

Conmutación Simétrica de un Rectificador Trifásico versus 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), Encarna García-Vílchez ^(b)

^(a) Dept. de Automática, Facultad de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Oriente Sede Mella, Santiago de Cuba, Cuba.

^(b) Dept. de Ingeniería Electrónica, Escuela de Ingeniería de Barcelona Este (EEBE), Universidad Politécnica de Cataluña (UPC) – BarcelonaTech, Barcelona, España.

Resumen—En el presente artículo se realiza el análisis de un rectificador trifásico tipo puente con un interruptor en serie con la carga conmutado con ángulo simétrico. Para dicho análisis se trabajan con una serie de índices como son la corriente eficaz, las potencias activa, reactiva, aparente y de distorsión, y el factor de potencia. El objetivo es aplicar este rectificador conmutado con ángulo simétrico para la mejora del factor de potencia en microcentrales hidroeléctricas que operan en régimen autónomo, y en las que se regulan la frecuencia variando la potencia disipadas en cargas balastos mediante convertidores de corriente alterna/corriente alterna (AC-AC). Las expresiones matemáticas de los índices previos para el convertidor AC-AC son resumidas. Sin embargo, un caso de estudio es desarrollado y se demuestra la ventaja del circuito rectificador en cuanto al factor de potencia del sistema eléctrico.

Palabras Clave—Rectificadores controlados, convertidores conmutados, factor de potencia, control de frecuencia.

I. INTRODUCCIÓN

En 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 voltaje que garanticen una buena calidad en el suministro de la energía eléctrica, y, mucho menos, control del factor de potencia [1], [2].

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 Sistema Electroenergético Nacional (SEN), 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_C) como se muestra en la Fig. 1. La ecuación básica que describe este tipo de regulación es: $P_G = P_L + P_C$ [3], [4].

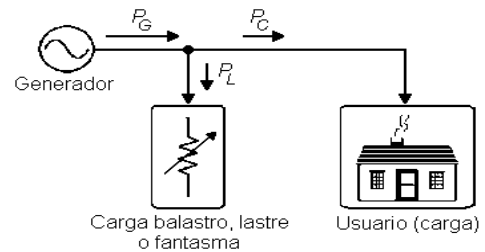


Fig. 1: Esquema general de trabajo de control de frecuencia por carga lastre.

El método de control de frecuencia por cargas lastres empleando controladores electrónicos presenta las siguientes ventajas: (1) regulación más eficiente, (2) los esquemas de control son más robustos flexibles y exactos, (3) no presentan desgastes, pues no hay piezas en movimiento, y (4) no requieren el mantenimiento necesario de los reguladores mecánico-hidráulicos [3]-[5].

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 [6]-[17].

En [10], 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, al cual, con el objetivo de mejorar el factor de potencia a su entrada, se conmuta por modulación de ancho de pulso. Este control tiene el inconveniente que emplea dispositivos de potencia de recuperación rápida que son más caros y están menos disponibles que los dispositivos de la misma potencia pero conmutados a baja frecuencia.

En [18] y [19], se aplican nuevas formas de conmutar a diferentes configuraciones de puentes rectificadores con carga resistiva inductiva. En ellos se demuestra que, dependiendo de la forma de conmutar a los componentes, el puente rectificador puede en su entrada tener potencia reactiva nula. La dificultad en la aplicación de estos métodos ha estado en la necesidad de emplear varios dispositivos de potencia (MCT, IGBT, GTO, etc.) que permiten lograr estas formas de conmutar pero que son más caros que los tiristores de la misma potencia.

El objetivo del presente trabajo consiste en conmutar con ángulo simétrico al esquema rectificador propuesto en [10], para la mejora del factor de potencia del sistema eléctrico de las

microcentrales hidroeléctricas en el control de la potencia disipada en la carga auxiliar.

Los parámetros a analizar 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 se subdivide en los acápites 2.1, en el que se realiza una breve reseña acerca de las expresiones de los índices de rendimiento y energéticos del convertidor AC-AC, y el 2.2, en el que se realiza un análisis del rectificador trifásico con interruptor en serie con la carga conmutado con ángulo simétrico, 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 mencionados y se demuestra la ventaja del empleo del rectificador con respecto al factor de potencia a la salida del generador. Finalmente, el artículo finaliza en la sección 4 mostrando las conclusiones más destacadas.

II. DESARROLLO

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 alternador a las cargas balastos. Además, como se considera que los convertidores están conectados en estrella, son conmutados con el mismo ángulo de disparo, se emplea la conexión a cuatro hilos y se considera un sistema equilibrado tanto en generación como en carga, basta analizar uno para obtener los resultados del conjunto.

En la Fig. 2 se muestra el esquema de simulación del convertidor AC-AC en PSim para una fase.

Este esquema de simulación está compuesto por: fuente de voltaje sinusoidal (V_{ef}) que representa una fase del alternador, de voltaje eficaz (V_{ef}) 110 V y frecuencia 60 Hz, convertidor AC-AC, constituido por los tiristores T1 y T2 en antiparalelo, generadores para el disparo (G_1 y G_2) cuya función es darle el pulso de disparo a los tiristores y sus parámetros son frecuencia (60 Hz), número de puntos de conmutación (dos) y puntos de conmutación (se indica el ángulo de disparo deseado), y resistencia de carga que representa la carga lastre en una fase ($R=4,03 \Omega$).

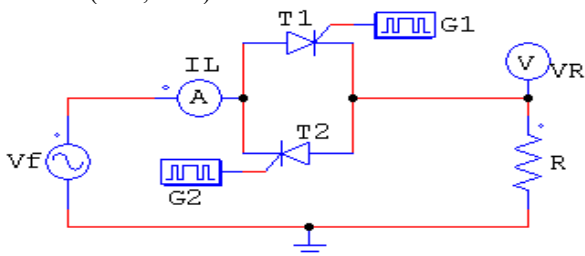


Fig. 2. Esquema de simulación del convertidor AC-AC.

El funcionamiento del esquema es el siguiente: para el semiciclo positivo del voltaje 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 Fig. 3 se representan las formas de onda más significativas tanto de voltaje como de corriente del circuito anterior para un caso particular con un ángulo α de 60° , que sirve como ejemplo para ver las formas de onda. 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:

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

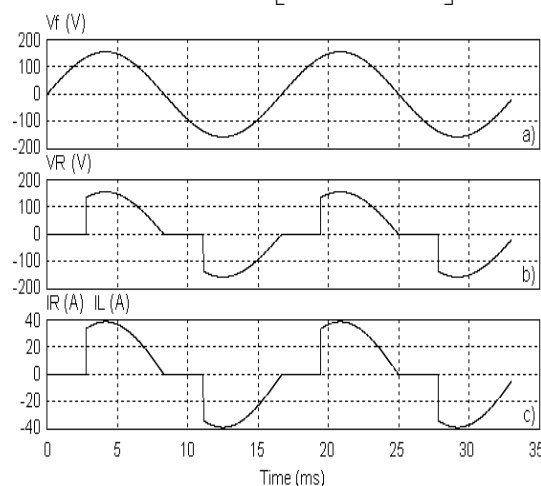


Fig. 3. Gráficas de las formas de onda más significativas del convertidor AC-AC. a) Voltaje de la fuente, b) Voltaje en la carga, c) Corriente en la línea de la misma de la carga.

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 esta $P_{\alpha 0}$ 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.

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 de la red. 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 de la red. Para $\alpha=0$, la potencia reactiva es nula, pues no existe desfase entre la componente fundamental de la corriente de entrada y el voltaje de alimentación de fase.

Un aspecto importante a mencionar es que cada convertidor AC-AC, útil 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:

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

Para $\alpha = 0$, la potencia aparente posee su valor máximo igual a la potencia activa máxima disipada en la resistencia de carga. Para $\alpha = \pi$, la fuente no le entrega energía a la carga por lo que la potencia aparente es nula (valor mínimo). Para $\alpha = 0$, la potencia aparente posee su valor máximo igual a la potencia activa máxima disipada en la resistencia de carga. Para $\alpha = \pi$, la fuente no le entrega energía a la carga por lo que la potencia aparente es nula (valor mínimo).

La potencia de distorsión de entrada al convertidor AC-AC viene dada por la siguiente expresión:

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

Para $\alpha = 0$, $T_{ent} = 0$ debido a que la corriente de entrada al convertidor no está distorsionada. Para $\alpha = \pi$, $T_{ent} = 0$, pues la corriente de entrada es nula. Por otro lado, para $\alpha = \pi/2$ la potencia de distorsión alcanza su valor máximo de 0,386 veces la potencia activa máxima.

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 $\alpha = 0$, $fp = 1$, pues para este ángulo la corriente de entrada al convertidor es perfectamente sinusoidal y está en fase con el voltaje 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 referencia 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 :

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

2.2. Análisis del rectificador trifásico tipo puente con interruptor en serie con la carga lastre conmutado con ángulo simétrico

En la Fig. 4 se muestra el esquema de simulación del rectificador trifásico con interruptor en serie con la carga lastre o fantasma y se obtienen las expresiones de los mismos índices de rendimiento y energéticos antes mencionados en función del ángulo de conmutación.

Los elementos que componen el esquema son: fuente de voltaje sinusoidal trifásica (VSIN3) de 60 Hz y de 190,53 V eficaz de línea y representa al alternador; 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 ($R=4,03 \Omega$).

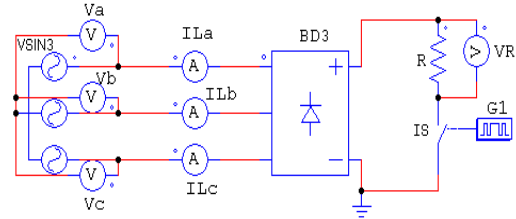


Fig. 4. Esquema de simulación del rectificador trifásico con interruptor en serie con la carga lastre.

El funcionamiento del esquema es el siguiente: los diodos del puente conducen un máximo de 120° y conmutan cada 60° por lo que el voltaje instantáneo producido por el puente está compuesto por seis segmentos, de duración de 60° , cada uno correspondiente a las seis combinaciones de voltaje de línea a línea delimitados por los puntos de conmutación natural, luego para la conmutación con ángulo de control simétrico, se cierra 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 Fig. 5 se representan las formas de onda más significativas tanto de voltaje como de corriente del circuito rectificador para un ángulo α de 15° .

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

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T_{IL}} \int_0^{T_{IL}/4} [i_L(\theta)]^2 d\theta} = \sqrt{\frac{4}{2\pi} \int_{\pi/6+\alpha}^{\pi/2-\alpha} \left[\frac{\sqrt{2}\sqrt{3}V_{ef}}{R} \text{sen}(\theta + \pi/6) \right]^2 d\theta} \quad (11)$$

$$I_{rms} = \frac{\sqrt{2}\sqrt{3}V_{ef}}{R} \sqrt{\frac{1}{\pi} \left[\frac{\pi}{3} - 2\alpha + \frac{\sqrt{3}}{2} \cos(2\alpha) - \frac{\text{sen}(2\alpha)}{2} \right]} \quad (12)$$

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

$$P_{3ent} = 3V_{ef} \frac{b_1}{\sqrt{2}} \quad (13)$$

$$P_{3ent} = \frac{9V_{ef}^2}{\pi R} \left[\frac{\pi}{3} - 2\alpha + \frac{\sqrt{3}}{2} \cos(2\alpha) - \frac{\text{sen}(2\alpha)}{2} \right] \quad (14)$$

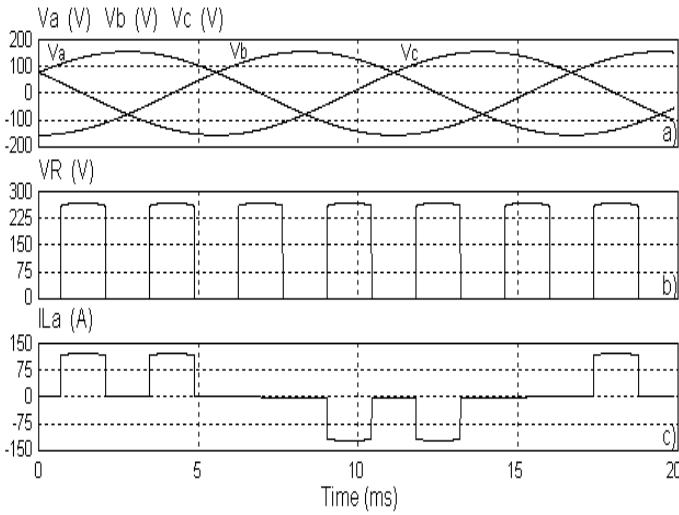


Fig. 5. Gráficas de las formas de onda más significativas del rectificador trifásico conmutado con ángulo simétrico, para un ángulo α de 15° . a) Voltajes de cada fase de la fuente, b) Voltaje en la carga, c) Corriente en la línea de fase A.

Para $\alpha = 0$ la potencia activa total es máxima, siendo su valor

$$P_{3ent\max} = \frac{9V_{ef}^2}{\pi R} \left[\frac{\pi}{3} + \frac{\sqrt{3}}{2} \right]. \text{ En cambio, para } \alpha = \pi/6 \text{ ésta es}$$

nula, valor mínimo alcanzable. Si se define $P_0 = V_{ef}^2/R$ y se divide (19) por P_0 , se obtiene la expresión de la potencia activa total normalizada. La potencia aparente total de entrada viene dada por:

$$S_{3ent} = 3V_{rms} I_{rms} \quad (15)$$

$$S_{3ent} = \frac{3\sqrt{6}V_{ef}^2}{R} \sqrt{\frac{1}{\pi} \left[\frac{\pi}{3} - 2\alpha + \frac{\sqrt{3}}{2} \cos(2\alpha) - \frac{\text{sen}(2\alpha)}{2} \right]} \quad (16)$$

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

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

$\alpha = \pi/6$, la potencia aparente trifásica es nula, su valor mínimo, ya que la fuente no entrega energía a la carga.

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

$$T_{3ent} = \sqrt{S_{3ent}^2 - P_{3ent}^2} \quad (17)$$

$$T_{3ent} = \frac{9V_{ef}^2}{\pi R} \sqrt{\frac{\pi^2}{9} - \left[2\alpha - \frac{\sqrt{3}}{2} \cos(2\alpha) + \frac{\text{sen}(2\alpha)}{2} \right]^2} \quad (18)$$

Para $\alpha = 0$, se tiene que $T_{3ent} = 1,687P_0$, valor diferente de cero debido a que la corriente de entrada al rectificador está distorsionada. En cambio, para $\alpha = \pi/6$, $T_{3ent} = 0$ pues la corriente de entrada es nula.

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

$$fp = \sqrt{\frac{3}{2\pi} \left[\frac{\pi}{3} - 2\alpha + \frac{\sqrt{3}}{2} \cos(2\alpha) - \frac{\text{sen}(2\alpha)}{2} \right]} \quad (19)$$

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 está distorsionada. El factor de potencia tiene una curva aproximadamente parabólica como lo indica (19).

Se recuerda que la potencia reactiva total a la entrada del rectificador, alimentado con un voltaje trifásico sinusoidal, es:

$$Q_{3ent} = 3V_{ef} \frac{a_1}{\sqrt{2}} = 0 \quad (20)$$

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 consumen potencia reactiva, contribuyendo con este consumo de reactiva a empeorar el factor de potencia a la salida del generador.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Ejemplo de aplicación del rectificador

En este acápite se desarrolla un ejemplo para ilustrar las ventajas del rectificador trifásico conmutado con ángulo simétrico, frente al convertidor AC-AC que es el esquema actualmente 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, el voltaje 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. El valor de ésta se calcula a partir de la potencia activa máxima que debe consumir el rectificador trifásico, $P_{BD3\max}$. En el ejemplo considerado, ésta vendrá dada por $P_{BD3\max} = P_{UMAX} - P_{UMIN} = 9$ kW, luego evaluando (19) para $\alpha = 0$ se tiene:

$$R_{Lastre} = \frac{9V_{ef}^2}{\pi P_{BD3\max}} \left[\frac{\pi}{3} + \frac{\sqrt{3}}{2} \right] = 7,3689 \Omega \quad (21)$$

El valor escogido de la resistencia lastre es así $R_{Lastre} = 7,3 \Omega$, ya que ésta permite 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 (16,16°).

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 Fig. 6 se muestra el esquema empleado para las simulaciones en Psim. El esquema de simulación que representa al sistema empleado actualmente se diferencia del mostrado en la Fig. 6, en que se sustituye al rectificador trifásico por tres convertidores AC-AC cada uno conectado entre una fase y el neutro del generador y que los nombres de los instrumentos de medición y por tanto de las variables medidas asociados a estos convertidores finalizan con ACAC.

En el esquema actual 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: $P_G=12,00$ 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.
- El factor de potencia: $fp_G=0,735$.

En la Tabla I, se muestran los valores para obtener la comparación entre los resultados de las simulaciones de los esquemas con rectificador trifásico conmutados con ángulo simétrico y de convertidor AC-AC.

Tabla I. 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_{La}, I_{Lb}, I_{Lc} (salida del generador)	45,61 A	49,45 A
$I_{aBD3}, I_{bBD3}, I_{cBD3}$	20,25 A	-
$I_{aACAC}, I_{bACAC}, I_{cACAC}$	-	19,27 A
W3L	12,002 kW	12,004 kW
VAR3L	7,656 kVAR	10,522 kVAR
VAPF3L (S)	15,065 kVA	16,323 kVA
VAPF3L, (fp)	0,7966	0,7354
W3BD3, W3ACAC	4,501 kW	4,504 kW
VAR3BD3, VAR3ACAC	-0,067 VAR	2,685 kVAR
VAPF3BD3, VAPF3ACAC	6,690 kVA	6,364 kVA
(S)		
VAPF3BD3, VAPF3ACAC, (fp)	0,6728	0,7077

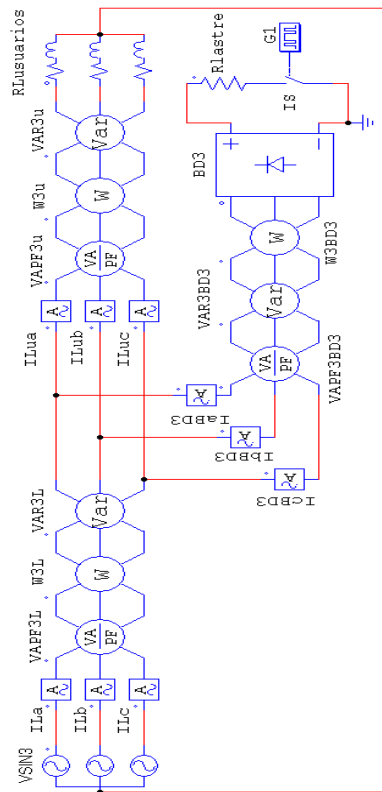


Fig. 6. Esquema de simulación con el rectificador trifásico.

De los resultados mostrados en la Tabla I, se observa una excelente correspondencia entre los valores calculados y simulados. De la Tabla I se nota que el valor dado por la simulación de la potencia reactiva para el esquema con el rectificador 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 % del reactivo total consumido por los usuarios y un 27,23 % de la potencia reactiva total a la salida del generador.

En la Tabla I se aprecia que el factor de potencia en los terminales de la fuente que representa al alternador; octava fila, (VAPF3L, (fp)); 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 él primero no consume

energía reactiva, lo que se traduce en la disminución de la corriente eficaz en cada fase del alternador en, aproximadamente, 4 A, como se observa en la segunda fila de la Tabla I, (*ILa*, *ILb*, *ILc* (salida del generador)), aumentando la disponibilidad del alternador en lo referente a la entrega de potencia activa, resultado que valida al circuito y la forma de conmutar propuesta.

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 I, es ligeramente menor que cuando se emplea convertidores AC-AC. A pesar de esto, con el rectificador se mejora el factor de potencia de la red.

Es importante comentar que el factor de potencia en los terminales del generador en el esquema que emplea los convertidores AC-AC es mayor que en los convertidores y en la carga de los usuarios por separados, esto se debe a que la potencia activa consumida por los usuarios y por los convertidores es mayor que la potencia reactiva total y la distorsión introducida por los convertidores.

IV. CONCLUSIÓN

En el presente artículo se ha mostrado la aplicación de un rectificador conmutado con ángulo simétrico para la mejora del factor de potencia en microcentrales hidroeléctricas que operan en régimen autónomo, y en el que se regulan la frecuencia variando la potencia disipadas en cargas balastos mediante convertidores AC-AC. 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, pudiéndose decir que se han obtenido las siguientes conclusiones. Por un lado, el rectificador trifásico tipo puente con interruptor en serie con la carga lastre conmutado con ángulo simétrico mejora o, al menos, no empeora el factor de potencia del sistema eléctrico de la μ CH, resultado corroborado mediante simulación y los cálculos realizados en el ejemplo desarrollado, lo que constituye una mejora con respecto al circuito actual, convertidor AC-AC. Puede afirmarse que con el rectificador trifásico se logra un aumento de aproximadamente el 7,8 % de la disponibilidad del generador eléctrico de la μ CH, para el punto de trabajo tratado en el ejemplo, con respecto al esquema actual.

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, cabe indicar que 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 1,7 veces la potencia activa máxima para el ángulo de conmutación de 0° .

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo ha sido parcialmente financiado por el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades (MICINN)-Agencia Estatal de Investigación (AEI) del Gobierno Español, y por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER), a través del proyecto PGC2018-098946-B-I00.

REFERENCIAS

- [1] Renewable.cu. Available online: http://www.google.com/cu/url?q=http://www.cubaenergia.cu/index.php/en/publications/doc_download/959-enero-2014&sa=U&ved=0CEUQFjAJahUKewj1gae_0NPHAhVlaT4KHdCwADw&usq=AFQjCNHT_k03l36THaOw3a0yaaushBsgBArenovable.cu (enero, 2014) [Consulted: 15-01-2014].
- [2] 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.
- [3] Mare, J., Odello, L., 2001. Reguladores de frecuencia inteligente para microcentrales hidráulicas. Universidad Nacional de COMAHUE, Argentina.
- [4] Hechavarria, M., Bell, O., 2008. Control de frecuencia en centrales minihidroeléctricas aisladas, Trabajo de Diploma. Facultad Ingeniería Eléctrica. Universidad de Oriente, Cuba.
- [5] 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]
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] Kurtz, V., Anocibar, H., 2007a. Alternativa para el control de cargas balastos. Hidrored, 3-10. Universidad Nacional de Misiones, Argentina. ISSN 0935-0578.
- [9] 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.
- [10] Kurtz, V., Botero, F., Una alternativa para el control de cargas balasto que Regular frecuencia y tensión en PCH de operación aislada. Available online: <http://cerpch.unifei.edu.br/wp-content/uploads/revistas/revista-35.pdf#page=20>. Consulted: [11-03-2018].
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] Peña, L., Dominguez, H., Fong, J., Garcia, 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]
- [15] 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]
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] Bory, H., Rodriguez, H., León, J., Garrido, D., Guillan, E., 2008. Análisis de diferentes formas de control del semiconvertidor monofásico. Conferencia Internacional FIE'08. 2008. Cuba. ISBN: 978-84-00-08680-0.