

Tendencias Actuales en el Diseño de Convertidores de Potencia para Aplicaciones en Fuentes de Energía Renovables

Chan-Puc Freddy, Calleja G. Hugo, Sánchez H. Víctor, Acosta O. Roberto, Torres M. Emmanuel

Resumen— En los últimos años, diversos grupos de investigación y organismos internacionales han enfocado sus esfuerzos hacia la comprensión y resolución de la problemática actual de la confiabilidad de los sistemas fotovoltaicos, basándose en amplios estudios de una enorme cantidad de sistemas instalados alrededor del mundo. Dentro de este grupo de trabajos se destaca la limitación de la vida útil del sistema debido principalmente al inversor, cuyo tiempo promedio a la primera falla es de cinco años. Por ello los esfuerzos se están enfocando a lograr tiempos de falla en los inversores de al menos unos 10 años. Basándose en la revisión del estado del arte, en este trabajo describe la problemática que enfrenta actualmente la confiabilidad de los sistemas fotovoltaicos. Se presentan también la clasificación de los sistemas, los diversos métodos para la estimación de la confiabilidad, y las propuestas que históricamente, se han empleado para mejorarla.

Palabras clave— Confiabilidad, Fotovoltaicos, Convertidores, Electrónica de Potencia.

I. INTRODUCCIÓN

La necesidad de obtener energía de una manera eficiente y ecológicamente amigable impulsa el desarrollo de las fuentes no convencionales, como alternativa a la utilización de combustibles fósiles. Dentro de éstas, las tecnologías dominantes en la actualidad son las que se basan en generadores eólicos y en las celdas fotovoltaicas. Se estima que los sistemas con mayor demanda en un futuro inmediato son los interconectados a red, con potencias entre 1 kW y 5 kW.

Diversos grupos de investigación y organismos internacionales han enfocado sus esfuerzos hacia la comprensión y resolución de la problemática asociada con la confiabilidad de los sistemas fotovoltaicos. Basándose en

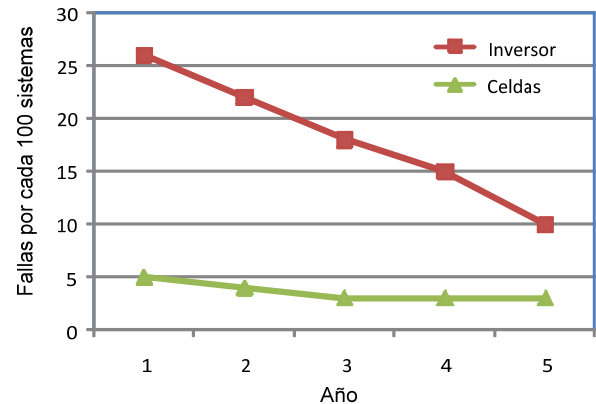


Fig. 1. Fallas por componentes reportados para el programa "1000 Roofs" en Alemania.

amplios estudios con una enorme cantidad de sistemas instalados alrededor del mundo [1]-[5], estos grupos de trabajo han encontrado que la limitante en la vida útil se debe principalmente al inversor, cuyo tiempo promedio a la primera falla es de alrededor de cinco años.

Éste es un periodo de tiempo inaceptable, porque otros componentes del sistema fotovoltaico se diseñan para operar por periodos de tiempo mucho más largos (p.e. los módulos fotovoltaicos tienen una vida promedio de 20 años) [6]-[8]. Por ello, los esfuerzos se están enfocando a lograr tiempos de falla en los inversores de al menos 10 años [9]-[12].

Las experiencias con sistemas fotovoltaicos son, en su mayoría, anecdóticas. Solo en unos cuantos casos se dispone de los datos estadísticamente importantes. Entre ellos se encuentran algunos proyectos fotovoltaicos de Alemania y Japón [5].

En las figuras 1 y 2 se muestran los resultados reportados en estos programas en los primeros años de operación. Se presentan los tipos de falla y la frecuencia de falla por cada 100 sistemas. La tasa de fallo decrece aproximadamente un 5.5 % por año en el programa alemán (Fig. 1) y un 4% en Japón (Fig. 2).

La información que proporcionan los propietarios no siempre distingue entre un mal funcionamiento temporal (el cual se restablece automáticamente), una falla propia del equipo (p.e. un defecto que requiera reparación), o una falla en el inversor debida a condiciones irregulares en la red.

Independientemente de si se trató de una falla catastrófica, o de un mal funcionamiento temporal, en todos

Manuscrito recibido el 1 de Junio de 2009. Este trabajo fue financiado en la Convocatoria 2009 "Apoyo a Proyectos Internos de Investigación de la División de Ciencias e Ingeniería bajo el proyecto UQROO/DCI/PI/01/09".

Dr. Freddy Chan-Puc hasta la fecha se ha desempeñado como Profesor-investigador en la Universidad de Quintana Roo en la División de Ciencias e Ingenierías; e-mail freddy@uqroo.mx.

Dr. Hugo Calleja hasta la fecha se ha desempeñado como Investigador en el Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, e-mail hcalleja@cenidet.edu.mx.

MC Victor Sánchez hasta la fecha se ha desempeñado como Profesor-investigador en la Universidad de Quintana Roo/DCI e-mail vsanchez@uqroo.mx

MES Roberto Acosta hasta la fecha se ha desempeñado como Profesor-investigador en la Universidad de Quintana Roo/DCI e-mail racosta@uqroo.mx

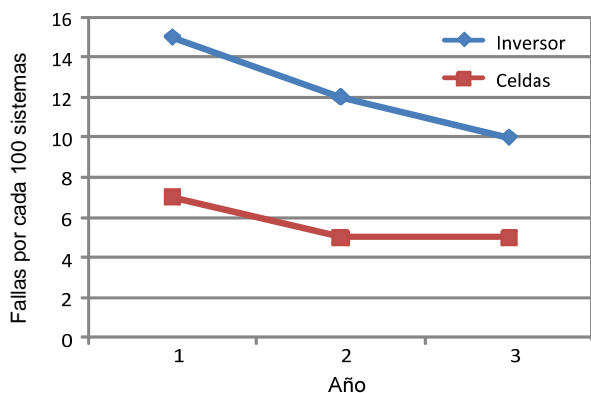


Fig. 2. Fallas por componentes reportados para el programa "residencial" en Japón.

los reportes el inversor fue el componente más problemático, y contribuyó con cerca del 66% de los problemas reportados. En contraposición, en las figuras se puede observar que los módulos resultan ser los más confiables de todos los componentes que conforman el sistema fotovoltaico.

Las gráficas también muestran que se tienen tasas de fallo significativamente menores conforme avanza el tiempo. Este comportamiento es el resultado de la madurez de la tecnología. Los inversores se benefician de los avances en la industria de semiconductores, los componentes son cada vez más confiables y los instaladores de sistemas tienen una mayor experiencia práctica. Sobre todo, el enorme número de instalaciones ha ayudado a estandarizar los sistemas y su instalación.

II. MÉTODOS DE ESTIMACIÓN DE LA CONFIABILIDAD

Los métodos para la estimación de la confiabilidad se clasifican en cuatro grandes categorías [13]-[16], las que se describen a continuación:

A. Métodos predictivos

Los métodos de predicción de la confiabilidad se basan en herramientas que emplean bases de datos, tales como el MIL-HDBK-217, Telcordia SR-332, etc. Se utilizan principalmente para establecer una línea de referencia de la confiabilidad mientras el diseño está todavía en papel. Para predecir la confiabilidad se requieren las especificaciones de los componentes, los esfuerzos proyectados y las condiciones ambientales de uso. Las bases de datos proveen los valores históricos de las tasas de fallo de diferentes tipos de componentes, y se construyen con información proporcionada por el fabricante y con datos de fallas en campo. Dado que los últimos datos de fallas en campo dependen principalmente del diseño y la aplicación, no son representativos de todos los casos. A través de incluir tanta información como sea posible, las bases de datos tienden a proveer tasas de fallo conservadoras. No se tiene un solo modelo de estimación que cubra todos los componentes, y una combinación de modelos puede proveer una mejor cobertura.

B. Métodos cualitativos

Los métodos cualitativos involucran pruebas agresivas tales como HALT¹, HASS², ESS³, HAST⁴, etc. Se emplean principalmente para mejorar la confiabilidad de un producto más que para medirla, predecirla o deducirla. Esos métodos involucran algunos tipos de pruebas de ambiente aceleradas, donde el producto se somete a esfuerzos elevados para precipitar las fallas latentes o exhibir debilidades de diseño. Para emplear estos métodos se requieren los productos reales y equipo de pruebas especializado. El beneficio que se obtiene es considerable, pero el costo y el tiempo de demanda podrían ser excesivos, dependiendo del tipo y extensión de las pruebas.

C. Métodos cuantitativos

Los métodos cuantitativos emplean técnicas tales como análisis de elemento finito, física del fallo, etc. Son métodos computacionalmente intensivos y la confiabilidad del producto se deduce principalmente a través de un análisis de simulación por computadora. Estos métodos requieren un diseño que pueda modelarse por computadora y en una plataforma de soporte de los datos. Los resultados pueden ser bastante exactos, dependiendo del nivel de habilidad y la disponibilidad de datos para el modelo.

No obstante, el uso de los métodos cuantitativos puede ser tedioso, con un gran consumo de tiempo y podría entrar en conflicto con los requerimientos estrictos de tiempos de manufactura de los productos electrónicos actuales.

D. Métodos analíticos

Los métodos analíticos son una mezcla de los métodos de predicción y los métodos cuantitativos, y requieren datos obtenidos mediante el uso de técnicas cualitativas. Entre estos métodos se encuentran el análisis de Weibull, la distribución de vida bajo esfuerzo, etc.

Estos métodos pueden proveer un resultado bastante exacto en términos de deducción, medición o verificación de la confiabilidad. Son versátiles en términos del modelado, sin estar limitados a una distribución exponencial. Sin embargo, algunos de los datos que se requieren sólo pueden obtenerse probando el producto real.

No todos los métodos se aplican en circunstancias similares. A excepción de la metodología de predicción, los demás se enfocan a estimar la confiabilidad de un producto terminado. En este sentido, son métodos correctivos, más que preventivos, y su función consiste, en esencia, en acortar el lapso necesario para ejercer la acción, o las acciones, de corrección.

III. CONFIABILIDAD EN LA ETAPA DE POTENCIA PARA SFV

¹ Highly Accelerated Life Testing

² Highly Accelerated Stress Screening

³ Environmental Stress Screening

⁴ Highly Accelerated Stress Testing

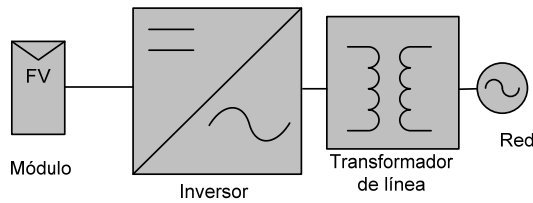


Fig. 3. Diagrama a bloques de una etapa de conversión interconectado con un módulo.

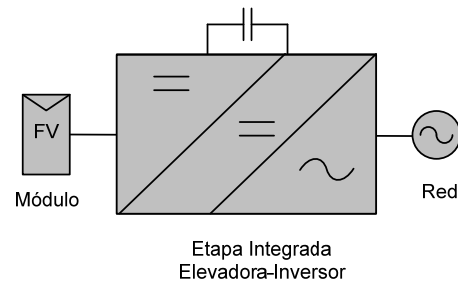


Fig. 5. Diagrama a bloques de una etapa integrada.

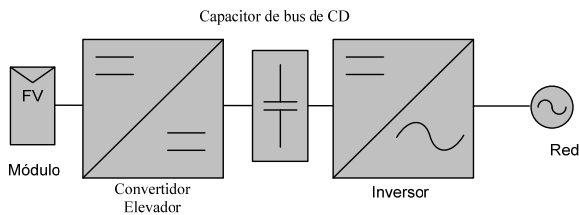


Fig. 4. Diagrama a bloques de múltiples etapas de conversión interconectadas a un módulo.

Existe una diversidad de configuraciones en las que se pueden conectar los módulos fotovoltaicos al inversor [17]-[22]. Todas estas configuraciones se pueden clasificar en cuatro grandes categorías dependiendo del nivel de potencia, voltaje de salida y características de aislamiento (entre otras):

1. Una etapa de conversión – un módulo
2. Múltiples etapas de conversión – un módulo
3. Una etapa de conversión – múltiples módulos
4. Múltiples etapas de conversión – múltiples módulos

A. Una etapa de conversión-un módulo

Esta categoría se caracteriza por tener una etapa de conversión simple, con una cantidad reducida de componentes; es robusta, de bajo costo y alta eficiencia [22]. Debido a que la fuente de entrada es un solo módulo, los dispositivos de conmutación y el capacitor del bus de CD trabajan con tensiones reducidas; sin embargo, para interconectarse a la red, se requiere de amplificación y ésta se logra a través de un transformador a frecuencia de línea, cuya principal desventaja es ser voluminoso y pesado (Fig. 3).

B. Múltiples etapas de conversión – un módulo

Los sistemas con dos o más etapas de conversión pueden tener algunas variantes [18], [21]. La más común es la que consiste de un inversor PWM (*pulse-width modulated*) interconectado a la red y de algún tipo de convertidor CD/CD con seguimiento individual del Punto de Máxima Potencia, PMP (Fig. 4).

Esta variedad de sistemas evita el uso del transformador a frecuencia de línea, ya que el convertidor CD/CD tiene una característica elevadora e incluye transformadores de alta frecuencia. Esto da como resultado topologías de bajo

costo y volumen reducido. Estas topologías tienen un intervalo de operación limitada por la fuente (90-500 Watts).

A estas topologías se les conoce como *módulos-CA* o módulos integrados [23]-[27] ya que, por su reducido tamaño, se pueden ubicar en el módulo fotovoltaico. Esta característica permite la conexión *modular* de los convertidores a una salida común. Cada *módulo-CA* se sincroniza de manera independiente con la frecuencia de línea, con lo que se obtiene una gran flexibilidad en el sistema.

La principal desventaja de los *módulos-CA* es que están expuestos a condiciones ambientales muy severas (temperatura, humedad, descargas atmosféricas), lo cual repercute en su tiempo de vida. Otra desventaja es el caro reemplazo, ya que se tiene que cambiar todo el módulo en caso de daño. En estos sistemas generalmente se tienen dos o tres etapas de conversión.

Otra tendencia dentro esta categoría es la integración de las etapas de un sistema fotovoltaico en una sola etapa con función elevadora y de inversor (Fig. 5). Esta variedad de topologías integradas se caracteriza por diseños más compactos y eficientes, por un número reducido de componentes y técnicas avanzadas de control [22].

C. Una etapa de conversión – múltiples módulos

Los módulos se conectan en arreglos serie y/o paralelo, lográndose niveles altos de voltaje, por lo que en este tipo de sistemas no se requiere de amplificación (transformador u otra etapa adicional). Los dispositivos de conmutación y el capacitor del bus de CD trabajan con tensiones elevadas. En esta categoría se encuentra el inversor centralizado (Fig. 6), el inversor “*string*” (Fig.7) y el inversor multinivel (Fig. 8)

En el pasado, se utilizó ampliamente el sistema conocido como *esquema centralizado* que se muestra en la Fig. 6. Es un sistema robusto aunque no flexible; el costo del inversor es relativamente alto, las pérdidas de potencia son, generalmente, altas debido principalmente a fallos en las conexiones de los módulos y a la necesidad de diodos de *bypass* [21].

El concepto de inversor *string* (cadena) es una alternativa para el esquema centralizado. El arreglo FV está seccionado en cadenas (Fig. 7) y cada una de ellas maneja su propio seguimiento del PMP [20]. Con este esquema se manejan intervalos medianos de potencia (0.5 kW <P<1 kW).

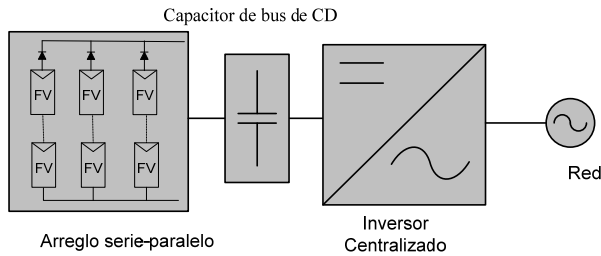


Fig. 6. Diagrama a bloques de un inversor centralizado.

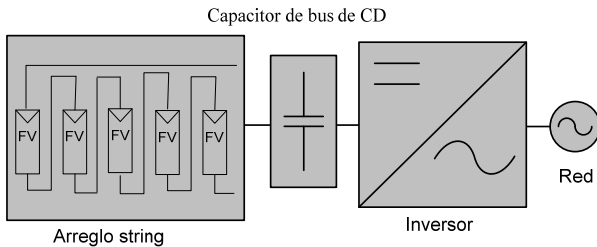


Fig. 7. Diagrama a bloques del inversor string.

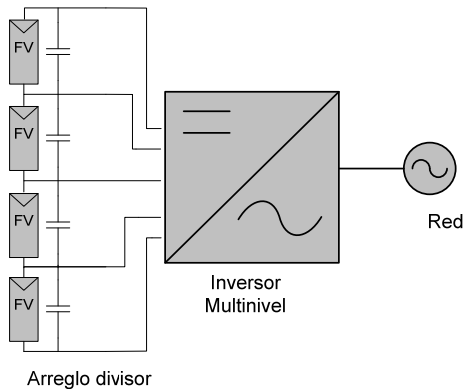


Fig. 8. Diagrama a bloques del inversor multinivel.

Las topologías de convertidores *multinivel* (Fig. 8) son especialmente adecuadas para aplicaciones fotovoltaicas ya que, con la estructura modular de los arreglos, se pueden producir diferentes niveles de voltaje CD [17]. El diseño se enfoca a la eficiencia (>97%) y se pueden manejar intervalos de potencia entre 1.5 kW y 3 kW. Sin embargo, al incrementarse el número de niveles en estos convertidores, se incrementa notablemente el costo y el número de componentes. Además, el desbalance en los módulos afecta la calidad de la salida.

Como se mencionó anteriormente, estos sistemas no cuentan con transformador. Sin embargo, el remover al transformador y su capacidad de aislamiento debe valorarse cuidadosamente ya que pueden ocurrir corrientes de fuga debido a la capacitancia a tierra del arreglo fotovoltaico, e incrementarse las emisiones electromagnéticas, tanto conducidas como radiadas.

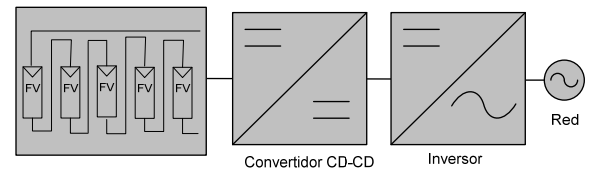


Fig. 9. Diagrama a bloques de un sistema de múltiples etapas sin segmentación de módulos.

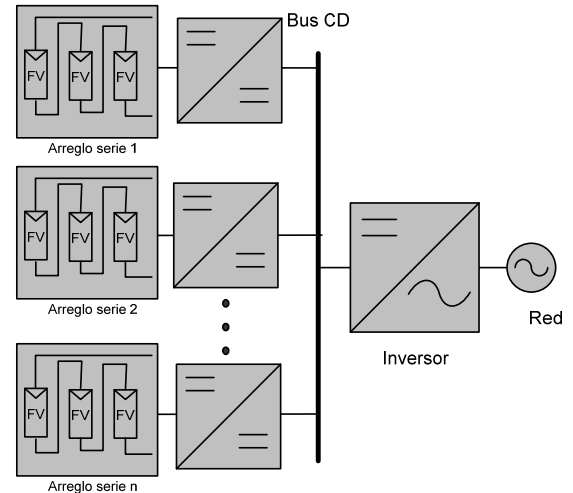


Fig. 10. Diagramas a bloques de un sistema de múltiples etapas con segmentación de módulos.

D. Múltiples etapas de conversión – múltiples módulos

En esta categoría la conexión de los módulos se puede realizar de dos formas [18],[19]: Una es que todos los módulos se conecten en serie (Fig. 9) de manera similar a la conexión de “múltiples etapas-un módulo”.

Se emplean entonces algunos de los sistemas de dos etapas de conversión presentados en la sección anterior. La principal diferencia es el nivel de voltaje de la entrada y, por lo tanto, las variaciones de voltaje de la etapa amplificadora.

La segunda forma consiste en conectar un convertidor CD/CD para cada cadena de módulos (*string*), los que se interconectan a un inversor común denominado “*multi-string*” (Fig. 10). Cada cadena opera su PMP de manera individual; por lo tanto, se espera un mejoramiento en la eficiencia global del sistema.

A pesar de la diversidad de opciones que existen para los inversores fotovoltaicos conectados a la red, la mayoría de ellos se diseñan bajo criterios diferentes al concepto de confiabilidad. Cabe mencionar también que el término “Robustez” se aplica de una manera muy amplia, porque en ninguno de los artículos consultados se calculan parámetros directamente relacionados con el concepto de confiabilidad.

IV. REDUNDANCIA

Varios trabajos se enfocan a la redundancia (sistemas paralelos) como una alternativa atractiva, debido principalmente a su capacidad de tolerancia a fallas. Esta redundancia puede ser de dos tipos:

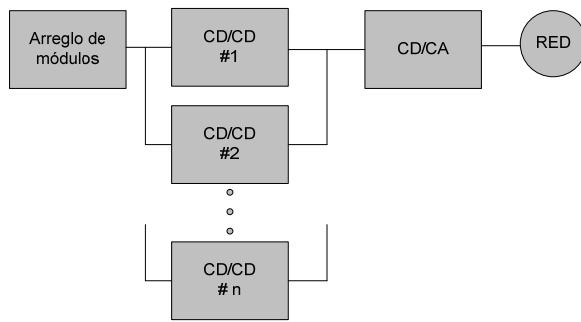


Fig. 11. Redundancia de convertidores CD/CD.

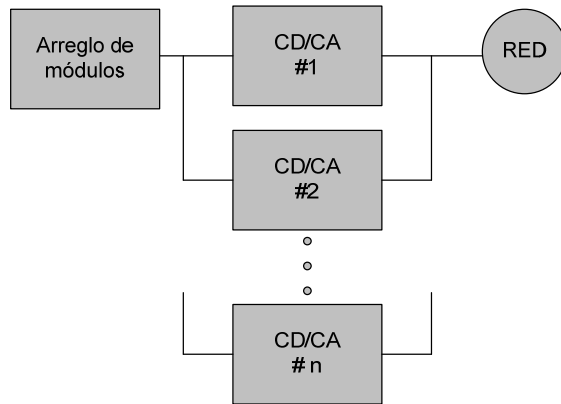


Fig. 12. Redundancia del inversor.

A. Conexión en paralelo de convertidores CD/CD.

La interconexión de los convertidores CD/CD en paralelo (Fig. 11) presenta varias ventajas; sin embargo, para lograr estas ventajas, el diseño y control del sistema paralelo deben diseñarse cuidadosamente. De otra manera, dichos sistemas podrían encontrar problemas tales como una distribución desequilibrada de la corriente de carga compartida, niveles altos (o bajos) en los voltajes de salida, altos rizados de corriente (o voltaje) y oscilaciones bruscas [28].

Para la redundancia pasiva (convertidores CD/CD en espera), el empleo de diversas técnicas de control (como el método maestro-esclavo con operación de cola circular) permite una sincronización adecuada de los convertidores [29],[30] y determina el número necesario de convertidores activos para cualquier condición de carga.

Para la redundancia activa (convertidores CD/CD en línea) se plantea el uso de la temperatura en los dispositivos (manejo térmico) como parámetro relevante del control para determinar la distribución de la corriente en la carga compartida [31].

B. Conexión en paralelo del convertidor CD/CD + inversor.

A partir de un análisis de la redundancia, su relación con la confiabilidad y su impacto en el costo [32]-[34], se plantea la redundancia de las dos etapas (Fig. 12). Una

ventaja de este esquema es el desacoplamiento del control del inversor con el control del regulador, permitiendo un manejo independiente del PMP, e incrementando de manera adicional la eficiencia.

Sin embargo, aún se cuestiona la redundancia como una opción para el diseñador, debido principalmente al costo y al apremio práctico.

V. SELECCIÓN DE COMPONENTES

Sin importar qué topología se utilice en el diseño, un convertidor consiste principalmente de uno o varios dispositivos de conmutación (p.e. MOSFET, IGBT), un circuito controlador, un transformador de aislamiento, un rectificador, filtros, impulsor y capacitores de entrada/salida.

De estos componentes, el capacitor electrolítico es el elemento más propenso a falla con una mayor contribución a la tasa de fallo global. Esto propicia que algunos grupos de investigación se enfoquen a la reducción del tamaño del capacitor del bus intermedio [35]-[38].

En orden de importancia le sigue el dispositivo de conmutación; algunos trabajos se enfocan al estudio de los esfuerzos en los dispositivos semiconductores y plantean la mejora de la confiabilidad en convertidores de potencia por medio de técnicas de conmutación suave o sobredimensionamiento de dichos dispositivos [39]-[41]. Después del dispositivo de conmutación, el orden de los otros componentes (el circuito controlador, los capacitores de cerámica, los diodos y los inductores) puede cambiar dependiendo de la topología seleccionada.

Existen estudios recientes de la confiabilidad de algunos convertidores de potencia [42]-[43]. Sin embargo, hasta el momento, sólo se plantea la evaluación y predicción de la confiabilidad, más no la mejora de ésta. Además, ninguna de estas propuestas se enfoca específicamente a sistemas fotovoltaicos.

Recientemente se han propuesto metodologías que involucran el concepto de confiabilidad desde la etapa del diseño de los sistemas fotovoltaicos [44]-[45] buscando con ello extender la vida útil de las etapas de potencia. Sin embargo, estas metodologías continúan siendo simples predicciones que requieren validarse con la implementación y prueba de los prototipos.

VI. CONCLUSIONES

Existe una tendencia clara a aumentar la confiabilidad de los sistemas con la meta específica de lograr un tiempo promedio a la primera falla del orden de 10 años. Para ello, se exploran configuraciones que evitan o minimizan los elementos más propensos a fallar (v.g. el capacitor del bus de CD).

Una segunda tendencia consiste en seccionar los bancos de celdas fotovoltaicas en segmentos de menor tamaño. Esto permite aprovechar al máximo todas las celdas, aun cuando parte de ellas estén temporalmente a la sombra. Otra ventaja es la posibilidad de aumentar gradualmente la capacidad del sistema, sin necesidad de modificar lo ya instalado. Dentro de esta categoría tenemos los *módulos-CA*, el inversor *string* y el inversor *multi-string*.

No existe una preferencia clara entre configuraciones de una y de dos etapas. En ambos casos se trata de extraer de las celdas una corriente libre de rizo y de inyectar a la red una forma de onda que cumpla con la normatividad vigente.

La redundancia se plantea como una solución para mejorar la confiabilidad. Se emplea a menudo cuando las consecuencias del fallo son inaceptables, resultando en sistemas de extremadamente alta confiabilidad. Sin embargo, el uso de la redundancia no es una panacea para resolver todos los problemas de confiabilidad. No sustituye a un buen diseño inicial, implica incrementar el costo, complejidad, tamaño, espacio, consumo de energía y usualmente es un sistema más complicado. Previamente a su incorporación en el diseño, el diseñador debe evaluar las ventajas y desventajas de la redundancia.

La optimización de la confiabilidad, a través de los métodos correctivos (estimación por métodos cualitativos, cuantitativos o analíticos) está ampliamente estudiada y se aplica rutinariamente a nivel industrial.

Los métodos predictivos también son ampliamente conocidos; sin embargo, no se aplican de manera sistemática durante la etapa de diseño de un convertidor electrónico de potencia.

El proceso de diseño de un convertidor electrónico de potencia no siempre está ligado al concepto de confiabilidad. Los convertidores se diseñan tomando en cuenta parámetros de rendimiento eléctricos. El empleo de metodologías de diseño confiable pronostica una mejora en la vida útil de los inversores.

RECONOCIMIENTOS

Este trabajo forma parte del “Desarrollo de Inversores Fotovoltaicos de alta confiabilidad con interconexión a la red eléctrica” PROMEP 2009-2010

REFERENCIAS

- [1] “Implementing Agreement on Photovoltaic Power Systems”; *Photovoltaic Power Systems Programme, IEA Annual Report 2006* [online] Available: www.iea-pvps.org.
- [2] S. Mau, U. Jahn, “Performance Analysis of grid-connected PV systems”; *Proc. of European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, 2006*, [online] Available: www.iea-pvps.org.
- [3] IEA, “Operational Performance, Reliability and Promotion of Photovoltaic Systems”; *Photovoltaic Power Systems Programme; Report IEA-PVPS T2-0*; 2002. [online] Available: www.iea-pvps.org.
- [4] IEA, “Reliability Study of Grid Connected PV Systems”; *Photovoltaic Power Systems Programme, Report IEA-PVPS T7-08*; 2002 [online] Available: www.iea-pvps.org.
- [5] IEA, “Country Reports on PV Systems Performance”; *Photovoltaic Power Systems Programme, Report IEA-PVPS T2-05*; 2004. [online] Available: www.iea-pvps.org.
- [6] E.D. Dunlop, “Lifetime performance of crystalline silicon PV modules”; *Proc. of World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, 2003* Page(s):2927 - 2930
- [7] E.L. Meyer, E.E. Van Dyk, “Assessing the reliability and degradation of photovoltaic module performance parameters”; *IEEE Trans. on Reliability*; Vol. 53, Issue 1, March 2004, Page(s):83 – 92.
- [8] J. H. Wohlgeuth, M. Conway, D.H. Meakin, “Reliability and performance testing of photovoltaic modules”; *Proc. of the IEEE Photovoltaic Specialists Conference 2000* Page(s):1483 – 1486
- [9] R. West, K. Mauch, Y.C. Qin, N. Mohan, R. Bonn, “Status and Needs of power electronics for photovoltaic inverters: Summary Document” Sandia National Laboratories Report SAND 2002-1085. [online] Available: www.prod.sandia.gov
- [10] R.H. Bonn, “Developing a next generation PV inverter”; *Proc. IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 2002*, Page(s):1352-1355
- [11] A. Maish, C. Atcity, S. Hester, D. Greenberg, D. Osborn, D. Collier and M. Brine. “Photovoltaic System Reliability”; *Proc. IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 1997*; Page(s):1049-1054
- [12] S. González, C. Beauchamp, W. Bower, J. Ginn, M. Ralph “PV Inverter Testing, Modeling, and New Initiatives”; *Proc. of NCPV and Solar Program Review Meeting, 2003*; Page(s):537-540
- [13] M. Economou, “The Merits and limitations of reliability Predictions.” *Proc. of Reliability and Maintainability Annual Symposium, RAMS 2004* Page(s):352 - 357
- [14] Xijin Tian, B. Edson, “A prediction based design-for-reliability tool”; *Proc. of Reliability and Maintainability Annual Symposium, RAMS 2004* Page(s):412 - 417
- [15] M. Cushing, D. Mortin, T. Stadterman, A. Malhorta. “Comparison of electronics-Reliability Assesment Approaches”; *IEEE Transactions on reliability* Vol. 42, No 4, 1993 December, Page(s):542-546
- [16] J. Jones, J. Hayes; “A Comparison of electronics-Reliability prediction models”; *IEEE Transactions on reliability*, Vol. 48, No 2, 1999 June, Page(s):127-134
- [17] M. Calais, V. Agelidis, “Multilevel Converters for single -phase grid connected photovoltaic systems- An Overview”; *Proc. of IEEE Power Electronics Specialists Conference, 1998*, Page(s):172 - 178
- [18] S.B. Kjaer, J.K. Pedersen, F. Blaabjerg; “A review of single-phase grid-connected inverters for photovoltaic modules”; *IEEE Trans. on Industry Applications*, Vol. 41, Issue 5, Sept.-Oct. 2005; Page(s):1292 – 1306
- [19] M. Calais, J. Myrzik, T. Spooner and V. Agelidis, “Inverters for Single-Phase Grid Connected Photovoltaic Systems - An Overview”; *Proc. IEEE Power Electronics Specialists Conference, 2002*, Page(s):1995-2000.
- [20] M. Calais, J. Myrzik, “String and module integrated inverters for single-phase grid connected photovoltaic systems- A Review”; *Proc. IEEE Power Tech Conference, 2003* Page(s):8
- [21] F. Blaabjerg, Z. Chen and S. Kjaer “Power electronics as efficient interface in dispersed power generation systems,” *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 19, Sep. 2004. Page(s):1184-1194.
- [22] Y. Xue, L. Chang, S.B. Kjaer, J. Bordonau, T. Shimizu, “Topologies of single-phase inverters for small distributed power generator: an Overview”; *IEEE Trans. on Power Electronics*, Vol. 19, issue 5, September 2004. Page(s):1305–1314.
- [23] T. Shimizu, K. Wada, N. Nakamura. “A flyback-type Single Phase Utility Interactive Inverter with Low-frequency Ripple Current Reduction on the DC Input for an AC Photovoltaic Module System”; *Proc. of IEEE Power Electronics Specialists Conference, 2002*; Page(s): 1483- 1488
- [24] Rodriguez, C.; Amaratunga, G.A.J. “Long-Lifetime Power Inverter for Photovoltaic AC Modules” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Volume: 55 Issue: 7 July 2008 Page(s): 2593-2601
- [25] H. Oldenkamp, I. J. de Jong, C.W.A. Baltus, S.A.M Verhoeven, S. Elstgeest; “Reliability and accelerated life tests of the AC module mounted OKE4 inverter”; *Proc. of IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 1996* Page(s):1339 - 1342
- [26] M. Meinhardt, T. O’Donnell, H. Schneider, J. Flannery, C. O. Mathuna, P. Zacharias, T. Krieger, “Miniaturised “low profile” module integrated converter for photovoltaic applications with integrated magnetic components”; *Proc. of IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition 1999*, Page(s):305-311.
- [27] B. Kær and F. Blaabjerg, “A novel single-stage inverter for the ac-module with reduced low-frequency ripple penetration”; *Proc. EPE European Conf. Power Electronics and Applications, 2003*, Page(s):10
- [28] Vazquez, M.J.V.; Marquez, J.M.A.; Manzano, F.S. “A Methodology for Optimizing Stand-Alone PV-System Size Using Parallel-Connected DC/DC Converters” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Volume: 55 Issue: 7 July 2008 Page(s): 2664-2673
- [29] A. Julian, G. Oriti; “A Comparison of Redundant Inverter Topologies to Improve Voltage Source Inverter Reliability”; *IEEE Trans. on Industry Applications*, Vol. 43, no. 5, September / October 2007; Page(s):1371-1378
- [30] T.F. Wu, K. Siri, C.Q. Lee; “Reliability improvement in parallel connected converter systems”; *Proc. of International Conference on Industrial Electronics, Control and Instrumentation, 1991*; Page(s):429 - 434
- [31] C. Nesgaard, M. Andersen, “Optimized Load Sharing control by means of thermal reliability management” *Proc. of IEEE Power Electronics Specialists Conference, 2004*; Page(s):4901-4906

- [32] U. de Pra, D. Baert, H. Kuyken, "Analysis of the degree of reliability of a redundant modular inverter structure", *Proc. of IEEE International Telecommunications Energy Conference*, 1998 Page(s):543 - 548
- [33] A. Pregelj, M. Begovic, A. Rohatgi. "Impact of inverter configuration on PV system Reliability and energy production", *Proc. of IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, 2002; Page(s):1388 - 1391
- [34] R. Tirumala, P. Imbertson, N. Mohan, C. Henze, R. Bonn 33 "An efficient, low cost DC-AC Inverter for photovoltaic systems with increased reliability". *Proc. of IEEE Industrial Electronics Conference*, 2002; Page(s):1095 - 1100
- [35] J. Kinght, S. Shirsavar, W. Holderbaum, "An improved reliability Cuk based solar inverter with sliding mode control", *IEEE Trans. on Power Electronics*, Vol. 21, issue 4, July 2006; Page(s):1107-1115,
- [36] J. Mulkern, C. Henze, D. Lo, "A High reliability, low cost, interleaved bridge converter", *IEEE Trans. on Electron Devices*, Vol. 38, Issue 4, April 1991; Page(s):777 - 783
- [37] T. Brekken, N. Bhiwapurkar, M. Rathi, N. Mohan, C. Henze, L. Moumneh, "Utility-Connected Power Converter for Maximizing Power Transfer from a Photovoltaic Source While Drawing Ripple-Free Current". *Proc. of IEEE Power Electronics Specialists Conference*, 2002, Page(s): 1518 - 1522
- [38] K. Nishijima, T. Nakano, K. Harada "On removing of output filter of low voltage and high current DC/DC converter". *Proc. of IEEE Power Electronics Specialists Conference*, 2004, Page(s):1808-1811
- [39] K. Ogura, T. Nishida, E. Hiraky, M. Nakaoka. "Time sharing boost chopper cascaded dual mode single-phase sine wave inverter for solar photovoltaic power generation system" *Proc. of IEEE Power Electronics Specialists Conference*, 2004, Page(s):4763-4767
- [40] M. Trivedi, K. Shenai, "Failure Mechanisms of IGBT's under short-circuit and clamped inductive switching stress", *IEEE Trans. on Power Electronics*, Vol. 14, Issue 1, Jan. 1999; Page(s):108 - 116
- [41] L. Saro, K. Dierberger, R. Redl, "High-voltage MOSFET behaviour in soft-switching converters", *Proc. of IEEE International Telecommunications Energy Conference* 1998. Page(s):30 - 40
- [42] Xijin Tian, "Design for Reliability and implementation on power converters", *Proc. of IEEE Reliability and Maintainability Symposium*, 2005 Page(s):89 - 95
- [43] G. Chen, R. Burgos, Z. Liang et al "Reliability Oriented design considerations for high power converter modules" *Proc. of IEEE Power Electronics Specialists Conference*, 2004, Page(s):419-425
- [44] Petrone, G. Spagnuolo, G. Teodorescu, R. Veerachary, M. Vitelli, M "Reliability Issues in Photovoltaic Power Processing Systems" *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, July 2008, Volume: 55, [Issue: 7](#) page(s): 2569-2580.
- [45] Chan, F. Calleja, "Design strategy to optimize the reliability of power converters" *Proc. of IEEE International Power Electronics Congress*, 2008, Page(s):128-132.
- [46] Ristow, A.; Begovic, M.; Pregelj, A.; Rohatgi, A. "Development of a Methodology for Improving Photovoltaic Inverter Reliability" *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Volume: 55 Issue: 7 July 2008 Page(s): 2581-2592



Calleja G. Hugo recibió el título de Doctor en Ciencias en Ingeniería Electrónica en el *cenidet* en 2000. Actualmente es profesor del centro nacional de investigación y desarrollo tecnológico, *cenidet*, adscrito al departamento de electrónica. Sus áreas de interés son instrumentación electrónica para convertidores de potencia, confiabilidad en sistemas fotovoltaicos.



Sánchez H. Víctor ingeniero en Electrónica por el Instituto Tecnológico de Orizaba (1996) y Maestro en Ciencias en Ingeniería Electrónica por el Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (2000). Sus áreas de estudio son sistemas de generación de energía eléctrica a partir de fuentes renovables, convertidores de potencia de alta eficiencia y sistemas de generación distribuidos.



Acosta O. Roberto titulado de la Maestría en Energía Solar de la UNAM. Profesor-Investigador Asociado "B", Definitivo de la Universidad de Quintana Roo, adscrito a la División de Ciencias e Ingeniería desde 2002. Sus áreas de interés son la medición de la radiación solar, los sistemas fototérmicos (particularmente los sistemas de calentamiento de agua y de concentración solar) y la evaluación de sistemas fotovoltaicos.



Torres M. Emmanuel obtuvo el título de Ingeniero Eléctrico en el Instituto Tecnológico de Chetumal en el 2002 y el grado de Maestro en Ciencias en el CINVESTAV Unidad GDL en el 2006. Del 2008 a la fecha labora como profesor de tiempo completo en la Universidad de Quintana Roo. Sus áreas de interés son: máquinas eléctricas, electrónica de potencia, calidad de la energía, fuentes renovables, ahorro y uso eficiente de la energía.



Freddy Chan-Puc obtuvo el título de Ingeniero en electrónico en el Instituto Tecnológico de Mérida en 1996. Recibió el título de Maestro en Ciencias y Doctor en Ciencias en Ingeniería Electrónica en el centro nacional de investigación y desarrollo tecnológico (CENIDET) en 1999 y 2008 respectivamente. Actualmente es profesor de la Universidad de Quintana Roo adscrito a la División de Ciencias e Ingeniería desde 2000. Sus áreas de interés son conversión de energía, electrónica de potencia y confiabilidad de convertidores electrónicos.