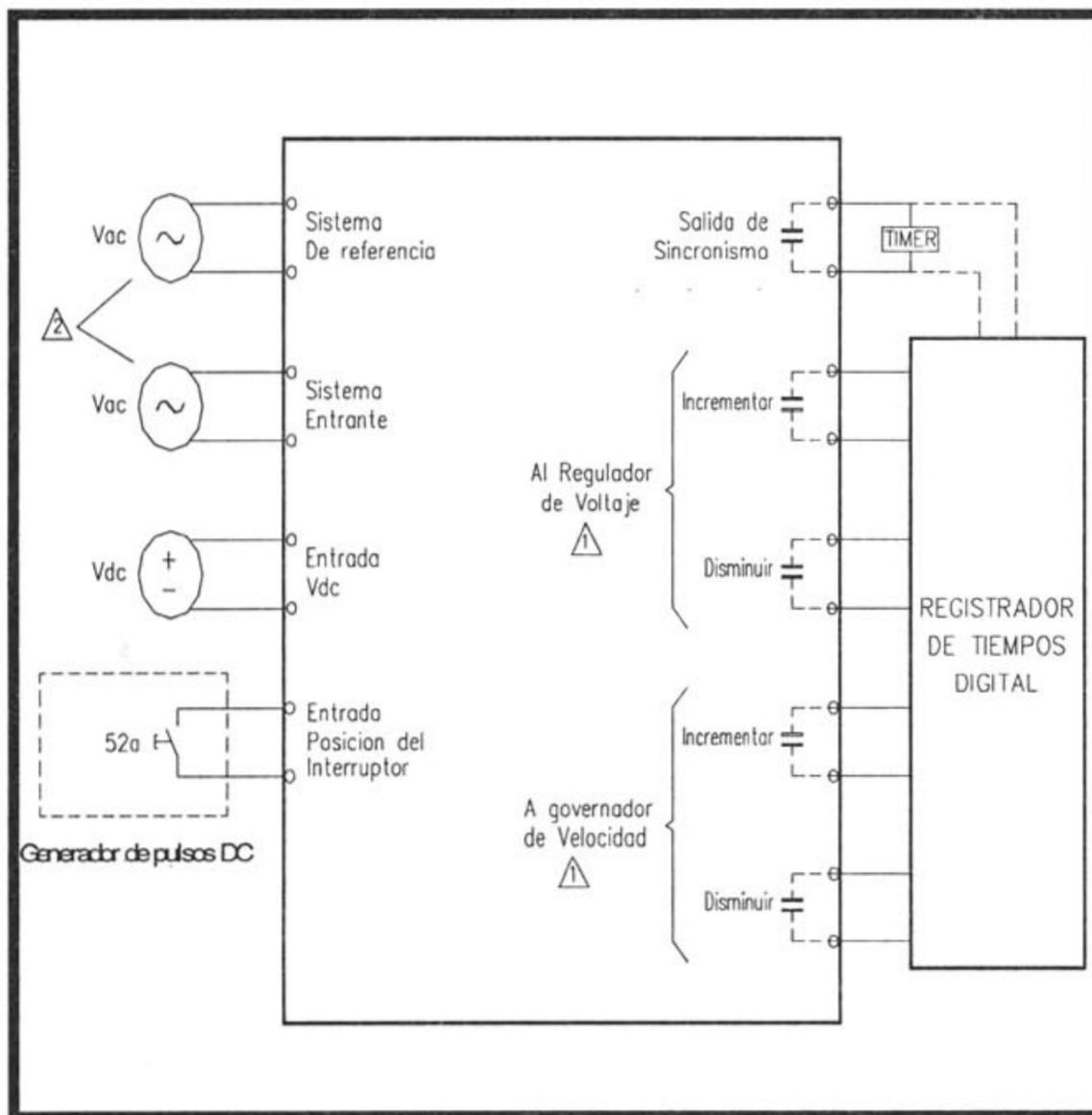


Criterios para ajuste en relés de sincronización



RESUMEN

En este artículo se presenta la metodología para determinar los ajustes que deben ser introducidos en un equipo de sincronización, cuando se van a acoplar dos sistemas de potencia. Esta metodología contiene una sustentación teórica y su respectiva aplicación en el sistema de sincronización de la Central Hidroeléctrica Calima.

ABSTRACT

This paper present the methodology to determine the adjustments required in the synchronizing equipments to interconnect two power systems. This methodology contains the supporting theory and its application to the Calima Power Generating Station.

1. INTRODUCCIÓN

La entrada de una máquina al sistema requiere comprobar el cumplimiento de condiciones necesarias para realizar el acople, sin afectar la máquina o la estabilidad del sistema. La sincronización consiste en verificar el cumplimiento de estas condiciones, para permitir la orden de cierre del interruptor de potencia y acoplar de esta manera dos sistemas en paralelo.

La teoría desarrollada será empleada para plantear una solución al problema del sistema de sincroni-

□ Gladys Caicedo Delgado, M.Sc.

Ingeniera Electricista
Profesora Titular
Universidad del Valle

□ Camilo Andrés Ruiz

Ingeniero Electricista

□ Francisco Javier Murcia, M.Sc

Ingeniero Electricista
Jefe de Sección de
Mantenimientos Especiales
Empresa de Energía del
Pacífico, EPSA

□ María Isabel Brieva

Ingeniera Electricista

zación automática de la Central Hidroeléctrica Calima, el cual presenta dificultades para ajustarse al nuevo tiempo de operación de los actuales interruptores. Este inconveniente obliga a la determinación de nuevos ajustes con base en los criterios desarrollados, para restablecer nuevamente el sistema de sincronización automático de la Central.

2. CRITERIOS DE AJUSTE

Los elementos que permiten o no el proceso de acople entre dos sistemas de potencia son los relés de verificación de sincronismo y los relés de sincronización automática. El relé de verificación de sincronismo (25) es empleado para supervisar el cierre manual o automático del interruptor de acople, con el fin de permitir el cierre sólo cuando el ángulo de desfase, la frecuencia de deslizamiento y la diferencia de voltaje sean menores o iguales a los valores de ajuste introducidos previamente al relé. El relé de sincronización automática (25A) cumple la misma función, pero adicionalmente envía señales de corrección a los reguladores de velocidad y de tensión del generador, con el fin de cumplir las condiciones apropiadas de sincronización. A continuación se describen los parámetros concernientes a los relés de sincronismo, fundamentales para presentar los criterios de ajuste:

- **Frecuencia de deslizamiento (Δf).** Se define como la diferencia entre las frecuencias de los generadores o sistemas a acoplar. Es considerado positivo cuando la frecuencia del sistema entrante es mayor que la del sistema de referencia y negativo cuando se presenta la situación inversa. Cuando el deslizamiento de frecuencia es negativo se presenta la motorización de la unidad, trayendo como consecuencia sobrepresiones que afectarían directamente a la turbina, ocasionando la actuación de los relés de potencia inversa.
- **Tiempo de cierre del interruptor de acople (T_r).** Para obtener la condición exacta de sincronismo debe tenerse en cuenta la velocidad de operación del interruptor de acople, es decir, el tiempo que emplea dicho interruptor desde el momento mismo en que su circuito de control es energizado hasta que sus contactos se cierran completamente.
- **Ángulo de desfase o compensación (θ_r).** Este ángulo representa la diferencia angular máxima que debe existir entre los dos sistemas en el momento de enviar la señal de cierre al circuito de control del interruptor de acople, para que en el instante en que este interruptor cierre sus contactos, la diferencia de fase sea cercana a cero grados.

2.1. Determinación general de los ajustes

La ausencia de sincronismo entre dos sistemas de potencia se refleja en la variación en el tiempo del ángulo de desfase entre los vectores de tensión representativos de cada sistema (θ), como consecuencia de la diferencia existente entre las velocidades de los rotores de las máquinas, lo cual se relaciona en la expresión:

$$\omega_r = \frac{d\theta}{dt} \quad (1)$$

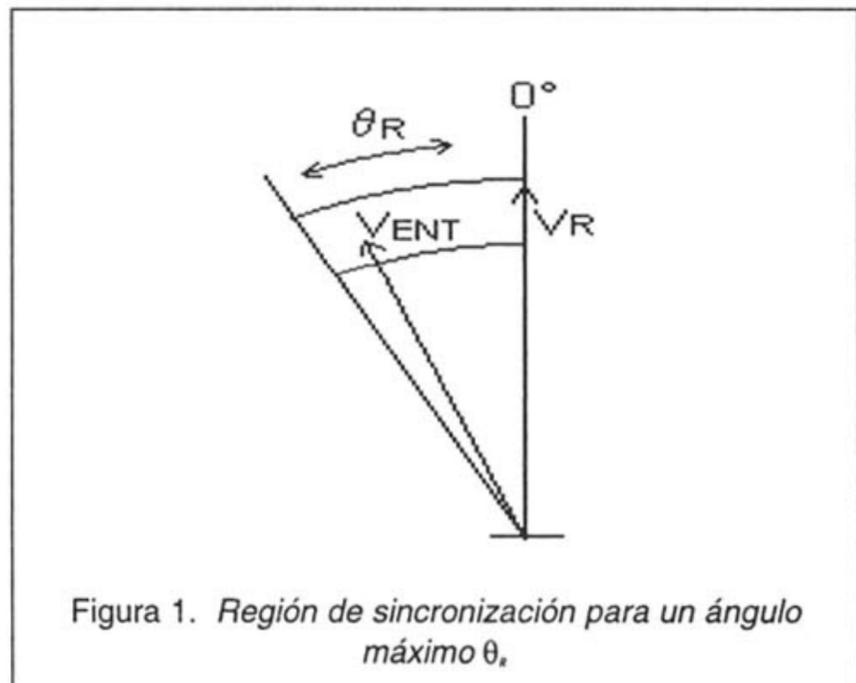
Donde ω_r es la velocidad relativa del sistema entrante con respecto al sistema rodante, es decir, la diferencia de velocidad entre los dos sistemas. El desarrollo de la ecuación es:

$$\omega_r = 2\pi \times \Delta f \frac{\text{rad} \times \text{ciclo}}{\text{seg}} = 360 \times \Delta f \frac{\text{grd} \times \text{ciclo}}{\text{seg}}$$

$$360 \times \Delta f = \frac{d\theta}{dt} \Rightarrow d\theta = 360 \times \Delta f \times dt$$

$$\boxed{\int d\theta = 360 \times \Delta f \times \int dt} \quad (2)$$

La diferencia angular entre los sistemas varía con el tiempo, a una velocidad que depende de la frecuencia de deslizamiento existente. El barrido del ángulo durante el tiempo de retraso t puede observarse en la figura 1, se nota que el desfase entre los dos sistemas varía en una región comprendida entre θ_r y 0° .



La señal de cierre del interruptor de acople se mantendrá activa, mientras el vector de voltaje del sistema entrante V_{ENT} se encuentre en la región comprendida entre θ_r y 0° con respecto al voltaje del sistema rodante V_r , por lo tanto los límites de integración para la ecuación (2) son:

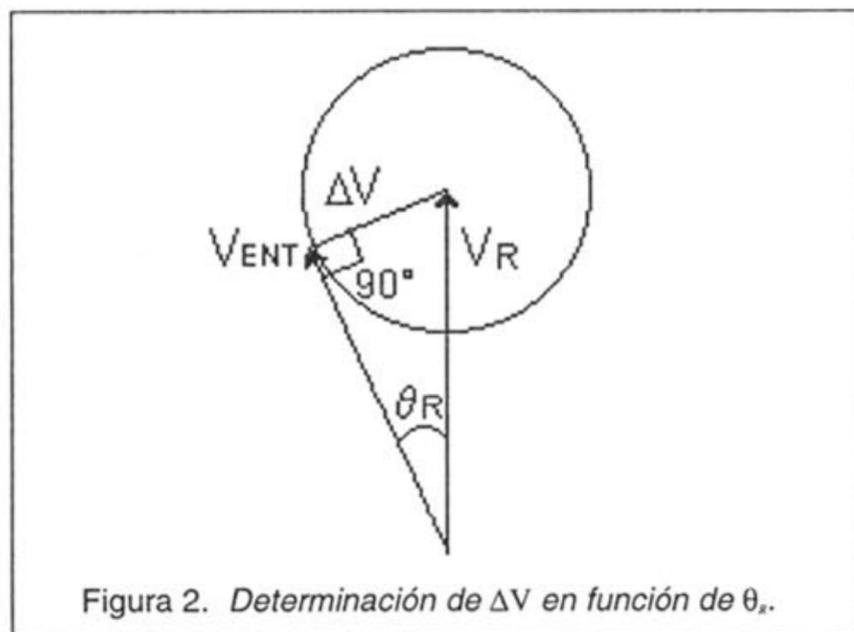
$$\int_0^{\theta_R} d\theta = 360 \times \Delta f \times \int_0^{T_R} dt \Rightarrow$$

$$\boxed{\theta_R = 360 \times T_R \times \Delta f}$$

La ecuación (3) determina la relación entre el ángulo de compensación, el tiempo de retraso y la frecuencia de deslizamiento para lograr el acople de dos sistemas en el momento en que estos tengan un desfase angular aproximado de cero grados.

Los relés de sincronismo actuales, sólo permiten ajustar en el panel frontal dos de las tres variables estudiadas anteriormente (θ_R y Δf , θ_R y T_R , ó, Δf y T_R), la tercera variable queda definida mediante la expresión (3).

Existe otra variable que puede ser ajustada en el panel frontal de los relés de sincronismo, la cual corresponde a la máxima diferencia de voltaje (ΔV) permitida entre los bornes del interruptor de acople en el momento de la iniciación del cierre. Este valor puede calcularse a partir del ángulo de compensación θ_R de acuerdo a la figura 2; V_R y V_{ENT} son los voltajes de los sistemas rodante y entrante respectivamente, medidos en el devanado de baja tensión de los transformadores de potencial.



El fasor V_{ENT} será tangente a una circunferencia trazada con centro en el extremo del vector V_R , así el fasor de máxima diferencia de voltaje ΔV será perpendicular a V_{ENT} formando un triángulo rectángulo, del cual se deduce la siguiente expresión:

$$\boxed{\Delta V = V_R \times \text{sen } \theta_R}$$

El procedimiento de cálculo de los valores de ajuste es:

1. Como punto de partida se determina la máxima diferencia de frecuencia permitida (Δf) de acuerdo a las condiciones de operación de los sistemas en

estado estable. Según el caso de aplicación:

- **Acople entre dos generadores.** El criterio para determinar la máxima diferencia que puede existir entre las unidades a acoplar, consiste en calcular el error del gobernador de velocidad, es decir, se miden los valores máximo y mínimo de la velocidad desarrollada por cada generador en régimen de vacío y en condiciones nominales. Con estos datos y el número de polos de la máquina se establece el valor del deslizamiento de frecuencia Δf que debe ser ajustado en el equipo de sincronización.
- **Acople de un generador a una barra de potencia.** En este caso, la máxima frecuencia de deslizamiento permitida se establece de acuerdo a la variación de frecuencia del generador y de acuerdo al rango de variación de frecuencia permitida en el sistema representado por la barra de potencia infinita para el estado de régimen permanente. Esta información es suministrada por los organismos de control y regulación.
- **Recierres y acople entre dos áreas de un sistema de potencia.** Al igual que en el caso anterior, sólo se necesita conocer los rangos permitidos de variación de la frecuencia en régimen permanente de los extremos aislados, con el fin de establecer la frecuencia de deslizamiento permitida para el acople.

2. Se establece el tiempo de cierre en segundos del interruptor de acople (T_R) de acuerdo a la información suministrada por los fabricantes en los catálogos.
3. Con los datos obtenidos en los pasos anteriores se calcula el ángulo de compensación (θ_R) para el cual debe ser enviada la orden de cierre del interruptor por medio de la ecuación (3).
4. A partir del ángulo calculado se establece la máxima diferencia de voltaje permitida, por medio de la ecuación (5).

Es importante tener en cuenta en el momento de determinar el ajuste de máxima diferencia de voltaje permitida ΔV , que en el voltaje del sistema rodante en la barra de potencia ocurren variaciones dependiendo de las condiciones del sistema durante el día, por esta razón debe establecerse la variación del voltaje en la barra, para ajustar el voltaje de salida del generador a las condiciones reales.

3. PRUEBAS DE CAMPO

Las pruebas efectuadas a los relés de sincronismo tienen el propósito de verificar la correcta operación del dispositivo, para garantizar la entrada de una nueva máquina o sistema, de manera segura y confiable. En la figura 3 se muestra el montaje de

prueba recomendado para los relés de sincronismo, así como las tres señales de entrada necesarias, independientes del tipo y marca del relé.

De acuerdo con la figura 3, el relé de sincronismo consta de diferentes unidades de ajuste que en conjunto determinan si se envía o no, orden de cierre al interruptor. El buen funcionamiento del relé se verifica a través de dos tipos de pruebas: una prueba individual de cada una de sus unidades y una prueba que involucre la operación en conjunto de dichas unidades. De acuerdo a los resultados obtenidos, debe chequearse que el relé responda dentro de los porcentajes de error permitidos por el fabricante.

3.1 Prueba de la unidad de ajuste de diferencia de voltaje

El objetivo de esta prueba consiste en verificar que la señal de sincronismo no sea enviada, cuando el valor de diferencia de voltaje se encuentre fuera del rango establecido por el fabricante. El procedimiento es como lo muestra la figura 3:

1. Ajustar los voltajes simulados de los sistemas rodante y entrante en 120V AC, 60 Hz. Colocar el selector de ajuste de diferencia de voltaje en su valor mínimo (por ejemplo 0.5 %).
2. Variar lentamente el voltaje simulado de sistema entrante para sobrepasar el límite establecido en el control del ajuste de diferencia de voltaje. El indicador correspondiente a ΔV debe señalar siempre que la diferencia de voltajes esté fuera del rango.
3. Repetir los pasos 1 y 2 con el control de ajuste de diferencia de voltaje en su valor máximo (5%). El indicador correspondiente a ΔV debe señalar siempre que la diferencia de voltajes esté fuera del rango establecido.
4. Verificar que la señal de sincronismo no sea enviada mientras la diferencia de voltaje esté fuera del rango establecido.

En los relés de sincronización automática (25A), existe la unidad de igualación de voltaje que envía señales de corrección al regulador de voltaje del generador. La prueba correspondiente a esta unidad es la siguiente:

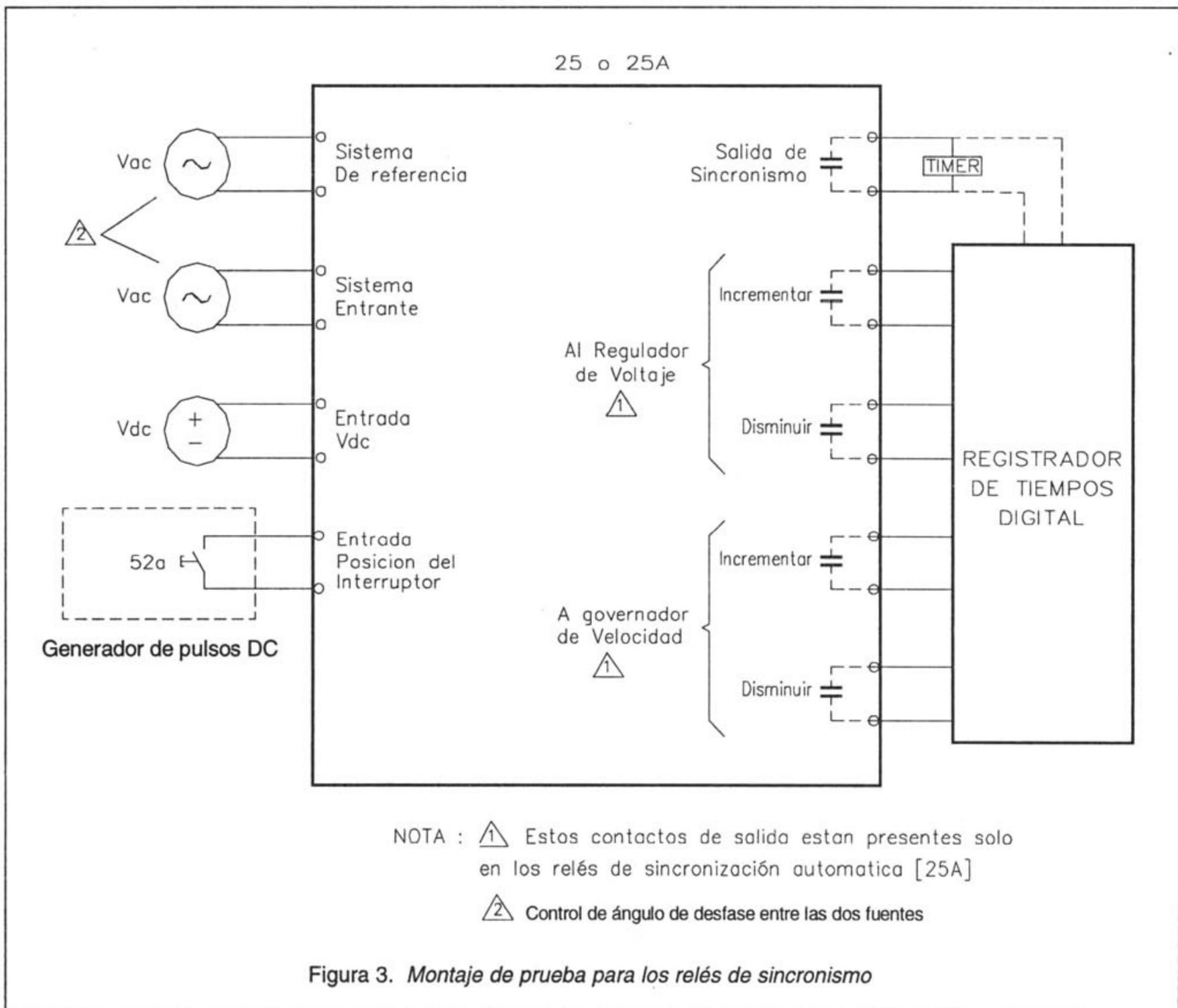
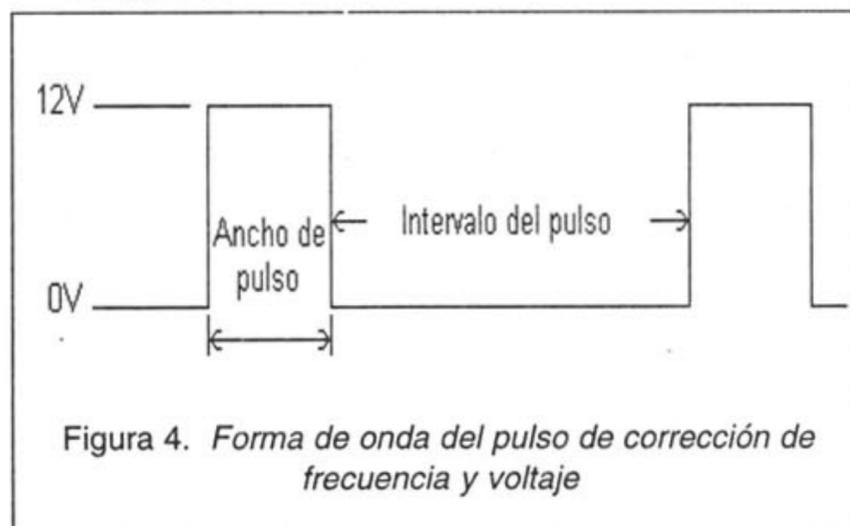


Figura 3. Montaje de prueba para los relés de sincronismo

1. Establecer un valor promedio en el selector de ajuste de diferencia de voltaje.
2. Ajustar el voltaje simulado del generador en un valor mayor que el del sistema, de tal manera que se encuentre fuera del límite establecido en el selector de ajuste de diferencia de voltaje. En ese momento el relé enviará por sus terminales "disminuir voltaje" un pulso de corrección adecuado para que el regulador de voltaje lo disminuya hasta alcanzar la tensión adecuada, en este caso el indicador correspondiente debe iluminarse.
3. Conectar un osciloscopio o un registrador de tiempos digital a las salidas del relé, observar el ancho y la frecuencia del pulso de corrección enviado al regulador de voltaje del generador. En el osciloscopio se debe observar la forma de onda presentada en la figura 4.



4. Si el relé posee la opción de ajuste del ancho y la frecuencia del pulso, introduzca un valor de ajuste al control del ancho del pulso y verifique que el indicador correspondiente a disminuir voltaje señalice para la duración del ancho del pulso ajustado; cuando ajuste el intervalo del pulso, el indicador no debe iluminarse durante este intervalo.
5. Ajustar el voltaje simulado del generador en un valor menor que el del sistema de tal manera que se encuentre fuera del límite establecido en el control de ajuste de diferencia de voltaje. En este momento el indicador correspondiente a aumentar voltaje (Raise) debe iluminarse para la duración del ancho del pulso introducido.

3.2 Prueba de la unidad de ajuste de diferencia de frecuencia

En esta prueba se verifica que la señal de sincronismo no sea enviada cuando el deslizamiento de frecuencia se encuentra fuera del rango permitido por el fabricante. El procedimiento es el siguiente:

1. Ajustar los voltajes simulados de los sistemas rodante y entrante en 120V AC, 60 Hz. Colocar el selector de ajuste de diferencia de frecuencia en su valor máximo (por ejemplo 0.5 Hz).
2. Disminuir, lentamente, la frecuencia del sistema

entrante hasta sobrepasar el límite establecido en el ajuste de diferencia de frecuencia. El indicador correspondiente a Δf alto debe señalar siempre que la diferencia de frecuencias esté fuera del rango.

3. Aumentar, lentamente, la frecuencia del sistema entrante, de tal forma que se cumpla el límite establecido en el ajuste de diferencia de frecuencia. El indicador correspondiente a Δf alto no debe emitir respuesta, mientras que la diferencia de frecuencias esté dentro del rango.
4. Verificar que la señal de sincronismo no sea enviada mientras la diferencia de frecuencias esté fuera del rango establecido.

3.3 Prueba de la unidad de ajuste del ángulo de compensación

La prueba de la unidad de ángulo de compensación consiste en verificar la relación matemática entre θ_R , Δf y T_R , presentada en el punto 3.1. Los pasos a seguir son:

1. Ajustar los voltajes simulados de los sistemas rodante y entrante en 120AC, 60 Hz.
2. Calcular el ángulo de compensación (θ_R) para cada uno de los valores de deslizamiento de frecuencia y tiempo de cierre presentados en la tabla 1, de acuerdo al tipo de relé empleado. En la tabla 1, las variables se relacionan con la expresión:

$$\theta_R = 360 \times T_R \times \Delta f$$

3. Ajustar la frecuencia del sistema entrante para obtener cada uno de los deslizamientos mostrados en la tabla 1, posteriormente ajuste el tiempo de cierre del interruptor de acuerdo a lo indicado en la tabla.
4. Verificar que el ángulo de desfase entre los dos sistemas, en el momento justo del envío del pulso de sincronización, sea el indicado para cada valor respectivo de deslizamiento y tiempo de cierre de la tabla 1.

En la mayoría de relés existe un límite de ángulo de desfase para el cual se inhibe el envío de la señal de sincronismo. En la tabla 1 se ha supuesto este valor en 40° pero puede ser otro valor de acuerdo al tipo de relé que se esté probando. Cuando el ángulo límite es sobrepasado, se indica con la expresión "No sincroniza".

3.4 Prueba de la unidad de ajuste de tiempo de retraso

1. Ajustar el control de tiempo de retraso en su valor mínimo, colocar en cero el contador de tiempos digital.
2. Ajustar los voltajes simulados de los sistemas rodante y entrante en 120V AC, 60 Hz y cero grados

TABLA 1. Parámetros para probar la unidad de ajuste del ángulo de compensación

Δf (Hz)	θ_R para $T_R = 100ms$	θ_R para $T_R = 400ms$	θ_R para $T_R = 700ms$
0.4	14.4°	NO SINCRONIZA	NO SINCRONIZA
0.2	7.2°	28.8°	NO SINCRONIZA
0.02	0.72°	2.88°	5.04°
0.005	0.18°	0.72°	1.26°

de desfase entre los dos. Simultáneamente inicie el contador de tiempo.

- Una vez el contacto de sincronismo detenga el contador de tiempo, verifique la lectura final con el tiempo de retraso ajustado, verifique que el porcentaje de error obtenido sea menor al especificado por el fabricante.

4. CASO DE APLICACIÓN: CENTRAL HIDROELÉCTRICA CALIMA

El sistema de sincronización de la Central Hidroeléctrica Calima puede ser clasificado como semiautomático, debido a que sólo se tiene control sobre el gobernador de velocidad de la unidad de generación entrante para realizar correcciones de frecuencia. La condición de voltaje es controlada en el generador por relés de bajo y sobre voltaje, y en la barra de potencia por un relé de bajo voltaje, de tal manera que sólo se permite la sincronización con una tensión superior al 80% (aproximadamente) del valor nominal.

El proceso de sincronización es controlado por un circuito que permite el acople de las unidades de generación con el sistema rodante en forma coordinada, empleando para ello los siguientes dispositivos:

Relé de igualación de frecuencias (15): Es el encargado de enviar señales de corrección de frecuencia al gobernador de velocidad de la respectiva unidad de generación a sincronizar. Este relé es el mismo para cada circuito de control de todas las unidades de generación, por lo tanto, sólo se podrá sincronizar una máquina a la vez.

Relé de verificación de sincronismo (25): Una vez que las condiciones de sincronismo se han obtenido, este relé envía la señal permisiva para la energización de la bobina de cierre del interruptor. Solamente existe un relé de verificación de sincronismo para la sincronización de todas las unidades, por lo cual, al igual que el relé de igualación de frecuencias, sólo permitirá la sincronización de una máquina al tiempo. El relé verificador de sincronismo de la central es un modelo XT7-C fabricado Westinghouse Electric Corporation. Este relé es fundamentalmente analógico (estático), su lógica de funcionamiento está basada en

la transformación y rectificación de voltajes, energización de relés, cierre o apertura de contactos, polarización de tubos de vacío y caídas de voltaje en resistencias.

El proceso de sincronización se realiza actualmente en forma manual debido a que el sistema de sincronización semiautomático presenta dificultades para ajustarse a los nuevos tiempos de operación de los interruptores existentes actualmente.

Este relé tiene únicamente selectores de ajuste de tiempo y ángulo de fase. Los controles de ajuste permiten seleccionar tiempos de cierre del interruptor desde 0.1 hasta 0.8 segundos y máximo ángulo de fase desde 0 hasta 40° antes de sincronismo, y presenta un rango de tolerancia para el acople de $\pm 3^\circ$, sin embargo, debido a que posee los ajustes de los antiguos interruptores, la sincronización se efectúa en un ángulo de desfase por fuera del rango de tolerancia, es decir, en condiciones no apropiadas de sincronismo. Este inconveniente obliga a la determinación de nuevos ajustes para restablecer el sistema de sincronización. Los valores de los ajustes antiguos son los siguientes:

- Ángulo de compensación (θ_R): 25°
- Tiempo de cierre (T_R): 0.52 segundos

La frecuencia de deslizamiento estimada para establecer los ajustes antiguos, puede ser aplicada para calcular los nuevos ajustes, debido a que las condiciones de la central no han cambiado hasta el momento. De acuerdo al catálogo suministrado por el fabricante las variables se relacionan por medio de la ecuación: $\theta_R = 360 \times T_R \times \Delta f$ por lo tanto, reemplazando las variables con los ajustes antiguos:

$$\Delta f = \frac{\theta_R}{360 \times T_R} = \frac{25^\circ}{360 \times 0.52 \text{ seg}} = 0.134 \text{ Hz}$$

Los interruptores instalados recientemente en Calima corresponden a los SF6, los cuales cuentan con un tiempo de cierre máximo de 0.04 segundos. Entonces, con esta información y el deslizamiento de frecuencia

calculado, se determina el nuevo ángulo de compensación así:

$$\theta_R = 360 \times 0.04 \text{seg} \times 0.134 \text{Hz} = 2^\circ$$

Con el fin de prever cambios futuros en el equipo de sincronización, se calcula la máxima diferencia de voltaje permitida a través del interruptor por medio de la ecuación $\Delta V = V_R \times \text{sen } \theta_R$, donde V_R es de 120 V para este caso:

$$\Delta V = 120 \times \text{sen } 2^\circ = 4.2V$$

Así, los nuevos ajustes para la sincronización de las unidades de la Central Hidroeléctrica de Calima son:

- Ángulo de compensación (θ_R): 2° .
- Tiempo de retraso (T_R): 0.04 seg.
- Frecuencia deslizamiento: 0.134 Hz.
- Máxima diferencia de voltaje: 4.2 V.

El tiempo de cierre de los nuevos interruptores no puede ser ajustado en el panel frontal del actual relé de verificación de sincronismo de la Central Hidroeléctrica de Calima, debido a que la unidad de tiempo de este relé sólo admite un ajuste superior o igual a 0.1 seg. Esta es una de las razones más significativas que conllevan a recomendar el cambio de los relés de sincronización de la central por un sistema moderno que se ajuste a los nuevos requerimientos.

6. CONCLUSIONES

- Para cada condición de sincronización existe una tolerancia con respecto a los ajustes de diferencia de voltaje, diferencia de frecuencia y ángulo de compensación introducidos al relé, con el fin de realizar el acople en condiciones exactas de sincronismo.
- El tiempo de cierre del interruptor de acople, a pesar de ser un ente externo al relé mismo, posee una gran influencia en los ajustes del relé de sincronismo, debido a su incidencia en el ángulo definitivo de acople.

7. BIBLIOGRAFÍA

- [1.] BRIEVA, M. I, RUIZ, C. A, Criterios de sincronización relacionados con la estabilidad en sistemas de potencia. Tesis de Grado del Programa de

Ingeniería Eléctrica de la Universidad del Valle, Cali, Colombia, 1998.

- [2.] BASLER ELECTRIC COMPANY. Instruction Manual For Auto – Synchronizer Relay Model: BE1 – 25A and BE1 - 25. U.S.A. Basler Electric, 1992.
- [3.] CUTLER – HAMMER. Instructions for XM family of synchronizers, style 5307C91. U.S.A. Westinghouse and Cutler – Hammer products, 1996.
- [4.] GENERAL ELECTRIC COMPANY. Protective relays application guide. 2ed. England, GEC, 1979

AUTORES

Gladys Caicedo Delgado. Es Ingeniera Electricista de la Universidad del Valle, egresada en 1986. Magíster en Sistemas de Generación de Energía Eléctrica de la Universidad del Valle en 1991. Profesora Titular de la Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Universidad del Valle.



Estudiante de Doctorado en Ingeniería de la Universidad del Valle. Su principal campo de interés es la automatización de sistemas de potencia. glacadel@eiee.univalle.edu.co



Francisco Murcia Polo. Ingeniero Electricista de la Universidad del Valle, en 1986. Magíster en sistemas de generación de energía eléctrica de la Universidad del Valle, en 1991. Trabajó en la operación y mantenimiento en la Planta de Salvajina (1988-1991) se desempeñó como Ingeniero de Protecciones y actualmente es el Jefe de Sección de Mantenimientos Especiales de la Empresa de Energía del Pacífico-Epsa. Su campo de interés es el de sistemas de generación de energía.

Camilo Andrés Ruiz. Ingeniero Electricista de la Universidad del Valle en 1998. Actualmente trabaja en la Empresa Transformadores de Colombia.



María Isabel Brieva. Ingeniera Electricista de la Universidad del Valle en 1998. Trabajó en Diconel, empresa dedicada al montaje de subestaciones.