



INSTITUTO TECNOLÓGICO DE SONORA
Educar para Trascender

Inversor fotovoltaico con aislamiento
por transformador en alta frecuencia
con funciones ampliadas para sistemas
interconectados a la red eléctrica

Tesis

Que para obtener el título de
Maestro en ciencias de la ingeniería

Presenta

Obed Enrique Ochoa Robles

Fecha

Cd. Obregón, Sonora, México.

Contenido

Índice de acrónimos y abreviaturas	1
Lista de figuras	2
Lista de tablas	3
I. Introducción	4
II. Desarrollo.....	6
i. Modelo matemático	6
a. Modelo conmutado	7
b. Modelo promediado	8
ii. Dimensionamiento de elementos pasivos.....	9
a. Dimensionamiento del capacitor	9
b. Dimensionamiento del inductor de acoplamiento	10
iii. Estrategia de control	11
iv. Esquema de modulación	11
v. Resultados de simulación	11
vi. Implementación	12
a. Composición del sistema completo	12
b. Diseño del transformador de alta frecuencia	12
c. Resultados prácticos	12
III. Conclusión	12
Trabajos futuros.....	12
Referencias	12

ÍNDICE DE ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABLAS

I. INTRODUCCIÓN

El agotamiento de los combustibles fósiles y el aumento en el calentamiento global son temas que preocupan a gran parte de la población mundial, debido a esto surge la necesidad de utilizar fuentes de energía limpia (eólica, geotérmica, solar, biomasa, etc.) [1], para dañar menos al medio ambiente y contribuir al desarrollo sustentable.

Dentro de las energías limpias la solar fotovoltaica tiene la capacidad de producir energía eléctrica directamente de la incidencia de radiación solar con las celdas fotovoltaicas, además este tipo de energía no presenta emisiones a la atmosfera y no cuenta con partes móviles en comparación con otros tipos de generación de energía, debido a esto la energía fotovoltaica es ampliamente estudiada en la actualidad [1], [2]. Una ventaja más de este tipo de energía es que las celdas fotovoltaicas son cada vez más baratas y eficientes, por esta razón mucha gente está apostando por ella. Sin embargo se tiene la desventaja de que este tipo de energía renovable es intermitente ya que está presente solo en una parte del día [1], [3].

En México se cuenta con un gran potencial en energías renovables, como lo muestra la TABLA I, y como se puede apreciar se cuenta con un potencial muy alto de energía solar en comparación con los otros tipos de energía [4].

TABLA I. POTENCIAL DE GENERACIÓN ELÉCTRICA POR ENERGÍAS RENOVABLES

Tipo de energía	Geotérmica GWh/año	Hidráulica GWh/año	Eólica GWh/año	Solar GWh/año	Biomasa GWh/año
Potencial posible	52,013.00	44,180.00	87,600.00	6,500,000.00	11,485.00
Potencial probado	2,355.00	4,796.00	19,805.00	16,351.00	2,396.00

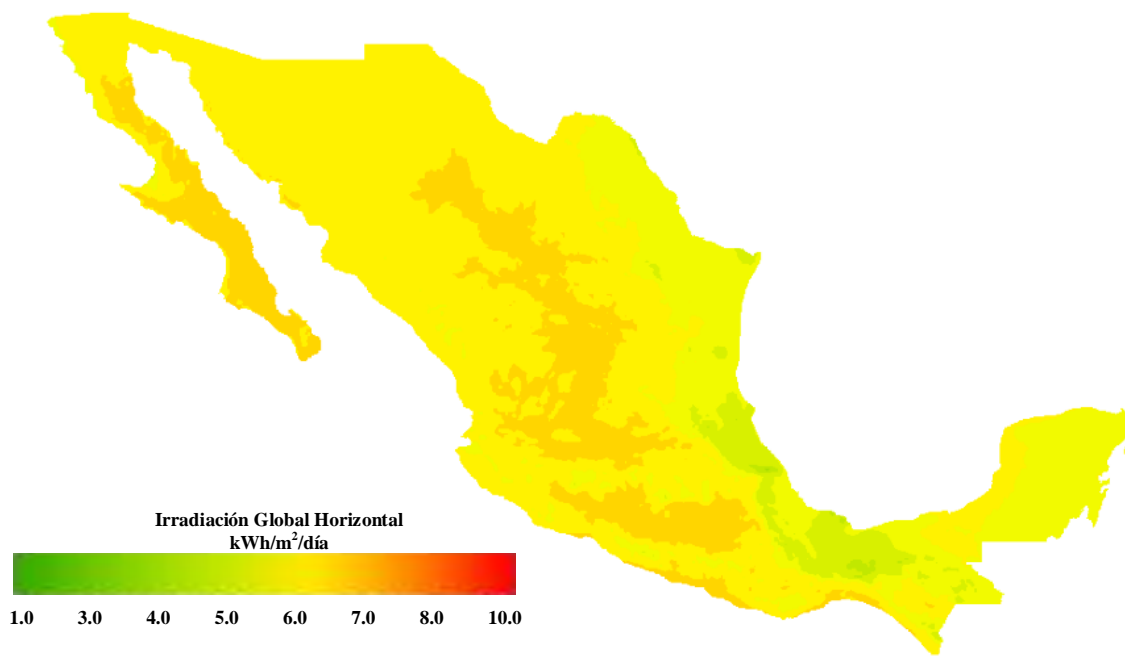


Figura 1. Mapa Nacional de Irradiación Global

El potencial solar con el cual cuenta nuestro país, es alto comparado con el potencial que tienen países líderes en producción de energía eléctrica generada por energía solar, como lo son; España, Alemania, Italia, entre otros. Estos países cuentan con una irradiación global de entre 2.7 y 4.7 kWh/m²/día [5] y la mayor parte de nuestro país cuenta con una irradiación global mayor a 5.5 kWh/m²/día como se muestra en la Figura 1. Por esta razón surge el interés de trabajar con energía solar, específicamente energía solar fotovoltaica. De esta manera, se impulsa el desarrollo tecnológico para la utilización de este tipo de energía, a la vez que se promueve la producción de energía eléctrica proveniente del recurso solar impactando en la conservación de nuestro medio ambiente.

En la actualidad los sistemas fotovoltaicos cuentan con ciertas funciones las cuales hacen aprovechar al máximo dichos sistemas. Estas funciones van desde hacer un buen seguimiento del máximo punto de potencia (MPPT), inyección de potencia activa a la red, seguridad eléctrica y compensación de reactivos, donde esta última es la función que se llevará a cabo en la ausencia y presencia del recurso solar [6]–[9].

Uno de los requerimientos más importantes, si no el más importante es el tema de la seguridad eléctrica, donde esta se logra al aislar galvánicamente a los paneles fotovoltaicos de la red eléctrica y agregando sistemas de protección en caso de fallas [10]–[12].

Para aislar galvánicamente el sistema, se puede llevar a cabo con un inversor aislado por transformador, ya sea de baja o de alta frecuencia. Donde los transformadores de baja frecuencia tienen la desventaja de ser voluminosos y caros, y actualmente un tanto obsoletos, por otra parte los transformadores de alta frecuencia tienden a ser ligeros, baratos y hoy en día más comunes [3], [6], [13].

Debido a las características que poseen los transformadores de alta frecuencia, actualmente es la tendencia en los inversores fotovoltaicos. Las topologías usadas en estos inversores son la Push-Pull, Flyback, Forward, entre otras [3]. Además existen otros inversores como son el medio puente y puente completo los cuales utilizan un transformador de alta frecuencia con relación de 1 solo para aislar y además utilizan un cicloconvertidor para sincronizarse con la red eléctrica [14]–[16].

Por otra parte existen topologías que no utilizan transformador (H5, H6, etc), pero utilizan una estrategia para desacoplar a la red eléctrica del arreglo fotovoltaico esto se realiza mediante dispositivos de conmutación extra [6], [17], [18].

Estos sistemas fotovoltaicos se pueden aplicar directamente a la industria debido a que esta cuenta con la problemática de altos consumos de energía eléctrica y a su vez con una alta demanda de reactivos los cuales son penalizados fuertemente por la compañía suministradora de energía y este tipo de sistema es la solución idónea a sus problemas [19], [20].

Identificando las necesidades que se tienen actualmente en cuestión de la calidad de la energía, se propone el siguiente sistema. Un inversor que sea capaz de inyectar la energía de paneles fotovoltaicos a la red eléctrica y que pueda compensar potencia reactiva de la red eléctrica de manera simultánea, esto con el fin de atacar los problemas por alto consumo

energético y calidad de la energía con los que cuenta la industria y en algunos casos a nivel residencial. Además este sistema contará con aislamiento galvánico entre la red eléctrica y el arreglo fotovoltaico, mediante un transformador de alta frecuencia donde más adelante se explica la metodología de su construcción y diseño.

II. DESARROLLO

El sistema propuesto está compuesto por un arreglo fotovoltaico PV , un filtro capacitivo (C) en el bus de cd, un convertidor Push-Pull con dos transistores (Q_1 y Q_2), un transformador de alta frecuencia (TAF), un cicloconvertidor con cuatro transistores (Q_3 - Q_6), y un inductor (L) para el acoplamiento con la red eléctrica. Además se considera una carga de ca en paralelo con la red para probar el funcionamiento del sistema. El diagrama del sistema descrito se muestra en la Figura 2.

El arreglo fotovoltaico provee la potencia activa al convertidor Push-Pull mediante el bus de cd; el filtro capacitivo ayuda a disminuir el rizo de voltaje del bus de cd; además, este elemento almacena la energía utilizada para realizar la compensación de potencia reactiva. Los transistores Q_1 y Q_2 conmutan de manera complementaria gracias a una señal cuadrada de alta frecuencia, lo cual permite convertir un voltaje de cd en un voltaje de ca en alta frecuencia, para pasarlo a través del TAF y así poder elevar dicha señal a un nivel deseado, debido a la relación de transformación del transformador. El cicloconvertidor toma la señal de voltaje de ca en alta frecuencia proveniente del devanado secundario (v_s) del TAF; utilizando el esquema de modulación propuesto, se produce una señal de voltaje con su componente fundamental a la frecuencia de la red y una componente de alta frecuencia al doble de la frecuencia usada en el convertidor Push-Pull. La inductancia L , sirve para acoplar la señal de voltaje de la salida del convertidor con la red eléctrica. Además el valor de L determina la magnitud del rizo de corriente y la cantidad de potencia reactiva que el sistema va a ser capaz de compensar.

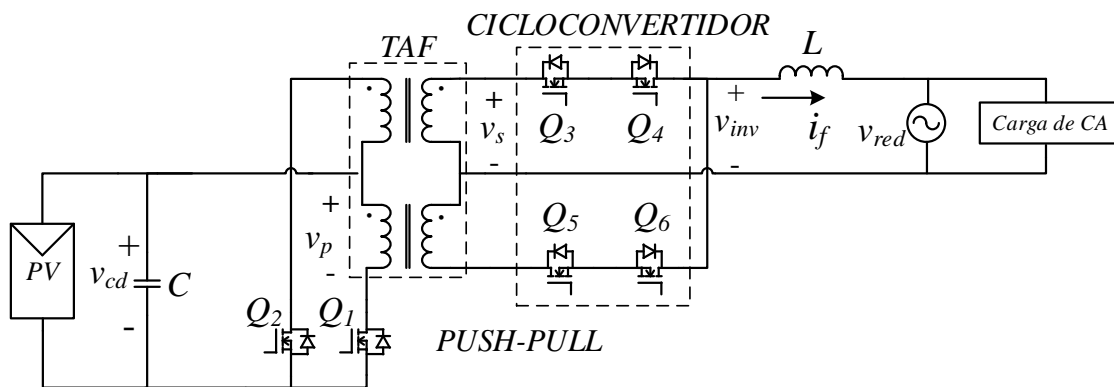


Figura 2. Diagrama del circuito del inversor bidireccional propuesto

i. Modelo matemático

Para obtener el modelo del inversor, primero se realizó el modelo conmutado del mismo el cual se basa en funciones de conmutación. Posteriormente se obtiene el modelo promediado, el cual permite utilizar una estrategia de control lineal ya que el modelo no sería discreto.

a. Modelo conmutado

Para obtener el modelo conmutado del inversor, se redibuja el diagrama de la Figura 2, sustituyendo los transistores Q_1 y Q_2 por los interruptores S_1 y S_2 , los transistores Q_3 y Q_4 se representan por el interruptor bidireccional S_3 , y Q_5 y Q_6 por S_4 . Los interruptores S_1 y S_2 conmutan de manera complementaria al igual que los interruptores S_3 y S_4 . Las pérdidas de potencia en el inversor se representan por la resistencia (R). El circuito equivalente con estas modificaciones se muestra en la Figura 3.

Para modelar el inversor, se construyó una tabla de verdad usando corrientes y voltajes, los cuales expresan el comportamiento del inversor y se muestran en la TABLA II. El voltaje v_{cd} representa el voltaje en el bus de cd, i_{pv} la corriente que aporta el arreglo fotovoltaico, i_{in} la corriente de entrada al convertidor Push-Pull, v_{inv} el voltaje a la salida del inversor (bus de ca) e i_f la corriente de inyección a la red. Con el propósito de simplificar términos, la relación de transformación del TAF se renombra como $n = \frac{N_2}{N_1}$.

TABLA II. TABLA DE VERDAD PARA OBTENER EL MODELO CONMUTADO

<i>Elementos de conmutación</i>				<i>Corrientes y voltajes en el circuito</i>	
S_1	S_2	S_3	S_4	v_{inv}	i_{in}
0	1	0	1	nv_{cd}	ni_f
0	1	1	0	$-nv_{cd}$	$-ni_f$
1	0	0	1	$-nv_{cd}$	$-ni_f$
1	0	1	0	nv_{cd}	ni_f

"1" interruptor cerrado, "0" interruptor abierto.

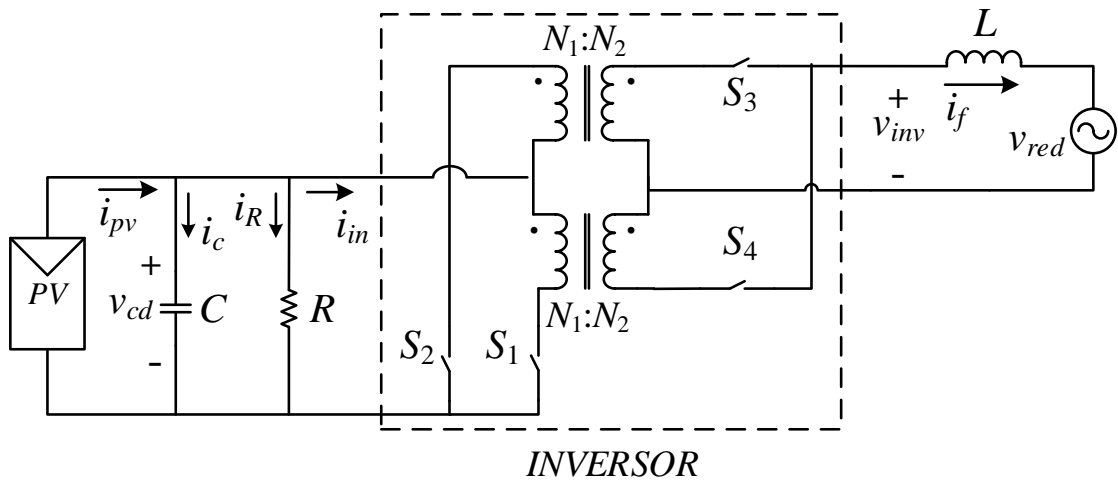


Figura 3. Diagrama del circuito equivalente del inversor utilizando interruptores

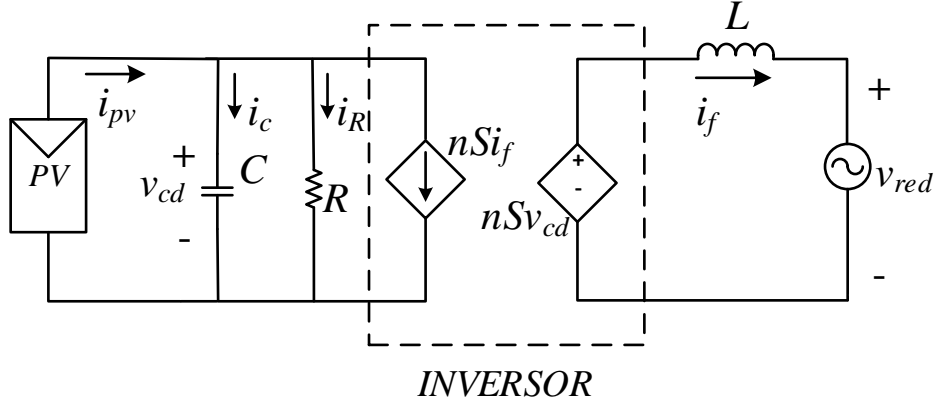


Figura 4. Circuito equivalente del modelo conmutado

El comportamiento del voltaje y la corriente en el inversor, utilizando las funciones de conmutación basadas en la TABLA II se expresa de la siguiente manera:

$$v_{inv} = n(S_1 - S_2)(S_3 - S_4)v_{cd} = nSv_{cd} \quad (1)$$

$$i_{in} = n(S_1 - S_2)(S_3 - S_4)i_f = nSi_f \quad (2)$$

La ecuación (1) describe la señal de voltaje de salida del inversor y (2) la corriente de entrada al inversor. Representando (1) y (2) como fuentes de voltaje y corriente dependientes y añadiendo los elementos restantes de la Figura 3, el diagrama del modelo conmutado queda expresado en la Figura 4.

Analizando el circuito equivalente de la Figura 4, se obtienen las expresiones (3) y (4) las cuales representan las dinámicas del voltaje en el capacitor C y de la corriente en el inductor L respectivamente para el modelo conmutado.

$$\frac{dv_{cd}}{dt} = \frac{1}{C} \left(i_{pv} - \frac{v_{cd}}{R} - nSi_f \right) \quad (3)$$

$$\frac{di_f}{dt} = \frac{1}{L} (nSv_{cd} - v_{red}) \quad (4)$$

b. Modelo promediado

Para obtener el modelo promediado del inversor, se aplica el operador de promediado de (5) a la función de conmutación S de (3) y (4).

$$\tilde{x}(t) = \frac{1}{T} \int_{t-T}^t x(\tau) d\tau \quad (5)$$

El promedio de la función de conmutación S se denota como u y se sustituye dicha función por su promedio en (3) y (4), entonces el modelo promediado del inversor se expresa de la siguiente forma:

$$\frac{dv_{cd}}{dt} = \frac{1}{C} \left(i_{pv} - \frac{v_{cd}}{R} - nu i_f \right) \quad (6)$$

$$\frac{di_f}{dt} = \frac{1}{L} (nu v_{cd} - v_{red}) \quad (7)$$

ii. Dimensionamiento de elementos pasivos

El inversor bidireccional con enlace en alta frecuencia, realiza dos tareas de manera simultánea: la primera, el inversor lleva a cabo la inyección de potencia activa a la red eléctrica desde los paneles fotovoltaicos; la segunda, el inversor realiza la compensación de potencia reactiva. El dimensionamiento de los elementos pasivos (capacitor C e inductor L) se lleva a cabo tomando en cuenta el análisis del flujo de potencia que se desarrolla en [21].

a. Dimensionamiento del inductor de acoplamiento

Para llevar a cabo el dimensionamiento del inductor L se consideró el modelo promediado del inversor, y se utilizó la representación fasorial del circuito de la Figura 5. La señal de voltaje a la salida del inversor, tiene un ángulo de fase (α) con respecto a la red eléctrica y una amplitud V_m . El voltaje de la red está dado por $v_g = V_p \cos(\omega t)$, donde V_p es la magnitud y ω es la frecuencia angular de v_g .

Haciendo el análisis en el circuito de la Figura 5, se obtiene la expresión para la corriente i_f y se presenta en la ecuación (8).

$$I_f = \frac{V_m \cos \alpha + jV_m \sin \alpha - V_p}{j\omega L} \quad (8)$$

De la expresión para la potencia compleja $S = VI_f^*$ se obtienen las ecuaciones para la potencia activa y reactiva, las cuales se denotan por (9) y (10) respectivamente.

$$P = \frac{V_m V_p}{2\omega L} \sin(\alpha) \quad (9)$$

$$Q = \frac{V_m V_p(\alpha)}{2\omega L} \cos(\alpha) - \frac{V_p^2}{2\omega L} \quad (10)$$

Despejando L en (9), se obtiene la expresión para dimensionar el inductor de acoplamiento (11), la cual depende de la potencia activa y reactiva que se quiera manejar.

$$L = \frac{V_m V_p \sin(\alpha)}{2\omega P} \quad (11)$$

Donde: $\alpha = \arcsin \left(-\frac{PV_p}{V_m \sqrt{Q^2 + P^2}} \right) - \arctan \left(\frac{-P}{Q} \right)$.

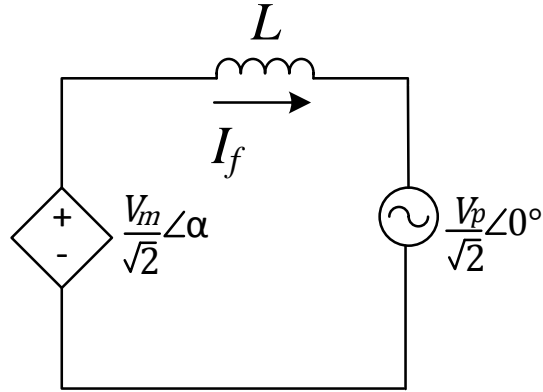


Figura 5. Circuito equivalente para el análisis del flujo de potencia

b. Dimensionamiento del capacitor

El diseño del capacitor se basó en el diagrama que representa el lado de corriente directa de la Figura 6. Aplicando la ley de corrientes Kirchoff se obtiene la ecuación que denota la corriente en el capacitor y está dada por:

$$i_C = i_{pv} - i_R - nui_f \quad (12)$$

Desarrollando (12) se obtiene la expresión de la dinámica del voltaje en el capacitor, la cual se presenta a continuación:

$$\frac{dv_{cd}}{dt} = \frac{1}{C}(i_{pv} - i_R - nui_f) \quad (13)$$

Considerando $u = m \cos(\omega t + \alpha)$ e $i_f = I_p \cos(\omega t + \phi)$, donde m es el índice de modulación, I_p es la magnitud de i_f y ϕ es el ángulo de fase con respecto a v_g .

Para simplificar el análisis, se hicieron las siguientes aproximaciones: $\alpha \approx \phi \approx 0$, las pérdidas en el convertidor no fueron tomadas en cuenta y la corriente que entrega el arreglo fotovoltaico fue considerada constante.

Entonces tomando en cuenta las consideraciones anteriores y desarrollando (13), se obtiene la expresión para dimensionar el capacitor (14).

$$C = \frac{nmI_p}{2\omega\Delta v_{cd}} \quad (14)$$

Donde Δv_{cd} es el rizo de voltaje pico-pico.

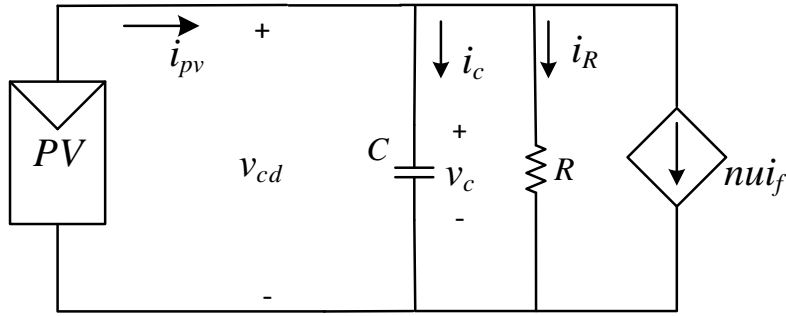


Figura 6. Circuito equivalente del lado de corriente directa del inversor

Para que exista la máxima transferencia de potencia capacitiva, el índice de modulación debe ser igual a 1 ($m=1$). Considerando $S = VI^* = \frac{V_P I_P \cos(\phi)}{2} - j \frac{V_P I_P \sin(\phi)}{2}$, los valores máximos de potencia activa y potencia reactiva que puede manejar el sistema, están dados por:

$$P_{\max} = \frac{V_P I_P}{2} \cos(\phi) \quad (15)$$

$$Q_{\max} = \frac{V_P I_P}{2} \sin(\phi) \quad (16)$$

Despejando I_p en (15) y (16), y sustituyendo en (14), se obtienen dos expresiones para dimensionar el capacitor (17) y (18).

$$C = \frac{n P_{\max}}{\omega \Delta v_{cd} V_P \cos(\phi)} \quad (17)$$

$$C = \frac{n Q_{\max}}{\omega \Delta v_{cd} V_P \sin(\phi)} \quad (18)$$

Donde: $\phi = \tan^{-1} \left(\frac{Q_{\max}}{P_{\max}} \right)$ y al igual que las expresiones del inductor, estas también dependen directamente de la potencia activa y reactiva que se quiera manejar en el inversor.

iii. Estrategia de control

iv. Esquema de modulación

v. Resultados de simulación

- vi. Implementación
 - a. Composición del sistema completo
 - b. Diseño del transformador de alta frecuencia
 - c. Resultados prácticos

III. CONCLUSIÓN

TRABAJOS FUTUROS

REFERENCIAS

- [1] H.-J. Chiu, Y.-K. Lo, C.-Y. Yang, S.-J. Cheng, C.-M. Huang, C.-C. Chuang, M.-C. Kuo, Y.-M. Huang, Y.-B. Jean, and Y.-C. Huang, "A module-integrated isolated solar microinverter," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 60, no. 2, pp. 781–788, 2013.
- [2] A. G. Bhuiyan, K. Sugita, A. Hashimoto, and A. Yamamoto, "InGaN solar cells: Present state of the art and important challenges," *IEEE J. Photovoltaics*, vol. 2, no. 3, pp. 276–293, 2012.
- [3] S. B. Kjaer, J. K. Pedersen, and F. Blaabjerg, "A review of single-phase grid-connected inverters for photovoltaic modules," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 41, no. 5, pp. 1292–1306, 2005.
- [4] "Inventario Nacional de Energías Renovables." [Online]. Available: <http://inere.energia.gob.mx/publica/version3.2/>.
- [5] "Solar and Wind Energy Resource Assessment." [Online]. Available: https://maps.nrel.gov/swera/?visible=swera_dni_nasa_lo_res&opacity=50&extent=18.17,27.64,4.34,43.79#/?aL=we1q1F%255Bv%255D%3Dt&bL=groad&cE=0&IR=0&mC=46.195042108660154%2C-76.2890625&zL=2.
- [6] F. Blaabjerg, K. Ma, and Y. Yang, "Power Electronics for Renewable Energy Systems – Status and Trends," pp. 25–27, 2014.
- [7] N. D. Marks, T. J. Summers, and R. E. Betz, "Reactive Power Requirements for Cascaded H-Bridge Photovoltaic Systems," no. 1, pp. 2219–2225.
- [8] Y. Yang, H. Wang, and F. Blaabjerg, "Reactive power injection strategies for single-phase photovoltaic systems considering grid requirements," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 50, no. 6, pp. 4065–4076, 2014.
- [9] J. Ma, S. Lu, P. V. Etingov, and Y. V. Makarov, "Evaluating the impact of solar generation on balancing requirements in Southern Nevada system," *IEEE Power Energy Soc. Gen. Meet.*, pp. 1–9, 2012.

- [10] S. Capparella and M. C. Falvo, "Secure Faults Detection for Preventing Fire Risk in PV Systems," 2014.
- [11] J. Yuventi, "DC electric arc-flash hazard-risk evaluations for photovoltaic systems," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 29, no. 1, pp. 161–167, 2014.
- [12] J. C. Hernández and P. G. Vidal, "Guidelines for protection against electric shock in PV generators," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 24, no. 1, pp. 274–282, 2009.
- [13] J. M. Carrasco, L. G. Franquelo, J. T. Bialasiewicz, S. Member, E. Galván, R. C. P. Guisado, S. Member, M. Ángeles, M. Prats, J. I. León, and N. Moreno-alfonso, "Power-Electronic Systems for the Grid Integration of Renewable Energy Sources : A Survey," *Ieee Trans. Ind. Electron.*, vol. 53, no. 4, pp. 1002–1016, 2006.
- [14] H. Keyhani and H. A. Toliyat, "Single-stage multistring PV inverter with an isolated high-frequency link and soft-switching operation," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 29, no. 8, pp. 3919–3929, 2014.
- [15] M. Amirabadi, A. Balakrishnan, H. A. Toliyat, and W. C. Alexander, "High-frequency AC-link PV inverter," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 61, no. 1, pp. 281–291, 2014.
- [16] W. Zhu, K. Zhou, and M. Cheng, "A bidirectional high-frequency-link single-phase inverter: Modulation, modeling, and control," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 29, no. 8, pp. 4049–4057, 2014.
- [17] F. Berba, D. Atkinson, and M. Armstrong, "A new approach of prevention of DC current component in transformerless grid-connected PV inverter application," *2014 IEEE 5th Int. Symp. Power Electron. Distrib. Gener. Syst. PEDG 2014*, 2014.
- [18] G. Buticchi, G. Franceschini, and E. Lorenzani, "Compensation strategy of actual commutations for PV transformerless grid-connected converters," *19th Int. Conf. Electr. Mach. ICEM 2010*, 2010.
- [19] S. Kalaschnikow, S. Hansen, L. Asiminoaei, and H. G. Moos, "Active compensation of harmonics in industrial applications," *2007 9th Int. Conf. Electr. Power Qual. Util. EPQU*, 2007.
- [20] A. Symonds and M. Laylabadi, "Cycloconverter Drives In Mining Applications," *IEEE Ind. Appl. Mag.*, no. November-December, pp. 36–46, 2015.
- [21] J. Perez Ramírez, "Multilevel converters application to static reactive power compensator STATCOM," Universidad Autónoma de San Luis Potosí, 2012.