación de carga de los grupos a acoplar. A partir de aquí, cada cromosoma indicará una secuencia de acople de las líneas, siendo la evaluación del sistema, la suma de los errores diferencia entre el valor ideal definido en ese punto de la curva del grupo y la suma de las cargas de las líneas que son introducidas secuencialmente en el sistema en cada instante.

OPERACIONES GENÉTICAS

Entre las operaciones genéticas adicionales al Algoritmo Genético Simple implementadas en el programa informático desarrollado e implementado en ordenador se ha considerado oportunamente:

- Sistemas supervivientes entre generaciones (Elitismo)

Esta técnica se basa en la supervivencia segura a la siguiente generación (con probabilidad uno) de un grupo constituido por los cromosomas con mejores aptitudes, sin alterar sus valores de las variables de control. Esto tiene como consecuencia que puedan tener más oportunidad de producir descendencia a lo largo de varias generaciones consecutivas los mejores entre un grupo de los mejores cromosomas por un lado, y por otro, eliminar la posibilidad de que modificados éstos y sus duplicados a resulta del cruce genético o/y posible mutación a sufrir sean sustituidos por descendientes peores que esos progenitores de elite.

- Selección por torneo: Se ha considerado un muy eficiente proceso de selección, el cual se basa en elegir aleatoriamente un número de individuos (generalmente alrededor de cinco) de la población $P(t)$, el mejor individuo de este grupo a resulta de la competición o torneo entre ellos es el ganador del torneo y pasa a pertenecer a la población intermedia. Se realizan tantos torneos del mismo modo, hasta completar la población intermedia $P'(t)$.

Este sistema de selección tiene la gran ventaja de que es paralelizable y por tanto la selección puede hacerse de modo distribuido entre distintos ordenadores, facilitando la paralelización del algoritmo genético también en su conjunto. Este ítem es transcendental en la utilización de los algoritmos genéticos para la toma de decisiones en tiempo real.

La selección se ha realizado con un número de copias que es proporcional al valor de la función objetivo.

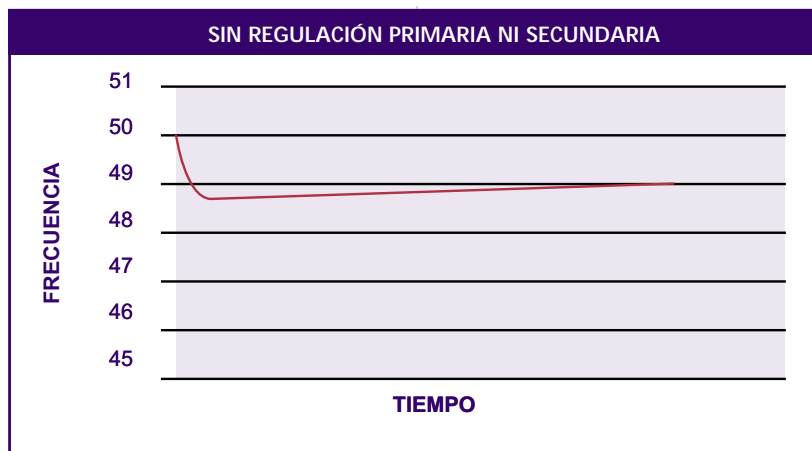


Figura 6

do no aplicamos ningún tipo de deslastre (Figura 5). En este caso, el nuevo punto de equilibrio se establecerá cuando la curva del consumo en función de la frecuencia se equilibre con el nuevo valor de la generación.

Así pues, vista la evolución "natural" del sistema en caso de no intervenir, el programa plantea tres posibles estados, en primer lugar sin regulación pero deslastrando carga para no alcanzar el mínimo de funcionamiento del sistema (Figura 6), en segundo lugar con regulación primaria y finalmente con regulación primaria y secundaria.

El individuo, está constituido por 24 variables, las doce primeras son los valores de los deslastres en cada escalón, y los doce siguientes las frecuencias en las que aplicar los mismos.

Hay que indicar que en todos los casos una solución se da por buena cuando cumpla dos requisitos: que la frecuencia nunca descienda por debajo de 48 Hz, y que alcance de forma estable los 49 Hz antes de 10 segundos. Cuando una solución cumpla esas condiciones, la evaluación se realizará en base a aquella que deslastre los menos posible.

Si buscamos una solución al mismo problema en un sistema que disponga de cierta flexibilidad marcada por una curva de funcionamiento de la evolución de la generación en distintos puntos en función de la frecuencia, el sistema de forma natural convergerá ante un disparo de un grupo generador, entre la mencionada curva y la de la evolución de la carga en función de la frecuencia. Si este punto se encuentra por

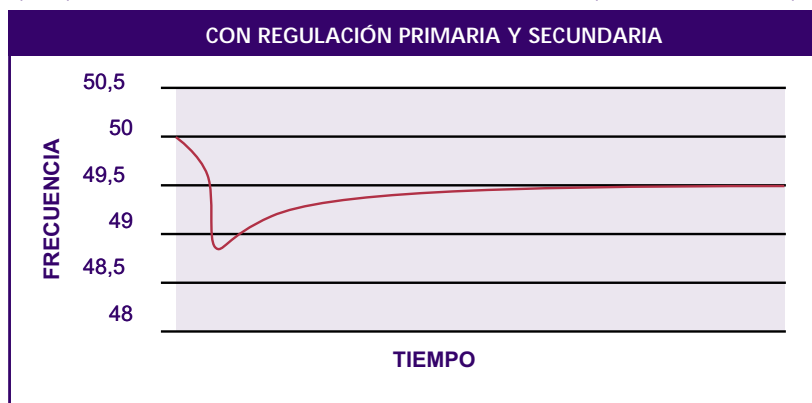


Figura 7

debajo de la frecuencia mínima de funcionamiento del sistema, el programa evaluará mediante algoritmos genéticos la cantidad de deslastre a aplicar y a que valores de la frecuencia.

En este caso se nota que la frecuencia no baja tanto al tener el sistema un cierto poder de "amortiguación" marcado por la curva de generación.

En el caso anterior, la solución aportada había indicado un deslastre mayor frente al actual lo que se refleja con un valor final de la frecuencia un poco mas bajo, si bien ambas soluciones son igualmente válidas por lograr estabilizar la frecuencia en una determinada franja antes del tiempo marcado y no alcanzando en ningún momento un valor de la frecuencia inferior al de funcionamiento del peor grupo del sistema.

ción para compensar la pérdida del grupo generador.

Como segunda etapa, se determina el conjunto de líneas a desconectar cuya suma debe ser lo más próximo a la salida de la primera etapa. Como parte de la solución se exponen los resultados parciales en una de las 19 subestaciones, donde se indican las líneas a desconectar. (Figura 8)

En el caso test y con el programa actual, las diferencias entre la potencia deseada o necesitada a deslastar y la deslastada por la obtención de las decisiones óptimas con el algoritmo genético implementado son decir prácticamente coincidentes.

En el proceso de reposición, tal y como se indicó, la mejor solución al pro-

SUB CINSA				
LINEA SALINETAS	P=	2.86	Q=	7.10E-01 1
LINEA GORO	P=	2.65	Q=	6.50E-01 1
LINEA CLAVELLINAS	P=	1.23	Q=	3.10E-01 0
LINEA CASERIO GANDO	P=	1.62	Q=	4.00E-01 1
LINEA VIDRIERAS	P=	8.00E-01	Q=	1.00E-01 1
LINEA DISA	P=	3.88	Q=	9.60E-01 1
LINEA VALDERRAMA	P=	3.35	Q=	8.30E-01 0
LINEA BASE AEREA	P=	1.45	Q=	3.60E-01 1
LINEA CINSA I	P=	4.60E-01	Q=	1.10E-01 0
LINEA CINSA II	P=	1.40	Q=	2.00E-01 1
BAT. CONDENSADORES I	P=	0.00E+00	Q=	-4.00E-01 1
BAT. CONDENSADORES II	P=	0.00E+00	Q=	-3.00E-01 0
P. ACTIVA EN SERVICIO EN ESTA S.E.	=	14.66		
P. REACTIVA EN SERVICIO EN ESTA S.E.	=	2.98		
P. ACTIVA DESLASTRADA EN ESTA S.E.	=	5.04		
P. REACTIVA DESLASTRADA EN ESTA S.E.	=	9.50E-01		

Figura 8

Finalmente consideramos el mismo sistema pero con regulación secundaria, (Figura 7) es decir con suficiente disponibilidad de potencia como para cambiar la consigna de funcionamiento de los grupos y generar mas potencia de la que inicialmente tenían asignada los respectivos grupos, y así desplazar "hacia arriba" a la curva de genera-

blema combinatorio es aquella, cuya suma de errores resultado de la diferencia entre, los valores de carga acumulados en cada secuencia de la reposición respecto al valor propuesto en la curva de aceptación de carga del grupo, sea mínimo. (Figura 9)

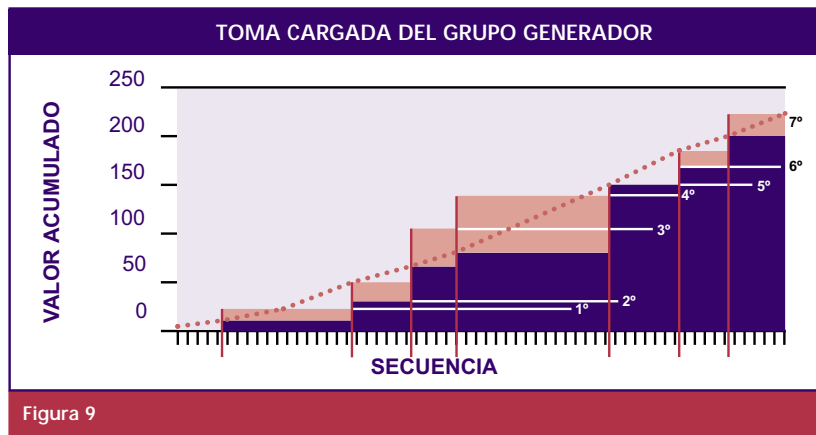
Para desarrollar el proceso de la reposición se partió de una determi-

nada curva definida como la bondad con que el grupo generador acepta carga.

Para comprobar el correcto funcionamiento del algoritmo y analizar la secuencia correcta de conexión, se tomaron inicialmente 50 líneas. En este caso se tardó 181 generaciones en encontrar la mejor opción con un margen de error nulo partiendo de una población de 228 cromosomas.

Así pues, a la vista de los primeros resultados, se puede estimar que la

metodología empleada cumple satisfactoriamente los requisitos requeridos de optimizar los procesos de deslastre y reposición, generando grandes expectativas para la mejora de situaciones reales conflictivas, cuando en su caso la configuración del proceso metodológico, se adapte y alimente con todos los parámetros técnicos del sistema eléctrico, sirviendo de robusto y eficaz simulador para los operadores de los Centros de Control y Operación de las Redes de sistemas aislados.



BIOGRAFÍA

MIGUEL J. MARTÍNEZ MELGAREJO

Doctor Ingeniero de Minas, es Catedrático de Universidad con docencia en Máquinas Eléctricas y Centrales Eléctricas. Fue Director Técnico de Unión Eléctrica de Canarias, S.A. durante 27 años, dirigiendo la construcción de la mayoría de las Centrales Eléctricas de las Islas Canarias. Fue becario en Inglaterra por la Confederación de Industrias Británicas, especializándose en: Reactores Nucleares, Turbinas y Generadores de Vapor, Alternadores, Interruptores y Transformadores de Potencia. Trabaja en la línea de investigación en relación con el Análisis de los Sistemas Eléctricos de Potencia. Tiene diversas publicaciones en este campo.

GABRIEL WINTER ALTHAUS

Ingeniero Industrial (1981), Dr Ingeniero Industrial (1984), Catedrático de Universidad en el área Matemática Aplicada (1992), Coordinador del Proyecto Europeo BRITE "Industrial Design and Applications using Genetic Algorithms and Evolution Strategies NETwork" - fase exploratoria (1996) de creación de la red europea INGENET y co-coordinación de la fase de implementación de la red (1997-2002), profesor de Ampliación de Matemáticas desde hace 22 años en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de Las Palmas, Director del Instituto Universitario de Sistemas Inteligentes y Aplicaciones Numéricas en Ingeniería (IUSIANI) de la ULPGC.

BERNARDINO MARTÍN DEL TORO

Doctor Ingeniero Industrial por la Universidad de Las Palmas de G.C. y actualmente es Jefe de Operación en Canarias de la empresa Endesa Distribución Eléctrica, S.L. Su labor de investigación se ha centrado en los Campos asociados al Análisis de Redes Eléctricas así como en la Operación de Sistemas Eléctricos y Algoritmos Genéticos. Paralelamente a la labor de investigación ha trabajado en el sector energético realizando diversas funciones. Su primera etapa la desarrolló en la Ingeniería y Puesta en Marcha de Subestaciones así como en la Protección de Sistemas Eléctricos, y finalmente ya en Endesa, en diversos puestos y entre ellos como responsable de Redes de Transporte y SS.EE. de la Provincia de Las Palmas y actualmente como Jefe de Operación de la Red de Canarias.

BLAS GALVÁN GONZÁLEZ

Ingeniero Industrial (Especialidad Electricidad) por la Universidad Politécnica de Las Palmas en 1983, realizó estudios de especialización en Seguridad de Centrales Nucleares en el departamento de Física y Tecnología Nuclear de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de la Universidad Politécnica de Madrid en 1983-1984. Recibió el grado de Doctor Ingeniero Industrial por la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria (ULPGC) en 1999. Está especializado en Análisis de

Fiabilidad y Riesgo de instalaciones y actividades potencialmente peligrosas para los seres humanos y el medioambiente, así como en la optimización de dichas instalaciones mediante métodos evolutivos. Ha sido profesor en la ULPGC durante los últimos 10 años, impartiendo docencia en diversas asignaturas de matemáticas en las escuelas de Ingenieros de la misma.

PEDRO CUESTA MORENO

Doctor Ingeniero Industrial, Profesor Titular de Universidad con docencia en el área de Matemática Aplicada, Subdirector de Relaciones Externas de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de la ULPGC, miembro del Instituto Universitario de Investigación IUSIANI, donde lleva investigación dentro del campo de los Algoritmos Genéticos con aplicación a la Ingeniería, teniendo diversas publicaciones sobre esta materia en revistas internacionales y nacionales y comunicaciones en Congresos.

JESÚS CARMELO ABDERRAMAN MARRERO

Licenciado en Ciencias Físicas por la UNED (1997). Dr. en la ULPGC (2001). Tesis Doctoral "Contribuciones a la convergencia del algoritmo genético simple con estimaciones del tiempo de espera al óptimo global". Publicaciones en área de algoritmos genéticos.

BIBLIOGRAFÍA:

[1] *An introduction to the Genetic Algorithms towards their state-of-the art* by Gabriel Winter and CEANI-research group. INGENET REPORT January,2000
 [2] *Algoritmos Genéticos: Nuevas tecnologías de optimización y computación de aplicación en ingeniería* Gabriel Winter, Pedro Cuesta y Blas Galván CEANI (Revista DINÁMICA

Enero - Marzo 1999)
 [3] *Power System Dynamics and Stability.* Machowski.Bialek y Bumby. Ed. John Wiley & Sons
 [4] *An Algorithm for load shedding and restoration during reduced generation periods* IEE Nov 91 Wong y Lau
 [5] *An expert System for procedure Generation of Power system Restoration in regional control center*

- IEE, Nov 1991. Miura, Takamo, Ueki, Fukuyama
- [6] New approaches in power system restoration. IEEE. Nov 92 Adibi
- [7] Restorative Planning of power system using genetic algorithm with branch exchange method. IEEE 1996 Oyama.
- [8] Simulation of Load shedding as a Corrective action Against Voltage Collapse. Nov 97. Parker, Morrison and Sutanto
- [9] Emergency control and restoration of power system under disturbance, Nov 97 Au, Yung
- [10] Application of expert system to Power System Restoration in sub-control center IEEE Mayo 99 Park, Lee
- [11] Load shedding on an Isolated System IEEE agosto 95 Concordia, Fink y Poullikkas
- [12] Analytical tool requirements for power system restoration. IEEE agosto 94. Adibi, Borkoski y Kafka
- [13] Expert system requirements for power system restoration. IEEE Agosto 94 Adibi, Kafka y Milaniez
- [14] Power System Restoration Planning. IEEE Febrero 94. Adibi y Fink
- [15] Knowledge - Based Systems as Operational Aids in Power System Restroration IEEE Mayo 92 Matsumoto, Sakaguchi, Kafka y Adibi
- [16] Knowledge - based Restoration Guidelines IEEE 1992 Delfino, Invernizzi y Morini
- [17] Centrales Eléctricas. Manuel Cortés Cherta
- [18] Optimal Load Shedding Methodologies in Power Systems IEEE 1988 Kheddache and Ebron
- [19] Application of knowledge engineering techniques to electric power system restoration IEEE 1988 Kojima, Warashina, Kato y Watanabe
- [20] Análisis de Sistemas Eléctricos de Potencia. Willian Stevenson Mc Graw Hill
- [21] Electric Energy Systems Theory. An Introduction Olle I. Elgerd
- [22] Modelling genetic algorithms with Markov chains. Annals of Mathematics and Artificial Intelligence Vol. 5 , pp.79-88 ; Nix, and. Vose (1992)
- [23] Genetic Algorithms In Search, optimization and Machine Learning. Reading, Massachusetts, Addison-Wesley.; Goldberg D.E., (1989)
- [24] An Analysis of the Behaviour of a Class of Genetic Adaptive Systems. Ph. dissertation. Univ. of Michigan, Ann Arbor, Mi. ; De Jong K.A. (1975)
- [25] Programas GENET1 y GENET2 en lenguaje de programación Fortran de algoritmos genéticos con codificación binaria (GENET1) y codificación real (GENET2) © CEANI-Blás Galván González, Pedro Damián Cuesta Moreno, Gabriel Winter Althaus, 1999.
- [26] Capítulo XII "Genetic Algorithms: A stochastic improvement technique. Tools, skills, pitfalls and examples" del libro: Genetic Algorithms in Engineering and Computer Science, J. Wiley Sons; Winter G., Galán M., Cuesta P., Greiner D., (1995)
- [27] Using Markov Chains to Analyze GAFOs. FOGA-1. Morgan Kaufmann, San Francisco ; De Jong K., Spears, Gordon G., (1995).
- [28] Towards a Stop Criterion for Simple Genetic Algorithm, SGA. European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering, (ECCOMAS 2000 ; Cuesta P.D., Abderraman J.C., Jiménez J.A., Galván B., Winter G.
- [29] Practical Modeling of simple genetic Algorithm, via deterministic paths, with Absorbing Markov Chains. Genetic and Evolutionary Computation Conference, GECCO-2000. Las Vegas, USA, 2000; Cuesta P.D., Abderraman J.C., Jiménez J.A., Winter G.
- [30] Análisis Estocástico de los Algoritmos Genéticos, IV Congreso de Métodos Numéricos en Ingeniería, Sevilla, 1999.; Abderraman J.C., Jiménez J.A., Cuesta P.D., Galván B., Winter G.

Patrocinador:

**Unión Eléctrica de Canarias, S.A.
(UNELCO)**