

## **ASPECTOS SOBRE OPERACIÓN Y NORMATIVAS DE INVERSORES FOTOVOLTAICOS PARA INYECCIÓN A RED DE BAJA TENSIÓN**

**H. Socolovsky , D. Raggio , J. Fernandez Vazquez, O. Romanelli**

Departamento Energía Solar (DES) Centro Atómico Constituyentes (CAC) Comisión Nacional de  
Energía Atómica (CNEA) Av. General Paz 1499 - (1650) San Martín – Argentina  
Universidad Nacional de General San Martín (UNSAM), Av 25 de Mayo 1169, San Martín –  
Argentina. Tel. (011) 6772-7619, e-mail: [socolovs@tandar.cnea.gov.ar](mailto:socolovs@tandar.cnea.gov.ar)

*Recibido 09/09/16, aceptado 07/10/16*

**RESUMEN:** Se presenta en este trabajo un análisis sobre el funcionamiento y algunas consideraciones de operación de un inversor fotovoltaico para inyección de energía a la red de baja tensión. Más precisamente se estudian los inversores monofásicos sin transformador de aislamiento a la salida, los más utilizados en instalaciones de hasta 5kW. Así mismo se muestra un resumen de las diferentes normativas internacionales que deben satisfacer en torno a seguridad eléctrica, y conexión a red.

**Palabras clave:** conexión a red, inversor fotovoltaico, generación distribuida

### **INTRODUCCIÓN**

El proyecto IRESUD dio el primer paso hacia la introducción de los sistemas fotovoltaicos conectados a la red eléctrica, en el marco de la generación distribuida, dentro del país. A partir de él se comenzó a trabajar en las reglamentaciones, normativas y proyectos de ley que hacen posible, desde el punto de vista legal y técnico que un usuario pueda conectar a la red una fuente de generación distribuida a partir de un recurso renovable. Las 50 instalaciones piloto ejecutadas en el marco del proyecto IRESUD, en 16 provincias a lo largo del país, sirvieron como plataforma de aprendizaje desde el punto de vista exclusivamente técnico de este tipo de tecnologías y formó además los primeros recursos humanos capacitados en estos sistemas en el país.

Un sistema fotovoltaico conectado a red consta básicamente de dos segmentos: los módulos fotovoltaicos que conforman el arreglo o sistema FV propiamente dicho y el inversor de tensión que inyecta energía en la red de distribución a partir de la generada por los paneles solares. El objeto de estudio del presente trabajo, es el inversor FV para conexión a red e intenta aclarar algunos aspectos técnicos relacionados con su funcionamiento y seguridad. Entre los requerimientos más importantes que debe satisfacer un inversor FV para conexión a red se destacan en orden de importancia, los de seguridad eléctrica y detección de funcionamiento en isla, detección de condiciones anormales de la red con su consecuente salida de servicio, los concernientes a la calidad de energía eléctrica inyectada a la red y por último la eficiencia de conversión de energía.

Los inversores para inyección de energía eléctrica en la red de baja tensión más utilizados actualmente a nivel global son aquellos que no disponen de transformador de aislamiento a la salida, dado que son más económicos, más eficientes, menos voluminosos y más livianos que sus pares con transformador. Sin embargo, un inversor FV para conexión a red de estas características debe satisfacer una serie de requerimientos “equivalentes” desde el punto de vista de la seguridad durante operación al que ofrece la separación galvanica. El móvil principal de este trabajo es aclarar aspectos de funcionamiento de los inversores principalmente en lo concerniente a este punto.

## ESTRUCTURA Y FUNCIONAMIENTO DE UN INVERSOR PARA CONEXIÓN A RED

La función de un inversor para conexión a red es convertir la potencia de corriente continua (CC) disponible en el sistema FV en potencia de corriente alterna (CA) compatible con la red de 220V. Desde un punto de vista más práctico y para que la conexión entre la red de baja tensión y el inversor fotovoltaico sea compatible (la red de distribución se comporta como una fuente de tensión) éste último debe comportarse como una fuente de corriente alterna cuya fase esté enganchada con la fase de la tensión de red y cuya magnitud esté modulada por la potencia disponible en el sistema FV. Un diagrama en bloques de un inversor FV típico sin transformador se muestra en la figura 1, en la cual se aprecian tres etapas de potencia:

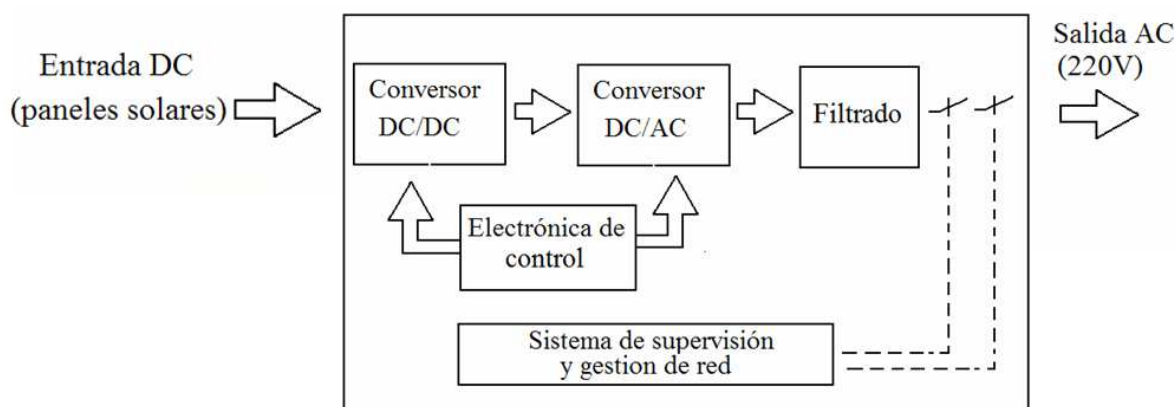


Figura 1: Diagrama en bloques de un inversor FV para conexión a red

La primer etapa es un convertor de tensión continua DC/DC cuya función es garantizar el nivel mínimo de tensión de operación requerido por el convertor DC/AC (para el caso de una red de 220Vac es de aproximadamente 400VDC). La segunda etapa, es el corazón del inversor propiamente dicho, y se encarga de generar la señal alterna y regular la inyección de corriente AC a la red. En consecuencia, esta etapa se encarga además de obtener la máxima potencia del sistema FV. Por último, una etapa de filtrado se encarga de remover todas las componentes de alta frecuencia debidos a la conmutación de los transistores durante la modulación de ancho de pulso (PWM).

El diagrama se completa con la electrónica de control asociada a ambos convertidores y un sistema redundado de supervisión y gestión de red que se encarga de desconectar los paneles de la red en caso de detección de funcionamiento anormal del equipo o de la red. Dicho sistema, denominado circuito de desconexión automática (ENS) es el pilar fundamental en lo que a seguridad eléctrica se refiere, desde el punto de vista de operación del inversor.

Un circuito eléctrico típico de un inversor monofásico sin transformador es el que se muestra en la figura 2. El convertor DC/DC de la primera etapa suele ser en muchos casos un convertor del tipo *boost* que eleva la tensión del campo de paneles en caso de ser insuficiente para alimentar la segunda etapa. La segunda etapa, el convertor DC/AC, está compuesta generalmente por un puente de transistores (IGBTs o MOSFETs) y su función es la sintetizar y controlar una corriente alterna senoidal de la misma frecuencia que la tensión de red pero desfasada 180°. A la salida del puente se coloca un filtro pasabajos, como por ejemplo un filtro LCL de 2do orden, que remueve las componentes de alta frecuencia no deseadas. En la misma figura se muestra el filtro de compatibilidad electromagnética a la salida junto con dos relays en serie que forman parte del dispositivo de desconexión automática (IEC62109-2, 2011)

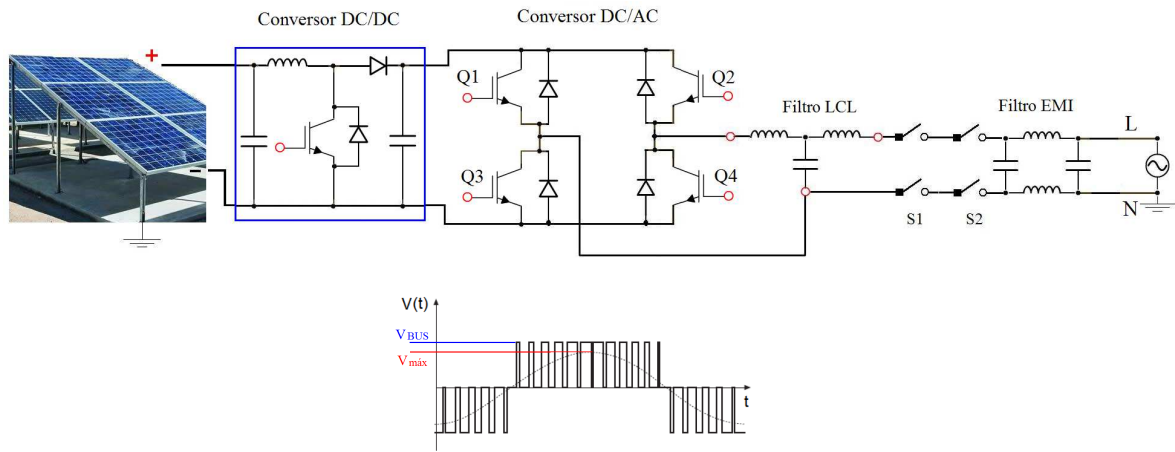


Figura 2: Circuito eléctrico típico de un inversor FV monofásico sin transformador a la salida y síntesis de una onda senoidal mediante PWM. La tensión de Bus del puente debe estar por encima del valor pico de tensión de red.

### CONDICIONES DE OPERACION DE INVERSORES FV PARA CONEXIÓN A RED

Un sistema FV para conexión a red que no tiene transformador de aislación galvanica debe tener sus entradas de tensión continua flotadas, es decir sin que el terminal positivo o negativo del campo de paneles este conectado a tierra. Por otro lado, previo a entrar en servicio, el inversor debe verificar la aislación eléctrica entre los terminales positivo y negativo del sistema FV y tierra y en base a un valor de resistencia límite decidir si entra o no en servicio. Dicha resistencia límite, es según el estándar IEC62109-2 de  $33k\Omega$  para sistemas FV de hasta 1000VDC ( $R_{\min} = V_{\max}/30mA$ ). Este procedimiento se vera justificado a continuación, cuando realicemos un análisis en base al funcionamiento del equipo.

En operación, cuando un inversor FV se encuentra inyectando energía a la red, los transistores del puente funcionan de a pares para la generación de cada semiciclo de la señal senoidal. Tecnológicamente hablando, uno de los dos transistores activos permanece conduciendo durante los 10ms que dura el semiciclo (para simplificar nuestro análisis supondremos a Q1 de la figura 3 en cortocircuito) mientras que el otro (Q4, línea roja punteada de la misma figura) es el que se encarga de la modulación por ancho de pulso (PWM) en si mismo. Si consideramos que el neutro del servicio eléctrico esta conectado a tierra y despreciamos la caída de tensión en las inductancias de los filtros a 50Hz, la salida positiva del conversor *boost* queda a potencial de tierra durante estos 10ms. Como consecuencia de esto, el terminal negativo de dicha etapa (que es común con el borne negativo del campo FV) queda a  $-V_{BUS}$  (en nuestro caso  $-400V$ ) de potencial para nuestro ejemplo. Cuando se encuentran activos los otros transistores (Q2 y Q3), en la generación del semiciclo siguiente, es la tensión de línea la que impone el potencial sobre la salida del boost con respecto a tierra, por lo que el terminal negativo sigue la forma de onda de la tensión de línea aunque desplazado  $-400V$  para nuestro ejemplo. De este análisis se desprende que los potenciales de los terminales positivo y negativo del sistema de paneles FV siguen la forma de onda mostrada en la figura 4.

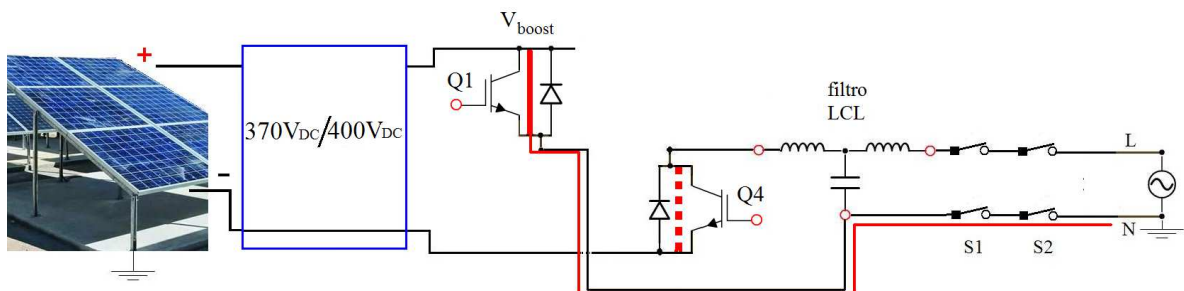


Figura 3: funcionamiento del puente de transistores IGBTs durante la generación de un semiciclo de la corriente inyectada.

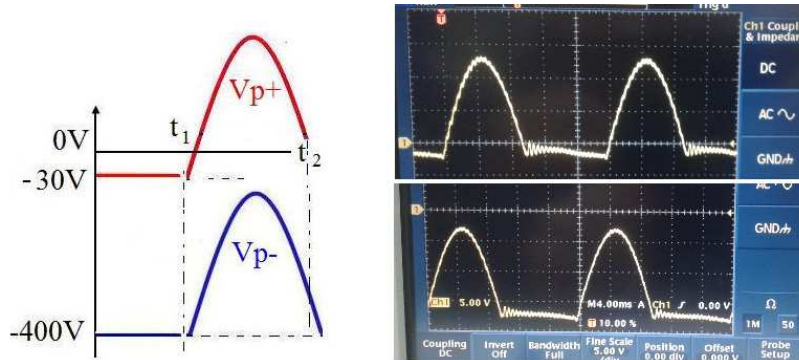


Figura 4: Potenciales eléctricos que aparecen en los terminales positivo(rojo) y negativo (azul) de un sistema FV durante operación con respecto a tierra. En la imagen de osciloscopio se muestran las formas de onda para un sistema FV de 370VDC

Es precisamente por este motivo que ninguno de los terminales del sistema FV puede ser conectado a tierra en inversores sin transformador. Como se aprecia, de la figura 4 se desprende que: a) ambos polos del campo FV sustentan potenciales de magnitudes importantes con respecto a tierra y b) dichos potenciales tienen carácter DC y AC. Por este motivo, una pérdida en la aislación de algún módulo FV con respecto a tierra (es decir con respecto al marco del paneles o la estructura metálica soporte) conlleva a corrientes de fuga o diferenciales que también tienen componentes AC y DC (figura 5). Como se vera en las próximas secciones, un inversor FV para conexión a red trae incorporado un interruptor de corte por corriente residual que mide ambas componentes.

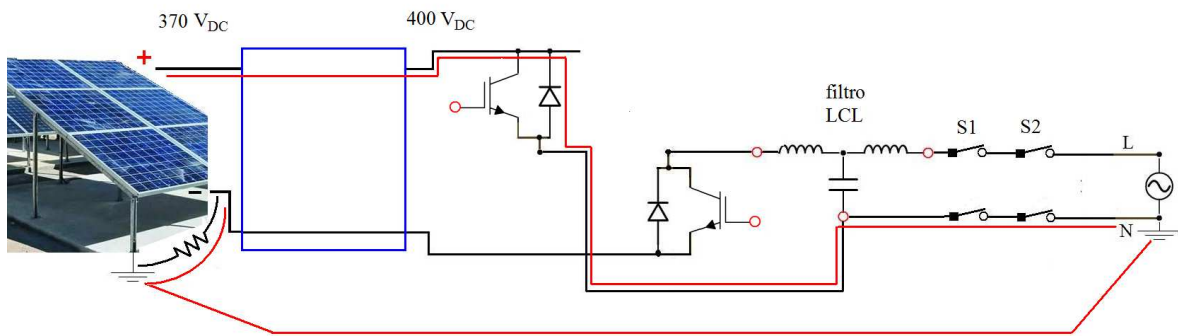


Figura 5: La pérdida de resistencia de aislamiento en el sistema FV ocasiona corrientes de fuga de carácter DC y AC. En el ejemplo se muestra el caso en que se pierde aislación entre el terminal negativo del sistema FV y el marco/estructura metálica de la instalación.

Otro efecto que trae asociado corrientes de fuga a tierra es que un módulo FV sustenta cierta capacidad parasita entre sus partes activas (celdas solares) y el marco del módulo, dado que las celdas están aisladas con vidrios o materiales dieléctricos (figura 6). Dicha capacidad parasita aumenta considerablemente si los módulos FV de un sistema están mojados o húmedos y dado que en servicio los terminales positivo y negativo del sistema FV tienen aplicado el potencial de la figura 4 con respecto a tierra pueden producirse corrientes de dispersión de índole capacitiva. Estas corrientes además pueden tener componentes de mayor frecuencia debido a que la forma de onda de la figura 4 es una señal poliarmónica y la reactancia de la capacidad disminuye para las componentes de mayor orden. Cabe aclarar que este efecto es inevitable en este tipo de sistemas y sin que esto signifique un defecto o una falla, puede ocurrir que el sistema se desconecte si hay un interruptor diferencial externo inadecuadamente dimensionado.

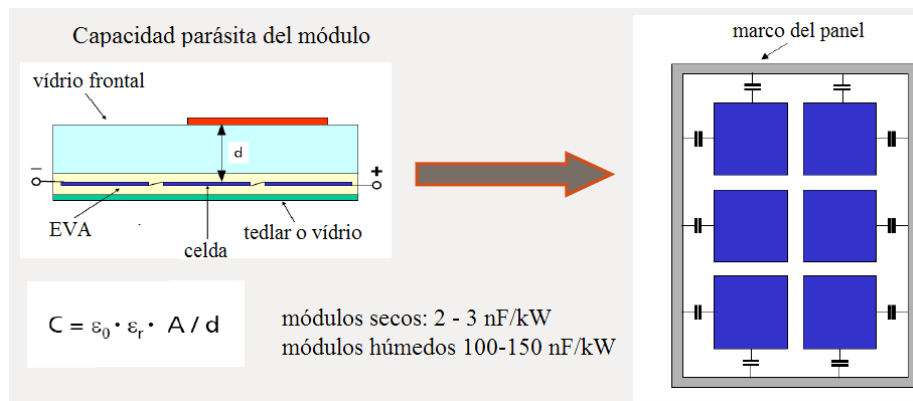


Figura 6: Capacidades parásitas de un módulo FV con respecto al marco del panel. Dichas capacidades aumentan considerablemente si los módulos FV están húmedos.

Es importante mencionar que superponiendo estos dos efectos de corrientes de fuga a tierra (pérdida de aislamiento y capacidad parásita) se pueda exceder la corriente de un interruptor diferencial externo de 30mA (dicho interruptor debiera ser sensible a corrientes AC y DC correspondiendo por ejemplo a uno de clase B) dado que en los estándares de inversores FV, como la IEC 62109-2 o VDE0126-1-1 (2006) se admiten corrientes residuales estáticas de hasta 300mA rms.

Por otro lado, es sabido que el límite admisible de corriente residual para un contacto accidental con alguna parte activa del sistema es de 30mA. Para poder discriminar esta situación con respecto a las corrientes de fuga mencionadas recientemente, el inversor FV tiene una unidad denominada RCMU (unidad de monitoreo de corriente residual) que monitorea permanentemente el valor eficaz de esta corriente y si advierte un cambio abrupto de más de 30mA saca de servicio al inversor desconectando el sistema FV de la red eléctrica. En la figura 7 se ilustra esta situación y por norma, el valor máximo para  $I_F$  es de 300mA mientras que el máximo admitido para  $\Delta I_N$  es de 30mA.

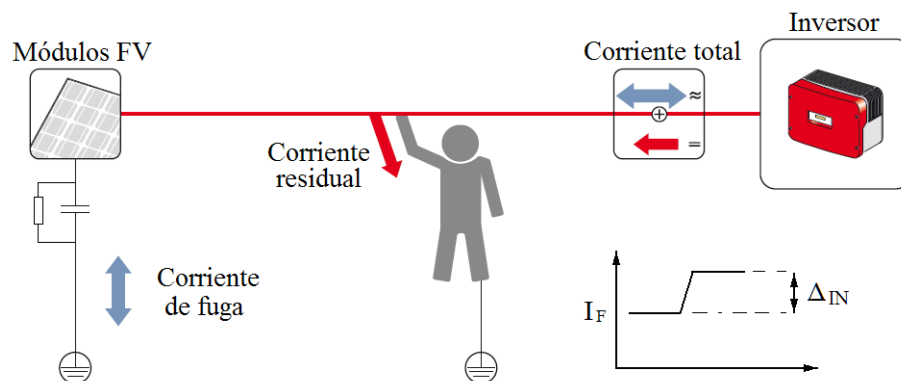


Figura 7: Detección de cambio abrupto de la corriente total de fuga por parte del RCMU del inversor FV (IEC 62109-2, VDE0126-1-1)

## SISTEMA DE MONITOREO PERMANENTE Y DESCONEXION AUTOMATICA (RCMU Y ENS)

En la figura 8 se muestra la arquitectura del sistema de control y monitoreo de red que trae incorporado un inversor FV para conexión a red. El mismo esta redundando mediante dos controles independientes que accionan cada uno un relay de dos polos los cuales seccionan tanto a la línea como



al neutro del servicio (SW1 y SW2 en la figura 8). Este sistema de desconexión automática tiene el objeto de desconectar al sistema FV de la red en caso de detección de alguna condición anormal de funcionamiento o en situaciones donde los valores de tensión y frecuencia de red estén fuera de rango. Los valores de tensión y frecuencia admitidos cambian según el código de red de cada país en particular, ejemplos de ello son la norma AS4777.3 (2005) para el caso de Australia, VDE0126-1-1(2006) en Alemania, RD1669 (2011) en España, DK5940 en Reino Unido, IEEE1547 en EE.UU., etc.

Como se menciona al comienzo, los inversores traen incorporados un subsistema que mide la resistencia de aislación entre el campo FV y tierra a fin de corroborar que la resistencia de aislación esté por encima del valor mínimo establecido en IEC62109-2. Una vez que se verifica este punto el inversor mide durante un tiempo prudencial que los valores de tensión y frecuencia de la red permanezcan estables y dentro de los valores admitidos por el código de red local. Finalmente si las verificaciones son exitosas, el inversor comienza a inyectar energía a la red.

Mientras se encuentra en operación el inversor no es posible realizar la medición de aislación del sistema de paneles, por este motivo la unidad de monitoreo de corrientes residuales (RCMU) se encarga de monitorear permanentemente los valores de corriente diferencial existentes entre línea y neutro de modo tal que si encuentra alguna de las siguientes dos situaciones desconecta al sistema FV de la red mediante los relays: a) si supera el valor máximo permitido de corriente residual que es de 300mA. b) si detecta un salto de mas de 30mA ( $\Delta I_n$ ) en la corriente residual.

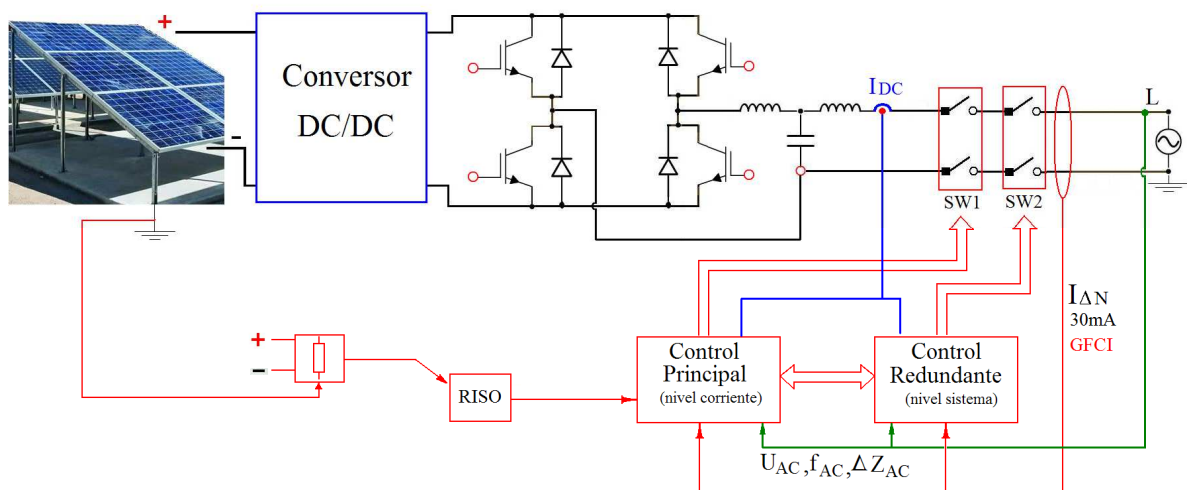


Figura 8: Sistema de supervisión y control de red que desconecta al sistema FV en caso de detección de funcionamiento en condiciones anormales.

Otro aspecto vital que deben satisfacer los inversores para conexión a red es la capacidad de detectar el funcionamiento en isla. En la actualidad existen diferentes métodos y técnicas de detección de funcionamiento en isla, algunos de ellos son métodos activos que introducen mínimas perturbaciones que en caso de ausencia de la red correrían alguna de las variables fuera de rango (tensión o frecuencia) y el equipo saldría fuera de servicio. Los ensayos que deben superar los inversores en torno a este punto son bastante rigurosos y presuponen condiciones de carga local muy particulares como lo establecen por ejemplo las normas IEC62116 (2014), VDE0126-1-1 y el estándar americano G83-2 (2012) entre otras. La figura 9 muestra el esquema de ensayo establecido por estos estándares, en los cuales se coloca un circuito oscilante como carga local. Las condiciones a cumplir exigen que la generación de potencia activa del inversor sea consumida por una carga resistiva y que además haya conectado un circuito resonante LC paralelo sintonizado a la frecuencia de la red (i.e. 50Hz) cuyo valor de potencia reactiva de cada elemento sea del orden de la potencia activa puesta en juego (por ejemplo para el caso de la IEC62116 se pide un circuito RLC con  $Q=1$ ). Bajo estas circunstancias, al desconectar la red del circuito el inversor debe dejar de inyectar energía en un tiempo establecido (que

varía desde 0,5segundos a 5 segundos según la norma utilizada para el ensayo. D. Raggio, et. al, (2015))

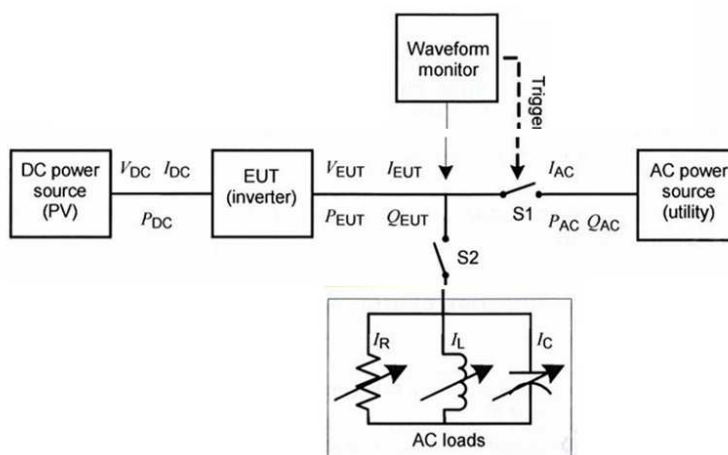


Figura 9: Esquema de ensayo anti-islanding según IEC62119. El tanque LC se sintoniza a la frecuencia de red y la potencia entregada por el inversor se iguala a la consumida por la resistencia local, simulando de este modo la peor condición para la detección.

Por ultimo, el sistema de control y gestión de red monitorea que la magnitud de la corriente continua inyectada no supere los umbrales establecidos por los códigos de red. A modo de ejemplo, para el caso de la norma Alemana VDE0126-1-1 o la española RD1699-2011, este valor máximo de  $I_{DC}$  es de 0,5% del valor de corriente AC cuando el inversor funciona a potencia nominal.

## CONCLUSIONES

La unidad de monitoreo de corrientes residuales y el dispositivo de desconexión automática que traen incorporados los inversores FV para conexión a red sin transformador de separación, han marcado un hito en lo que a seguridad eléctrica respecta para estos sistemas. Es así que en la actualidad dentro el mercado global se han impuesto como los más convenientes dado que son más económicos, eficientes y cumplen con medios de seguridad equivalentes a los que trae una separación galvanica. Por ultimo, las técnicas y métodos de detección de funcionamiento en isla de los inversores FV para conexión a red que existen en la actualidad han demostrado ser muy robustos frente a los exigentes ensayos basados en circuitos sintonizados.

**Keywords:** distributed generation, PV inverter, grid tie inverter, grid interactive inverter

## REFERENCIAS

- IEC 62109-2 (2011). "Safety of power converters for use in photovoltaic power systems – part 2: particular requirements for inverters".
- IEC 62116 (2014). "Utility-interconnected photovoltaic inverters - Test procedure of islanding prevention measures".
- IEEE 1547 "Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems".
- G83-2 (2012). "Recommendations for the Connection of Type Tested Small-Scale Embedded Generators (Up to 16A per phase) in Parallel with Low Voltage Distribution Systems".

Raggio D., Socolovsky H., Fernández Vázquez J., Romanelli O.. “Ensayo de Inversores Fotovoltaicos”, Avances en Energías Renovables y Medioambiente Vol. 3, pp. 04.215-04.222, 2015.

RD1669 (2011) “Conexión a red de instalaciones de producción eléctrica de pequeña potencia”.

VDE 0126-1-1(2006). “Automatic disconnection device between a generator and the public low voltage grid”.

## **ABSTRACT**

An analysis on the functioning and considerations of operation of a photovoltaic inverter for power feed into the low voltage network is presented in this paper. More precisely the single-phase inverters without isolation transformer at the output, the most widely used systems up to 5 kW are studied. Also a summary of different international regulations to be met regarding electrical safety and grid code is shown.