

Paradigmas de las Alternativas de Energía para Sistemas Interconectados a Red

J. E. Rivas de la O¹, A. Salas¹, F. Huerta Valenzuela¹, A. Gamez², R. Cuellar²

Resumen— En este artículo se propone un análisis para operar con fuentes alternativas de energía sincronizadas a plantas generadoras de diversos tipos y representar que ocurre en la red eléctrica con un sistema interconectado con una diferente naturaleza de voltaje y corriente. El problema principal se presenta cuando se traslapan las fuentes del sistema de distribución (CFE) y la planta generadora alternativa, que puede ser un sistema de frecuencias altas para elevar pequeños voltajes a voltajes de aplicación, celdas de energía o sistemas fotovoltaicos con inversores trifásicos conectados y sincronizados a la red general.

Palabras claves—Sistema fotovoltaico conectado a red SFVR, Sistema Fotovoltaico SFV.

I. INTRODUCCIÓN

En los últimos años el uso de combustibles fósiles a dominado la economía del mercado mundial en la producción de plantas energéticas que operan bajo este tipo de aplicación, siendo este desde hace varios años atrás un recurso que contamina el ambiente y está en vías de extinción, por lo que es necesario comenzar a estudiar y aplicar otro tipo de fuentes de energía, como la energía solar, eólica y celdas de energía que operan a base de hidrógeno por mencionar, las cuales son confiables y no contaminan tanto como las que usan energía calorífica o nuclear como fuente de transformación. Por ello es importante empezar a estudiar el sector energético de fuentes renovables el cual ha sido poco estudiado y no se conoce tanto de él, donde el uso de inversores tiene mucha aplicación para ayudar a la cogeneración de energía.

Con este tipo de tecnología que está en proceso de desarrollo, en un futuro la aplicación de inversores y fuentes renovables de energía deberán de ser capaces también de suministrar potencia reactiva y compensar el comportamiento capacitivo e inductivo de los consumidores en el punto de inyección a la red, mediante el correspondiente desplazamiento del ángulo de fase entre la corriente y la tensión de red del inversor.

Debido a esta problemática en este artículo se analiza la implementación de un sistema de fuente renovable de energía usando un inversor con conducción de 180 grados el cual se inyecta a la red general de CFE.

II. FORMULACIÓN MATEMÁTICA

Si se emplea el análisis de Fourier para representar el voltaje de fase a neutro del inversor como una función $F(t)$ que es seccionalmente continua y periódica, se obtiene:

$$b_n = \frac{1}{L} \int_{-L}^L f(t) \sin\left(\frac{n\pi\omega t}{L}\right) d\omega t \quad (1)$$

$$F(t) = V_m \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin\left(\frac{n\pi\omega t}{L}\right) \quad (2)$$

Donde, $F(t)$ de (2), es la serie de Fourier que sirve para representar la señal del inversor como una función continua y periódica en el periodo P , la cual será inyectada a el nodo de consumo de la red general de CFE, que se representa como:

$$G(t) = V_s \sin(\omega t) \quad (3)$$

Los sistemas anteriores descritos como $F(t)$ y $G(t)$ se analizan como dos fuentes de voltaje en paralelo, donde el sistema a resolver es la superposición de la aportación de ambos a la carga RL, tal como se muestra en la figura 1.

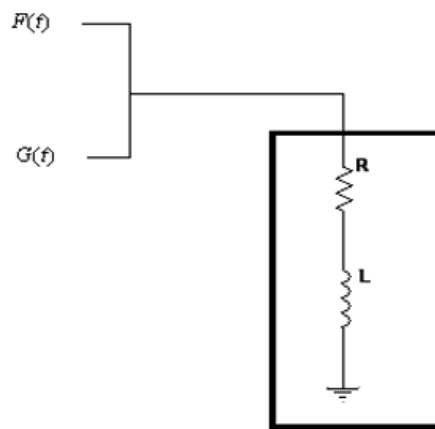


Figura 1. Modelo de inyección nodal con $F(t)$, $G(t)$.

En la figura 1, el sistema consumidor se representa con

¹ José Everardo Rivas de la O (everito_78nike@hotmail.com), Arturo Salas Gutiérrez (arturo_929@hotmail.com), Francisco Huerta Valenzuela (fhv_1@hotmail.com), Div. De Electromecánica, Av. Tecnológico No. 1555 Sur Periférico Gómez-Lerdo Km. 14.5 C.P. 35150 Cd. Lerdo, Dgo. Tels. 01(871)725-23-71/725-57-79/725-58-02

la carga RL y el objetivo principal es que el sistema general CFE no alimente al sistema alternativo de energía que es el que aportara la máxima corriente cuando este se inyecte al nodo consumidor. Para obtener la corriente de inyección es necesario acoplar al sistema inversor una impedancia variable $Z(t)$ que aporte la potencia reactiva, como se muestra en la figura 2.

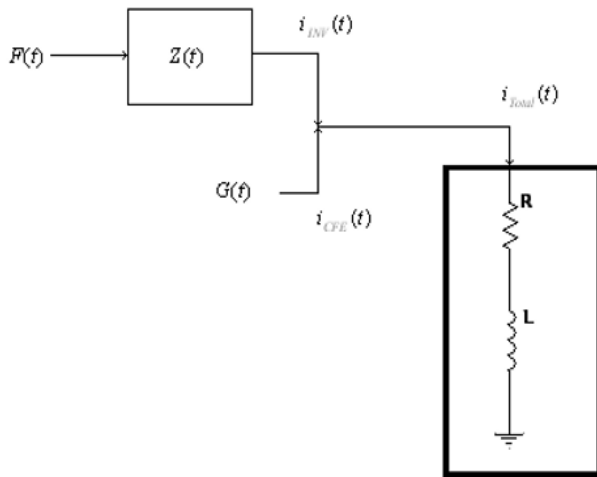


Figura 2. Modelo de inyección nodal con $F(t)$, $G(t)$, y $Z(t)$.

Donde, $i_{CFE}(t)$, $i_{inv}(t)$ y $i_{total}(t)$ son las corrientes de la planta generadora, sistema inversor y la aportación total al nodo consumidor.

La corriente del inversor se obtiene resolviendo la fuente periódica $F(t)$ de manera independiente, con la malla del sistema RL para después hacer la superposición con el sistema alimentado con la fuente periódica $G(t)$, como se muestra en la figura 3.

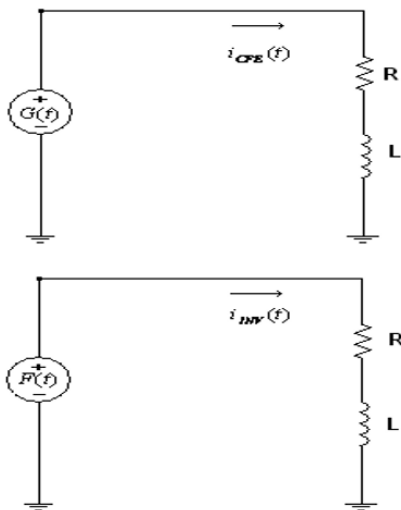


Figura 3. Mallas de los dos sistemas generadores $G(t)$ y $F(t)$.

Los resultados de ambos análisis para las corrientes de inyección al nodo consumidor se muestran en las figuras 4 y 5; debido a que las componentes usando el análisis de Fourier son aproximadamente iguales estas se pueden superponer a fin de obtener las aportaciones que sean necesarias para la administración de la carga, de tal forma que $k_1 i_{inv}(t) \leftrightarrow k_2 i_{CFE}(t)$.

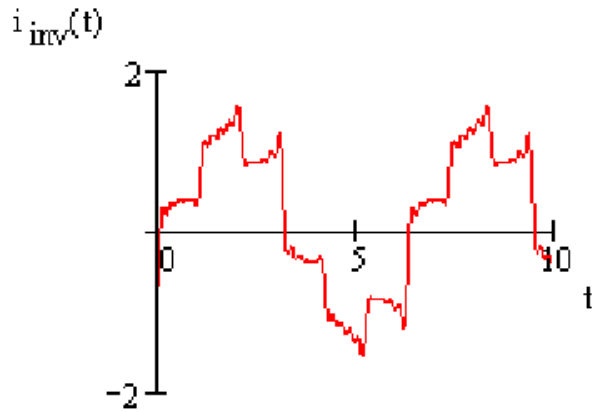


Figura 4. Inyección nodal con $i_{inv}(t)$, un 70% de aportación a CFE.

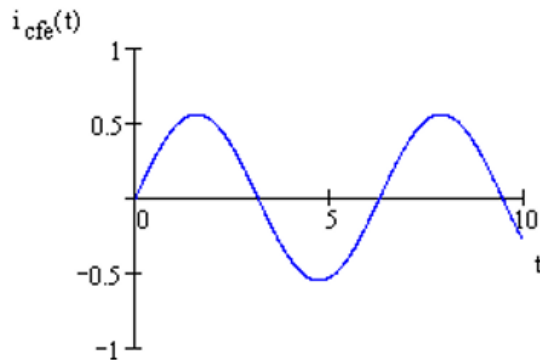


Figura 5. Inyección nodal con $i_{CFE}(t)$, un 30% de aportación.

Ambas corrientes se superponen al ser inyectadas a la red donde la aportación de cada una de estas mejora la calidad de la corriente en el sistema, ya que la inductancia de la carga provoca $V_{carga}(t) = L \frac{di}{dt}$, lo que produce una deformación en el voltaje de entrada que disminuye la eficiencia del voltaje “rms verdadero”, que a su vez por el tipo de onda puede aportar armónicos no deseables a la red en el sistema de la carga. La respuesta de corriente del inversor se puede ver en la figura 4 y la respuesta final con ambos sistemas se muestran en la figura 6.

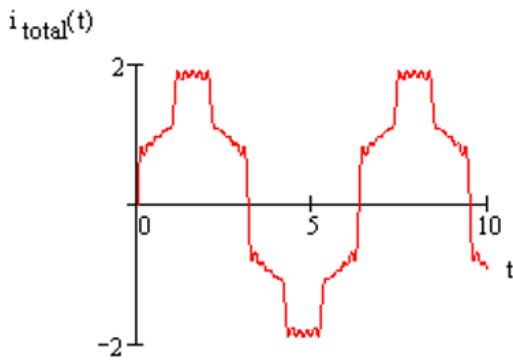


Figura 6. Corriente $i_{total}(t)$, suministrada al sistema consumidor.

Al acoplarse ambos sistemas de generación CFE y sistema alternativo de energía como cogeneración; dependiendo cual sea más dominante en la corriente de suministro al nodo consumidor, este ejercerá cierto dominio en el sistema, por lo que se compara la respuesta de la potencia instantánea en el momento en que ambos intercambien el dominio del sistema; como se muestran en las figuras 7 y 8.

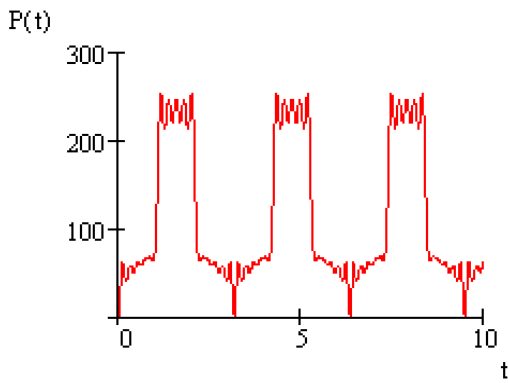


Figura 7. Potencia instantánea cuando domina el sistema cogenerador.

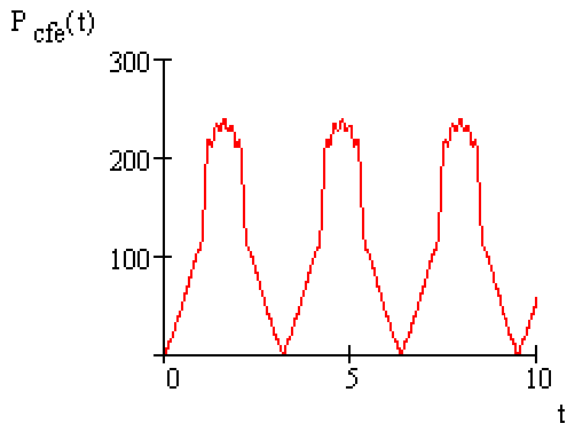


Figura 8. Potencia instantánea cuando domina el sistema general CFE.

Se puede observar que la aplicación es válida ya que ambos sistemas se comportan de manera similar según el dominio de la fuente generadora. La aplicación de sistemas de fuentes alternativas operando como sistemas cogeneradores acoplados a la red es importante ya que el sistema general CFE, puede usarse en el inicio de los arranques de carga, para que este aporte la corriente necesaria y después el sistema cogenerador aporte la máxima corriente. Como el sistema alternativo de energía se encuentra sincronizado a la red general CFE las variaciones en el factor de potencia se superpondrán para ambos debido a que las fuentes $F(t)$ y $G(t)$, se encuentran en paralelo. El análisis para este caso se consideró tomando en cuenta la potencia activa y reactiva en la superposición de ambos dominios CFE y sistema cogenerador alternativo de energía, como se muestran en las figuras 9 y 10.

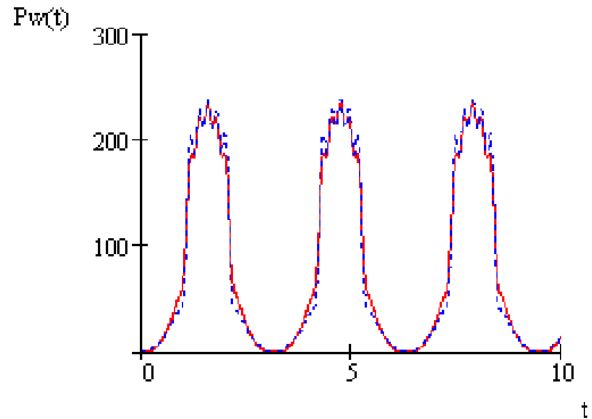


Figura 9. Potencia activa del sistema CFE (rojo) y sistema cogenerador (azul).

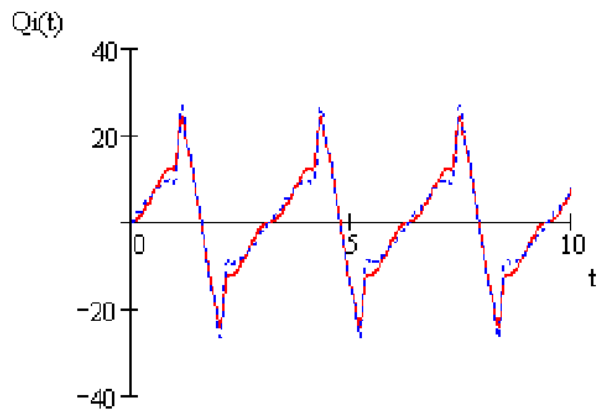


Figura 10. Potencia reactiva del sistema CFE (rojo) y sistema cogenerador (azul).

En los resultados que se muestran anteriormente, se considera un factor de potencia de 0.90 en atraso, tomando

en cuenta la corriente de inyección total con una aportación del sistema cogenerador del 70% (líneas de color azul) y sistema CFE del 30% (líneas de color rojo); y se compara con la superposición de la fuente $F(t)$ considerando una señal de corriente senoidal (CFE), a fin de concluir la demostración de las ecuaciones (2) y (3), que son las fuentes de voltaje que alimentan a los sistemas mostrados en las figuras 2 y 3.

Para el análisis e implementación, se utilizó una tarjeta de trabajo que consta de detectores de cruce por cero trifásicos que ayudan a monitorear la red y se encargan de dar la información al microcontrolador 16f877 de cómo administrar los disparos del inversor para que se sincronice a la red CFE, un banco RL y una máquina de inducción para simular el sistema consumidor.

Las mediciones de corriente se hicieron con una bobina de Rowogsky para corrientes entre 5 y 10 Amperes y voltaje de 220 Volts.

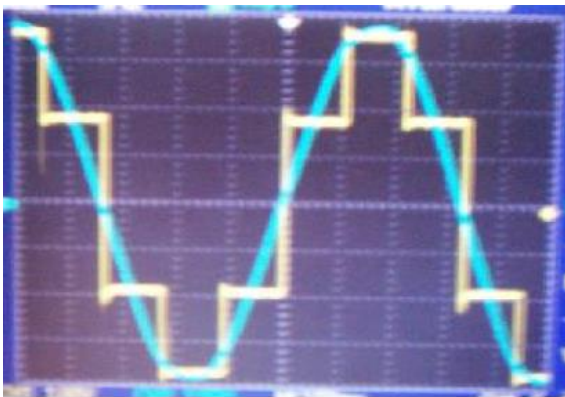


Figura 11. Sistema general CFE sincronizado con la fuente del inversor en (color amarillo).

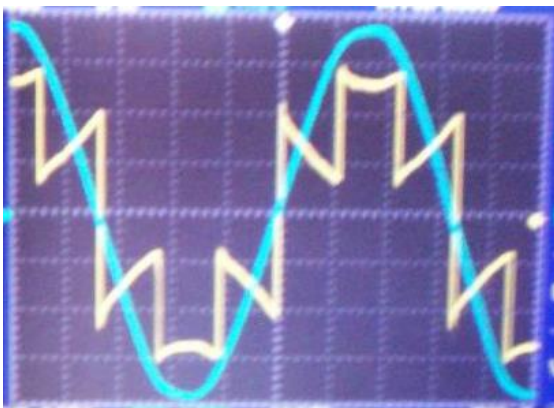


Figura 12. Señal de la corriente de CFE y corriente inyectada total en (color amarillo) en el banco con Carga RL, donde $R > L$.

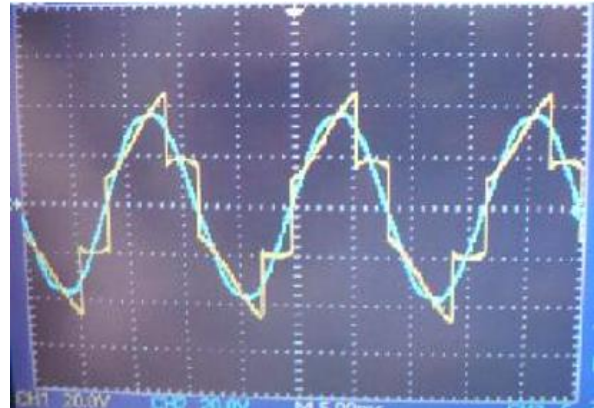


Figura 13. Señal de la corriente de CFE y corriente inyectada total (color amarillo) en el banco con Carga RL, donde $R \ll L$.

Los resultados son favorables y se continúa estudiando este tipo de alternativas energéticas ya que deberá ser necesario implementarlas y desarrollarlas para altos niveles de tensión, debido a que los combustibles fósiles han sido muy utilizados y se están acabando en todo el planeta.

III. CONCLUSIÓN

En el análisis e implementación de fuentes alternativas de energía, que para este caso se usa una fuente fotovoltaica y un inversor de conducción a 180 grados con voltaje de línea de 220 V, se hicieron pruebas para llevarlo a potencias entre 5 y 10 kilowatts por lo que falta hacer pruebas para altas corrientes y voltajes, así como para ayudar a corregir el factor de potencia usando esta tecnología, los resultados demuestran que el análisis es de buena aproximación y se acerca a la realidad cumpliendo con los objetivos previstos en este tipo de potencia.

Para la validación se conectó un banco RL y una máquina de inducción, para proveer al sistema consumidor variables estables y dinámicas para un tiempo finito considerable para observar su comportamiento.

IV. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Instituto Tecnológico Superior de Lerdo, directivos y personal de apoyo; por el apoyo y el uso de sus instalaciones, como también a las divisiones de electromecánica y electrónica. El primer autor agradece al Doctor Marco Antonio Arjona López del Instituto Tecnológico de la Laguna, por su amistad y enseñanza recibida, como a las organizaciones N&EE y PROSEMSA.

V. REFERENCIAS

- [1]. D. Cyganski, J. A. Orr, A. K. Chakravorti, A. E. Emanuel, E. M. Gulachenski, C. E. Root, and R. C. Bellemare, "Current and Voltage Harmonic Measurements and Modeling at the Gardner Photovoltaic Project", IEEE Trans. On Power Delivery, Vol 4, No. 1, pp. 800-809, January 1989.
- [2]. S. Santoso and W. M. Grady, "Developing an Upper Level Undergraduate Course on Renewable Energy and Power Systems", Proceedings, 2005 IEEE PES General Meeting, San Francisco, CA, June 12-16.
- [3]. M. H. Nehrir, C. Wang, and V. Gerez, "Impact of Wind Power Distribution Power Distributed Generation on Distribution Systems", Proceedings, CIRED 2003 -17th European International Conference on Electricity Distribution, May 12-15, 2003, Barcelona, Spain.
- [4]. G. M. Masters, Renewable and Efficient Power Systems, Wiley/IEEE, 2004.

VI. BIOGRAFÍA



M.C. José Everardo Rivas de la O. Ingeniero en Eléctrica egresado del Instituto Tecnológico de la Laguna en el 2000. Premio Nacional de Matemáticas 1997. Recibió el grado de maestro en ciencias en Ingeniería Eléctrica en el Instituto Tecnológico de la Laguna en el 2005. Ha publicado en la Sociedad Matemática Mexicana y Canadá en el área de métodos numéricos y optimización.

Supervisor temporal de proyectos de construcciones eléctricas por parte de C.F.E. Pertenece a la sociedad Matemática Mexicana – Canadá, invitado a Who's Who in the World 2008., nominado a Top 100 Engineers 2010 y 2000 Outstanding Intellectuals of the 21 Century 2011 y docente del Instituto Tecnológico Superior de Lerdo. Sus áreas de interés incluyen desarrollo tecnológico enfocado a la empresa privada, energías alternativas y sustentables, electrónica de potencia, máquinas eléctricas, métodos numéricos- optimización y control aplicado. Email: everito_78nike@hotmail.com



M. C. Arturo Salas Gutiérrez. Nació en Lerdo Durango en 1982. Ingeniero Electromecánico egresado del Instituto Tecnológico Superior de Lerdo en el 2005. Obtuvo el grado de Maestro en Ciencias en Ingeniería Eléctrica en la División de Estudios de Posgrado del del Instituto Tecnológico de la Laguna en el 2011 y Maestría en Energías Renovables en el Centro de Investigación en Materiales Avanzados (CIMAV) en el 2015.

Actualmente es docente del Instituto Tecnológico Superior de Lerdo, sus áreas de interés es el desarrollo de proyectos a la industria privada, sistemas eléctricos de potencia, control aplicado, redes eléctricas industriales, energías renovables, ahorro de energía e instrumentación virtual en Labview.



M.C. Francisco Huerta Valenzuela. Nació en la Ciudad de Torreón, Coah., México el 5 de agosto de 1979. Egresado del Instituto Tecnológico de la Laguna de la carrera de Ingeniería Electrónica con la especialidad en comunicaciones en el año 2002. Obtuvo el grado de Maestría en Ciencias de la Ingeniería Eléctrica en el Centro de Graduados del Instituto Tecnológico de la Laguna, ubicado en la ciudad de Torreón, Coah., México, en el año

de 2004, en la especialidad en Control de Robots Manipuladores.

Actualmente labora en el Instituto Tecnológico Superior de Lerdo, desempeñado el puesto de Investigador-Docente, en el Departamento de Investigación y Desarrollo Tecnológico y en la División de Ingeniería Electromecánica respectivamente, el instituto se encuentra ubicado en la ciudad de Lerdo, Dgo., México. Cuenta con experiencia profesional en el ramo de la automatización industrial. Sus actuales líneas de investigación incluyen: Mecatrónica, diseño de controladores lineales y no lineales para sistemas electromecánicos, automatización industrial, control de movimiento, comunicaciones industriales y electrónica de control y de potencia.



M. C. Aron Gámez Vargas. Nació en Torreón Coahuila en 1981. Ingeniero Electrónico egresado del Instituto Tecnológico de la Laguna en el 2004. Obtuvo el grado de Maestro en Ciencias en Ingeniería Eléctrica en la División de Estudios de Posgrado del Instituto Tecnológico de la Laguna en el 2006. Fue profesor-investigador del Instituto Tecnológico Superior de Lerdo, sus áreas de interés

es el desarrollo de proyectos a la industria privada, electrónica de potencia, control aplicado, redes eléctricas industriales y procesamiento digital de señales.