

Comparación entre Rectificador Trifásico con Conmutación Simétrica y Convertidor AC/AC para la Mejora del Factor de Potencia en Microcentrales Hidroeléctricas

Henry Bory Prevez ^{a,*}, Herminio Martínez García ^{b,*}, Luís Vázquez Seisdedos ^a, Francisco Chang Mumañ ^a,
Lorenzo Alfredo Enríquez García ^c

^a Departamento de Automática, Facultad de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Oriente Sede Mella, Ave Casero S/N, Santiago de Cuba, Cuba.

^b Departamento de Ingeniería Electrónica, Escuela de Ingeniería de Barcelona Este (EEBE), Universidad Politécnica de Cataluña (UPC) – BarcelonaTech, Av. de Eduard Maristany, n° 10 – 14, E-08019, Barcelona, España

^c Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador.

Resumen

Muchas de las microcentrales hidroeléctricas, útiles por la producción de electricidad en regiones de difícil acceso, operan en régimen autónomo, por lo que es necesario realizar la regulación de frecuencia de la tensión generada. Una vía de regular frecuencia es variando la potencia disipada en cargas balastos mediante convertidores AC-AC. Estos convertidores consumen potencia reactiva, empeorando el factor de potencia a la salida del generador. Sin embargo, una alternativa para evitar el empeoramiento del factor de potencia, es el empleo de un rectificador trifásico a diodos tipo puente con interruptor, en serie con la carga, conmutado con ángulo simétrico. El objetivo del presente artículo es comparar dicho rectificador mencionado y el convertidor de AC-AC, esquema más empleado actualmente, respecto a parámetros de interés como es el factor de potencia a la salida del generador eléctrico de las microcentrales hidroeléctricas que regulan frecuencia por el método de carga lastre.

Palabras Clave:

Rectificadores controlados, convertidores AC-AC conmutados, factor de potencia, control de frecuencia.

Comparison of Three-Phase Rectifier with Symmetrical Switching and AC-AC Converter for the Power Factor Improvement in Hydroelectric Micro-Plants

Abstract

Many of hydroelectric micro-plants, useful for the electricity production at intricate regions, operate in autonomous regimen. Therefore, it is necessary to accomplish the control of frequency. One way to control the frequency is varying the power dissipated in ballast loads employing AC-AC converters. These converters consume reactive power, contributing to aggravate the power factor at the generator output. An alternative in order to avoid the deterioration of the power factor is the use of a bridge three-phase rectifier using diodes with a serial switch with the load that is switched with symmetric angle. As a consequence, the objective of this article is to carry out a comparison between the aforementioned three-phase rectifier and the AC-AC converter, regarding the power factor at the output of the electric generator of hydroelectric micro-plants that regulate frequency by means of the ballast-load method.

Keywords:

Controlled rectifiers, switching AC-AC converters, power factor, frequency control.

1. Introducción

En la actualidad se presta atención a las fuentes de energías renovables, como lo demuestran los artículos de

(López *et al.*, 2014; Wu *et al.*, 2014 y Bordons *et al.*, 2015), creándose las llamadas microrredes eléctricas que operan en modo islas, no conectadas al sistema eléctrico, siendo necesario hoy en día, para la regulación de tensión y

*Autor para la correspondencia: herminio.martinez@upc.edu

frecuencia, la aplicación de convertidores electrónicos de potencia y su control (Naqui *et al.*, 2013; Ortega *et al.*, 2016; Colak *et al.*, 2015 y Piri-Botalla *et al.*, 2016).

Dentro de las energías renovables se encuentra la energía hidráulica en las cuales se transforma la energía potencial gravitatoria del caudal de agua en energía eléctrica.

En el caso particular de Cuba, existen actualmente 147 pequeñas centrales hidroeléctricas (PCHs). Estas PCHs están ubicadas principalmente en las provincias orientales y, de éstas, 117 no se encuentran conectadas al Sistema Electroenergético Nacional (SEN); así pues, operan de forma autónoma. La mayoría no posee reguladores de frecuencia y/o de tensión que garanticen una buena calidad en el suministro de la energía eléctrica, y, mucho menos, control del factor de potencia (Renovable.cu, 2014; García, 2005).

En este trabajo se enfocará la atención en las pequeñas centrales hidroeléctricas, ya que éstas prestan servicio en intrincados lugares sin necesitar grandes embalses o grandes caudales de agua, produciendo menor impacto ambiental. En algunas de estas microcentrales hidroeléctricas (μ CHs), al no encontrarse conectadas al citado Sistema Electroenergético Nacional, el control de la frecuencia se realiza manteniendo el caudal constante y modificando la potencia disipada en una carga lastre conectada en paralelo con la carga de los usuarios, de modo tal que la potencia generada (P_G), que se desea mantener constante, sea igual a la potencia disipada por la carga lastre (P_L) más la potencia consumida por los usuarios (P_U) como se muestra en la Figura 1. La ecuación básica que describe este tipo de regulación es: $P_G = P_L + P_U$ (Mare y Odello, 2001; Hechavarria y Bell, 2008).

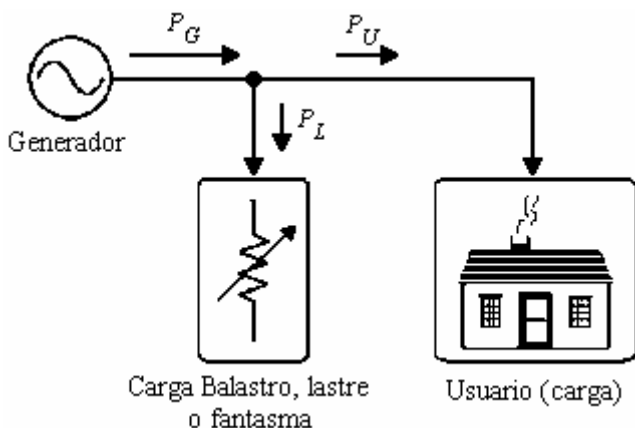


Figura 1: Esquema general de trabajo de control de frecuencia por carga lastre.

El método de control de frecuencia por cargas lastres empleando controladores electrónicos presenta las siguientes ventajas: (1) regulación más eficiente que otros métodos existentes, (2) los esquemas de control son más robustos, flexibles y exactos, (3) no presentan desgastes, pues no hay elementos mecánicos o electromecánicos en movimiento, y (4) no requieren el mantenimiento necesario de los reguladores mecánico-hidráulicos (Mare y Odello, 2001; Hechavarria y Bell, 2008; Mendoza, 2006).

Actualmente, tanto nacional como internacionalmente, en las μ CHs en las que se regula frecuencia mediante cargas balastos, para el control de la potencia a disipar en cada una de las tres resistencias lastres (una por cada fase del generador trifásico) se emplea un convertidor AC-AC.

Ejemplo de esto, se tiene en los trabajos de García *et al.*, 2004; de Abreu, 2006; de Kurtz y Anocibar, 2007a y 2007b; de Kurtz y Botteró, 2014; de Fong *et al.*, 2008; de Hechavarria y Bell, 2008; de Dinh, 2010; de Suárez, 2010; de Peña *et al.*, 2013; de Vasquez *et al.*, 2014; y de Bory, 2011 y 2014.

En el trabajo de Kurtz y Botteró, 2014, los autores proponen como alternativa del control de la potencia a disipar en la carga balastro, un rectificador trifásico tipo puente a diodos (puente de Graetz) con un MOSFET de potencia, que actúa como interruptor en serie con la carga, el cual se conmuta por modulación de ancho de pulso (PWM, *pulse width modulation*), como se muestra en la Figura 2.

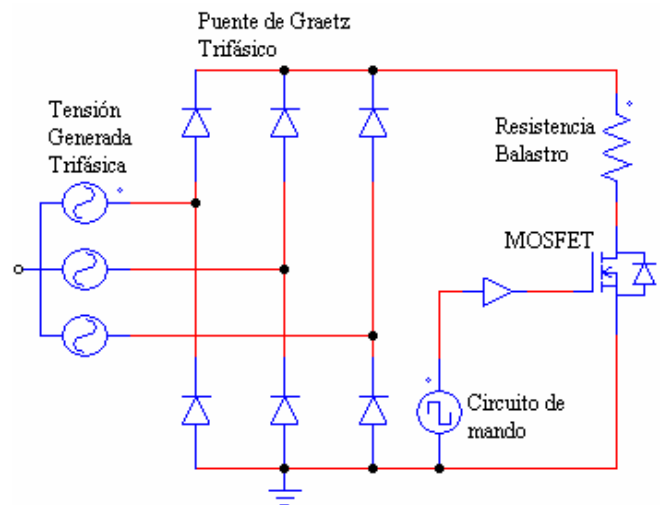


Figura 2: Rectificador trifásico con interruptor (MOSFET) en serie con la carga (Kurtz y Botteró, 2014).

El control PWM de este rectificador tiene el inconveniente que emplea dispositivos de potencia de recuperación rápida que son más caros y están menos disponibles que los dispositivos para el mismo rectificador conmutando al interruptor a una frecuencia menor.

Además, en las referencias (Bory *et al.*, 2006; Bory *et al.*, 2008) se aplica una forma de conmutar a diferentes configuraciones de puentes rectificadores con carga resistiva inductiva, denominada conmutación con ángulo simétrico o conmutación simétrica. En las mismas se demuestra que, conmutando a los componentes con ángulo simétrico, el puente rectificador tiene potencia reactiva nula en su entrada. La dificultad en la aplicación de éste método ha estado en la necesidad de emplear varios dispositivos de potencia (MCT, IGBT, GTO, etc.) que son más caros que los tiristores de la misma potencia.

Así pues, el objetivo del presente trabajo consiste en comparar al rectificador trifásico de Kurtz y Botteró, 2014, conmutando el interruptor en serie con la carga con ángulo simétrico, y el convertidor AC-AC, que es el esquema actualmente más utilizado en el control de la frecuencia en una μ CH mediante carga balastro, con respecto a parámetros de interés como es el factor de potencia a la salida del generador eléctrico de microcentrales hidroeléctricas que regulan frecuencia por el citado método de carga lastre.

Los parámetros del sistema eléctrico a analizar en este artículo son: la corriente eficaz, las potencias activa, reactiva, aparente y de distorsión, así como el factor de potencia.

El artículo está organizado de la siguiente forma: la sección 2 realiza una aproximación al estudio de los dos convertidores que se han comparado en el presente artículo. En concreto, en la subsección 2.1 se realiza una breve reseña acerca de las expresiones de los índices de rendimiento y energéticos del convertidor AC-AC, que es el esquema más empleado actualmente, y la subsección 2.2, se realiza un análisis del rectificador trifásico con interruptor en serie con la carga conmutado con ángulo simétrico propuesto, obteniéndose las expresiones matemáticas de los índices de rendimiento y energéticos en función del ángulo de conmutación. En la sección 3, se desarrolla un ejemplo de aplicación a las microcentrales hidroeléctricas, donde se comparan el rectificador trifásico y los convertidores AC-AC de acuerdo a los índices previamente mencionados, y se demuestra la ventaja del empleo del rectificador con respecto al factor de potencia a la salida del generador. El artículo finaliza en la sección 4 mostrando las conclusiones más destacadas.

2. Aproximación a los Convertidores Bajo Estudio

En esta sección presentaremos una aproximación al estudio de los dos convertidores que se han comparado en el presente artículo: el convertidor AC-AC, que es el esquema más empleado actualmente, y la propuesta basada en el rectificador trifásico tipo puente con interruptor en serie con la carga lastre conmutado con ángulo simétrico..

2.1. Reseña sobre el Convertidor AC-AC

A continuación se resumirán las expresiones matemáticas de los parámetros de rendimiento y energéticos mencionados anteriormente del convertidor AC-AC. Como el sistema es trifásico, existe un convertidor en cada fase que regula la cantidad de energía transferida del generador a las cargas balastos. Además, como se considera que: (1) los convertidores están conectados en estrella, (2) son conmutados con el mismo ángulo de disparo, (3) se emplea la conexión a cuatro hilos, y (4) el sistema es equilibrado tanto en generación como en carga, basta con analizar una fase para obtener los resultados del conjunto trifásico.

En la Figura 3 se muestra el esquema de simulación del convertidor AC-AC en PSIM® para una fase.

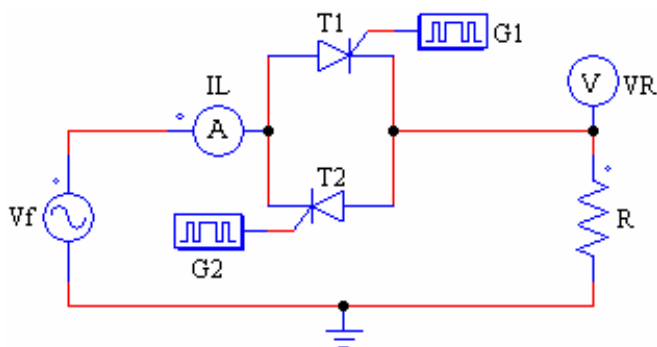


Figura 3: Esquema de simulación del convertidor AC-AC.

Este esquema de simulación está compuesto por una fuente de tensión sinusoidal (V_f) que representa una fase del generador, de tensión eficaz (V_{ef}) 110 V y frecuencia 60 Hz, un convertidor AC-AC, constituido por los tiristores $T1$ y $T2$

en antiparalelo, los generadores para el disparo (G_1 y G_2) cuya función es dar los pulsos de disparo a los tiristores, con ajuste de parámetros de frecuencia (60 Hz), de número de puntos de conmutación (dos) y de puntos de conmutación (se indica el ángulo de disparo deseado), y, finalmente, resistencia de carga que representa la carga lastre en una de las tres fases ($R=4,03 \Omega$).

El funcionamiento del esquema es el siguiente: para el semiciclo positivo de la tensión de entrada se dispara $T1$ un ángulo α después del cruce por cero, haciendo que éste pase al estado de conducción permitiendo el flujo de potencia de la fuente a la carga. Durante el semiciclo negativo, se dispara $T2$ un ángulo α después del cruce por cero, haciendo que éste pase al estado de conducción, permitiendo el flujo de potencia de la fuente a la carga. Así pues, variando el ángulo de disparo, se controla el flujo de potencia.

En la Figura 4 se representan las formas de onda más significativas tanto de tensión como de corriente del circuito anterior para un caso particular con un ángulo α de 60° .

El valor eficaz de la corriente de entrada es:

$$I_{rms} = \frac{V_{ef}}{R} \sqrt{\frac{1}{\pi} \left[\pi - \alpha + \frac{\sin(2\alpha)}{2} \right]} \quad (1)$$

Y la potencia activa de entrada al convertidor AC-AC:

$$P_{ent} = \frac{V_{ef}^2}{\pi R} \left[\pi - \alpha + \frac{\sin(2\alpha)}{2} \right] \quad (2)$$

Para $\alpha=0$ la potencia activa es máxima, de valor $P_{\alpha 0} = V_{ef}^2 / R$, lo que se corresponde con el comportamiento del convertidor como un circuito resistivo puro, pues para este valor de α , la fuente ve conectada a ella una resistencia pura y ésta $P_{\alpha 0}$ es la potencia que se disipa en dicha resistencia. Para $\alpha = \pi$, la potencia de entrada alcanza su valor mínimo, cero, pues no se transfiere potencia de la fuente a la carga.

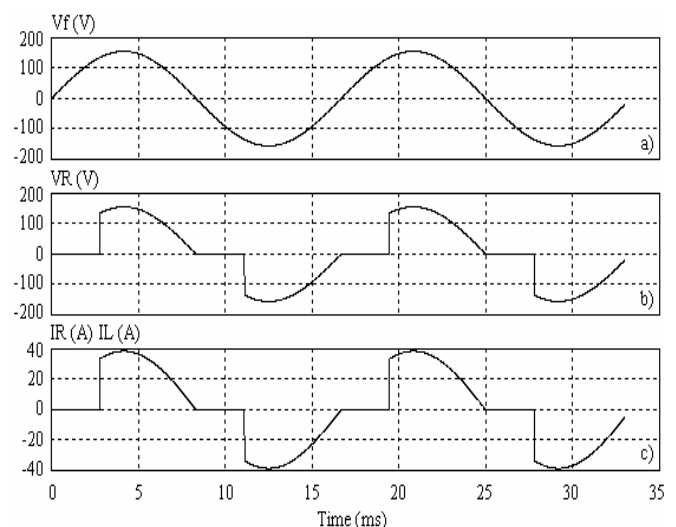


Figura 4: Gráficas de las formas de onda más significativas del convertidor AC-AC. (a) Tensión de la fuente, (b) tensión en la carga, (c) corriente en la línea, la misma de la carga.

Por otro lado, la potencia reactiva de entrada al convertidor AC-AC viene dada por:

$$Q_{ent} = \frac{V_{ef}^2}{\pi R} \left[\frac{1 - \cos(2\alpha)}{2} \right] \quad (3)$$

Esta potencia es positiva, lo que indica que se consume del generador. En la Figura 5 se presenta la gráfica de la potencia reactiva de entrada dividida entre la potencia activa máxima, en función del ángulo de disparo. Esta relación es cero para $\alpha = 0$ y $\alpha = \pi$. Para $\alpha = \pi/2$, alcanza la potencia reactiva su valor máximo de 0,318 veces la potencia activa máxima. Ésta es la máxima potencia reactiva consumida del generador. Para $\alpha = 0$, la potencia reactiva es nula, pues no existe desfase entre la componente fundamental de la corriente de entrada y la tensión de alimentación de fase.

Cada convertidor AC-AC, utilizado para el control de la potencia a disipar en una resistencia lastre, consume potencia reactiva inductiva, lo que contribuye a empeorar el factor de potencia en los terminales del generador eléctrico.

La potencia aparente de entrada al convertidor AC-AC es:

$$S_{ent} = \frac{V_{ef}^2}{R} \sqrt{\frac{1}{\pi} \left[\pi - \alpha + \frac{\text{sen}(2\alpha)}{2} \right]} \quad (4)$$

A partir de esta expresión, podemos apreciar que, para $\alpha = 0$, la potencia aparente posee su valor máximo igual a la potencia activa máxima disipada en la resistencia de carga, y para $\alpha = \pi$, la fuente no entrega energía a la carga por lo que la potencia aparente es nula (valor mínimo).

La potencia de distorsión surge cuando en un circuito existen formas de ondas no sinusoidales y se define como la raíz cuadrada positiva de la diferencia de la potencia aparente al cuadrado y la suma de los cuadrados de la potencia activa y reactiva. A la entrada del convertidor AC-AC, esta viene dada por la expresión:

$$T_{ent} = \frac{\sqrt{2} V_{ef}^2}{2\pi R} \sqrt{2\alpha(\pi - \alpha) + (2\alpha - \pi)\text{sen}(2\alpha) + \cos(2\alpha) - 1} \quad (5)$$

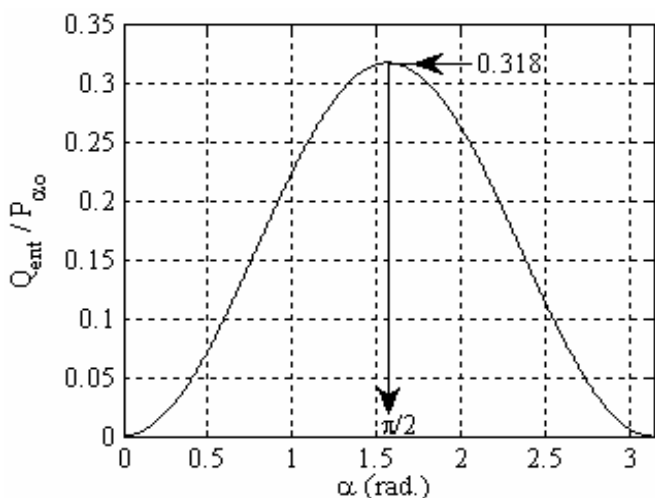


Figura 5: Gráfica de la relación $Q_{ent} / P_{\alpha 0}$ en función del ángulo de disparo.

En la Figura 6 se muestra la gráfica de la potencia de distorsión dividida entre $P_{\alpha 0}$ en la que se observa que para $\alpha = 0$, $T_{ent} = 0$ debido a que la corriente de entrada al convertidor es sinusoidal; para $\alpha = \pi$, $T_{ent} = 0$ pues la corriente de entrada es nula; y para $\alpha = \pi/2$ la potencia de distorsión alcanza su valor máximo de 0,386 veces $P_{\alpha 0}$.

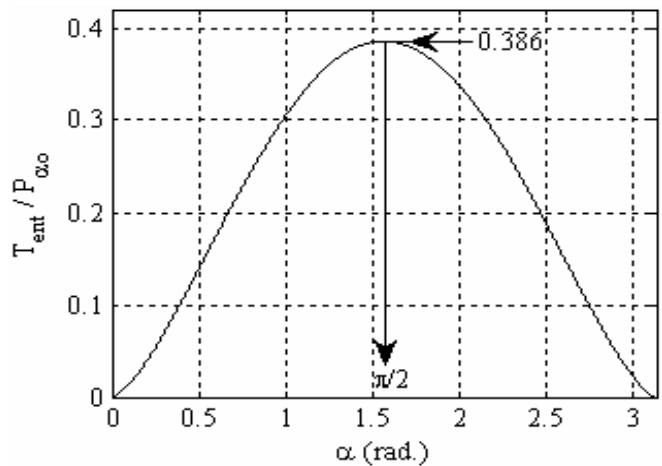


Figura 6: Gráfica de la relación $T_{ent} / P_{\alpha 0}$ en función del ángulo de disparo.

Finalmente, el factor de potencia viene dado por:

$$fp = \sqrt{\frac{1}{\pi} \left[\pi - \alpha + \frac{\text{sen}(2\alpha)}{2} \right]} \quad (6)$$

Para $\alpha = 0$, el factor de potencia $fp = 1$ pues, para este ángulo, la corriente de entrada al convertidor es perfectamente sinusoidal y está en fase con la tensión de entrada.

Como el sistema es trifásico y, por tanto, existe un convertidor AC-AC en cada fase, que se supone se conmutan con el mismo ángulo de disparo y poseen igual carga (sistema trifásico equilibrado), las expresiones de las potencias totales y factor de potencia son:

- Potencia activa trifásica P_{3ent} :

$$P_{3ent} = 3P_{ent} = 3 \frac{V_{ef}^2}{\pi R} \left[\pi - \alpha + \frac{\text{sen}(2\alpha)}{2} \right] \quad (7)$$

- Potencia reactiva trifásica Q_{3ent} :

$$Q_{3ent} = 3Q_{ent} = 3 \frac{V_{ef}^2}{\pi R} \left[\frac{1 - \cos(2\alpha)}{2} \right] \quad (8)$$

- Potencia aparente trifásica S_{3ent} :

$$S_{3ent} = 3S_{ent} = 3 \frac{V_{ef}^2}{R} \sqrt{\frac{1}{\pi} \left[\pi - \alpha + \frac{\text{sen}(2\alpha)}{2} \right]} \quad (9)$$

- Factor de potencia de la red trifásica fp_3 :

$$fp_3 = \frac{P_{3ent}}{S_{3ent}} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \left[\pi - \alpha + \frac{\text{sen}(2\alpha)}{2} \right]} \quad (10)$$

4.2. Análisis del Rectificador Trifásico Tipo Puente con Interruptor en Serie con la Carga Lastre Conmutado con Ángulo Simétrico

En la Figura 7 se muestra el esquema de simulación del rectificador trifásico con interruptor en serie con la carga lastre o “fantasma”. En esta subsección mostraremos las expresiones de los mismos índices de rendimiento y energéticos antes mencionados en función del ángulo de conmutación.

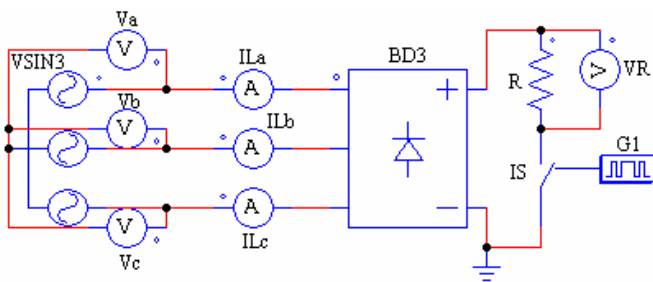


Figura 7: Esquema de simulación del rectificador trifásico con interruptor en serie con la carga lastre.

Los elementos que componen el esquema son: fuente de tensión sinusoidal trifásica (V_{SIN3}) de 60 Hz y de 190,53 V eficaz de línea, y representa al generador; puente rectificador trifásico a diodos (BD3), interruptor (IS) que representa un componente de conmutación como transistor bipolar de potencia o IGBT; generador de disparo (G1) que representa a la unidad de control, y su función es aplicar un pulso al interruptor según la forma de conmutar con ángulo simétrico y con valor del ángulo de conmutación deseado, con parámetros frecuencia (360 Hz), número de puntos de conmutación (2) y puntos de conmutación (ángulo y ancho deseado); y la resistencia de carga (R), que representa la carga lastre ($R=4,03 \Omega$).

El funcionamiento del esquema es el siguiente: los diodos del puente conducen un máximo de 120° y conmutan naturalmente cada 60° por lo que la tensión instantánea producida por el puente está compuesta por seis segmentos, de duración de 60° , cada uno, correspondiente a las seis combinaciones de tensión de línea a línea delimitados por los puntos de conmutación natural. A partir de este punto, para la conmutación con ángulo de control simétrico, se cierra el interruptor IS un ángulo α después del punto de conmutación natural y se abre IS el mismo α antes del próximo punto de conmutación natural, de esto se deduce que el rango de regulación es: $0 \leq \alpha \leq \pi/6$.

En la Figura 8 se representan las formas de onda más significativas tanto de tensión como de corriente del circuito rectificador para un caso particular en que el ángulo α es de 15° .

La forma de onda de la corriente de entrada al rectificador, como la que se muestra en la Figura 8(c) para la fase ‘a’,

tiene período $T_{IL} = 2\pi$ y cuya expresión analítica se expresa mediante las ecuaciones dadas en (11).

$$i_L(\theta) = \left. \begin{array}{l} 0 \quad \pi/6 < \theta < \pi/6 + \alpha \\ \frac{\sqrt{2}\sqrt{3}V_{ef}}{R} \text{sen}(\theta + \pi/6) \quad \pi/6 + \alpha < \theta < \pi/2 - \alpha \\ 0 \quad \pi/2 - \alpha < \theta < \pi/2 + \alpha \\ \frac{\sqrt{2}\sqrt{3}V_{ef}}{R} \text{sen}(\theta - \pi/6) \quad \pi/2 + \alpha < \theta < 5\pi/6 - \alpha \\ 0 \quad 5\pi/6 - \alpha < \theta < 7\pi/6 + \alpha \\ \frac{\sqrt{2}\sqrt{3}V_{ef}}{R} \text{sen}(\theta - 5\pi/6) \quad 7\pi/6 + \alpha < \theta < 3\pi/2 - \alpha \\ 0 \quad 3\pi/2 - \alpha < \theta < 3\pi/2 + \alpha \\ \frac{\sqrt{2}\sqrt{3}V_{ef}}{R} \text{sen}(\theta + 5\pi/6) \quad 3\pi/2 + \alpha < \theta < 11\pi/6 - \alpha \\ 0 \quad 11\pi/6 - \alpha < \theta < 2\pi + \pi/6 \end{array} \right\} \quad (11)$$

En la Figura 8(c), se observa que la corriente de entrada por fase del rectificador posee simetría impar y de media onda, lo que implica que, en la serie de Fourier, dada por la expresión:

$$i_L(\theta) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(n\theta) + b_n \text{sen}(n\theta), \quad (12)$$

los coeficientes $a_0 = 0$, $a_n = 0$ para todo n y $b_n = 0$ para n par. Como el coeficiente a_1 es nulo, el rectificador trifásico para la forma de conmutar analizada no consume ni genera potencia reactiva para ningún valor posible del ángulo de conmutación.

Determinando el coeficiente b_1 , tenemos:

$$b_1 = \frac{8}{T_{IL}} \int_0^{T_{IL}/4} i_L(\theta) \text{sen}(\theta) d\theta = \frac{8}{2\pi} \int_{\pi/6 + \alpha}^{\pi/2 - \alpha} \frac{\sqrt{2}\sqrt{3}V_{ef}}{R} \text{sen}(\theta + \pi/6) \text{sen}(\theta) d\theta \quad (13)$$

$$b_1 = \frac{3\sqrt{2}V_{ef}}{\pi R} \left[\frac{\pi}{3} - 2\alpha + \frac{\sqrt{3}}{2} \cos(2\alpha) - \frac{\text{sen}(2\alpha)}{2} \right] \quad (14)$$

Este coeficiente indica qué valor posee la amplitud del primer armónico de la corriente de cada terminal de entrada del rectificador en función del ángulo de conmutación. Así pues, el valor eficaz de la componente fundamental de la corriente de entrada es:

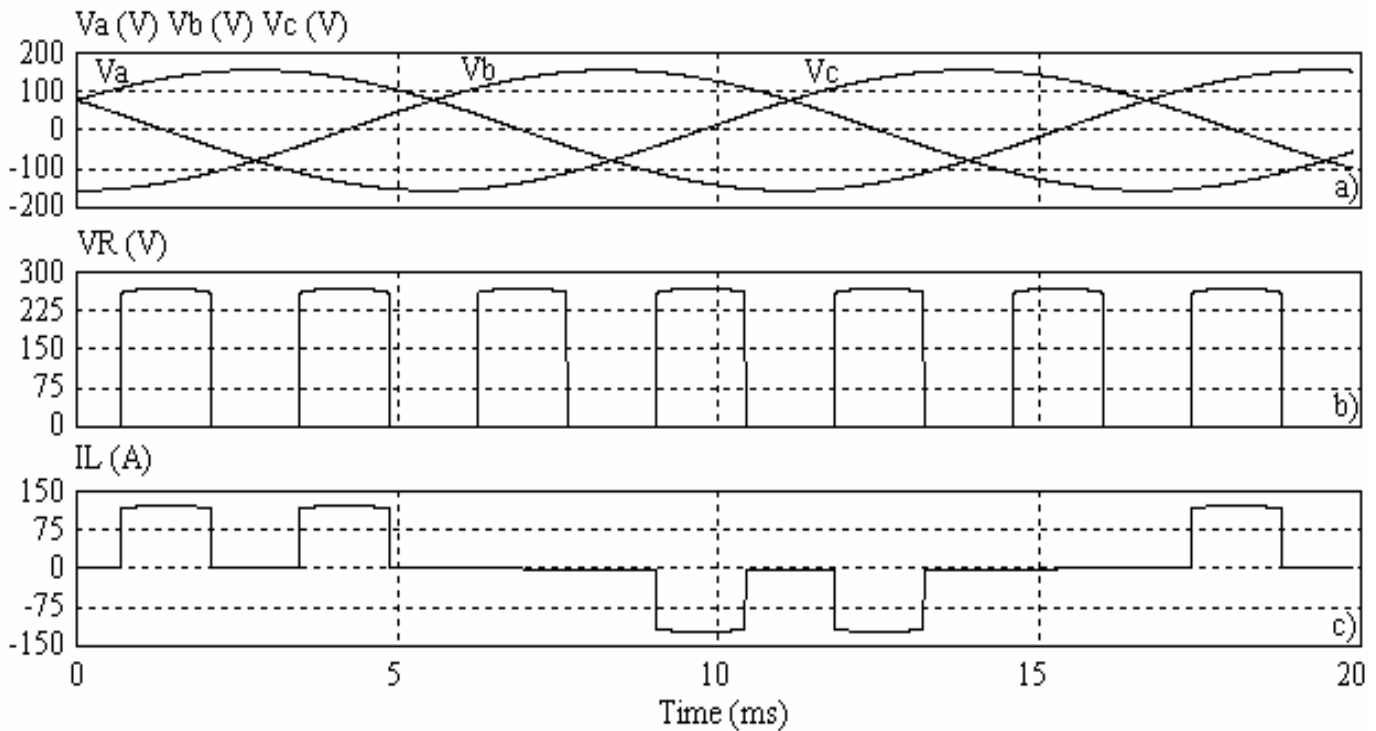


Figura 8: Gráficas de las formas de onda más significativas del rectificador trifásico conmutado con ángulo simétrico, para un ángulo α de 15° . (a) Tensiones de cada fase de la fuente, (b) Tensión en la carga, (c) Corriente en la línea de fase A.

$$I_{rms} = \frac{3V_{ef}}{\pi R} \left[\frac{\pi}{3} - 2\alpha + \frac{\sqrt{3}}{2} \cos(2\alpha) - \frac{\text{sen}(2\alpha)}{2} \right] \quad (15)$$

Para $\alpha = 0$, el valor eficaz de la componente fundamental de la corriente de entrada al convertidor alcanza su valor máximo, siendo igual a $I_{1rmsm\acute{a}x} = \frac{3V_{ef}}{\pi R} \left[\frac{\pi}{3} + \frac{\sqrt{3}}{2} \right]$, y para $\alpha = \pi/6$ se anula, siendo éste su valor mínimo.

Conviene indicar que, el ángulo de desplazamiento ϕ_1 , defasaje entre la tensión instantánea de fase y el primer armónico de corriente a la entrada al rectificador, es nulo para cualquier valor del ángulo de control, indicando que no existe desfase entre la tensión de fase y el primer armónico de la corriente de entrada al rectificador, lo que corrobora lo comentado anteriormente: que el rectificador no consume ni genera potencia reactiva. Como consecuencia, puede afirmarse que el factor de potencia de desplazamiento, $\cos(\phi_1)$, es igual a la unidad.

El valor eficaz de la corriente de entrada al rectificador es:

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{4}{T_{IL}} \int_0^{T_{IL}/4} [i_L(\theta)]^2 d\theta} = \sqrt{\frac{4}{2\pi} \int_{\pi/6+\alpha}^{\pi/2-\alpha} \left[\frac{\sqrt{2}\sqrt{3}V_{ef}}{R} \text{sen}(\theta + \pi/6) \right]^2 d\theta} \quad (16)$$

resultando:

$$I_{rms} = \frac{\sqrt{2}\sqrt{3}V_{ef}}{R} \sqrt{\frac{1}{\pi} \left[\frac{\pi}{3} - 2\alpha + \frac{\sqrt{3}}{2} \cos(2\alpha) - \frac{\text{sen}(2\alpha)}{2} \right]} \quad (17)$$

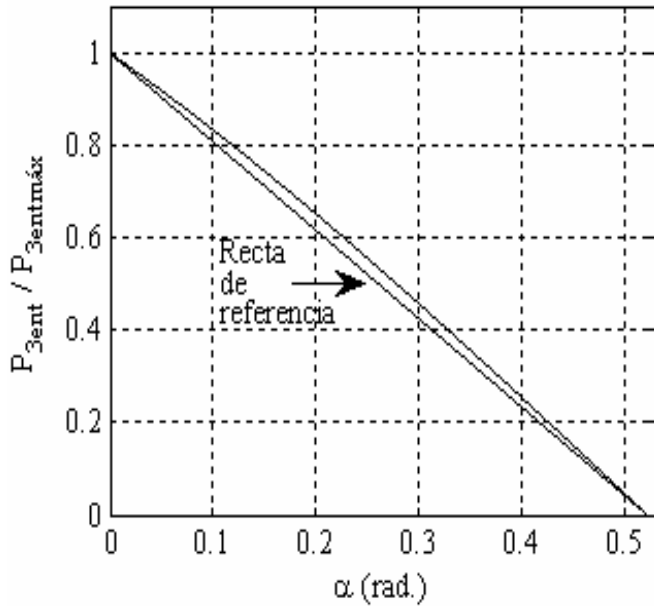
Determinando la potencia activa total a la entrada del rectificador empleando la componente del armónico fundamental de la corriente de entrada en fase con la tensión de fase, queda:

$$P_{3ent} = 3V_{ef} \frac{b_1}{\sqrt{2}} \quad (18)$$

$$P_{3ent} = \frac{9V_{ef}^2}{\pi R} \left[\frac{\pi}{3} - 2\alpha + \frac{\sqrt{3}}{2} \cos(2\alpha) - \frac{\text{sen}(2\alpha)}{2} \right] \quad (19)$$

Para $\alpha = 0$, la potencia activa total es máxima, siendo su valor $P_{3entm\acute{a}x} = \frac{9V_{ef}^2}{\pi R} \left[\frac{\pi}{3} + \frac{\sqrt{3}}{2} \right]$.

En cambio, para $\alpha = \pi/6$, ésta es nula, valor mínimo alcanzable. Si se divide (19) por $P_{3entm\acute{a}x}$, se obtiene la expresión de la potencia activa total normalizada, en cuyo gráfico, mostrado en la Figura 9, se observa un comportamiento aproximadamente lineal de ésta (compárese con la recta de referencia), lo que hace que este rectificador con conmutación de ángulo simétrico tenga una interesante propiedad: lo convierte en un elemento con una característica estática de entrada-salida aproximadamente lineal, en su rango de operación, ideal para el lazo de control de frecuencia.

Figura 9: Gráfica de $P_{3ent} / P_{3entmáx}$ en función de α .

La potencia aparente total de entrada viene dada por:

$$S_{3ent} = 3V_{rms}I_{rms} \quad (20)$$

$$S_{3ent} = \frac{3\sqrt{6}V_{ef}^2}{R} \sqrt{\frac{1}{\pi} \left[\frac{\pi}{3} - 2\alpha + \frac{\sqrt{3}}{2} \cos(2\alpha) - \frac{\text{sen}(2\alpha)}{2} \right]} \quad (21)$$

Para $\alpha = 0$, la potencia aparente total a la entrada del rectificador alcanza su valor máximo

$$S_{3entmáx} = \frac{3\sqrt{6}V_{ef}^2}{R} \sqrt{\frac{1}{\pi} \left[\frac{\pi}{3} + \frac{\sqrt{3}}{2} \right]}. \text{ En cambio, para } \alpha = \pi/6, \text{ la}$$

potencia aparente trifásica es nula, su valor mínimo, ya que la fuente no entrega energía a la carga. Esta potencia tiene una curva aproximadamente parabólica como indica (21).

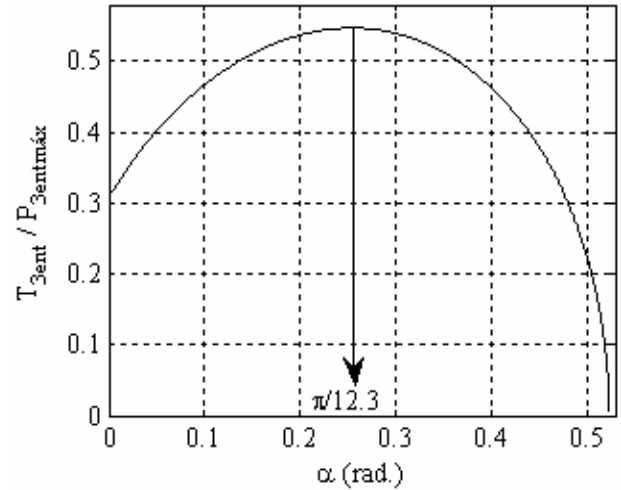
Por otro lado, la potencia de distorsión trifásica se determina como:

$$T_{3ent} = \sqrt{S_{3ent}^2 - P_{3ent}^2} \quad (22)$$

$$T_{3ent} = \frac{9V_{ef}^2}{\pi R} \sqrt{\frac{\pi^2}{9} - \left[2\alpha - \frac{\sqrt{3}}{2} \cos(2\alpha) + \frac{\text{sen}(2\alpha)}{2} \right]^2} \quad (23)$$

Para $\alpha = 0$, se tiene que $T_{3ent} = 0,308P_{3entmáx}$, valor diferente de cero debido a que la corriente de entrada al rectificador no es sinusoidal. En cambio, para $\alpha = \pi/6$, $T_{3ent} = 0$ pues la corriente de entrada es nula.

En la Figura 10 se muestra el gráfico de la potencia de distorsión total de entrada dividida entre $P_{3entmáx}$, en función de α . Se resalta que, para $\alpha = \pi/12,3$, esta potencia alcanza su valor máximo de 0,5473 veces $P_{3entmáx}$.

Figura 10: Gráfica de $T_{3ent} / P_{3entmáx}$ en función del ángulo de conmutación.

Finalmente, se determina el factor de potencia, expresado como:

$$\begin{aligned} fp &= \frac{P_{3ent}}{S_{3ent}} = \\ &= \frac{\frac{9V_{ef}^2}{\pi R} \left[\frac{\pi}{3} - 2\alpha + \frac{\sqrt{3}}{2} \cos(2\alpha) - \frac{\text{sen}(2\alpha)}{2} \right]}{\frac{3\sqrt{6}V_{ef}^2}{R} \sqrt{\frac{1}{\pi} \left[\frac{\pi}{3} - 2\alpha + \frac{\sqrt{3}}{2} \cos(2\alpha) - \frac{\text{sen}(2\alpha)}{2} \right]}} \quad (24) \end{aligned}$$

resultando:

$$fp = \sqrt{\frac{3}{2\pi} \left[\frac{\pi}{3} - 2\alpha + \frac{\sqrt{3}}{2} \cos(2\alpha) - \frac{\text{sen}(2\alpha)}{2} \right]} \quad (25)$$

Debe notarse que para $\alpha = 0$, el factor de potencia queda $fp = 0,956$, debido a que la corriente de entrada al rectificador para este ángulo es no sinusoidal. El factor de potencia tiene una curva aproximadamente parabólica como lo indica (25).

Se recuerda que la potencia reactiva total a la entrada del rectificador, alimentado con una tensión trifásica sinusoidal, es:

$$Q_{3ent} = 3V_{ef} \frac{a_1}{\sqrt{2}} = 0, \quad (26)$$

resultado esperado, y que demuestra que el rectificador bajo la forma de conmutar descrita no consume ni aporta energía reactiva a la red, lo que se considera una mejora respecto al esquema de uso actual mediante convertidores AC-AC, que sí consumen potencia reactiva, contribuyendo con este consumo de reactiva a empeorar el factor de potencia a la salida del generador

3. Resultados y Discusión

En esta sección se desarrolla un ejemplo para comparar el rectificador trifásico conmutado con ángulo simétrico, frente

al convertidor AC-AC que es el esquema actualmente más empleado en el control de la frecuencia en una μ CH mediante carga balastro.

Como ejemplo numérico, supóngase que, teniendo un registro de mediciones de la potencia, la tensión y corriente eficaces en una μ CH, se conozca, además, que la potencia activa mínima demandada por los usuarios, P_{UMIN} , sea de 3 kW; que la potencia activa máxima demandada por los usuarios, P_{UMAX} , sea de 12 kW y que, en cierto horario, la potencia demandada por los usuarios sea $P_U=7,5$ kW con un factor de potencia, fp_U de 0,7 en atraso.

Caso de Estudio— Como para el control de la potencia a disipar en las cargas lastres se empleará el rectificador trifásico conmutado con ángulo simétrico, se impone encontrar el valor de la resistencia lastre. En concreto, el valor de ésta se calcula a partir de la potencia activa máxima que debe consumir el rectificador trifásico, $P_{BD3máx}$. En el ejemplo considerado, ésta vendrá dada por $P_{BD3máx}=P_{UMAX}-P_{UMIN}=9$ kW. Así pues, evaluando (19) para $\alpha = 0$, se tiene:

$$R_{Lastre} = \frac{9V_{ef}^2}{\pi P_{BD3máx}} \left[\frac{\pi}{3} + \frac{\sqrt{3}}{2} \right] = 7,3689 \Omega \quad (27)$$

El valor escogido de la resistencia lastre es así $R_{Lastre} = 7,3 \Omega$, ya que ésta permitirá disipar una potencia ligeramente superior a los 9 kW necesarios para mantener la potencia entregada por el generador igual a 12 kW cuando la potencia de los usuarios sea la mínima y de esta forma lograr el control de la frecuencia.

Los valores de la resistencia e inductancia por fase que representan a la carga de los usuarios cuando en cierto horario éstos demanden la potencia P_U con un factor de potencia de 0,7 son: $R_U=2,37 \Omega$ y $L_U=6,418$ mH respectivamente. La potencia reactiva total consumida por los usuarios y la corriente eficaz en cada fase para estas condiciones son: $Q_U=7,65$ kVAR e $I_U=32,47$ A.

En el horario en que los usuarios consumen la potencia P_U , el rectificador debe consumir una potencia activa, P_{BD3} de 4,5 kW. Esto se logra con $\alpha = 0,282$ rad.

Para este valor de α y de R_{Lastre} , las corrientes eficaces, potencias y factor de potencia en la entrada del rectificador son, respectivamente:

- La corriente eficaz (17), $I_{BD3A}=I_{BD3B}=I_{BD3C}=20,27$ A.
- La potencia activa total (19), $P_{BD3}=4,5006$ kW.
- La potencia reactiva total: $Q_{BD3}=0$ kVAR.
- La potencia aparente total (21): $S_{BD3}=6,690$ kVA.
- La potencia de distorsión total (23): $T_{BD3}=4,950$ kVAD.
- El factor de potencia (25): $fp_{BD3}=0,6727$.

En los terminales del generador para las condiciones de carga impuestas por los usuarios y del rectificador, la potencia activa total (P_L), potencia reactiva total (Q_L), potencia aparente total (S_L), potencia de distorsión total (T_L) y el factor de potencia (fp_L) son, respectivamente:

- La potencia activa total: $P_L=12,00$ kW.
- La potencia reactiva total: $Q_L=7,65$ kVAR.
- La potencia aparente total: $S_L=15,070$ kVA.

- La potencia de distorsión total: $T_L=4,950$ kVAD.
- El factor de potencia: $fp_L=0,7966$.

En la Figura 11 se muestra el esquema empleado para las simulaciones en PSIM®.

Los elementos que componen al esquema son: fuente de tensión sinusoidal **VSIN3**, que representa al generador; la carga de los usuarios, **RLusuarios**; el rectificador trifásico propuesto constituido por **BD3**, **IS** y **G1**; la carga balastro **Rlastre**; los amperímetros de corriente alterna (**ILa**, **ILb**, **ILc**, **ILua**, **ILub**, **ILuc**, **IaBD3**, **IbBD3**, e **IcBD3**) que miden los valores eficaces en cada fase de la corriente en los terminales del generador, en la carga que representa a los usuarios, y en el rectificador propuesto respectivamente, y los vatímetros, varímetros y medidores de potencia aparente y factor de potencia (**W3L**, **VAR3L**, **VAPF3L**, **W3u**, **VAR3u**, **VAPF3u**, **W3BD3**, **VAR3BD3**, y **VAPF3BD3**) para medir las potencias totales y factor de potencia a la salida del generador, en la carga de los usuarios y en la entrada del puente rectificador, respectivamente.

A modo aclaratorio, el esquema de simulación mostrado en la Figura 11 se diferencia del sistema actualmente empleado, basado en convertidores AC-AC, en la sustitución de los tres convertidores AC-AC, cada uno conectado entre una fase y el neutro del generador, por el rectificador trifásico. La notación utilizada en los instrumentos de medición y, por tanto, de las variables medidas asociadas a estos convertidores, finaliza con ACAC en el sistema con convertidores AC-AC y con BD3 en la propuesta con rectificador trifásico a diodos tipo puente con interruptor en serie con la carga, conmutado dicho interruptor con ángulo simétrico.

En el esquema actual, que emplea los convertidores AC-AC, las tres resistencias lastres, son $R_{lastre1}=R_{lastre2}=R_{lastre3}=4,03 \Omega$, una por cada convertidor AC-AC. Para que estos convertidores AC-AC consuman 1,5 kW, deben ser conmutados con un ángulo de 90° , resultando que:

- La corriente eficaz de entrada por convertidor, (1), $I_{ACAC}=19,30$ A.
- Potencia activa por fase, (2), $P_{fACAC}=1,5$ kW, total: $P_{ACAC}=4,5$ kW.
- Potencia reactiva por fase, (3), $Q_{fACAC}=0,955$ kVAR, total: $Q_{ACAC}=2,864$ kVAR.
- Potencia aparente por fase, (4), $S_{fACAC}=2,123$ kVA, total: $S_{ACAC}=6,369$ kVA.
- Potencia de distorsión por fase, (5), $T_{fACAC}=1,157$ kVAD, total: $T_{ACAC}=3,470$ kVAD.
- El factor de potencia, (6), $fp_{ACAC}=0,7071$.

A la salida del generador, representado por **VSIN3**, la potencia activa es (P_G), la potencia reactiva (Q_G) kVAR, la potencia aparente (S_G), la potencia de distorsión (T_G) y el factor de potencia (fp_G) vienen dados, respectivamente por:

- La potencia activa total: $P_G=12,000$ kW.
- La potencia reactiva total: $Q_G=10,514$ kVAR.
- La potencia aparente total: $S_G=16,331$ kVA.
- La potencia de distorsión total: $T_G=4,950$ kVAD.

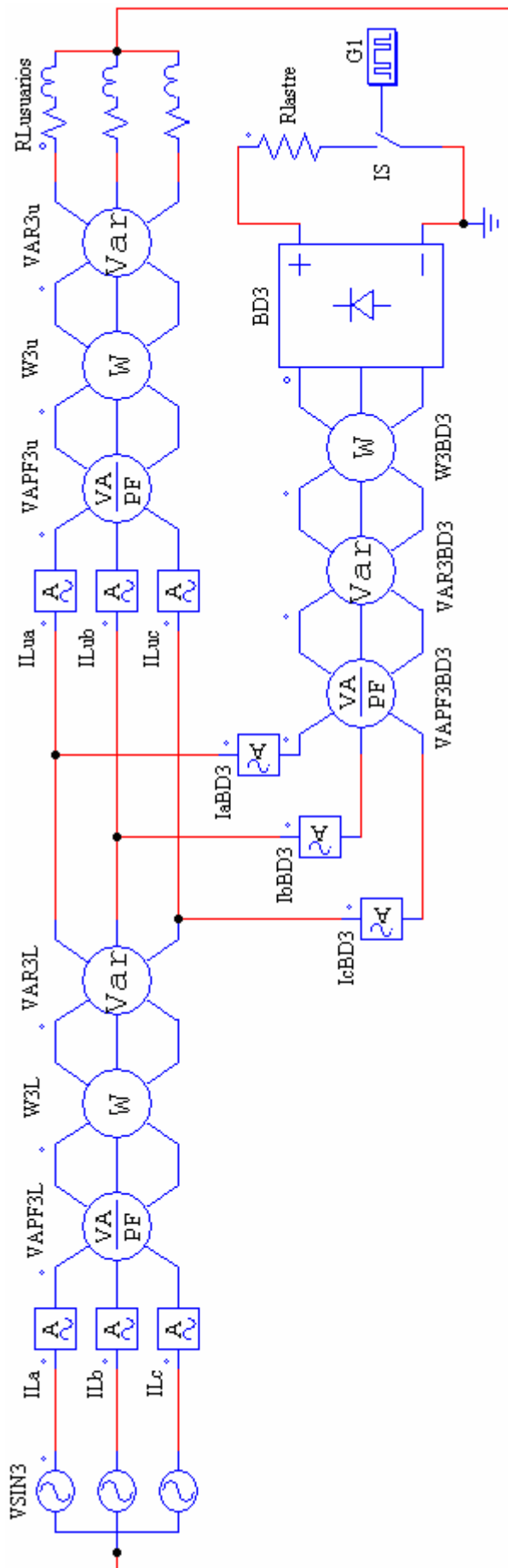


Figura 11: Esquema de simulación con el rectificador trifásico.

- El factor de potencia: $fp_G=0,735$.

En la Tabla 1, se muestran los valores para obtener la comparación entre los resultados de las simulaciones de los esquemas con rectificador trifásico conmutado con ángulo simétrico y con convertidor AC-AC. Las variables I_S , P_S , Q_S , S_S y fp_S denotan la corriente eficaz, las potencias activa, reactiva, aparente y el factor de potencia, respectivamente, a la entrada del rectificador o del convertidor, mientras que I_{GS} , P_{GS} , Q_{GS} , S_{GS} y fp_{GS} representan las mismas variables pero a la salida del generador. El subíndice S indica que son valores obtenidos mediante simulación.

Tabla 1: Comparación entre los resultados de las simulaciones de los esquemas con el rectificador trifásico conmutado con ángulo simétrico y los convertidores AC-AC.

| Variable | Rectificador Trifásico. | Convertidores AC-AC. |
|-----------|-------------------------|----------------------|
| I_{GS} | 45,61 A | 49,45 A |
| I_S | 20,25 A | 19,27 A |
| P_{GS} | 12,002 kW | 12,004 kW |
| Q_{GS} | 7,656 kVAR | 10,522 kVAR |
| S_{GS} | 15,065 kVA | 16,323 kVA |
| fp_{GS} | 0,7966 | 0,7354 |
| P_S | 4,501 kW | 4,504 kW |
| Q_S | -0,067 VAR | 2,685 kVAR |
| S_S | 6,690 kVA | 6,364 kVA |
| fp_S | 0,6728 | 0,7077 |

De los resultados mostrados en la Tabla 1, se observa una excelente correspondencia entre los valores calculados y simulados.

De la Tabla 1 se nota que el valor dado por la simulación de la potencia reactiva para el esquema con el rectificador, fila Q_S , puede considerarse nula debido a su pequeña magnitud, esto constituye la diferencia fundamental entre el esquema que emplea el rectificador trifásico conmutado con ángulo simétrico y el esquema actual con convertidores AC-AC.

La potencia reactiva total consumida por los tres convertidores AC-AC para el ángulo de control en cada convertidor de 90° representa un 37,4 % de la reactiva total consumida por los usuarios y un 27,23 % de la potencia reactiva total a la salida del generador.

En la Tabla 1 se aprecia que el factor de potencia en los terminales de la fuente que representa al generador, fp_{GS} , para el esquema con rectificador trifásico conmutado con ángulo simétrico, es mayor que en el esquema con convertidores AC-AC. Esto se debe a que el primero no consume energía reactiva, lo que se traduce en la disminución de la corriente eficaz en cada fase del generador en, aproximadamente, 4 A, como se observa en la primera fila de la Tabla 1, corriente I_{GS} , aumentando la disponibilidad del generador en lo referente a la entrega de potencia activa, resultado que valida al circuito y la forma de conmutar propuesta en el presente artículo.

Es interesante notar que el factor de potencia en los terminales de entrada del rectificador trifásico, según los cálculos realizados y la última fila de la Tabla 1, es ligeramente menor que cuando se emplea convertidores AC-AC. A pesar de esto, obsérvese que, con el rectificador

trifásico, se mejora el factor de potencia a la salida del generador.

En la Figura 12 se representan gráficamente el factor de potencia a la salida del generador cuando se emplea el rectificador trifásico, fp_{GSBD3} , y los convertidores de AC-AC, fp_{GSACAC} , obtenidos mediante simulación, para el rango de variación de la potencia activa de los usuarios considerada en el ejemplo y con un fp_U de 0,7 en atraso.

En la Figura 12 se aprecia que fp_{GSBD3} supera a fp_{GSACAC} en el 94,5 % del rango de variación de la potencia

activa consumida por los usuarios, encontrándose el máximo valor de la diferencia de fp_{GSBD3} y fp_{GSACAC} igual a 0,06. Ambos factores de potencia a la salida del generador se igualan para una P_U de 3,5 kW, siendo estos de 0,94, y, para P_U igual a 12,0 kW, estos alcanzan el valor de 0,699, igual al de la carga de los usuarios. Sólo fp_{GSACAC} es mayor al fp_{GSBD3} para mínimo consumo de potencia de los usuarios, de 3,0 kW a 3,5 kW, superándolo como máximo en 0,02.

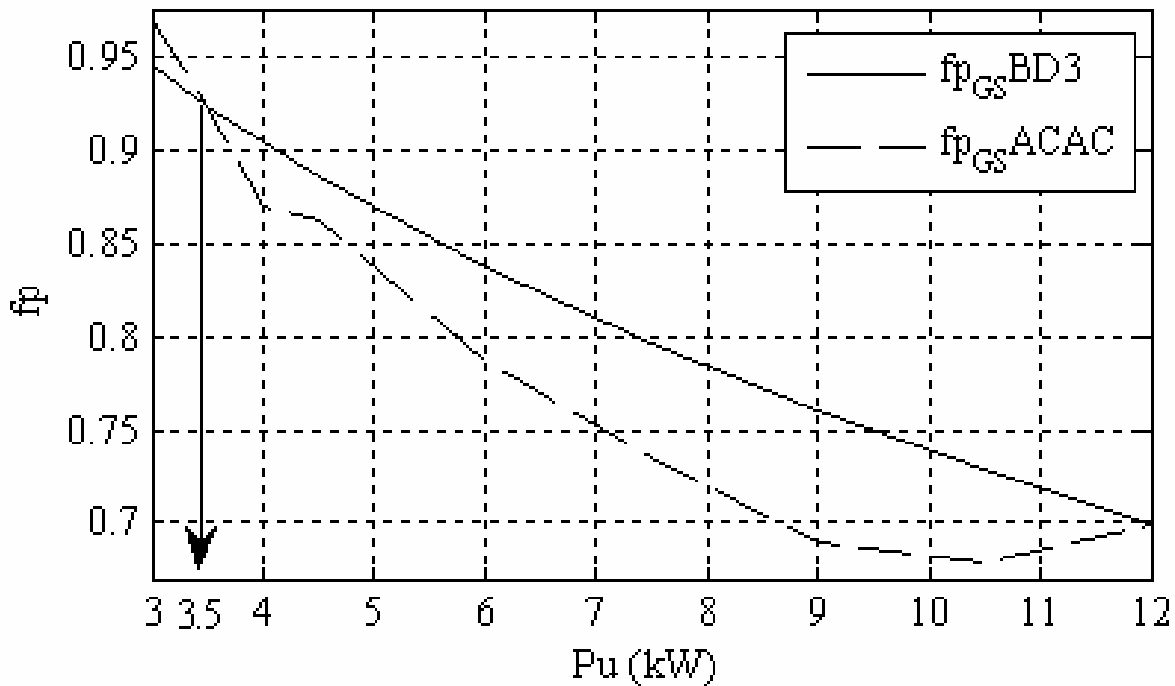


Figura 12: Comparación entre el factor de potencia a la salida del generador cuando se emplea: el rectificador trifásico, fp_{GSBD3} , y los convertidores de AC-AC, fp_{GSACAC} .

Lo anterior indica claramente que se puede emplear el rectificador trifásico conmutado con ángulo simétrico como alternativa para la mejora del factor de potencia a la salida del generador.

4. Conclusiones

En el presente artículo se han comparado el rectificador trifásico conmutando al interruptor en serie con la carga con ángulo simétrico, y el convertidor de AC-AC, esquema actualmente empleado, con respecto al factor de potencia a la salida del generador eléctrico de las microcentrales hidroeléctricas en las que se regula la frecuencia variando la potencia disipada en cargas balastros mediante convertidores AC-AC.

Al respecto, se han validado ambos circuitos, el puente rectificador con interruptor en serie con la carga conmutado con ángulo simétrico y el convertidor de AC-AC, en un ejemplo numérico concreto para una instalación con un consumo determinado, y se ha realizado una comparativa entre las mismas.

Por un lado, el rectificador trifásico tipo puente con interruptor en serie con la carga lastre conmutado con ángulo simétrico mejora el factor de potencia a la salida del generador eléctrico de la μ CH en el 94,5% del intervalo de

variación de la potencia consumida por los usuarios, resultado corroborado mediante simulación y los cálculos realizados en el ejemplo desarrollado, lo que constituye una mejora significativa con respecto al circuito actual, convertidor AC-AC.

Además, se han obtenido las expresiones matemáticas de los índices de rendimiento y energético en función del ángulo de conmutación del rectificador trifásico tipo puente con interruptor en serie con la carga resistiva, conmutado con ángulo simétrico, expresiones que demuestran que con esta conmutación no se aporta ni se consume energía reactiva. Ésta es una ventaja clave del rectificador trifásico considerado en el presente artículo, pues los convertidores AC-AC siempre consumen potencia reactiva excepto cuando el ángulo de disparo de los tiristores es 0 o 180°.

Finalmente, la potencia de distorsión es nula para un ángulo de disparo de 0° en el convertidor AC-AC, mientras que para el rectificador es aproximadamente 0,32 veces la potencia activa máxima del rectificador para el ángulo de conmutación de 0°.

En futuros trabajos del grupo investigador, se comparará el rectificador monofásico a diodos tipo puente con interruptor en serie con la carga conmutado con ángulo simétrico y el convertidor de AC-AC, con respecto al factor de potencia a la salida del generador eléctrico de las microcentrales

hidroeléctricas que regulan frecuencia por el método de carga lastre.

Referencias

- Abreu, A., 2006. Construcción de un regulador de frecuencia para una mini hidroeléctrica. Trabajo de Diploma. Dpto. Automática. Facultad Ingeniería Eléctrica. Universidad de Oriente. Cuba.
- Bordons, C., García-Torres, F., Valverde, L., 2015. Gestión Óptima de la Energía en Microrredes con Generación Renovable. Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial 12, 117–132. <http://dx.doi.org/10.1016/j.riai.2015.03.001>
- Bory, H., Matos, E., 2006. Análisis de diferentes formas de control del puente rectificador monofásico. Conferencia Internacional FIE'06. 2006. Cuba. ISBN: 84-00-08424-1.
- Bory, H., Rodriguez, H., León, J., Garrido, D., Guilan, E., 2008. Análisis de diferentes formas de control del semiconvertidor monofásico. Conferencia Internacional FIE'08. 2008. Cuba. ISBN: 978-84-00-08680-0.
- Bory, H., 2011. Metodología para el mejoramiento del factor de potencia en Pequeñas Centrales Hidroeléctricas en régimen autónomo y que emplean convertidores de CA en CA para la regulación de frecuencia. Tesis de Maestría. Dpto. Automática. Facultad Ingeniería Eléctrica. Universidad de Oriente. Cuba.
- Bory, H., Chang, F., Yero, J., 2014. Conmutación simétrica para control de frecuencia de Minihidroeléctricas. I Convención Internacional de Ciencias Técnicas. 2014. Cuba. ISBN 978-959-207-529-0.
- Colak, I., Kabalci, E., Fulli, G., Lazarou, S., 2015. A survey on the contributions of power electronics to smart grid systems. Renewable Sustainable Energy 47, 562–579. doi:10.1016/j.rser.2015.03.031
- Dihn, S., 2010. Controlador de frecuencia para las micros y mini centrales hidroeléctricas de operación aislada. Trabajo de Diploma. Dpto. Automática. Facultad Ingeniería Eléctrica. Universidad de Oriente. Cuba.
- Fong, J., et al, 2008. Regulador de frecuencia por carga lastre basado en microcontrolador para micro y mini centrales hidroeléctricas en operación aislada. Conferencia Internacional FIE'08. 2008. Cuba. ISBN: 978-84-00-08680-0.
- García, J., Domínguez, H., Peña, L., Fong, J., Chang, F., 2004. Perspectivas de la automatización de las centrales hidroeléctricas en Cuba. Facultad de Ingeniería Eléctrica. Universidad de Oriente.
- García, L., 2005. Macro Optimización del proyecto y la explotación de las pequeñas centrales hidroeléctricas de las regiones montañosas. Trabajo de Doctorado. Universidad de Oriente, Cuba.
- Hechavarria, M., Bell, O., 2008. Control de frecuencia en centrales minihidroeléctricas aisladas, Trabajo de Diploma. Facultad Ingeniería Eléctrica. Universidad de Oriente, Cuba.
- Kurtz, V., Botteró, F., Una alternativa para el control de cargas balasto que regulan frecuencia y tensión en PCH de operación aislada. Available online: <http://www.cerpch.unifei.edu.br/arquivos/artigos/44c1e4324ee3998d01c61875a2288b61.pdf>. Consulted: [19-05-2014].
- Kurtz, V., Anocibar, H., 2007a. Alternativa para el control de cargas balastos. Hidrored, 3-10. Universidad Nacional de Misiones, Argentina. ISSN 0935-0578.
- Kurtz, V., Anocibar, H., 2007b. Sistema mixto para control de la generación en microcentrales hidroeléctricas. Hidrored, 24-30. Universidad Nacional de Misiones, Argentina. ISSN 0935-0578.
- López, A., Somolinos, J., Núñez, L., 2014. Modelado Energético de Convertidores Primarios para el Aprovechamiento de las Energías Renovables Marinas. Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial 11, 224–235. <http://dx.doi.org/10.1016/j.riai.2014.02.005>
- Mare, J., Odello, L., 2001. Reguladores de frecuencia inteligente para microcentrales hidráulicas. Universidad Nacional de COMAHUE, Argentina.
- Mendoza, P., 2006. Control electrónico de una central Micro-hidráulica para su aplicación en generación distribuida. Available online: http://www.centroenergia.cl/literatura/memorias_tesis/memoria_Patricio_Mendoza.pdf [Consulted: 21-04-2014]
- Naqui, A., Ahmad, A., 2013. A lossless switching technique for smart grid applications. Int J Electr Power Energy Syst 49, 213 – 220.
- Ortega, R., Carranza, O., Sosa, J., García, V., Hernández, R., 2016. Diseño de controladores para inversores monofásicos operando en modo isla dentro de una microrred. Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial 13, 115–126. <http://dx.doi.org/10.1016/j.riai.2015.09.010>
- Peña, L., Domínguez, H., Fong, J., García, J., Alzórris, P., Regulación de frecuencia en una Minihidroeléctrica por carga lastre mediante un pc Embebido. Universidad Politécnica de Cataluña. Available online: <http://www.aedie.org/9CHLIE-paper-send/291-PE%D1A.pdf>. [Consulted: 12-06-2013]
- Piris-Botalla, L., Oggier, G., Airabella, A., García, G., 2016. Extensión del Rango de Operación con Conmutación Suave de un Convertidor CC-CC Bidireccional de Tres Puertos. Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial 13, 127–134. <http://dx.doi.org/10.1016/j.riai.2015.04.007>
- Renovable.cu. Available on line: http://www.google.com.cu/url?q=http://www.cubaenergia.cu/index.php/en/publications/doc_download/959-enero-2014&sa=U&ved=0CEUQFjAJahUKEwj1gae_0NPHAhVIaT4KHdCwADw&usq=AFQjCNHT_k03l36THaOw3a0yaaUShBsgBArenovable.cu (enero, 2014) [Consulted: 15-01-2014].
- Suárez, T., 2010. Desarrollo de un sistema de regulación de frecuencia para una microcentral hidroeléctrica de operación aislada. Trabajo de Diploma. Dpto. Automática. Facultad Ingeniería Eléctrica. Universidad de Oriente. Cuba.
- Vasquez, H., Pinedo, C., Palacios, J., Ramirez, J., Regulación de frecuencia en Micro-centrales hidroeléctricas mediante compensación de la carga. Universidad del Valle Available:<http://bibliotecadigital.univalle.edu.co/bitstream/10893/1216/1/Regulacion%20de%20frecuencia%20en%20microcentrales.pdf> [Consulted: 20-03-2014]
- Wu, D., Tang, F., Dragicevic, T., Vasquez, J., Guerrero, J., 2014. Autonomous Active Power Control for Islanded AC Microgrids With Photovoltaic Generation and Energy Storage System. IEEE Transactions on Energy Conversion 4, 882-892.