

MODELO OPTIMIZADO DE GENERACIÓN FOTOVOLTAICA CON COMPENSACIÓN DE PERTURBACIONES EN LA RED ELÉCTRICA

D. H. Pontoriero¹, M. G. Molina², P. E. Mercado²

^{1,2}Instituto de Energía Eléctrica – Facultad de Ingeniería (IEE - FI)
Universidad Nacional de San Juan (UNSJ)

²Consejo de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)

Av. Lib. Gral. San Martín 1109 (0) CP: 5400 - San Juan – Argentina. Tel. 0264 226444 Fax: 0264 4210299

e-mail: dpontori@iee.unsj.edu.ar

RESUMEN: Se presenta un modelo de simulación dinámica de generador fotovoltaico optimizado acoplado a la red eléctrica que permite, inyectar energía eléctrica aprovechando al máximo su capacidad de generación eléctrica, y además, compensar perturbaciones indeseadas en la red Eléctrica. Se elabora un modelo detallado de todos los componentes y algoritmo de control que conforman el sistema propuesto y se simula el modelo completo con criterios de generación y compensación eléctrica con la finalidad de predecir su funcionamiento y observar la variación de sus parámetros característicos. Los resultados de la simulación dinámica muestran el comportamiento satisfactorio de la propuesta presentada. Se muestran los efectos del aporte eléctrico y de la compensación de las perturbaciones existentes en la red. Las conclusiones de la propuesta muestran nuevas posibilidades de aprovechamiento fotovoltaico que contribuyen al aporte de potencia activa, a la reducción de las pérdidas eléctricas y el mejoramiento de la calidad de servicio eléctrico.

Palabras clave: modelación dinámica, generación fotovoltaica, acoplamiento a la red, compensación de perturbaciones.

INTRODUCCIÓN

La tecnología fotovoltaica (FV) ha alcanzado en la actualidad un grado de madurez suficiente para ser considerada una alternativa válida de suministro de energía eléctrica. Tanto es así que en algunas aplicaciones concretas esta alternativa se ha tornado en la solución más económica y/o en la única solución técnicamente posible. Las aplicaciones más difundidas se han dado en sistemas aislados, aunque también se han realizado conexiones a redes interconectadas de distribución de energía, en especial para solucionar los problemas de caída de tensión debido a la transmisión de potencia activa sobre largas distancias, y proveer un aporte adicional de potencia activa (Iriarte Aldana, 2000). En estos casos se realiza la introducción de generación local FV cercana a la demanda. Este tipo de generación posee larga vida útil y escaso mantenimiento, siendo de especial aplicación en zonas de consumo alejadas de los grandes centros poblados y/o con grandes problemas de accesibilidad. Posee además la propiedad de ser fácilmente acoplada a otras fuentes de generación y a redes eléctricas existentes, siendo posible ampliar su potencia instalada sin modificaciones del equipamiento ya instalado (Kasa et al. 2000). Todo esto la convierte en un tipo de generación muy flexible y adaptable a los requerimientos del sistema. Esta propiedad y teniendo en cuenta que en Argentina gran parte del territorio nacional el recurso solar es muy bueno, hacen de la generación FV una alternativa como generación distribuida en todo el país, es especial cuando la tendencia en un futuro inmediato es interconectar todas las poblaciones del país al sistema interconectado nacional. Aprovechar así las instalaciones FV existentes en zonas aisladas y por otro lado planificarla como posible generación distribuida donde se la requiera.

Por otra parte existe un grave problema en la calidad de la energía suministrada a los usuarios. Este problema de calidad se da tanto con líneas extensas de transmisión y/o distribución, como en sistemas eléctricos aislados. Algunos de los problemas que inciden en la calidad de suministro que se presentan son: flujos de potencia reactiva, caídas de tensión y bajos valores de factor de potencia en los extremos de línea, presencia de armónicos de corriente y/o de tensión, que normalmente se denominan perturbaciones eléctricas. Estas perturbaciones conducen a un bajo nivel de calidad del servicio, a un aumento de las pérdidas eléctricas de generación, transmisión y distribución de la energía, y elevados costos de operación y mantenimiento. Una solución posible de estos problemas se obtiene a través de la conexión de sistemas compensadores, en lugares estratégicos de la red, para reducir o eliminar los problemas mencionados (Aredes et al., 1998).

Técnicamente es factible introducir una generación eléctrica fotovoltaica y simultáneamente realizar una compensación de las perturbaciones presentes en la red eléctrica, utilizando únicamente el equipamiento requerido para la conexión FV a la red. Esta posibilidad se basa en el hecho de que los sistemas eléctricos compensadores requieren una fuente de tensión de corriente continua (CC) y un convertidor de corriente continua a corriente alterna (CC/CA). Normalmente, y de acuerdo con el tipo de compensación requerida, es suficiente utilizar un capacitor que cumple la función de la fuente de tensión. Es precisamente aquí donde se puede aprovechar el sistema de acoplamiento de generación FV a la red eléctrica, es decir, utilizar el mismo convertidor CC/CA para realizar la conversión de CC de los módulos a CA de la red y al mismo tiempo realizar la compensación de las perturbaciones requeridas en la red (Hingorani, 1988). Se debe realizar un control apropiado sobre este convertidor CC/CA, para que realice ambas funciones.

Evidentemente se deben tener en cuenta sus particularidades, tales como: generación eléctrica dependiente de la aleatoriedad de la radiación solar y comportamiento como fuente de CC de los módulos FV. Se requiere además que la compensación producida tenga una respuesta en tiempo real adaptada dinámicamente a las necesidades instantáneas de la red, que varían continuamente dependiendo de la variación de sus parámetros característicos.

La innovación fundamental de esta propuesta es seleccionar el equipamiento apropiado e implementar un esquema de control que cumpla con todas las características mencionadas, que dado todos los factores que intervienen, se torna en un problema complejo. En este artículo se presenta un modelo desarrollado propuesto, con una descripción detallada de cada una de sus partes y un novedoso algoritmo de control que se implementan a través de la utilización de una herramienta de modelado y simulación digital (Molina y Mercado, 2004; Acha et al., 2002). La simulación permite obtener una idea muy aproximada del funcionamiento del sistema real y así depurar la interrelación de las diferentes variables involucradas. Para esto se utilizan herramientas de Simulink/Matlab (Simulink, 2002). La simulación se torna una herramienta fundamental para seleccionar apropiadamente los componentes y conocer en detalle el comportamiento de los mismos frente a distintas situaciones reales que se pueden presentar, para pasar a una segunda etapa de la implementación de un prototipo de laboratorio y posteriormente a un prototipo de campo. Además se requiere del prototipo para validar y ajustar el modelo realizado.

GENERACIÓN FOTOVOLTAICA ACLOPLADA A LA RED ELÉCTRICA

Principio de la Generación Fotovoltaica

El generador FV se comporta como una fuente de CC constante con una resistencia en serie y otra en paralelo. Su generación dependerá por un lado de la luz que incida sobre sus celdas, y por otro lado de la carga que se conecte entre sus terminales, definiendo así un punto de funcionamiento sobre la curva de respuesta del generador FV. En función de la tensión y la corriente eléctrica deseada se conectan los módulos en forma apropiada en una combinación serie – paralela. Esto implica que para una carga constante, la energía eléctrica entregada depende de la luz solar incidente en los módulos FV y varía en forma proporcional a ella. También depende de la temperatura. Evidentemente esta energía es nula por la noche.

Acoplamiento Fotovoltaico a la red eléctrica

Los componentes básicos requeridos para acoplar un generador FV a la red eléctrica están mostrados en la Figura 1.

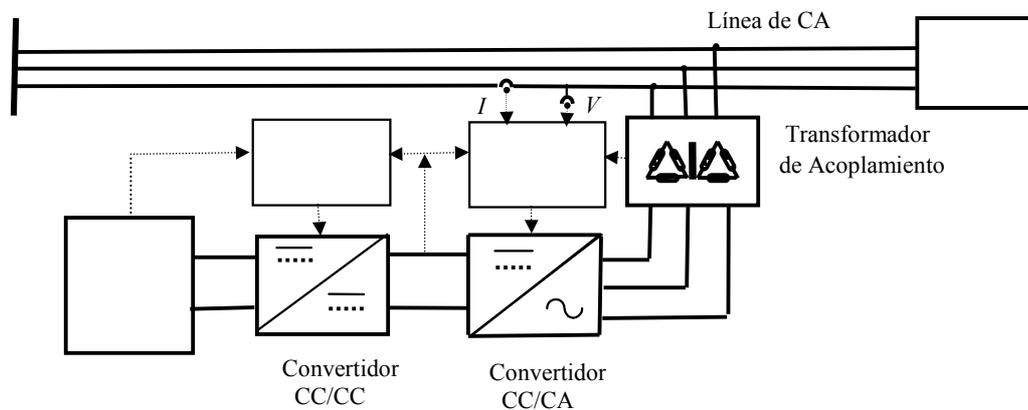


Figura 1: Campo Fotovoltaico acoplado a red eléctrica de CA de distribución.

El punto de funcionamiento de un generador FV, para un valor de radiación solar y una carga determinada, definen la potencia (P) entregada por el mismo, según los valores de tensión (V) y corriente (I) establecidos en la carga. Se intenta que en todo momento el generador FV entregue la máxima potencia para así lograr el máximo aprovechamiento de la potencia instalada. Es decir, se trata de obtener un valor de V y uno de I tales que correspondan a la máxima P, los cuales dependen de la radiación solar, es decir de la intensidad de luz incidente sobre las celdas FV y ésta a su vez de la posición del sol (hora y época del año), inclinación de los módulos, humedad y temperatura ambiente, del tipo de carga conectada y área de las celdas entre otras. La radiación solar y las condiciones atmosféricas no se pueden cambiar, pero la carga que ve el generador puede ser adaptada artificialmente a través de un dispositivo electrónico que actúe como adaptador de impedancia. Este dispositivo es un convertidor CC/CC controlable, denominado comúnmente seguidor del punto de máxima potencia, que presenta al generador FV una carga apropiada tal que lo obliga a entregar una tensión y una corriente correspondientes a la potencia máxima. Además, debido a que la generación de un sistema FV es de CC se requiere de un convertidor CC/CA o inversor, para convertir esta CC a CA, y así acoplar el campo FV a la línea de CA. Por otro lado, dependiendo del nivel de tensión de barra de CA se requiere un transformador de acoplamiento. En la figura 1 también se muestra una barra de distribución, que es donde se desea acoplar el generador FV y la carga que esta colgada de esta barra. Evidentemente la línea graficada puede ser de baja tensión (380 V) o de media tensión (13,2 o 33 KV) y la carga son todos los usuarios que están detrás de esa barra.

El control, tanto de los convertidor CC/CC y CC/CA, requiere de variables que deben ser sensadas permanentemente de acuerdo a la variación que sufren las mismas. Como se observa en la Figura 1, las variables sensadas son la tensión y

corriente de red, la corriente y tensión del generador FV, la tensión a la salida del convertidor CC/CC y los valores de corriente a la salida del convertidor CC/CA. Estas variables son sensadas en forma instantánea y con la mayor frecuencia posible, considerando los retardos involucrados, a través de shunts, transformadores de corriente y transformadores de tensión, para adaptar estos valores a bajos niveles de tensión apropiados a los sistemas de control. Con los valores de tensión y corriente, a través de algoritmos de cálculos como pueden ser la teoría pq (Aredes et al., 1998), u otra similar, se obtienen los valores de potencia activa y reactiva, factor de potencia y las armónicas presentes a esas señales sensadas.

DESARROLLO DEL MODELO COMPLETO

Se realiza en primer lugar el modelado de cada uno de los bloques de la Figura 1, para ello se requiere conocer en detalle los componentes que forman parte de estos bloques en forma real. Como existen varias alternativas de configuraciones electrónicas para cada uno de los bloques, se hace un análisis previo para determinar que configuración es la más apropiada en función del objetivo propuesto. Se hará una breve descripción de los componentes básicos del modelo.

Modelo del Campo Fotovoltaico

La Figura 2 muestra un esquema simplificado de un generador FV con dispositivo de control de potencia. El modelo posee un diodo en paralelo con la fuente de corriente, que representa a la corriente de juntura p-n del semiconductor con que está formada la celda FV. La corriente de juntura es despreciable cuando hay radiación solar. En el modelo representado en este diodo se realiza con diodos en serie en función de la tensión de generador fotovoltaico. Evidentemente este bloque generador representa un arreglo o campo FV, constituido en una configuración serie – paralelo de módulos FV en función de la tensión y corriente requerida por la carga.

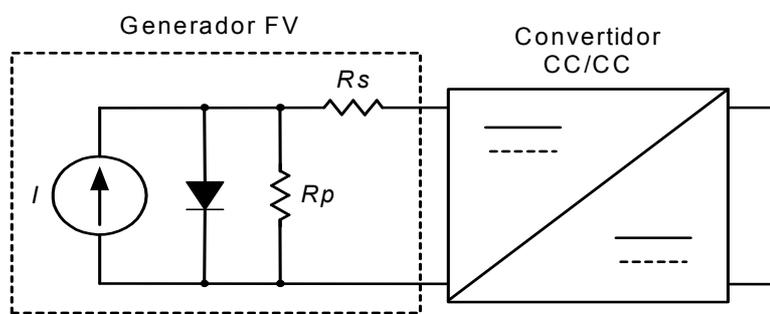


Figura 2: Modelo simplificado de un generador FV acoplado con un convertidor de CC/CC.

En realidad este modelo se comporta como una fuente híbrida de corriente y tensión, dependiendo de la zona de trabajo del módulo, tal es así que para bajas tensiones se comporta como una fuente de corriente casi pura, pero para altas tensiones se llega a comportar como una fuente de tensión. Para un óptimo aprovechamiento de la energía generada por el campo FV, su control debe intentar que el mismo entregue la máxima potencia posible, en función de la luz recibida y de otros parámetros ambientales. Para ello se le adosa al generador FV un convertidor CC/CC en sus bornes de modo que el campo FV vea siempre una impedancia apropiada para que entregue la máxima potencia. Este convertidor CC/CC actúa como un adaptador de impedancia y se denomina comúnmente seguidor del punto de máxima potencia. Para el caso propuesta el control debe mantener la tensión de salida de este convertidor en valores casi constantes, dentro de un cierto rango, independientemente de la potencia generada.

Una forma de mantener la tensión constante durante las 24 horas del día, es utilizar baterías que mantienen la tensión requerida en la salida del convertidor CC/CC. Esta solución implica un costo adicional de componentes, electrónica de control asociada, y mantenimiento de la batería, con las consecuentes pérdidas y falta de confiabilidad asociadas. Sin embargo no se descarta totalmente esta alternativa que para algunas aplicaciones es una solución posible, pero que no tomaremos en este trabajo.

Configuración del Convertidor CC/CC

Un convertidor CC/CC, consiste en un dispositivo electrónico que convierte una tensión de CC en otra tensión de CC de mayor o menor valor. Si no hay pérdidas internas en el convertidor, la corriente también se ve convertida en proporción inversa a la tensión. La proporción de conversión de tensión y corriente se denomina relación de conversión.

El control del convertidor CC/CC debe ser guiado por el valor de tensión constante a la salida del mismo y de la máxima potencia entregada por el generador FV. La potencia se debe comparar permanentemente para obtener el valor máximo, y se debe variar permanentemente la relación de conversión para adaptar la tensión que posee en los terminales del generador FV, de acuerdo al punto de máxima potencia, es decir el producto de una tensión y una corriente prefijada por esta potencia. Se admite circulación de corriente en un solo sentido, por ello este convertidor debe ser de un solo cuadrante.

Existen distintos tipos de convertidores, clasificados según la magnitud de la tensión de salida respecto de la de entrada. Así, los convertidores pueden ser: incrementales (Boost), decrementales (Buck) o decrementales-incrementales (Buck-Boost). En la presente aplicación se escoge un convertidor CC/CC de tipo incremental, para permitir elevar la tensión generada por el

campo FV. Este dispositivo permite operar al generador FV en su punto de potencia máxima, mediante el control de la impedancia que ve el generador FV como carga. Se utiliza la estructura de convertidor Boost mostrada en la Figura 3, cuya operación se basa en el control de la energía almacenada en un inductor. Para ello se conmuta una llave, típicamente un transistor bipolar de puerta aislada (IGBT), con una relación de conversión o ciclo de operación D , haciendo que la energía almacenada en el inductor sea utilizada en ciertos intervalos de tiempo en conjunto con la energía suministrada por el generador FV para elevar la tensión de un capacitor de salida, por arriba de la tensión de entrada. Como ya se mencionó el control debe sentir la tensión de entrada y la tensión de salida del convertidor.

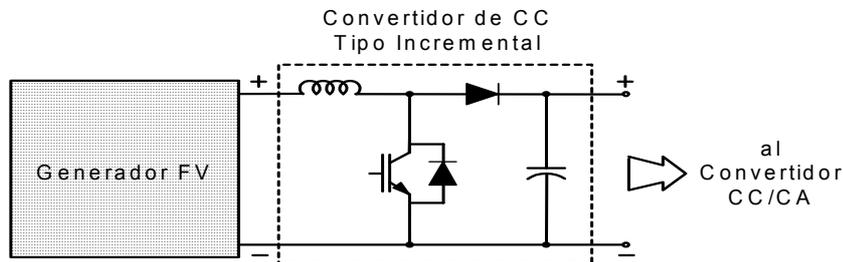


Figura 3: Modelo simplificado de un Convertidor de CC/CC tipo Incremental o Boost.

Configuración del Convertidor CC/CA

La Figura 4 muestra un esquema elemental de convertidor CC/CA fuente de tensión de 6 pulsos, basado en el control modulación de ancho de pulso (PWM). Este convertidor CC/CA está compuesto por seis llaves controladas, usualmente IGBTs y seis llaves no controladas en antiparalelo, diodos. Las llaves controladas se conmutan con alta frecuencia para generar un conjunto de tres tensiones sinusoidales de frecuencia fundamental en la salida. Normalmente se colocan filtros pasivos, banco de capacitores, a la salida del convertidor CC/CA, después del transformador de acoplamiento al sistema de CA, para reducir el contenido armónico de las ondas sinusoidales generadas. En la barra de CC del convertidor CC/CA se coloca un pequeño capacitor para mantener constante el nivel de tensión y permitir así el balance de potencia instantánea de entrada y salida del dispositivo electrónico.

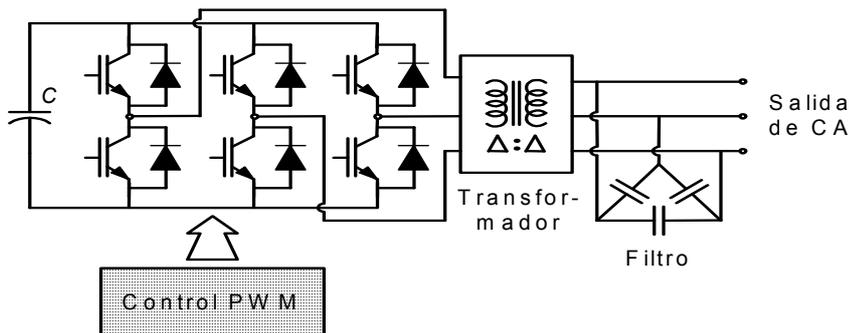


Figura 4: Modelo simplificado de un Convertidor de CC/CA con el control PWM, y transformador y filtro de acoplamiento.

El control del convertidor CC/CA dependerá fundamentalmente de la aplicación que se requiera, pero necesita como variables la tensión y corriente de la red, la tensión de entrada y la corriente de salida del conversor. Se pueden distinguir dos tipos básicos de controles: control de fase y control por Modulación de ancho de pulso (PWM). El control PWM permite variar en forma independiente la tensión y la frecuencia de la onda sinusoidal de salida. Por este motivo, se prefiere este modo de control para aplicaciones de media potencia, donde las pérdidas por conmutación se mantienen dentro de valores aceptables.

Modelo completo

Además de los modelos del campo FV, los convertidores CC/CC y CC/CA, se realizan los modelos individuales del transformador y filtro de acoplamiento, la línea eléctrica, la carga, los circuitos de disparo y las señales de realimentación y de referencia utilizadas para el control de disparo y todos los elementos del control necesarios, que aquí no se incluyen por razones de espacio. En base a cada uno de los modelos realiza el modelo completo que se muestra en la Figura 5.

Estrategia de Control

Es posible a través de un apropiado control sobre el convertidor CC/CC y el convertidor CC/CA, producir una variación en la potencia activa, como en la potencia reactiva. También se puede lograr, a través del control del PWM, generar una señal de CA que contengan los armónicos opuestos a lo que existen en la red de CA, de modo de contrarrestarlos y así anularlos. A partir de este control es posible generar potencia activa, potencia reactiva de modo de mejorar el factor de potencia de la red y además compensar los armónicos y desbalances existentes en la señal alterna que circula por la red. También es posible compensar niveles de tensión en líneas muy extensas y con cargas débiles y muy desbalanceadas como sucede en muchas

partes de San Juan y de Argentina. Cabe acotar que esta configuración inyecta corriente a la red, aunque también se produzca compensación de tensión. Esta compensación disminuirá pérdidas en la línea y mejorará considerablemente la calidad de energía que recibe la carga, ya que los armónicos provocan grandes perturbaciones en algunos tipos de cargas muy sensibles, produciendo mal funcionamiento de algunos artefactos y molestias desagradables en los usuarios.

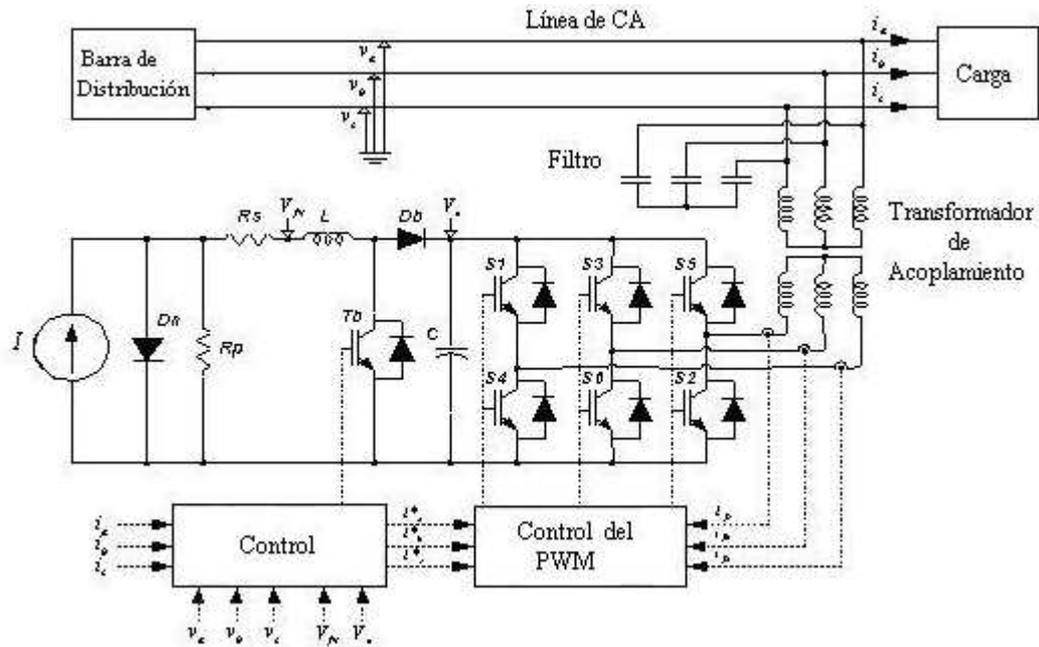


Figura 5: Modelo simplificado de un Generador Fotovoltaico acoplado a la red.

De modo que la posibilidad no solo de generar potencia activa, sino también de generar potencia reactiva, mejorar el factor de potencia, eliminar armónicos, compensar desbalances de tensión y corriente y compensar niveles de tensión, es posible seleccionando una apropiada estrategia de control. Existen equipamientos para realizar solamente compensaciones de perturbaciones de la red que son muy costosos y en algunos casos son imprescindibles en algunas redes de distribución. En la presente propuesta no se requieren estos equipamientos produciendo también un ahorro en equipo.

El flujo de potencia activa y reactiva por cada fase que suministra el generador fotovoltaico en el punto de conexión a la red se expresa a través de las Ecuaciones 1 y 2 respectivamente.

$$P = \frac{V_{ac} \cdot V_{inv}}{X} \sin \alpha \quad (1)$$

$$Q = \frac{V_{ac}}{X} (V_{inv} \cdot \cos \alpha - V_{ac}) \quad (2)$$

Donde: V_{ac} es la tensión eficaz en la barra de conexión, $X = \omega L$ es la impedancia equivalente del transformador de acoplamiento, α es el desplazamiento de fase entre la tensión generada por el convertidor CC/CA, cuyo valor eficaz es V_{inv} , y la tensión en la barra de conexión V_{ac}

A partir de estas ecuaciones puede observarse que el intercambio de potencia reactiva entre el convertidor CC/CA y el sistema de CA puede controlarse fundamentalmente por medio de la variación de la tensión trifásica de salida V_{inv} . En forma similar, el intercambio de potencia activa entre el convertidor CC/CA y el sistema de CA puede controlarse básicamente por medio de la variación del desplazamiento de fase α . La tensión de salida del convertidor CC/CA, del lado del primario del transformador de acoplamiento, se relaciona con la tensión en el capacitor a través de la Ecuación 3.

$$V_{inv} = k_a V_c \quad (3)$$

Donde V_c es la tensión media en el capacitor, y k_a es una constante que depende de la relación de transformación del transformador de acoplamiento y del número de pulsos del convertidor.

El balance de potencia entre los lados de CA y CC, despreciando pérdidas, está dada por la Ecuación 4.

$$P = 3 \frac{V_{ac} V_{inv}}{X} \sin \alpha = V_c I_c = C V_c \frac{dV_c}{dt} \quad (4)$$

Donde I_c es la corriente media en el capacitor.

Así mismo, la tensión en el capacitor se relaciona con la tensión en terminales del generador FV, a través de la Ecuación 5 que rige la operación del convertidor de CC tipo incremental.

$$V_{fv} = V_c(1-D) \quad (5)$$

Donde V_{fv} es la tensión del generador, y $D=Ton/Ts$ es la relación de operación, siendo Ton el tiempo de conducción del IGBT y Ts el período de conmutación.

A partir de las Ecuaciones 1 a 5 se implementa en el modelo, utilizando para ello Simulink/Matlab. Como observamos en la Figura 5 las variables del control que se introducen a los bloques de control están relacionadas según las ecuaciones mencionadas y utilizando un algoritmo apropiado.

Se comprueba el adecuado funcionamiento del modelo propuesto de la Figura 5 a través de simulación dinámica utilizando un sencillo sistema de prueba compuesto por una barra de distribución (10kVA/380V), una línea de 10km modelada con parámetros concentrados y una carga RL (1000W/200var). El convertor CC/CA (1.5kVA/380V) se conecta a la red a través de un transformador elevador de tensión (1.5kVA, 400/380V). La modulación PWM exige la utilización de filtros en la salida del transformador, utilizando para ello un banco de capacitores (100µF/380V). En la barra de CC del inversor se coloca un capacitor (33µF/400V), el cual trabaja en un nivel medio de 400V, mientras que el arreglo de celdas FV opera con un nivel medio de tensión de 48V.

RESULTADOS OBTENIDOS

En la simulación dinámica se representan varios estados de operación del sistema. Los primeros resultados pueden verse en las Figuras 6 a 10. Entre 0 y 0.1s el sistema de CA se encuentra en su estado natural sin filtro ni compensación. En estado estacionario del sistema eléctrico de CA, el $\cos \phi$ en la barra de distribución es de 0.86 (Figura 6) y se suministran aproximadamente 970W y 560var a la carga como puede observarse en la Figura 7. A los 0.1s se activa el efecto compensador pero sin inyección de potencia activa. La compensación de reactivo producida es de aproximadamente 200var, lo cual permite elevar el $\cos \phi$ a 0.94 y elevar levemente el nivel de tensión. A partir de los 0.2s el campo FV inyecta potencia activa al sistema eléctrico de CA (Figura 8). Esto produce la disminución del $\cos \phi$ a 0.78 en la barra de distribución, como consecuencia de la disminución en aproximadamente un 60% del valor inicial de la potencia activa entregada por el sistema de CA (Figura 7). Además se produce una notable disminución de la corriente provista por el sistema de CA (ver Figura 9) y una leve disminución de su nivel de tensión. A los 0.3s se compensa el $\cos \phi$ llevándolo a 1 mediante la compensación de reactivo (400VA adicionales). Esto permite disminuir la corriente entregada por el sistema de CA (Figura 9), y además, se observa un aumento considerable en el nivel de tensión en la barra de distribución (Figura 10).

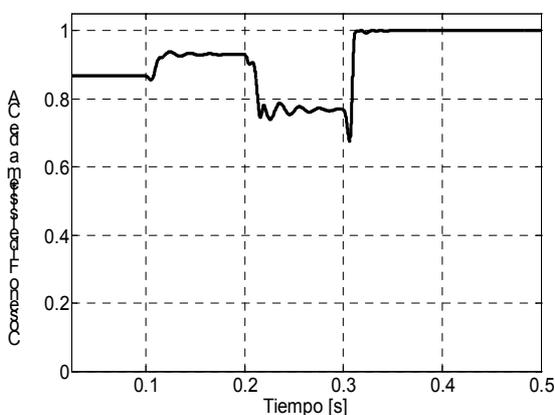


Figura 6: Variación del $\cos \phi$ del sistema de CA

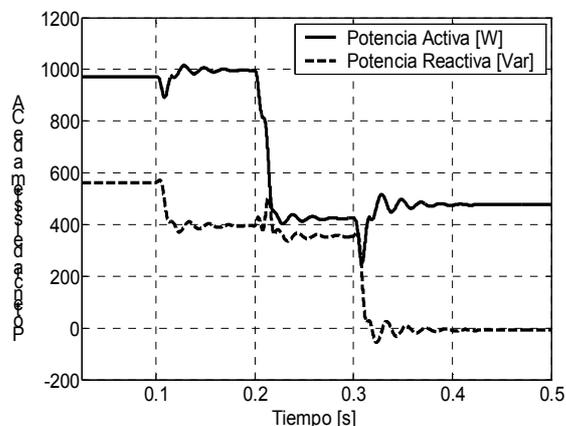


Figura 7: Potencia del sistema eléctrico de CA

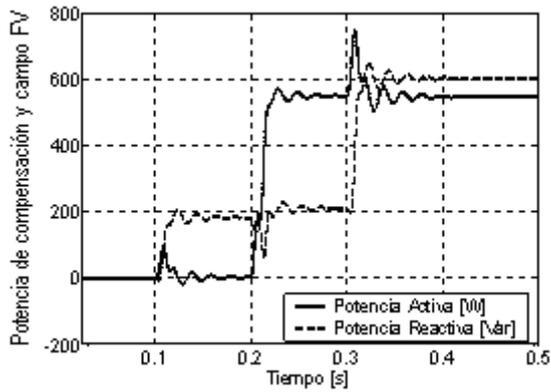


Figura 8: Potencia activa y reactiva aportada

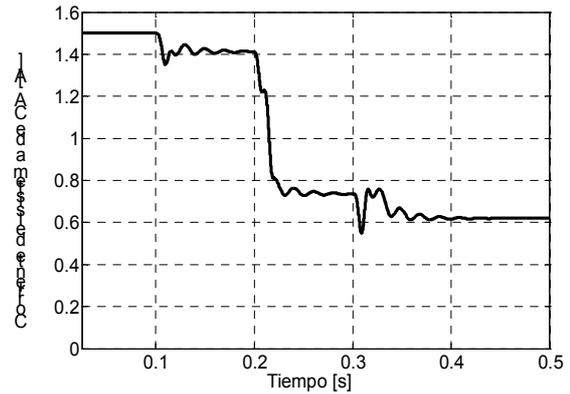


Figura 9: Corriente del sistema eléctrico de CA

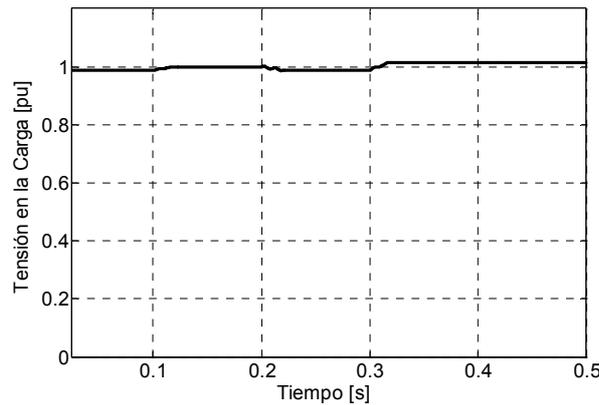


Figura 10: Tensión del sistema eléctrico de CA

En la Figura 11 se muestra la señal de corriente trifásica que circula por la red eléctrica. Como se observa es una señal perturbada que posee armónicos. En la Figura 12 se observa una comparación entre una señal de corriente de fase de red original sin corregir, y la señal corregida, incluyendo además la señal correctora que introduce el convertidor CC/CA por efecto del control de la señal moduladora del PWM que gobierna los disparos de los IGBT de este convertidor. Se observa que la señal corregida es prácticamente senoidal, lográndose eliminar casi la totalidad del contenido armónico en la red.

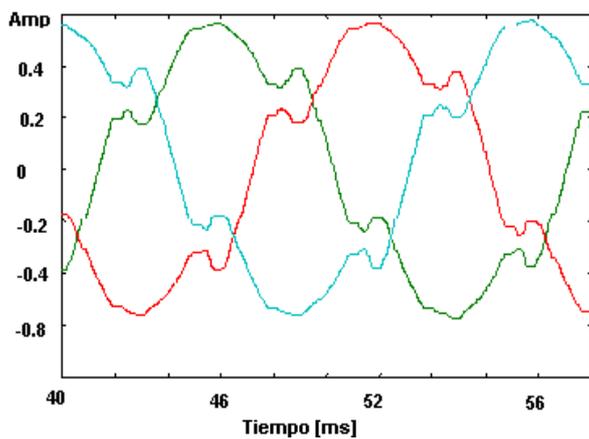


Figura 11: Señal eléctrica perturbada de la red

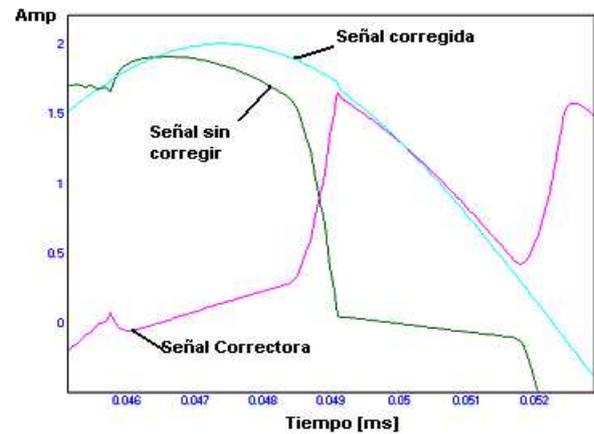


Figura 12: Comparación de las corrientes de red

Esta reducción de armónicos se puede observar con más detalle en la Figura 13, donde se muestra un aumento en magnitud de la armónica fundamental, senoidal aportada por el campo FV, y una reducción en las armónicas superiores, que provocan las perturbaciones en la corriente. La demora en la respuesta se debe a los tiempos de simulación y al hecho de partir de un valor cero de corriente. La Figura 14 muestra los espectros en frecuencia de los armónicos de corriente de red sin corregir y de la señal de corriente que inyecta el convertidor CC/CA a la red. El hecho de que se muestren desfasadas en frecuencia sólo es una forma de graficación que utiliza el MATLAB, y que los valores sean negativos en magnitud representa que los armónicos inyectados por el convertidor CC/CA son en magnitud igual pero opuestos a los existentes en la red, de modo de anular su efecto. La única excepción es de la primera armónica de la señal inyectada, que se representa con magnitud negativa pero este valor se suma a la fundamental de la red y corresponde al aporte de potencia activa de la generación FV.

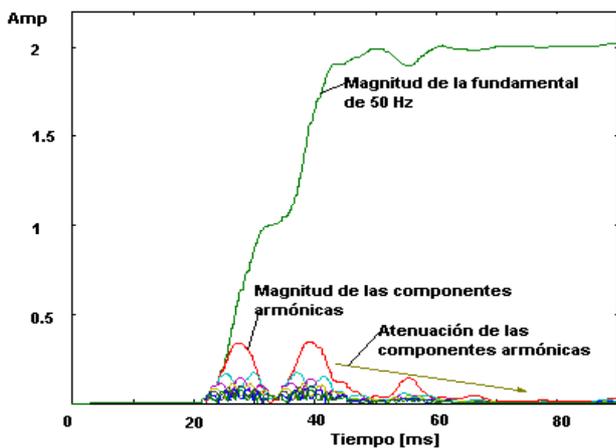


Figura 13: Atenuación de armónicas superiores al fundamental.

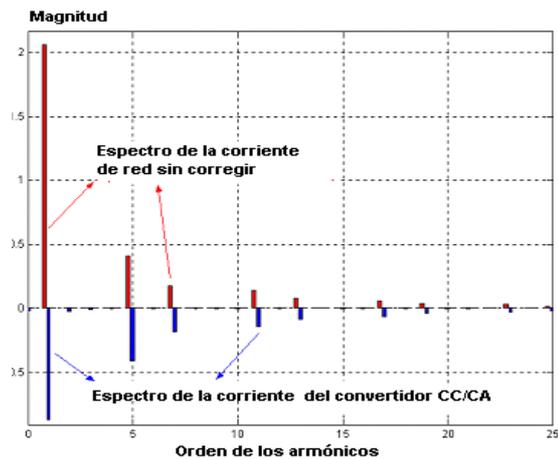


Figura 14: Espectro de las señales de red e inyectadas.

CONCLUSIONES

Se amplía el campo de aplicación de la tecnología FV y se reduce los costos de inversión frente a los beneficios económicos que brinda. La tecnología FV implica una disminución de la contaminación ambiental, con un potencial energético inagotable. Con un adecuado control sobre los disparos de los IGBT del convertidor CC/CA, es posible mejorar el factor de potencia, el nivel de tensión sobre la carga y filtrar armónicos, permitiendo realizar una eliminación selectiva de armónicos, con una reducción de las pérdidas eléctricas en la línea y el mejoramiento del nivel de calidad de servicio. La generación FV puede ser combinado también con otras fuentes de generación eléctrica como son eólica y/o diesel, constituyendo sistemas mixtos. Utilizando el mismo convertidor CC/CA se aporta mayor potencia activa a la red. Además es posible también incluir almacenamiento de energía eléctrica a este sistema, aportando otras ventajas de compensación de red como el de control de frecuencia y anular micro-cortes entre otros. El almacenamiento puede ser con baterías o con nuevas tecnologías de sistemas de almacenamiento, como son: sistemas de almacenamiento magnético con superconductores (SMES), súper capacitores (SC), masas rotantes (flywheels) y baterías de flujo. Solo es necesario adaptar la estrategia de control. No existen limitaciones técnicas potencias mayores a la considerada y el campo de aplicaciones que abre esta propuesta en un futuro mediato es inmenso.

REFERENCIAS

- Iriarte Aldana C. A. (2000). Considerações sobre o Acoplamiento de um Sistema FV a una Fonte CA. Grau de Maestre em Ciencia (M.Sc.) em Engenharia Elétrica. COPPE/UF RJ. Rio de Janeiro – Brasil.
- Kasa N., Iida T. and Iwarnoto H. (2000). Maximum Power Point Tracking with Capacitor Identifier for Photovoltaic Power System. IEE Proceedings -Electric Power Application, Vol.147, No.6, pp.497-502, 2000.
- Aredes M., Heumann K., Watanabe E. (1998). An Universal Active Power Line Conditioner. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 13, No. 2, April.
- Hingorani N. G. (1988). Power Electronics in Electric Utilities: Role of Power Electronics in Future Power Systems. Proceedings of the IEEE.
- Molina M. G. y Mercado P. E. (2004). Controlling a Static Synchronous Compensator with Super-conducting Magnetic Energy Storage for Applications on Primary Frequency Control, Latin American Applied Research International Journal, Vol. 34, No. 2, pp. 119-126, Apr.
- Acha E., Agelidis V., Anaya-Lara O., and Miller T. (2002). Power Electronic Control in Electrical System, 1st Ed. United Kingdom: Newness.
- Simulink 5: User's guide (2002), The MathWorks Inc., Natick, MA, Updated.

ABSTRACT

A dynamic simulation model of optimized photovoltaic generator coupled to the electric grid is presented, which allows injecting electric power by taking advantage of its maximum capacity of providing energy, and also compensating unwanted disturbances in the electric system. It is developed a detailed model of all the components and the control algorithm that compose the proposed system. In addition, the full model is simulated taking into consideration specific generation and compensation criteria aiming at predicting its operation and observing the variation of its characteristic parameters. Dynamic simulation results show the satisfactory behaviour of the presented proposal. The effects of the electric contribution and the compensation of the current disturbances in the network are also shown. The conclusions of the proposal bring new possibilities of photovoltaic use that contribute to the delivering of active power, to the reduction of the electric losses and the improvement of the power quality.

Keywords: Dynamic modeling, photovoltaic generation, grid connection, network compensation.