

ARTÍCULO RECIBIDO: 10/01/15

ARTÍCULO ACEPTADO: 08/07/15

CONMUTACIÓN SIMÉTRICA DE UN RECTIFICADOR TRIFÁSICO AL FACTOR DE POTENCIA MEJORANDO EN EL CONTROL DE FRECUENCIA MINI HIDRÁULICA

SYMMETRICAL SWITCHING OF A THREE-PHASE RECTIFIER
TO POWER FACTOR IMPROVING
IN THE MINIHIDROELECTRICS FREQUENCY CONTROL

Lorenzo Enríquez-García¹, Henry Bory², Carmen Mantilla¹, Carlos Miranda¹

¹Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba-Ecuador

²Universidad de Oriente Sede Mella, Santiago de Cuba-Cuba;

RESUMEN

En el presente trabajo se analiza un rectificador trifásico de tipo puente con el interruptor en serie con la carga conmutada con el ángulo simétrico, asistido con los índices de corriente efectiva, potencia activa, potencia reactiva, Potencia aparente, de distorsión y el factor de potencia. El objetivo es aplicar este rectificador conmutado con ángulo simétrico para mejorar el factor de potencia en microcentrales hidroeléctricas que operan en régimen aislado, y que regulan la frecuencia variando la potencia disipada en las cargas de lastre con corriente alterna con la alternancia de convertidores de corriente. Se suman las expresiones de los índices anteriores de la corriente alterna con la alternancia del convertidor de corriente. Un ejemplo, se calcula donde ambos convertidores se comparan demostrando la ventaja del circuito rectificador con respecto al factor de potencia del sistema eléctrico.

Palabras clave:

conmutación simétrica; convertidor CA-CA; control de frecuencia; factor de potencia; rectificador

ABSTRACT

In the present work is analyzed a type bridge three-phase rectifier with switch in series with the load commuted with symmetrical angle, assisting to the indexes effective current, power active, reactive, apparent, of distortion and power factor. The objective is to apply this rectifier commuted with symmetrical angle for the improvement of the power factor in hydroelectric micro centrals that operate in isolated regime, and that they regulate frequency varying the power dissipated in loads ballasts with alternating current in alternating current converters. The expressions of the indexes previous of the alternating current in alternating current converter are summarized. An example is calculated where both converters are compared demonstrating the advantage of the circuit with rectifier regarding the factor of power of the electric system.

Keywords:

Rectifier; symmetrical switching; CA-CA converter; power factor; frequency control

INTRODUCCIÓN

Este trabajo se enfocó en pequeñas centrales hidroeléctricas, ya que prestan servicios en intrincados lugares sin necesitar embalses o caudales grandes de agua, produciendo menor impacto ambiental. En algunas micro centrales hidroeléctricas (μ CHs), al no encontrarse conectadas al Sistema Electro energético Nacional (SEN), el control de frecuencia se

realiza manteniendo el caudal constante y modificando la potencia disipada en la carga lastre conectada en paralelo con la carga de usuarios, de modo tal que la potencia generada (PG), que se desea mantener constante, sea igual a la potencia disipada por la carga lastre (PL) más la potencia consumida por usuarios (PC), (PennWell, 2009), (Ashish Kumar, 2015).

El método de control de frecuencia por cargas lastres empleando controladores electrónicos presenta ventajas de regulación más eficiente, los esquemas de control son más robustos flexibles y exactos; no presentan desgastes, pues no hay piezas en movimiento; ni requieren mantenimiento necesario de reguladores mecánico-hidráulicos. (Mare J & Odello L, 2001), (Hechavarría M & Bell O, 2008), (Mendoza P A, 2006).

Actualmente nacional como internacionalmente en las μ CHs en las que se regula frecuencia mediante cargas balastros, para el control de la potencia a disipar en cada una de las tres resistencias lastres se emplea un convertidor de corriente alterna en corriente alterna (CA-CA). (García J A & Domínguez H, 2004), (Abreu, 2006), (Kurtz V & Anocibar H, 2007b), (Kurtz V & Anocibar H, 2007a), (Kurts V & Botero F, 2014), (Fong, 2008), (Dihn S, 2010), (Suárez T, 2010), (Peña L, Dominguez H, & Fong J, 2013), (Vasquez H, Pinedo C, Palacios J, & Ramirez J, 2014), (Bory P, 2011).

(Kurts V & Botero F, 2014), proponen como alternativa del control de la potencia a disipar en la carga balastro, un rectificador trifásico tipo puente a diodos (puente de Graets) 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 misma potencia pero conmutados a baja frecuencia.

Se aplican nuevas formas de conmutar a diferentes configuracio-

nes de puentes rectificadores con carga resistiva inductiva (Bory et, 2006) y (Bory et, 2008), se demuestra que dependiendo de la forma de conmutar a los componentes, el puente puede consumir o aportar o ni consumir ni aportar potencia reactiva. 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 por (Kurts V & Botero F, 2014), para el mejoramiento del factor de potencia del sistema eléctrico de las micro centrales hidroeléctricas en el control de la potencia disipada en la carga auxiliar.

Los parámetros analizados son corriente efectiva, potencia activa, reactiva, aparente, de distorsión y factor de potencia.

La sección 1 presenta una introducción; la sección 2 Metodología se subdividió en los acápite 2.1, establece reseña de las expresiones de los índices de rendimiento y energéticos del convertidor de CA-CA, y el 2.2, donde se realizó un análisis del rectificador trifásico con interruptor en serie con la carga conmutado con ángulo simétrico obteniéndose las expresiones matemáticas de índices de rendimiento y energéticos en función del ángulo de conmutación; la sección 3, se desarrolló un ejemplo de aplicación a las micro centrales hidroeléctricas, se comparan el rectificador trifásico y los convertidores de CA-CA 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.

METODOLOGÍA

► Reseña sobre el convertidor de CA-CA

Como el sistema es trifásico existe un convertidor en cada fase que regula la cantidad de energía transferida del alternador a las cargas balastros, se considera que los convertidores están conectados en estrella, son conmutados con el mismo ángulo de disparo y emplea la conexión a cuatro hilos, basta analizar uno para obtener los resultados del conjunto. La Figura 1 muestra el esquema de simulación del convertidor CA-CA en Psim para una fase, compuesto por fuente de voltaje sinusoidal (V_f , fase del alternador $V_{ef} = 110$ V y frecuencia 60 Hz); convertidor CA-CA constituido por tiristores (T1, T2 en anti paralelo), gatillos (G1, G2 pulso de disparo a tiristores, frecuencia 60 Hz); dos puntos de conmutación (ángulo de disparo deseado), resistencia de carga (carga lastre en fase $R = 4.03$ Ohm) y marcadores de corriente (IL) y voltaje (VR)

para visualizar las formas de onda de corriente de entrada al convertidor y voltaje en la carga.

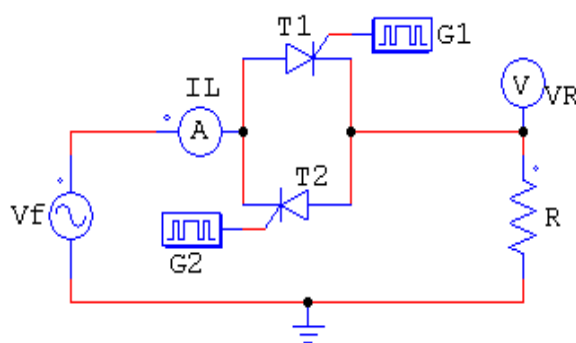


Figura 1. Esquema de simulación de convertidor CA-CA.

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 fuente a carga. En 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 fuente

a carga. Variando el ángulo de disparo se controla el flujo de potencia. La Figura 2 presenta las formas de onda de voltaje y corriente del circuito anterior $\alpha = 60^\circ$.

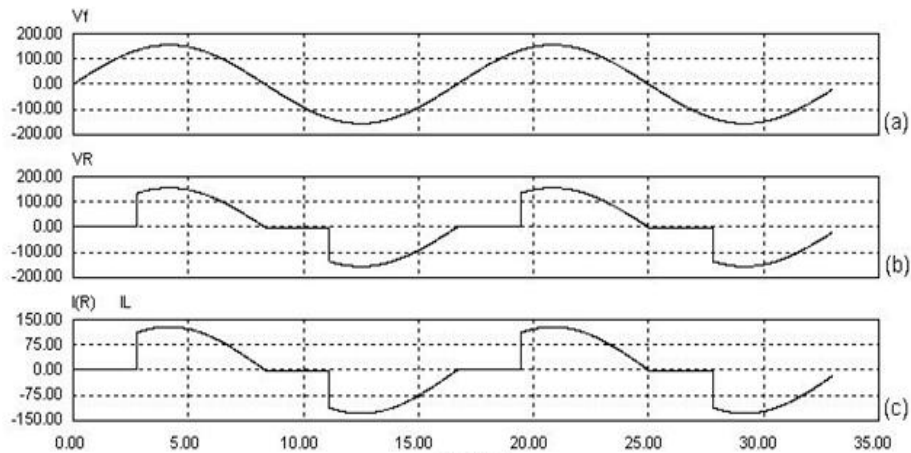


Figura 2. Formas de ondas significativas del convertidor CA-CA. (a) Voltaje de la fuente, (b) Voltaje en carga, (c) Corriente en la línea la misma de la carga.

Valor efectivo de corriente de entrada

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

Para $\alpha = 0$ la potencia activa es máxima $P_{\alpha 0} = \frac{V_{ef}^2}{R}$, corresponde con el comportamiento del convertidor, para el valor de α , la fuente ve conectada a ella una resistencia pura y $P_{\alpha 0}$ es la potencia que se disipa en dicha resistencia.

Potencia activa de entrada al convertidor CA-CA

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

Para $\alpha = \pi$, la potencia de entrada alcanza su valor mínimo, cero, no se transfiere potencia de fuente a carga. La ec (3) indica la potencia reactiva de entrada al convertidor de CA-CA, es positiva lo que indica que consume de red.

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

En la Figura 3 se grafica la potencia reactiva de entrada dividida entre la potencia activa máxima contra el ángulo de disparo, ésta es cero para $\alpha = 0$ y $\alpha = \pi$. Para $\alpha = \pi/2$, alcanza la potencia reactiva su valor máximo de 0.318 veces la po-

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

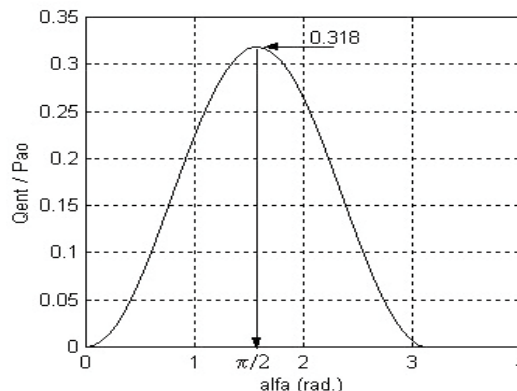


Figura 3. Gráfica de $Q_{ent} / P_{\alpha 0}$ en función del ángulo de disparo.

Es importante mencionar que cada convertidor de CA-CA, útil para el control de potencia a disipar en una resistencia lastre, consume potencia reactiva inductiva lo que contribuye a em-

peorar el factor de potencia en los terminales del generador eléctrico. La potencia aparente de entrada al convertidor CA-CA se muestra en la ecuación (4).

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

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 entrega energía a la carga

por lo que la potencia aparente es nula, su valor mínimo. La potencia de distorsión de entrada al convertidor de CA-CA, ec. (5).

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

Para $\alpha = 0$, $T_{ent} = 0$ ya que la corriente de entrada al convertidor no está distorsionada. Para $\alpha = \pi$, $T_{ent} = 0$ pues la corriente de entrada es nula. Para $\alpha = \pi/2$ la potencia de distorsión alcanza su valor máximo de 0.386 veces la potencia activa máxima.

El factor de potencia ec. (6), para $\alpha = 0$, $fp=1$, la corriente de entrada al convertidor es perfectamente sinusoidal y está en fase con el voltaje de entrada.

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

El sistema es trifásico, por tanto existe un convertidor de CA-CA en cada fase, que se supone se conmutan con el mismo

ángulo de referencia, 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 red trifásica fp_3

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

► Análisis de rectificador trifásico tipo puente con interruptor en serie con la carga lastre conmutado con ángulo simétrico

La Figura 4 muestra el esquema de simulación del rectificador trifásico con interruptor en serie con la carga lastre o fantasma, se obtienen las expresiones de índices de rendimiento y energéticos mencionados en función del ángulo de conmutación.

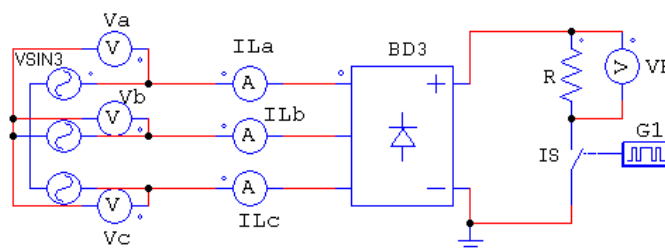


Figura 4. Esquema de simulación del rectificador trifásico con interruptor en serie con la carga lastre

Los elementos del esquema son: fuente de voltaje sinusoidal trifásica (VSIN3 alternador, 60 Hz, 190.53 V efectivo de línea); puente rectificador trifásico a diodos (BD3); interruptor (IS componente de conmutación como transistor bipolar de potencia o IGBT); gatillo (G1 unidad de control, frecuencia 360 Hz, dos puntos de conmutación ángulo y ancho deseado), su función es aplicar un pulso al interruptor según la forma de conmutar con ángulo simétrico y con valor del ángulo de conmutación deseado; resistencia de carga (R carga lastre $R=4.03 \Omega$) y los marcadores de voltajes y corrientes ($V_a, V_b, V_c, V_R, I_{La}, I_{Lb}$ e I_{Lc}) que visualizan las formas de onda de voltajes

de fase, voltaje en carga y corrientes de línea.

Los diodos del puente conducen un máximo de 120° y conmutan cada 60° , luego para la conmutación con ángulo de control simétrico, se cierra IS un ángulo después del punto de conmutación natural y se abre IS el mismo antes del próximo punto de conmutación natural, de esto se deduce que el rango de regulación es: $0 \leq \alpha \leq \frac{\pi}{6}$. La Figura 5 presenta las formas de onda significativas de voltaje y corriente del circuito rectificador para un ángulo de 15° , para la fase **a**, tiene período $T_{LL} = 2\pi$ y cuya expresión analítica se expresa por ec. (11).

$$i_L(\theta) = \left\{ \begin{array}{ll} 0 & \pi/6 < \theta < \pi/6 + \alpha \\ \frac{\sqrt{2}\sqrt{3}V_{ef}}{R} \text{sen}(\theta + \pi/6) & \pi/6 + \alpha < \theta < \pi/2 - \alpha \\ 0 & \pi/2 - \alpha < \theta < \pi/2 + \alpha \\ \frac{\sqrt{2}\sqrt{3}V_{ef}}{R} \text{sen}(\theta - \pi/6) & \pi/2 + \alpha < \theta < 5\pi/6 - \alpha \\ 0 & 5\pi/6 - \alpha < \theta < 7\pi/6 + \alpha \\ \frac{\sqrt{2}\sqrt{3}V_{ef}}{R} \text{sen}(\theta - 5\pi/6) & 7\pi/6 + \alpha < \theta < 3\pi/2 - \alpha \\ 0 & 3\pi/2 - \alpha < \theta < 3\pi/2 + \alpha \\ \frac{\sqrt{2}\sqrt{3}V_{ef}}{R} \text{sen}(\theta + 5\pi/6) & 3\pi/2 + \alpha < \theta < 1 \pi/6 - \alpha \\ 0 & 1 \pi/6 - \alpha < \theta < 2\pi + \pi/6 \end{array} \right\} \quad (11)$$

La figura 5.(c) muestra que la corriente de entrada por fase del convertidor posee simetría impar de media onda, lo que impli-

ca que: $a_0 = 0, a_n = 0$ para todo n par, $b_n = 0$.

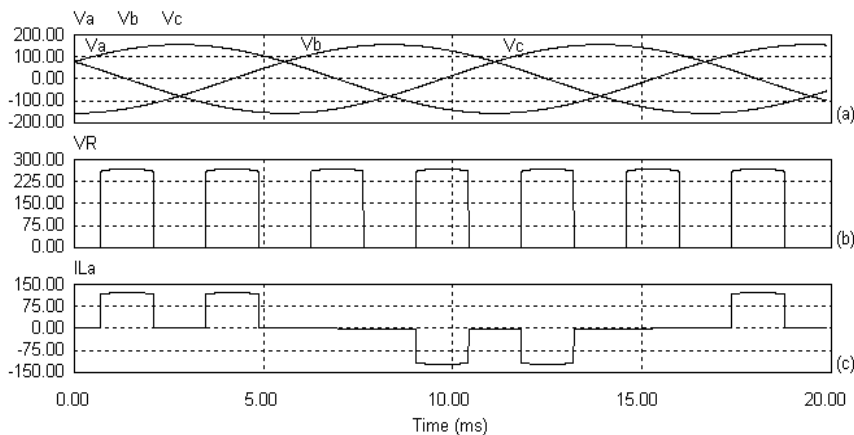


Figura 5. Formas de ondas significativas del rectificador trifásico conmutado con ángulo simétrico. (a) Voltajes de cada fase de la fuente, (b) Voltaje en la carga, (c) Corriente en la línea de fase A.

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. El

coeficiente b_1 , indica la amplitud del primer armónico de corriente de cada terminal de entrada del rectificador en función del ángulo de conmutación.

$$b_1 = \frac{8}{T_{IL}} \int_0^{\pi/4} i_L(\theta) \text{sen}(\theta) d\theta = \quad (12)$$

$$\frac{8}{2\pi} \int_{\pi/6+\alpha}^{\pi/2-\alpha} \frac{\sqrt{2}\sqrt{3}V_{ef}}{R} \text{sen}\left(\theta + \frac{\pi}{6}\right) \text{sen}(\theta) d\theta$$

$$b_1 = \frac{3\sqrt{2}V_{ef}}{\pi R} \left[\frac{\pi}{3} - 2\alpha + \frac{\sqrt{3}}{2} \cos(2\alpha) - \frac{\text{sen}(2\alpha)}{2} \right] \quad (13)$$

El valor efectivo de corriente de entrada ec. (14), para $\alpha = 0$ el valor efectivo de la componente fundamental de co-

rriente de entrada al convertidor alcanza su valor máximo: $I_{1rms\max} = \frac{3V_{ef}}{\pi R} \left[\frac{\pi}{3} + \frac{\sqrt{3}}{2} \right]$ y para $\alpha = \pi/6$ se anula (mínimo).

$$I_{1rms} = \frac{3V_{ef}}{\pi R} \left[\frac{\pi}{3} - 2\alpha + \frac{\sqrt{3}}{2} \cos(2\alpha) - \frac{\text{sen}(2\alpha)}{2} \right] \quad (14)$$

El ángulo de desplazamiento ϕ_1 es nulo para cualquier valor del ángulo de control, indicando que no existe defasaje entre el voltaje de fase y el primer armónico de la corriente de entrada al rectificador, lo que corrobora que el rectificador no consume

ni genera potencia reactiva. El factor de potencia de desplazamiento es 1 y el valor efectivo de la corriente de entrada al rectificador es:

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{4}{T_{IL}} \int_0^{\pi/4} [i_L(\theta)]^2 d\theta} = \sqrt{\frac{4}{2\pi} \int_{\pi/6+\alpha}^{\pi/2-\alpha} \left[\frac{\sqrt{2}\sqrt{3}V_{ef}}{R} \text{sen}\left(\theta + \frac{\pi}{6}\right) \right]^2 d\theta} \quad (15)$$

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

Determinando la potencia activa total a la entrada del rectificador empleando la componente del armónico fundamental de

corriente de entrada en fase con el voltaje de fase.

$$P_{3ent} = 3V_{ef} \frac{b_1}{\sqrt{2}} \quad (17)$$

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

Para $\alpha = 0$ la potencia activa total es máxima $P_{3ent\max} = \frac{9V_{ef}^2}{\pi R} \left[\frac{\pi}{3} + \frac{\sqrt{3}}{2} \right]$ y para $\alpha = \pi/6$ es nula (mínimo). Si se define $P_0 = \frac{V_{ef}^2}{R}$ y se divide la ec. (18) por P_0 , se obtiene la expresión de potencia activa total normalizada, la Figura 6

muestra un comportamiento aproximadamente lineal de ésta, convirtiendo a este rectificador con conmutación de ángulo simétrico en un componente ideal del lazo de control de frecuencia.

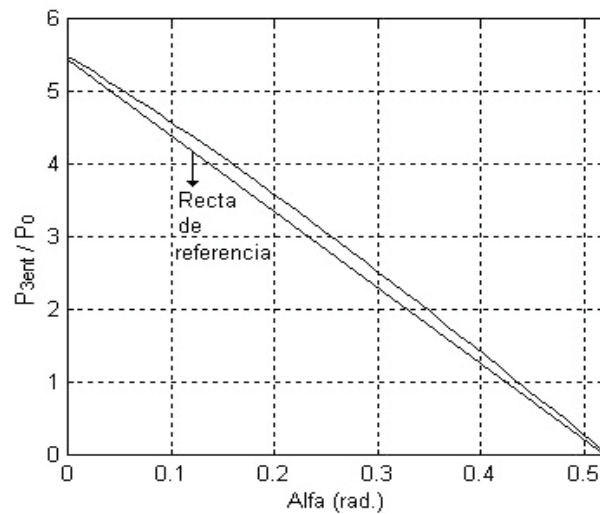


Figura 6. Gráfica de en función de alfa.

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

$$S_{3ent\text{máx}} = \frac{3\sqrt{6}V_{ef}^2}{R} \sqrt{\frac{1}{\pi} \left[\frac{\pi}{3} + \frac{\sqrt{3}}{2} \right]}$$

Para $\alpha = \pi/6$, la potencia aparente trifásica es nula (mínimo); con una curva aproximadamente parabólica ec. (20).

$$S_{3ent} = 3V_{rms} I_{rms} \quad (19)$$

$$S_{3ent} = \frac{3\sqrt{6}V_{ef}^2}{R} \sqrt{\frac{1}{\pi} \left[\frac{\pi}{3} - 2\alpha + \frac{\sqrt{3}}{2} \cos(2\alpha) - \frac{\text{sen}(2\alpha)}{2} \right]} \quad (20)$$

La potencia de distorsión trifásica ec. (21), para $\alpha = 0$ $T_{3ent} = 1.687P_0$, es diferente de cero ya que la corriente de entrada al rectificador está distorsionada. Para $\alpha = \pi/6$ $T_{3ent} = 0$,

$$T_{3ent} = \sqrt{S_{3ent}^2 - P_{3ent}^2} \quad (21)$$

$$T_{3ent} = \frac{9V_{ef}^2}{\pi R} \sqrt{\frac{\pi^2}{9} - \left[2\alpha - \frac{\sqrt{3}}{2} \cos(2\alpha) + \frac{\text{sen}(2\alpha)}{2} \right]^2} \quad (22)$$

La figura 7 muestra la potencia de distorsión total de entrada dividida entre P_0 en función de alfa, en $\alpha = \pi/12$ alcanza su valor máximo de 2.999 veces P_0 .

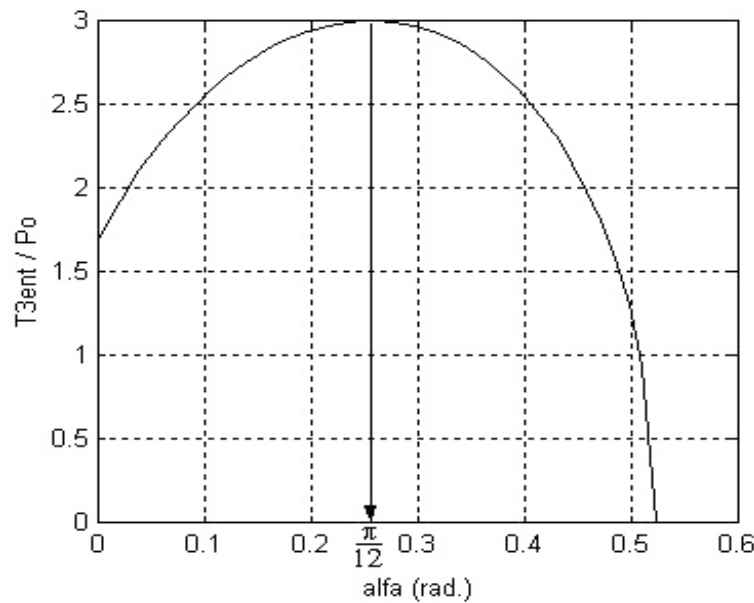


Figura 7. Gráfica de T_{3ent} / P_0 en función del ángulo de conmutación.

El factor de potencia para $\alpha = 0$ es $fp=0.956$, porque la corriente de entrada al rectificador para este ángulo está distorsionada, tiene una curva aproximadamente parabólica ec. (24).

$$fp = \frac{P_{3ent}}{S_{3ent}} = \frac{\frac{9V_{ef}^2}{\pi R} \left[\frac{\pi}{3} - 2\alpha + \frac{\sqrt{3}}{2} \cos(2\alpha) - \frac{\text{sen}(2\alpha)}{2} \right]}{\frac{3\sqrt{6}V_{ef}^2}{R} \sqrt{\frac{1}{\pi} \left[\frac{\pi}{3} - 2\alpha + \frac{\sqrt{3}}{2} \cos(2\alpha) - \frac{\text{sen}(2\alpha)}{2} \right]}} \quad (23)$$

$$fp = \sqrt{\frac{3}{2\pi} \left[\frac{\pi}{3} - 2\alpha + \frac{\sqrt{3}}{2} \cos(2\alpha) - \frac{\text{sen}(2\alpha)}{2} \right]} \quad (24)$$

La potencia reactiva total a la entrada del rectificador ec. (25), demuestra que el rectificador bajo la forma de conmutar descrita no consume ni aporta energía reactiva a la red, considerando una mejora respecto al actual, los convertidores CA-CA que consumen reactivo contribuyen con este consumo de reactivo a empeorar el factor de potencia a la salida del generador.

$$Q_{3ent} = 3V_{ef} \frac{a_1}{\sqrt{2}} = 0 \quad (25)$$

RESULTADOS

Para ilustrar las ventajas del rectificador trifásico conmutado con ángulo simétrico, frente al convertidor de CA-CA actualmente empleado en el control de la frecuencia en una μ CH mediante carga balastro en un ejemplo, suponemos que luego de tener un registro de mediciones de potencia, voltaje y corriente efectiva en una μ CH, conocemos la potencia activa mínima demandada por usuarios $P_{UMIN} = 3$ kW; la potencia activa máxima demandada por usuarios $P_{UMAX} = 12$ kW y en cierto horario la potencia demandada por usuarios sea $P_U = 7.5$ kW con un factor de potencia, $f_{pU} = 0.7$ en atraso.

Como para el control de potencia a disipar en las cargas lastres se empleará el rectificador trifásico conmutado con ángulo simétrico se impone encontrar el valor de resistencia lastre, calculada a partir de la potencia activa máxima que debe consumir el rectificador trifásico $P_{BD3m\acute{a}x} = P_{UMAX} - P_{UMIN} = 9$ kW, evaluando la ecuación (18) para $\alpha = 0$ se tiene que $R_{Lastre} = 7.3$ Ohm, la resistencia $R_U = 2.37$ Ohm e inductancia $L_U = 6.418$ mH por fase (con carga P_U), potencia reactiva total consumida por usuarios $Q_U = 7.65$ kVAR y corriente efectiva en cada fase $I_U = 32.47$ A. Si consumen P_U , el rectificador debe consumir una potencia activa $P_{BD3} = 4.5$ kW, esto se logra con $\alpha = 0.282$ rad, entonces las corrientes efectivas ec.(16), $I_{BD3A} = I_{BD3B} = I_{BD3C} = 20.27$ A, potencia activa total

ec. (18) $P_{BD3} = 4.5006$ kW, potencia reactiva total $Q_{BD3} = 0$ kVAR, potencia aparente total ec. (20) $S_{BD3} = 6.690$ kVA, potencia de distorsión total ec. (22): $T_{BD3} = 4.950$ kVAD y factor de potencia en entrada de rectificador ec. (24) $f_{pBD3} = 0.6727$, en los terminales del generador para estas cargas, la potencia activa total ($P_L = 12.00$ kW), potencia reactiva total ($Q_L = 7.65$ kVAR), potencia aparente total ($S_L = 15.070$ kVA), potencia de distorsión total ($T_L = 4.950$ kVAD) y el factor de potencia ($f_{pL} = 0.7966$).

La Figura 8 muestra el esquema para simulación en Psim, compuesto por fuente de voltaje sinusoidal VSIN3 (alternador); R_{Usuarios} (carga usuarios); rectificador trifásico propuesto constituido por BD3, IS y G1; R_{lastre} (carga balastro); amperímetros de corriente alterna (ILa, ILb, ILc, ILua, ILub, ILuc, ILuA, ILuB, ILuC e I_{BD3A}, I_{BD3B} e I_{BD3C} miden valores efectivos en cada fase de corriente en los terminales del generador, en la carga y en el rectificador propuesto) y los watt metros, var metros y medidores de potencia aparente y factor de potencia (W3L, VAR3L, VAPF3L, W3u, VAR3u, VAPF3u, W3BD3, VAR3BD3 y VAPF3BD3 miden las potencias totales y factor de potencia a la salida del alternador, en la carga y en la entrada del puente rectificador).

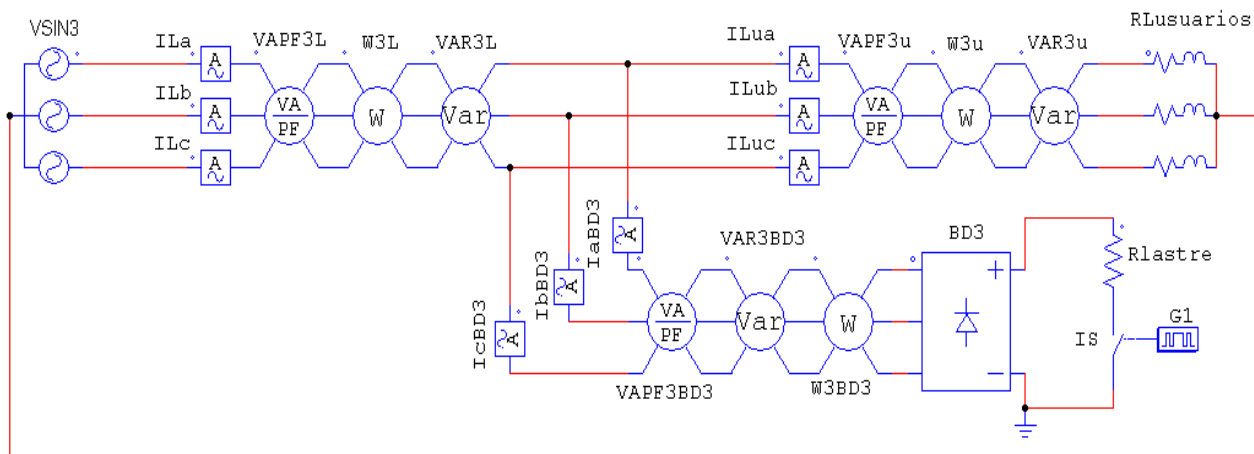


Figura 8. Esquema de simulación con rectificador trifásico.

El esquema de simulación que representa al sistema empleado actualmente se diferencia del de la Figura 8, en que sustituye al rectificador trifásico por tres convertidores de CA-CA cada uno conectado entre una fase, el neutro del generador y el nombre de las variables finalizan con CACA.

En el esquema actual las tres resistencias lastres $R_{lastre1} = R_{lastre2} = R_{lastre3} = 4.03$ Ohm, una por cada convertidor CA-CA para que consuman 1.5 kW, deben ser conmutados con

90° , resultando que corriente efectiva de entrada por convertidor ec. (1), $I_{CACA} = 19.30$ A, potencia activa por fase, ec. (2), $P_{fCACA} = 1.5$ kW, total: $P_{CACA} = 4.5$ kW, potencia reactiva por fase, ec. (3), $Q_{fCACA} = 0.955$ kVAR, total: $Q_{CACA} = 2.864$ kVAR, potencia aparente por fase, ec.(4), $S_{fCACA} = 2.123$ kVA, total: $S_{CACA} = 6.369$ kVA; potencia de distorsión por fase, ec. (5), $T_{fCACA} = 1.157$ kVAD, total: $T_{CACA} = 3.470$ kVAD y factor de potencia ec. (6), $f_{pCACA} = 0.7071$.

A la salida del generador (VSIN3), la potencia activa $P_G=12.00$ kW, la potencia reactiva $Q_G=10.514$ kVAR, potencia aparente $Q_G=10.514$ kVAR, potencia de distorsión $T_G=4.950$ kVAD y factor de potencia $fp_G=0.735$.

La Tabla 1 muestra resultados de la simulación de ambos esquemas, hay excelente correspondencia entre los valores cal-

culados y simulados, en la simulación 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 de CA-CA.

Tabla 1. Simulaciones esquemas rectificador trifásico conmutado ángulo simétrico y convertidores CA-CA.

Variable	Rectificador Trifásico	Convertidor CA-CA
ILa, ILb, ILc (salida generador) (A)	45.6100	49.450
IaBD3, IbBD3, IcBD3(A)	20.2500	-
IaCACA, IbCACA, IcCACA(A)	-	19.270
W3L(kW)	12.0020	12.004
VAR3L (kVAR)	7.6560	10.522
VAPF3L (S) (kVA)	15.0650	16.323
VAPF3L, (fp)	0.7966	0.7354
W3BD3, W3CACA(kW)	4.5010	4.504
VAR3BD3, VAR3CACA (VAR)	-0.0670	2.685
VAPF3BD3, VAPF3CACA (S) (kVA)	6.6900	6.364
VAPF3BD3, VAPF3CACA, (fp)	0.6728	0.707

La potencia reactiva total consumida por los tres convertidores CA-CA para el ángulo de control en cada convertidor de 90° representa un 37.4 % del reactivo total consumido por usuarios y 27.23 % de la potencia reactiva total a la salida del generador.

La Tabla 1 muestra el factor de potencia en los terminales de la fuente que representa al alternador; (VAPF3L, fp); para el esquema con rectificador trifásico conmutado con ángulo simétrico, es mayor que en el esquema con convertidores CA-CA, se debe a que él primero no consume energía reactiva, lo que se traduce en la disminución de la corriente efectiva en cada fase del alternador en aproximadamente cuatro amperes; e (ILa, ILb, ILc), aumenta la disponibilidad del alternador en lo referente a la entrega de potencia activa, resultado que vali-

da al circuito y la forma de conmutar propuesta.

El factor de potencia en los terminales de entrada del rectificador trifásico, según los cálculos realizados y valores de Tabla 1, es ligeramente menor que cuando se emplea convertidores de CA-CA, a pesar de esto con el rectificador se mejora el factor de potencia de la red.

El factor de potencia en los terminales del generador del esquema emplea los convertidores CA-CA 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 usuarios y por convertidores es mayor que la potencia reactiva total y la distorsión introducida convertidores.

CONCLUSIONES

El rectificador trifásico tipo puente con interruptor en serie con carga lastre conmutado con ángulo simétrico mejora el factor de potencia del sistema eléctrico de la μ CH, lo que constituye una mejora con respecto al circuito actual, convertidor de CA-CA.

Con el rectificador trifásico se logra un aumento de la disponibilidad del generador eléctrico de la μ CH, con respecto al esquema actual.

Las expresiones matemáticas de los índices de rendimiento y energético en función del ángulo de conmutación del rectifi-

cador trifásico tipo puente con interruptor en serie con carga resistiva conmutado y ángulo simétrico, demuestran que con esta conmutación no se aporta ni se consume energía reactiva.

Los convertidores de CA-CA siempre consumen potencia reactiva excepto cuando el ángulo de disparo de los tiristores es 0° o 180° .

La potencia de distorsión es nula para un ángulo de disparo de 0° en el convertidor de CA-CA, mientras que para el rectificador es aproximadamente 1.7 veces la potencia activa máxima para el ángulo de conmutación de 0° .

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abreu. (2006). Construcción de un regulador de frecuencia para una mini hidroeléctrica. Universidad de Oriente, Cuba.
- Ashish Kumar. (2015). Energy Statistics. Recuperado 9 de junio de 2016, a partir de http://mospi.nic.in/Mospi_New/upload/Energy_stats_2015_26mar15.pdf
- Bory et. (2006). Análisis de diferentes formas de control del puente rectificador monofásico. Presentado en Conferencia Internacional FIE'06.
- Bory et. (2008). Análisis de diferentes formas de control del semiconvertidor monofásico. Presentado en Conferencia Internacional FIE'08, Cuba.
- Bory P. (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. Universidad de Oriente Sede Mella, Cuba.
- Dihn S. (2010). Controlador de frecuencia para las micros y mini centrales hidroeléctricas de operación aislada. Universidad de Oriente Sede Mella, Cuba.
- PennWell Corporation, (2009). Hydropower is centerpiece of Ecuador energy plan. Hydro Industry FAQs and Recurses. Recuperado de <http://www.hydropowerworld.com/articles/2009/10/hydropower-is-centerpiece.html>
- Fong. (2008). Regulador de frecuencia por carga lastre basado en microcontrolador para micro y mini centrales hidroeléctricas en operación aislada. Presentado en Conferencia Internacional FIE'08, Cuba.
- García J A, y Domínguez H. (2004). Perspectivas de la automatización de las centrales hidroeléctricas en Cuba. Universidad de Oriente, Cuba.
- Hechavarría M, y Bell O. (2008). Control de frecuencia en centrales minihidroeléctricas aisladas. Universidad de Oriente, Cuba.
- Kurts V, y Botero F. (2014). Una alternativa para el control de cargas balasto que Regulan frecuencia y tensión en PCH de operación aislada. Recuperado 9 de junio de 2016, a partir de https://www.google.com/search?q=KURTS+V,+BOTERO+F+Una+alternativa+para+el+control+de+cargas+balasto+que+Regulan+frecuencia+y+tensi%C3%B3n+en+PCH+de+operaci%C3%B3n+aislada.+&ie=utf-8&oe=utf-8&client=firefox-b&gfe_rd=cr&ei=1wFaV9mxNqLI8Af5uYqABA
- Kurtz V, & Anocibar H. (2007a). Alternativa para el control de cargas balastos. Hidrored, Universidad Nacional de Misiones, Argentina, 2007, 3-10.
- Kurtz V, & Anocibar H. (2007b). Sistema mixto para control de la generación en microcentrales hidroeléctricas. Hidrored, Universidad Nacional de Misiones, Argentina, 2007, 24-30.
- Mare J, & Odello L. (2001). Reguladores de frecuencia inteligente para microcentrales hidráulicas. Recuperado 9 de junio de 2016, a partir de [https://www.google.com.ec/webhp?ie=utf-8&oe=utf-8&client=firefox-b&gfe_rd=cr&ei=t-1ZV8uGCunE8gejg62AAQ&gws_rd=cr#q=Mare+J%2C+Odello+L+\(2001\)+Reguladores+de+frecuencia+inteligente+para+microcentrales+hidr%C3%A1ulicas.+Universidad+Nacional+de+COMAHUE%2C+Argentina](https://www.google.com.ec/webhp?ie=utf-8&oe=utf-8&client=firefox-b&gfe_rd=cr&ei=t-1ZV8uGCunE8gejg62AAQ&gws_rd=cr#q=Mare+J%2C+Odello+L+(2001)+Reguladores+de+frecuencia+inteligente+para+microcentrales+hidr%C3%A1ulicas.+Universidad+Nacional+de+COMAHUE%2C+Argentina).
- Mendoza P A. (2006). Control electrónico de una central Micro-hidráulica para su aplicación en generación distribuida. Recuperado 9 de junio de 2016, a partir de http://www.centroenergia.cl/literatura/memorias_tesis/memoria_Patricio_Mendoza.pdf
- Peña L, Dominguez H, & Fong J. (2013). Regulación de frecuencia de una Minihidroeléctrica por carga secundaria utilizando un pc embebido de uso industrial. Recuperado 10 de junio de 2016, a partir de <http://www.aedie.org/9CHLIE-paper-send/291-PE%D1A.pdf>
- Suárez T. (2010). Desarrollo de un sistema de regulación de frecuencia para una microcentral hidroeléctrica de operación aislada. Universidad de Oriente.
- Vasquez H, Pinedo C, Palacios J, & Ramirez J. (2014). Regulacion de frecuencia en microcentrales. Recuperado 10 de junio de 2016, a partir de <http://bibliotecadigital.univalle.edu.co/bitstream/10893/1216/1/Regulacion%20de%20frecuencia%20en%20microcentrales.pdf>