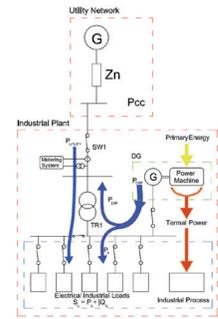


Sistemas de acoplamiento de rigidez variable en plantas industriales con generación distribuida

Adaptative rigity system in industrial facilities with distributed generation



Francisco Carro-De-Lorenzo¹, José-Luis Falagán-Cabero², Joaquim Meléndez-i-Frigola³, Ramón-Ángel Fernández²

¹ Tresca Ingeniería S.A. Parque Tecnológico de León, s/n – 24009 León.

² Universidad de León. Escuela de Ingeniería industrial e Informática. Campus de Vegazana, s/n – 24071 Leon.

³ Universidad de Girona. Escuela Politécnica Superior. Campus de Montilivi. Calle M^a Aurelia Capmany, 61 – 17071 Girona.

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8313> | Recibido: 13/02/2017 • Evaluado: 15/02/2017 • Aceptado: 15/03/2017

ABSTRACT

- A lot of industrial facilities with Cogeneration Heat and Power (CHP) exists working electrically as Distributed Generation (DG). In these utilities the cogeneration unit operate in parallel with network, but several times due to electrical disturbances, islanding operation mode is chosen. This mode is activated when disturbances appeared or are expected to appear in the network. During islanding mode both facilities and receivers are affected by the low electrical stability of the own generation. Stability disturbances are mainly referred both frequency and voltage stability. Disturbances also appears in the moment of the reconnection from islanding to normal operation mode. In order to avoid these inconvenients between rigid network connection and islanding operation mode an alternative solution is approached in this document, is the so-called Adaptative Rigid System (ARS). Through this system we can electrically move far away enough from network to disturbances do not affect the operation of our Plant. On the other hand we can keep the electrical stability provided by the external network. To conclude we will describe the advantages on this (ARS) system against normal operation modes.
- **Keywords:** Electrical cogeneration, Islanding operation, distributed generation, Voltage sags, power quality.

eléctricamente de la red lo suficiente para que sus perturbaciones no alteren el funcionamiento de nuestra planta industrial. Y por otro lado podremos seguir disfrutando de la estabilidad eléctrica que nos aporta la conexión a la red exterior. Terminaremos describiendo las ventajas de este sistema(ARS) frente a los modos de operación habituales.

Palabras Clave: Cogeneración, Operación en Modo isla, generación distribuida, Huecos de Tensión, Calidad de la Energía.

1. INTRODUCCIÓN

Comenzaremos realizando la descripción de una planta industrial dotada de un sistema de CHP, explicando los elementos que conforman la planta y el subsistema CHP; posteriormente analizaremos los diferentes modos de operación con los que opera una planta industrial. A continuación, nos centraremos en el sistema de operación en isla, su difícil explotación y los problemas eléctricos que ocasiona en los receptores.

Para una posible solución a los problemas de operación descritos se presentará un novedoso sistema de explotación llamado acoplamiento de rigidez variable el cual se analizará y desarrollará. Para terminar, aportaremos una simulación numérica mediante MatLab de una planta industrial con CHP dotada de este sistema de acoplamiento mediante rigidez variable (ARS).[1][2]

RESUMEN

Existen plantas industriales con cogeneración CHP (Cogeneration Heat and Power) que trabajan eléctricamente como generación distribuida (DG). En estas plantas la unidad de cogeneración (CHP) opera en paralelo con la red, pero en ocasiones por problemas eléctricos, se decide pasar a modo de operación en isla. Este modo se activa cuando aparecen perturbaciones en la red o se prevé que las haya. Durante el modo en isla la planta sufre por la poca estabilidad eléctrica de la generación propia. Los problemas de estabilidad se refieren principalmente a estabilidad en frecuencia y tensión. También existen problemas en el momento de la reconexión al salir del modo isla al modo normal. Para evitar estos problemas en el presente documento se propone una solución alternativa entre la conexión rígida a la red y el modo isla, que llamaremos acoplamiento de rigidez variable (ARS Adaptative Rigid System). Mediante este sistema podremos alejarnos

2. DESCRIPCIÓN DE UNA PLANTA INDUSTRIAL DOTADA DE GENERACIÓN DISTRIBUIDA

Estas plantas de generación están compuestas por un generador o varios síncronos conectados en paralelo con la red general de la planta y propulsados por motores primarios bien diésel, turbinas de gas o turbinas de vapor con esquemas similares al representado en la Fig. 1. [1].

En estas plantas el motor primario impulsa un generador síncrono y se aprovechaba el calor residual o de refrigeración para el proceso industrial consiguiendo altos valores de rendimiento energético. Las ayudas gubernamentales, unidas al alto rendimiento energético, generaron un gran desarrollo de estas instalaciones. Derivado de esta situación, aquellas plantas con procesos críticos observaron que podían usar CHP como fuente de energía *Back-up* para casos de falta de suministro eléctrico o bien suministros de mala calidad.[1][2][3][4].

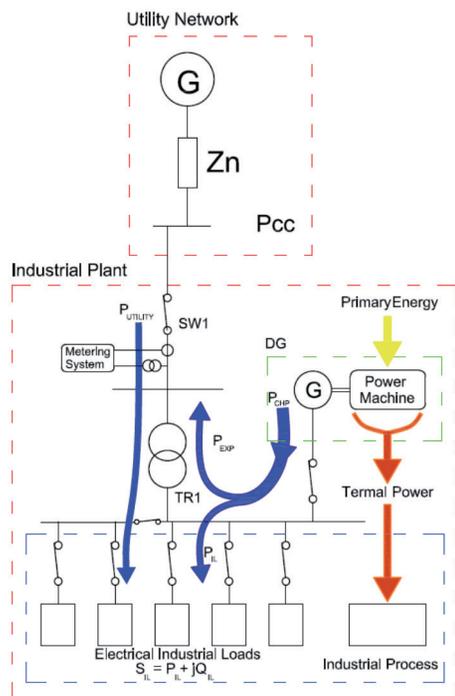


Figura 1

3. MODOS DE OPERACIÓN DE UNA PLANTA CON GD/CHP

3.1. PLANTA ACOPLADA RÍGIDAMENTE VERTIENDO ENERGÍA A LA RED. ($P_{CHP} > P_{IL}$)

La GD produce más potencia (P_{CHP}) de la que demanda la planta industrial (P_{IL}), por lo que el excedente se exporta a la red exterior (P_{EXP}); de tal manera el sistema de control actúa sobre la potencia del motor primario y sobre la tensión de excitación de generador de tal forma que la potencia eléctrica generada sea constante y cercana al 100%.

Este modo es el habitual en instalaciones de cogeneración ya que la red por un lado evacua toda la energía entregada y por otro mantenemos la generación térmica constante; también es habitual en sistemas donde la energía eléctrica producida esta primada económicamente y es fácil de evacuar este es el sistema habitual.[4][5][6][7]

3.2. PLANTA ACOPLADA RÍGIDAMENTE SIN VERTIDO DE ENERGÍA A LA RED. ($P_{EXP} = 0$)

Cuando la red no tiene capacidad de evacuación o bien la compañía propietaria de la red no autoriza a dicha evacuación, la generación distribuida se ha de controlar sin permitir o minimizando la inyección de energía a la red ($P_{EXP} = 0$). La primera solución al problema es que la planta de GD entregue una potencia constante que esté por debajo de la potencia mínima demandada en el proceso; la otra solución es que el sistema controle la producción de energía para que se vaya ajustando lo máximo posible la potencia entregada a la demandada. Por tanto, en los sistemas operados en modo sin inyección a red la potencia generada por la CHP siempre quedara por debajo de la potencia consumida por la planta industrial. En cuanto a la estabilidad de este modo de operación es similar al modo anterior ya que tanto la estabilidad en frecuencia como la estabilidad en tensión la proporciona la red exterior. [4][5][6][7]

3.3. PLANTA EN OPERACIÓN EN ISLA. ($P_{CHP} = P_{IL}$)

El modo de operación en isla consiste en que la planta industrial está desconectada de la red exterior, con lo cual toda la

potencia que precisa la planta industrial para su proceso ha de generarse en la instalación de GD/CHP ($P_{CHP} = P_{IL}$) y, por tanto, ni se pueden exportar ($P_{UTILITY} = 0$) los excedentes ni se puede tomar de la red la potencia extra necesitada. En este caso el control de la instalación de GD se complica por no tener a la red como referencia en tensión y frecuencia y por la dificultad de ajustar a la producción a la demanda a suficiente velocidad.

El paso de modo isla sucede cuando la falta de suministro del exterior es inestable o existe riesgo de serlo. [8][9][10][11][12][13]

3.4. PROBLEMAS EN LA PLANTA DURANTE LA OPERACIÓN EN MODO ISLA

Los problemas son de dos tipos: por un lado problemas asociados a la calidad de la señal, vinculados a la estabilidad en la tensión y la frecuencia generada y, por otro, los asociados a la compañía eléctrica entre los que nos encontramos con su preocupación por la seguridad de las instalaciones.

En nuestro trabajo nos centraremos en el estudio del primer problema asociado a la falta de estabilidad de parámetros, en el modo de operación en isla. [8][9][10][11][12][13]

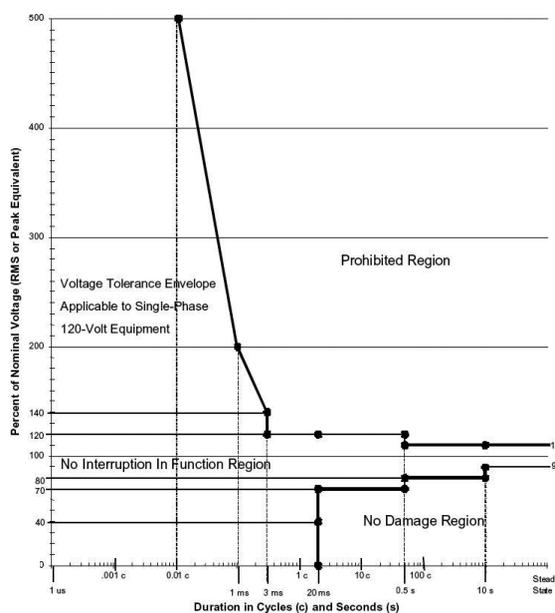


Figura 2

4. LÍMITES TOLERABLES EN LA CALIDAD DE LA ENERGÍA

El objetivo en todos los modos de operación es poder alimentar a la planta industrial con una tensión dentro de los parámetros admisibles para los receptores. En este punto vamos a detallar cuáles son los límites de los parámetros eléctricos según las diferentes normas internacionales. [14]

Existen dos principales grupos de normas para tabular los límites en la calidad del suministro eléctrico.

Por un lado, tenemos las curvas ITIC emitidas en la norma IEC 61000 que nos dan los límites de tolerancia a huecos de tensión de sistemas eléctricos.[15]

Nos vamos a centrar en la aplicación de las curvas CBMA (Computer and Business Equipment manufactures Asociation) por ser las más representativas a nivel internacional. En ellas se establecen los límites de tensión admisibles para equipos electrónicos.

En la Fig. 2 podemos ver una muestra de la citada curva. A partir de estas curvas podremos establecer cuáles son los límites de calidad de energía para alimentar a nuestros receptores.[16][14]

5. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE ACOPLAMIENTO DE RIGIDEZ VARIABLE

En muchos casos frente a una falta total de suministro a única posibilidad de seguir con la planta en funcionamiento es el paso a modo isla. En el caso opuesto vemos que la operación de la planta industrial y de la instalación de GD acopladas rígidamente a la red externa las hace especialmente vulnerables a las perturbaciones que sucedan en la red externa.

Por tanto, en muchos casos nos encontramos en situaciones en los que una solución intermedia sería la solución a determinados problemas. Esta solución intermedia ha de ser una en que la conexión a la red pasa de ser muy rígida a ser menos rígida. En este caso vamos a definir el sistema de acoplamiento como de rigidez variable o ARS (Adaptative Rigid System).[17][7]

En el presente documento se documentará el proceso de simulación matemática de este nuevo sistema de acoplamiento para realizar una validación y verificación previa a la construcción de un modelo real.

El sistema de acoplamiento de rigidez variable como puede observarse en la Fig. 3 será instalado en la parte de alta tensión correspondiente a la instalación del usuario después del sistema de medida. Puesto que las pérdidas de energía y de potencia serán asumidas por la planta industrial.

5.1. DESCRIPCIÓN CONCEPTO RIGIDEZ DE ACOPLAMIENTO

El sistema de acoplamiento (Fig. 3) usualmente está compuesto de una línea eléctrica, las protecciones, dispositivos de maniobra correspondientes y transformadores. También podemos relacionar de forma inversa la rigidez con la impedancia de acoplamiento mediante la siguiente ecuación o de forma directa con su admitancia.

$$Rigidez = \sum \frac{1}{Z_{Sistema\ acoplamiento}} = \sum Y_{sistema\ acoplamiento}$$

Podemos observar que para disminuir la rigidez hemos de aumentar la impedancia del sistema de acoplamiento. La única

forma viable de disminuir la rigidez será insertando una o varias impedancias en serie en el sistema de acoplamiento mediante un sistema de maniobra gobernado por sistema de control. De esta forma al disminuir la rigidez del sistema de acoplamiento nos separamos de la red y por tanto la planta industrial es más inmune a las perturbaciones externas.

5.2. CÁLCULO DE LA RIGIDEZ DE UN ACOPLAMIENTO

El sistema de rigidez variable básicamente aumenta la impedancia del sistema externo visto desde la planta industrial. Así mismo antes de la entrada en operación del ARS la impedancia del sistema vista desde barras de baja tensión (Bus Bar 3) en la Fig.3 sería:

$$Z_{eq} = Z_N + Z_L + Z_{TR1}$$

Con lo cual la potencia de cortocircuito del sistema en barras Bus Bar 1 sería:

$$S_{CC-BB1} = \frac{V_{nom}^2}{Z_N}$$

Y, por tanto, la potencia de cortocircuito en barras Bus Bar 3 o PCC sería:

$$S_{CC-BB3} = \frac{V_{nom}^2}{\sum Z_N + Z_L + Z_{TR1}}$$

Con lo cual la rigidez del acoplamiento en el lado de acoplamiento rígido viene dada por la impedancia de la línea de alimentación más la impedancia del transformador.

Una vez entre en operación el ARS la nueva impedancia del sistema vista desde las barras de la planta receptora sería:

$$S_{CC-BB3} = \frac{V_{nom}^2}{\sum Z_N + Z_L + Z_{TR1} + Z_{ARS}}$$

Si utilizamos las admitancias en vez de las impedancias nos queda la expresión:

$$S_{CC-BB3} = V_{nom}^2 \cdot \sum Y_N + Y_L + Y_{TR1} + Y_{ARS}$$

Siendo la suma de las admitancias de las diferentes etapas que del sistema de rigidez adaptativo y n el número de etapas.

$$Y_{ARS} = \sum_{i=1}^n Y_N$$

De esta forma asimilaremos el concepto de rigidez del acoplamiento al valor de la admitancia de dicho acoplamiento de forma directa y lineal.

5.3. CONSECUENCIAS DE LA DISMINUCIÓN DE RIGIDEZ DE UN ACOPLAMIENTO

Hemos visto que como efecto beneficioso de disminuir la rigidez de un acoplamiento está el ser más inmune a las perturbaciones externas a la planta industrial, pero simultáneamente existen otras consecuencias a tener en cuenta como son:

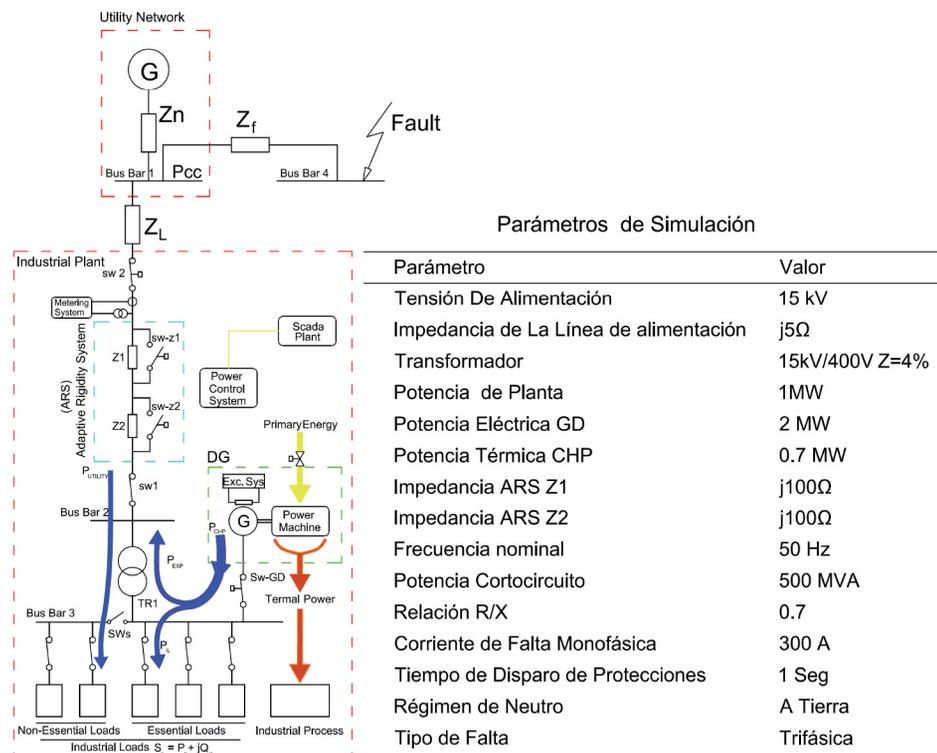


Figura 3

- Reducción de la capacidad de evacuación de energía del sistema a la red.
- Reducción de la corriente de avería en el sistema.
- Aumento en las caídas de tensión en el sistema.
- Grandes caídas de tensión en la planta frente al arranque de máquinas de gran potencia.
- Aumento de la tasa de distorsión armónica en tensión.

5.4. DESCRIPCIÓN FÍSICO DEL SISTEMA DE RIGIDEZ VARIABLE (ARS)

El sistema ARS de la planta de la Fig. 3 está compuesto por dos etapas de impedancias insertadas en serie (con la línea de alimentación antes de transformador (TR1). Cuando se activa el modo ARS estos interruptores se abren de forma controlada para aumentar la impedancia del acoplamiento y por tanto disminuir la rigidez del mismo.

A las impedancias iría asociado un sistema de descarga de la energía de las bobinas para minimizar los transitorios de acople y desacople. Estos sistemas de descarga están fuera del alcance del presente documento. En la tabla de la Fig. 3 podemos observar la descripción de todos los elementos de la planta con sistema ARS y los valores que se emplearían para la simulación matemática.

5.5. MODOS DE OPERACIÓN DEL SISTEMA DE ACOPLAMIENTO DE RIGIDEZ VARIABLE

El ARS puede operar en dos tipos de escenarios. Un primer escenario será predictivo en el que un sistema experto de predicción de perturbaciones, pronosticará la posibilidad de una perturbación en la red. En ese caso el ARS se activará y aumentará la impedancia del acoplamiento para aumentar la inmunidad frente a una hipotética falta externa.

En segundo escenario es frente a una falta sobrevenida en el que los parámetros de tensión y frecuencia se ven alterados y, por tanto, fuera de los límites establecidos. En esa situación el ARS insertará una primera etapa de aumento de impedancia, si los parámetros siguen sin estar dentro de los límites se insertará una segunda etapa. Si después de insertar las dos etapas disponibles, el sistema sigue con los valores de tensión o frecuencia fuera de los límites, el ARS comenzará la secuencia de paso a operación en modo isla.

Durante la operación en modo ARS, el sistema de control realizará muestreos en continuo de los valores de tensión, corriente y potencias activa y reactiva en todos los nudos antes y después del ARS.

Una vez se haya comprobado por el sistema de control que los parámetros de la red de distribución externa están dentro de los valores aceptables y no hay motivo para prever otro episodio adverso el sistema de control iniciará la secuencia de desconexión de las etapas de ARS con objeto de volver la situación de operación normal.

En la Figura 4 podemos observar el flujograma que ha de seguir el sistema de control para la toma de decisión de modo de operación y para la decisión de paso de un modo a otro.

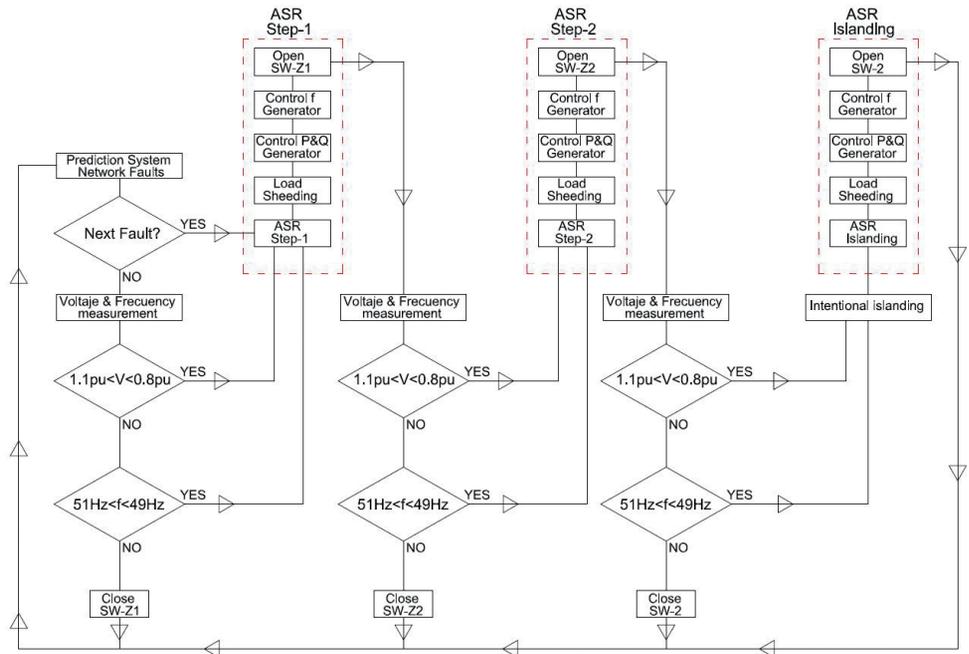


Figura 4

5.6. COSTES ASOCIADOS A LA IMPLANTACIÓN Y OPERACIÓN ARS

Este nuevo sistema se pretende que sea de utilidad en aquellas plantas con suministros muy deficientes y en plantas con procesos críticos donde la estabilidad del mismo es muy importante.

En aquellas plantas donde o el suministro es estable o donde el proceso puede interrumpirse sin mayores costes el sistema no es rentable puesto que precisa altos costes de implantación y de operación y mantenimiento asociados al mismo.

5.7. CONSIDERACIONES EN OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO EN UNA PLANTA TRAS LA INSTALACIÓN DEL ARS

Son numerosos los cambios que han de realizarse tanto para la implantación como para la operación de la planta con un sistema ARS. Si bien cada uno de ellos llevará asociado un estudio pormenorizado, pasaremos a enumerar los más significativos:

- Nuevo estudio de las potencias de cortocircuito del sistema, ya que se verán reducidas.
- Nuevo estudio tanto de protecciones como de los ajustes de disparo que se verán modificados para cada uno de los modos de operación de la planta.
- Nuevo estudio del sistema de control de la planta y la integración del mismo con el control del ARS.
- Nuevo estudio de la planta de operación y de mantenimiento, considerando los nuevos sistemas, sus posibilidades de avería y la reparación de los mismos sin afectar al funcionamiento de la planta.

6. MODELADO Y SIMULACIÓN DEL SISTEMA ELÉCTRICO

Tanto el modelado como las simulaciones se han realizado con Mat-Lab con el paquete SimPower-System de Simulink. [18][19]

Los modelos son completos y no simplificados, se han implementado las ecuaciones diferenciales de todos los elementos para así poder estudiar en detalle los transitorios tanto en tensión como en corriente de cara a una etapa posterior de dimensionamiento de elementos.

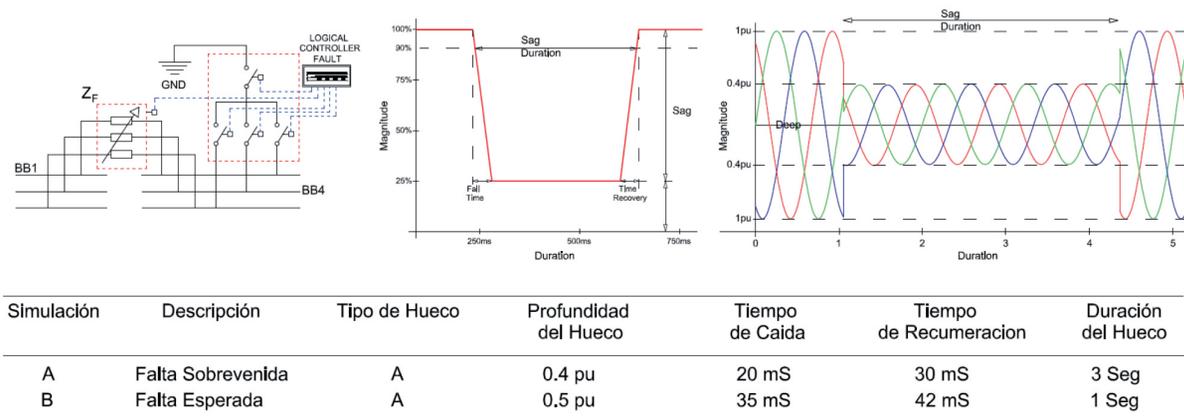


Figura 5

6.1. MODELADO DEL SISTEMA ELÉCTRICO

Para el modelado nos basaremos en una planta industrial como la descrita en la Fig. 3. Se trata de una planta alimentada por una línea de 15 Kv. En la planta industrial tenemos un transformador reductor de 15Kv/400v que alimenta unas barras donde están conectadas las cargas de la planta y también está conectado el sistema CHP/GD. El sistema de CHP/GD consta de un grupo diésel con una tensión nominal en bornes de 400v.

La planta industrial la modelaremos como se muestra en la Figura 3. En dicha planta existen una serie de receptores eléctricos de baja tensión conectados contra una barra partida (Bus Bar 3) a un lado de la cual conectaremos los receptores no esenciales y al otro los receptores esenciales. Esta barra está conectada a un transformador de potencia (TR1) en cual servirá para tomar energía de la red o exportarla según el caso.

En el secundario del transformador (TR1) disponemos de un interruptor SW1 el cual servirá para la desconexión total de la planta. Este interruptor SW1 estará conectado a las etapas del sistema de rigidez variable y servirá para poner la planta en modo de operación en isla.

El sistema de rigidez adaptativa (ARS) estará compuesto de una o varias impedancias trifásicas (Z_1 , Z_2) e interruptores normalmente cerrados en paralelo (SW- Z_1 , SW- Z_2). En nuestro caso tenemos dos etapas de cambio de rigidez. Los valores tomados en nuestras etapas serán los que aparecen en la tabla de la Fig. 3.

Para modelar el sistema de simulación de faltas recurriremos a un conjunto de interruptores como el reflejado en la primera imagen de la Fig. 5 en los cuales disponemos de un interruptor por fase todos ellos unidos a un punto común y otro más uniendo el punto citado con tierra. Asociado a este grupo de interruptores tenemos una impedancia Z_f la cual servirá para simular la distancia de la falta al sistema y por consiguiente para actuar sobre la severidad de la falta.

Como veremos para nuestra simulación provocaremos una falta trifásica impedante en Bus-Bar 4 que provocará un hueco de tensión tipo A, como el que se muestra en la Fig. 5.[20][21][22]

6.2. SIMULACIÓN A

En primer lugar, simularemos la respuesta de una planta dotada de ARS frente a una perturbación no esperada.

En las tres primeras graficas de la Fig. 6 podemos observar la secuencia de la simulación. En la primera grafica representamos la operación del generador de faltas y en la gráfica 2 y 3 las lógicas de los interruptores del ARS.

Para $T=0s$ la planta arranca con normalidad, para $T=2s$ sucede de forma intempestiva y no esperada una perturbación lo cual nos genera un hueco de tensión tipo A en el punto de alimentación

con una profundidad de aproximadamente el 40% con lo cual nuestros receptores no pueden trabajar a esa tensión y la opción habitual sería pasar a modo isla.

En vez del paso a modo isla se activa nuestro sistema de rigidez adaptativa (ARS) el cual reduce la rigidez del acoplamiento en una primera etapa en $T=2.5s$ y una segunda etapa en $T=3s$. A partir de este momento se estabilizará el funcionamiento hasta que en $T=5s$ desaparece la falta externa y por tanto volvemos a la situación inicial de alta rigidez en $T=5.5s$.

Con las secuencias antes descritas ejecutaremos el modelo realizado en MAT-LAB, obteniendo los resultados que a continuación se describen.

6.2.1. Análisis de la tensión en el punto de acoplamiento

En la cuarta grafica de la Fig. 6 observamos la tensión medida en el punto de acoplamiento lo que en nuestro esquema de la Fig. 3 nombramos como Bus-Bar 1. En dicho punto podemos observar primeramente durante unos pocos milisegundos el transitorio de arranque del sistema para. Para $T=2s$ aparece un hueco de tensión de gran profundidad como resultado del cortocircuito que habíamos provocado en Bus-Bar-4 hasta $T=5s$.

6.2.2 Análisis de la tensión en bornes de la carga

En la quinta grafica de la Fig. 6 representamos la tensión en bornes de la carga la cual está estable hasta la llegada del hueco de tensión desde el exterior para $T=2s$. En ese momento nuestra tensión sufre un hueco de similares proporciones (0.4pu) al visto en las barras del punto de acoplamiento.

La profundidad de este hueco hace que no sea compatible el funcionamiento de la planta industrial, por lo que en condiciones normales o bien se pasaría a modo isla o bien se daría un cero a toda la planta.

En nuestro caso para $T=2.5$ entra en operación el primer escalón del sistema ARS amortiguando el hueco y reduciendo su profundidad hasta ya unos casi tolerables 0.15pu.

Para $T=3$ entra en operación el segundo escalón del ARS amortiguando ya casi completamente el hueco y dejando una profundidad residual casi despreciable.

Para $T=5$ la falta se despeja y con posterioridad el ARS en $T=5.5$ pasa al modo de rigidez normal. Entre los tiempos $T=5$ y $T=5.5$ se puede apreciar unos transitorios con unas ligeras sobretensiones provocadas por el despeje de la falta y la sobreexcitación del alternador de la GD lo cual en 500ms desaparecen.

6.2.3. Análisis de la estabilidad de la GD

Para el análisis de la estabilidad de la GD monitorizaremos la velocidad del rotor del alternado que nos dará una idea de la es-

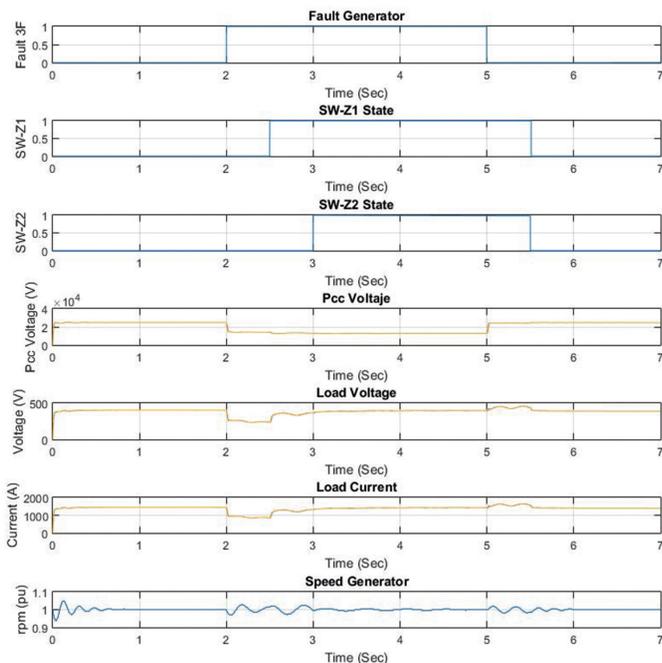


Figura 6

tabilidad que podemos esperar en frecuencia en el sistema la cual se muestra en la última grafica de la Fig. 6.

Puesto que la simulación parte de unas condiciones iniciales de cero, podemos observar el transitorio de arranque de la maquina síncrona formada por una oscilación senoidal fuertemente amortiguada con un decremento logarítmico fuerte que hace que antes del primer segundo de funcionamiento la maquina este ya en condiciones estables.

Cuando aparece la falta para $T=2s$ observamos unas fluctuaciones en la velocidad de una amplitud aproximada de un 4.5%. Es importante resaltar que estas oscilaciones no cesan hasta que entra el segundo escalón de ARS que rápidamente y tras un corto transitorio se amortiguan casi por completo. Con lo cual se concluye que el ARS es efectivo en la estabilidad dinámica del sistema.

Finalmente, cuando la falta es despejada en $T=5s$ observamos otro transitorio de poco más de un segundo durante el cual el sistema ha de reajustarse a las condiciones de operación prefalta.

6.3 SIMULACIÓN B

Al igual que en la simulación A, los tres primeros gráficos de la Figura 7 corresponden a la lógica del generador de falta y lógica de los interruptores de ARS.

En un momento determinado el sistema inteligente de predicción de perturbaciones anuncia la posibilidad de que se produzca una falta en la red externa. En ese momento se activa el ARS ($T=3s$) pasando a modo de rigidez variable.

Como ya hemos visto la operación de ARS aumentan la inmunidad de la planta frente a perturbaciones externas y de esta manera la planta estará preparada para recibir la perturbación sin parar la operación.

Para $T=4s$ sucede de forma prevista y esperada la perturbación procedente de la red exterior lo cual nos genera un hueco de tensión tipo A en el punto de alimentación con una profundidad de aproximadamente el 40% con lo cual nuestros receptores no podrían trabajar a esa tensión en una situación normal si no fuese por la inmunidad aportada por el ARS.

En la gráfica 1 de la Figura 7 podemos ver como para $T=5s$ desaparece la falta y una vez comprobada la estabilidad, el sistema retorna la operación a modo norma desconectado en $T=6s$ el ARS.

6.3.1. Análisis de la tensión en el punto de acoplamiento

La tensión en el punto de acoplamiento (Pcc Voltaje, Figura 7) es perfectamente estable hasta la llegada del hueco en $T=4s$. En este instante la señal de tensión tiene una contracción de forma de hueco de tensión con una profundidad de 0.4pu. hasta el despeje de la falta para $T=6s$.

6.3.2. Análisis de la tensión en bornes de la carga

La tensión en bornes de la carga (Load Voltaje, Figura 7) es perfectamente estable durante todo el tiempo de simulación incluso durante la falta del exterior en $T=4s$. Observando solamente unos pequeñísimos transitorios de 0.1pu de magnitud y de unos pocos milisegundos en $t=4$ durante el establecimiento de la falta.

Estos transitorios como vemos desaparecen con mucha rapidez y la señal de tensión durante el tiempo de falta no sufre el hueco de tensión del exterior, solamente unas pequeñas oscilaciones de valor despreciable $\ll 0.01pu$.

En el punto de despeje de la falta $T=5s$ volvemos a tener unos nuevos transitorios procedentes del reajuste del sistema de control a las condiciones post-falta. Estos transitorios apenas duran 500ms y con una amplitud de $<0.1pu$.

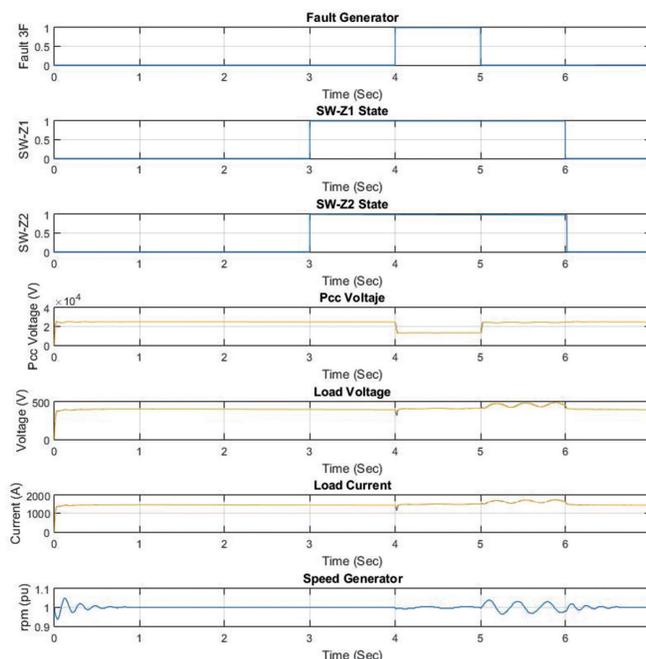


Figura 7

Puesto que estamos simulando y analizando una planta con receptores lineales la intensidad en la carga sigue un patrón similar a la de la tensión y las interpretaciones de los fenómenos temporales son similares.

6.3.3. Análisis de la estabilidad de la GD

Como en la anterior simulación, para el análisis de la estabilidad de la GD monitorizaremos la velocidad del rotor del alternador.

Puesto que la simulación parte de unas condiciones iniciales de cero, podemos observar el transitorio de arranque similar a la anterior simulación.

Cuando aparece la falta $T=4s$ y por tanto el hueco la curva de estabilidad sufre unas fluctuaciones de amplitud despreciable.

Cuando se despeja la falta en $T=5s$ aparece un transitorio fuertemente amortiguado con una amplitud máxima de 4% en frecuencia y un tiempo de amortiguación inferior un segundo. Para $T=7s$ el ARS pasa a modo de operación normal y la señal de estabilidad termina por estabilizarse.

7. CONCLUSIONES

El sistema de rigidez variable (ARS) puede ser un modo de operación de plantas industriales que dota a las mismas de una gran inmunidad frente a perturbaciones eléctricas exteriores en forma de huecos de tensión.

El modo ARS ha de ir unido a un cambio importante en la estrategia del sistema de control tanto de la planta como de la CHP/GD.

No es viable exportar energía en el modo de operación de rigidez variable de forma estable debido a que la red exterior reduce su capacidad de evacuación.

Si la carga de la planta industrial es superior a la potencia generada por la GD, es preciso dotar a la planta de un sistema de deslastre previo al cambio de modo.

En la Tabla 1, podemos observar la mejora en los parámetros de estabilidad en tensión, estabilidad en frecuencia concluyendo la notable mejoría en el comportamiento del sistema.

Simulación	Parámetro	Valor Sin ARS	Valor con ARS
A	Tensión en la carga	0.4pu	0.95 pu
A	Estabilidad dinámica	5%	3%
B	Tensión en la carga	0.5pu	0.95 pu
B	Estabilidad dinámica	5%	3%

Tabla 1

En el caso de la tensión obtenemos la mejoría más sensible al pasar de un hueco del 40% o 50% al 5% con lo cual la planta industrial puede seguir en marcha.

Podemos concluir que el sistema desarrollado puede ser de gran utilidad en plantas industriales donde el suministro eléctrico es inestable y las paradas de la planta industrial son costosas.

Un ejemplo de aplicación sería aquellas plantas de proceso continuo como son las plantas químicas, químico farmacéutico o industria del papel, donde las paradas son muy perjudiciales y habitualmente ya disponen de planta de cogeneración.

8. TRABAJOS FUTUROS Y PROBLEMAS A RESOLVER

En este trabajo acerca del desarrollo de un sistema ARS, se ha tratado de demostrar la viabilidad de su implantación, así como de la utilidad en determinadas plantas. No obstante, como en cualquier desarrollo industrial quedan numerosos pasos hasta llegar a un prototipo implantable en una industria.

Los siguientes pasos habrían de ser:

- Construcción de un prototipo real a tamaño reducido.
- Estudio, desarrollo y diseño de detalle de las impedancias de acoplamiento.
- Implantación en una planta real y análisis de su comportamiento.
- Estudio económico y análisis de rentabilidad de la implantación de un ARS.

BIBLIOGRAFÍA

[1] E. Cardona and A. Piacentino, "Cogeneration: A regulatory framework toward growth," *Energy Policy*, vol. 33, no. 16, pp. 2100–2111, 2005.
[2] W. El-Khattam and M. M. Salama, "Distributed generation technologies, definitions and benefits," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 71, no. 2, pp. 119–128, Oct. 2004.

[3] M. Kanoglu and I. Dincer, "Performance assessment of cogeneration plants," *Energy Convers. Manag.*, vol. 50, no. 1, pp. 76–81, 2009.
[4] Z. Beihong and L. Weiding, "An optimal sizing method for cogeneration plants," *Energy Build.*, vol. 38, no. 3, pp. 189–195, 2006.
[5] D. Khani, A. Sadeghi Yazdankhah, and H. Madadi Kojabadi, "Impacts of distributed generations on power system transient and voltage stability," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 43, no. 1, pp. 488–500, Dec. 2012.
[6] P. Basak, S. Chowdhury, S. Halder Nee Dey, and S. P. Chowdhury, "A literature review on integration of distributed energy resources in the perspective of control, protection and stability of microgrid," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 16, no. 8, pp. 5545–5556, 2012.
[7] J. C. Gomez and M. M. Marcos, "Distributed generation: Exploitation of islanding operation advantages," *2008 IEEE/PES Transm. Distrib. Conf. Expo. Lat. Am. T D-LA*, pp. 1–5, 2008.
[8] I. J. Balaguer, S. Member, Q. Lei, S. Yang, and U. Supatti, "Control for Grid-Connected and Intentional Islanding Operations of Distributed Power Generation," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 58, no. 1, pp. 147–157, 2011.
[9] U. Rudez and R. Mihalic, "A novel approach to underfrequency load shedding," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 81, no. 2, pp. 636–643, Feb. 2011.
[10] W. Gu, W. Liu, C. Shen, and Z. Wu, "Multi-stage underfrequency load shedding for islanded microgrid with equivalent inertia constant analysis," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 46, pp. 36–39, Mar. 2013.
[11] R. L. Vasquez-Arnez, D. S. Ramos, and T. E. Del Carpio-Huayllas, "Microgrid dynamic response during the pre-planned and forced islanding processes involving DFIG and synchronous generators," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 62, pp. 175–182, Nov. 2014.
[12] F. Katiraei, S. Member, M. R. Iravani, and P. W. Lehn, "Micro-Grid Autonomous Operation During and Subsequent to Islanding Process," vol. 20, no. 1, pp. 248–257, 2005.
[13] P. K. Dash, M. Padhee, and S. K. Barik, "Estimation of power quality indices in distributed generation systems during power islanding conditions," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 36, no. 1, pp. 18–30, Mar. 2012.
[14] C. T. Hsu, "Voltage sags improvement for the high-tech industrial customers by using cogeneration system," *IEEE Reg. 10 Annu. Int. Conf. Proceedings/TENCON*, pp. 36–39, 2007.
[15] J. Zambrano, M. Izzeddine, "Análisis de la protección secundaria efecto en cuanto a la estimación de los huecos de tensión gravedad," pp. 1–14, 2015.
[16] S. T. Elphick and V. W. Smith, "The 230 V CBEMA curve - Preliminary studies," *Inf. Tecnol. Ind. Council USA*, pp. 1–6, 2010.
[17] M. M. Morcos and J. C. Gómez, "Mitigation of Distant Voltage-Sag Penetration into Industrial Premises with Distributed Generation," *Electr. Power Components Syst.*, vol. 34, no. 9, pp. 961–965, Sep. 2006.
[18] The MathWorks, *SimPowerSystems for use with Simulink for use with Simulink*. 2013.
[19] S. T. Karris, *Second Edition Introduction to Simulink*®, 2nd ed. 2008.
[20] M. H. J. Bollen, "What is power quality?," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 66, no. 1, pp. 5–14, 2003.
[21] M. H. J. Bollen, IEEE Power Engineering Society, IEEE Power Electronics Society, and IEEE Industry Applications Society, *Understanding power quality problems: voltage sags and interruptions*. IEEE Press, 2000.
[22] G. Yaleinkaya, M. H. J. Bollen, and P. a. Crossley, "Characterization of voltage sags in industrial distribution systems," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 34, no. 4, pp. 682–688, 1998.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a las Universidades de León y de Girona por el apoyo en los trabajos realizados y en segundo lugar a la empresa *Tresca Ingeniería S.A.* por facilitar datos reales de plantas, así como aportar comentarios de situaciones reales que han ayudado al desarrollo de los trabajos aquí expuestos.