

DESARROLLO DE UNA ESTRATEGIA DE MODULACION BASADO EN CONTROL PREDICTIVO APLICADO EN SISTEMAS CONECTADOS A LA RED ELÉCTRICA

*DEVELOPMENT OF A MODULATION STRATEGY BASED ON
PREDICTIVE CONTROL APPLIED TO GRID-CONNECTED SYSTEM*

Rubén Alain Govinda Salazar Ortiz

Tecnológico Nacional de México / IT de Celaya, México
alaingovinda@gmail.com

Héctor Juan Carlos López Tapia

Tecnológico Nacional de México / IT de Celaya, México
hector.lopez@itcelaya.edu.mx

Recepción: 29/abril/2020

Aceptación: 29/octubre/2020

Resumen

Se presenta una estrategia de modulación basada en técnicas de control predictivo, la cual es implementada en un inversor monofásico sin transformador en modo común conectado a la red eléctrica; dicha estrategia, se conforma de un algoritmo que actúa de acuerdo con la toma de decisiones basadas en la comparación de las señales de referencia y la respuesta completa del sistema. Se pretende obtener una intensidad de corriente de salida que se encuentre con el mismo ángulo de fase con la tensión de la red ante cambios de carga resistiva y de valores de referencia. Por otra parte, se desea que esta modulación sea igualmente efectiva ante cargas reactivas no lineales.

Palabras clave: Carga resistiva, Control predictivo, Inversor monofásico sin transformador, Respuesta completa.

Abstract

A modulation strategy based in predictive control techniques is presented, which is implemented in a Transformerless Common-Mode Current-Source Inverter Grid-Connected. The strategy is conformed by an algorithm that responds according to the decision making between reference signals and the complete response of the

system. This work seeks to obtain an output signal of current in the same phase than the voltage grid which responds on resistive loads and reference values changes. Finally, it is desired to obtain same performance. Even with non-linear reactive loads.

Keywords: *Complete response, Predictive control, resistive load, Transformerless Single Phase Inverter.*

1. Introducción

Debido al considerable incremento de la demanda global de la energía eléctrica en las últimas décadas, se ha prestado demasiado interés en el desarrollo de sistemas que involucren fuentes de energía renovable que sean favorables con el medio ambiente [Arab, Kedjar, Javadi y Al-Haddad, 2018]. Entre estos, los sistemas solares de energía, atraen la mayor atención por ser fuentes limpias, abundantes y libre de emisiones [Luo, Chen, Shuai y Tu, 2013]; siendo los paneles fotovoltaicos (PV) unos de los más importantes empleados en la generación de energía eléctrica [Arab et al., 2018]. En la actualidad, los sistemas PV conectados a la red eléctrica se han convertido en tendencia, pero su implementación conlleva a una serie de requerimientos importantes; tales como, eficiencia, confiabilidad, calidad de la energía, entre otros [Shen, Zhao y Wang, 2017]. Los inversores son dispositivos utilizados en los sistemas PV para la conversión de la tensión de corriente continua de salida de los paneles a una tensión deseada de corriente alterna [Ghaderi, Sarikhani y Hamzeh, 2019].

Existen diversas topologías de diseño de inversores monofásicos; pero en tiempos recientes, los investigadores se han enfocado en los inversores sin transformador ya que son una excelente solución para aplicaciones PV conectadas a la red, debido a su gran eficiencia de conversión, bajo costo, ligeros y de tamaño notablemente menor comparados con aquellos que incluyan un transformador en su diseño [Wang, Xiao, Wei y Chen, 2019]. Sin embargo, una de las preocupaciones en la implementación de inversores sin transformador es el surgimiento de una corriente de fuga; la cual, puede circular a través de la capacitancia parasita formada por los paneles solares a tierra física. Por lo tanto, se deben seguir algunos estándares de seguridad con el fin de eludir probables riesgos [Ghaderi, Sarikhani y Hamzeh, 2019].

Se han propuesto diversas Topologías de diseño de inversores sin transformador que mitigan este problema; en [Guo,2017][Liao,cao,Qiu y Xu,2018] [Li et al. 2015] se diseñan topologías con 5 interruptores y en [Li et al. 2015] [Zhang,Sun,Xing y Xing, 2014] [Islam,Mekjilef, 2015] se proponen inversores con 6 interruptores.

Otro reto que se debe afrontar en el diseño de inversores consiste en la modulación. La estrategia de modulación que causa interés en este trabajo es el control predictivo; como se muestra en [Cortes,Wilson,Kouro,Rodriguez y Abu-Rub,2010][Mohapatra y Agarwal, 2019][Judewickz,Gonzalez,Fischer,Martinez y Carrica, 2018][Castelló,Espí y Garcia, 2016] donde su investigación se basa en ecuaciones en diferencias del sistema.

En este artículo, se propone una estrategia de modulación fundamentada en técnicas de control predictivo; dicha estrategia, se basa en la respuesta completa del inversor monofásico y del filtro de salida. La topología utilizada es la que se presenta en [López, Rodríguez, Guo, Vázquez y Carrillo, 2018]. El objetivo del presente trabajo consiste en controlar la inyección de la corriente aplicada a la red eléctrica que permita alcanzar la estabilidad, una buena respuesta dinámica; y a su vez, obtener una baja Distorsión Armónica (THD) y un factor de potencia (FP) cercano a la unidad. Para finalizar, se presentan y se razonan los resultados obtenidos mediante simulación ante cambios de referencia y de carga.

2. Métodos

El método utilizado para la realización del trabajo de investigación se basa en la selección de la topología existente; Conocer los modos de operación del inversor, obtener el modelo matemático de los subcircuitos creados por cada modo de operación y del filtro de salida, Desarrollar el algoritmo de modulación y finalmente, verificar el funcionamiento del inversor por medio de simulación. A continuación, se describe cada uno de los pasos mencionados.

Topología

En la figura 1 se muestra la topología del inversor implementada en este trabajo propuesta en [López et al., 2018]. Consiste en un inversor con un filtro de salida de

segundo orden, el cual es alimentado por una fuente de poder creada por un sistema PV y el cual se encuentra interconectado a la red eléctrica en modo común; dicho convertidor consta de un arreglo de cinco interruptores (S) unidireccionales con su respectivo diodo en serie (D) y un inductor (L) que suministra la corriente requerida para la operación del inversor. Cabe mencionar, que a cada inductor se le considera su resistencia en serie para el análisis del modelado matemático del sistema.

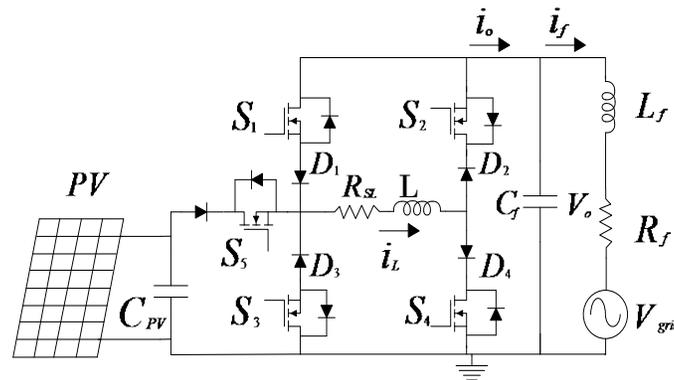


Figura 1 Topología del inversor empleado.

Modos de operación

El presente inversor se conforma principalmente por cinco modos de operación, tal y como se expone en [López et al., 2018]. La tabla 1 exhibe los modos de operación definidos a través de la activación de los interruptores (donde un cero corresponde a interruptor apagado y uno corresponde a interruptor encendido); así como la condición del inductor L con respecto a la corriente (i_L) inyectada al filtro. De manera resumida, se puede inferir que en el modo de operación 1; la corriente que circula a través del inductor L se mantiene constante debido a la desconexión del inductor con la fuente de alimentación y la red eléctrica.

Tabla 1 Modos de operación del inversor.

Modo de operación	S1	S2	S3	S4	S5	Condición de i_L en L
1	1	1	0	0	0	Circulación
2	0	0	0	1	1	Carga
3	0	1	0	0	1	Carga
4	0	1	1	0	0	Descarga
5	1	0	0	1	0	Descarga

En el modo de operación 2; el inductor se conecta en paralelo con el sistema PV, provocando un incremento en la corriente (i_L). En el modo de operación 3; el inductor se carga por la fuente de poder e inyecta corriente al filtro y por ende a la red eléctrica. En el modo de operación 4 y 5; el inductor se descarga por la desconexión de la fuente de poder y la inyección de corriente al filtro y a la red eléctrica. Con la única diferencia que en el modo 5, la corriente proporcionada por el inductor circula en sentido contrario.

Filtro de salida

Considerando la corriente (i_o) como la entrada del filtro, y la corriente (i_f) como la salida. La figura 2 muestra el filtro de salida del inversor.

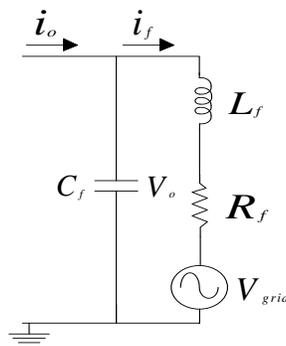


Figura 2 Filtro de salida del inversor.

Cabe destacar, que la solución del circuito es de segundo orden y su respuesta es subamortiguada; por lo tanto, sus raíces son complejas conjugadas y la respuesta se puede expresar con ecuación1 [Fraile,2012].

$$i_f(t) = e^{-a_p t} (B_1 \cos(w_n t) + B_2 \text{sen}(w_n t)) + i_o(0) \quad (1)$$

Donde:

$$B_1 = i_f(0) - i_o(0) \quad \text{y} \quad B_2 = \frac{v_o - v_{grid} - i_f(0) * R + L * a_p * i_f(0) - L * i_o(0)}{L * w_n}$$

$$a_p = \frac{R_f}{2L_f} : \quad \text{Coeficiente de amortiguamiento.}$$

$$w_o = \frac{1}{\sqrt{L_f * C_f}} : \quad \text{Frecuencia de Resonancia.}$$

$w_n = \sqrt{w_0^2 - a_p^2}$: Frecuencia Natural Amortiguada.

$i_o(0)$: Respuesta forzada

Estrategia de modulación propuesta

La estrategia de modulación se fundamenta en técnicas de control predictivo en base al modelado de los subcircuitos que componen los modos de operación del inversor y del filtro de salida. Consiste en la predicción del comportamiento del sistema en los cinco modos de operación, se calcula la función de costo en cada uno de ellos, se elige la menor y se aplica el modo de operación de dicha función. El proceso comienza con la evaluación de la respuesta completa del inversor y del filtro de salida. En la sección anterior se presentó la solución del filtro de salida, por lo tanto, en la ecuación 2 se presenta la respuesta completa de manera general de la corriente del inductor del inversor.

$$i_L(t) = A + Be^{-\frac{R_{SL}}{L}t} \quad (2)$$

Donde:

$$A = \frac{V_{in} + L i_L(0)}{R_{SL}} \quad B = -A$$

Una vez obtenidas las ecuaciones, se ejecuta el algoritmo del control propuesto mostrado en la tabla 2, donde la corriente de salida se indica como $i_f(t)$; la corriente del inductor L como $i_L(t)$; La tensión del capacitor del filtro como $V_o(t)$, la tensión de la red como $V_{grid}(t)$; Las corrientes medidas se definen como $i_f^*(t)$, $i_L^*(t)$, respectivamente.

El objetivo consiste en muestrear todas las señales involucradas en las ecuaciones 1 y 2, este hecho se debe al requerimiento necesario de un controlador digital para efectuar el algoritmo; una vez muestreadas las señales, se pretende cargar el inductor con el valor de su respectiva referencia propuesta. Una vez alcanzada la corriente deseada en el inductor, este actúa como una fuente de corriente para el filtro; así de esta manera, seleccionar el modo que indique la función de costo. En este estudio, la función de costo representa el error de seguimiento de las corrientes predichas para la siguiente muestra.

Tabla 2 Diagrama de flujo del control propuesto.

Ejecución de pasos del control predictivo	
1.	Se realiza el muestreo de las señales $i_f(t), i_L(t), V_o(t), V_{grid}(t), i_f^*(t), i_L^*(t)$
2.	Se compara $i_L(k)$ con $i_L^*(k)$
3.	Si $i_L(k) = i_L^*(k)$ entonces
4.	Para $i = 1:5$
5.	Obtener $i_f(k + 1), i_L(k + 1)$ del modo i
6.	Aplicar la función de costo $G_{fi} = i_f^*(K + 1) - i_f(k + 1) $
7.	Aplicar la función de costo $G_{Li} = i_L^*(K + 1) - i_L(k + 1) $
8.	Si $i=5$ entonces
9.	Almacena el valor elegido de acuerdo con $G = \min(G_{f1}, G_{f2}, G_{f3}, G_{f4}, G_{f5})$
10.	Si el valor elegido se encuentre entre G_{f1} , y G_{f2} entonces
11.	Almacena el menor de ambos.
12.	Se aplica el $i_f(k + 1)$ del modo seleccionado
13.	Si no
14.	Si el valor elegido se encuentra entre G_{f3} , y G_{f4}
15.	Almacena el menor de ambos
16.	Se aplica el $i_f(k + 1)$ del modo seleccionado
17.	Si $i_L(k) \neq i_L^*(k)$ entonces
18.	Se aplica el $i_f(k + 1)$ del modo 2

3. Resultados

Los resultados de la simulación se obtuvieron con el software PSIM 9.1 y los parámetros utilizados, se obtuvieron de [López et al., 2018]. La tabla 3 muestra la descripción, el símbolo y el valor de los componentes y condiciones empleadas.

Tabla 3 Parámetros de simulación.

Descripción	Símbolo	Valor
Resistencia en serie del inductor de la red	R_{SL}	0.0001 Ω
Inductancia de la red	L	20 mH
Tensión de la red	V_{grid}	170 V
Capacitancia del Filtro	C_f	47 μ f
Inductancia del Filtro	L_f	16 mH
Resistencia en serie del inductor del filtro	R_f	0.001 Ω
Fuente de tensión de entrada	PV	170 Vp

La figura 3 muestra la tensión de la red atenuada diez veces; la corriente del inductor de entrada, el valor de referencia del inductor de entrada y la corriente inyectada a la red desde $t=0$. La perturbación inicial, se debe a que la técnica de control tiene como prioridad inyectar corriente al inductor de entrada con el fin de alcanzar el valor de referencia determinado; en este caso 14 amperes. Una vez alcanzado dicho

valor, en la figura 4 se puede apreciar que la corriente inyectada a la red eléctrica en estado estacionario se mantiene en fase con la tensión de red, con un FP de 0.9998 y una THD de 0.33%.

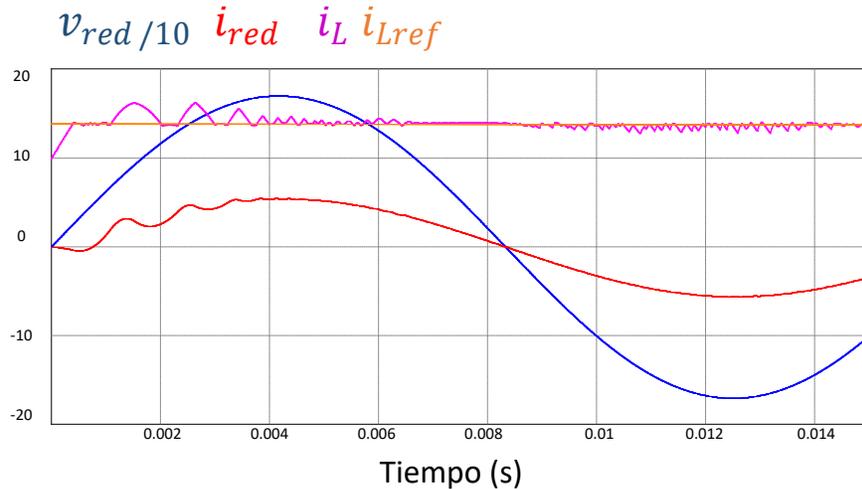


Figura 3 Puesta en operación del sistema.

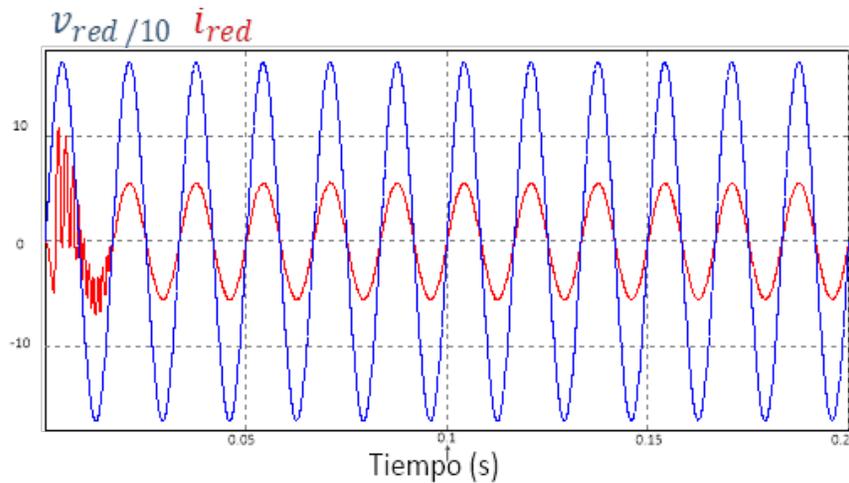


Figura 4 Puesta en operación y estado estable del sistema.

En la figura 5 se observa el comportamiento del sistema, donde se aprecia que la corriente de salida sigue a la corriente de referencia de 11 Amperes. Siendo de esta manera, como se logra mantener en fase a la corriente de salida junto con la tensión de la red.

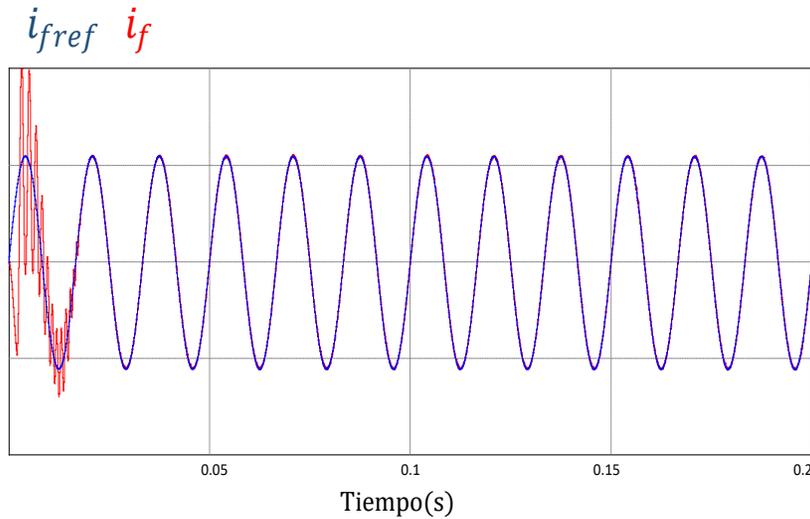


Figura 5 Corriente de salida y de referencia.

Finalmente, en la figura 6 se muestran las corrientes de referencia y las corrientes del inductor junto con la salida del filtro. Se ejemplifica la respuesta dinámica del sistema ante cambios de carga y de referencia. Se puede apreciar que la respuesta dinámica es lenta ante perturbaciones por la naturaleza del filtro, pero tiene un comportamiento estable. En esta prueba, la corriente de referencia deseada en la red oscila entre dos y tres amperes; de igual manera, la carga varía de 15 a 30 ohms.

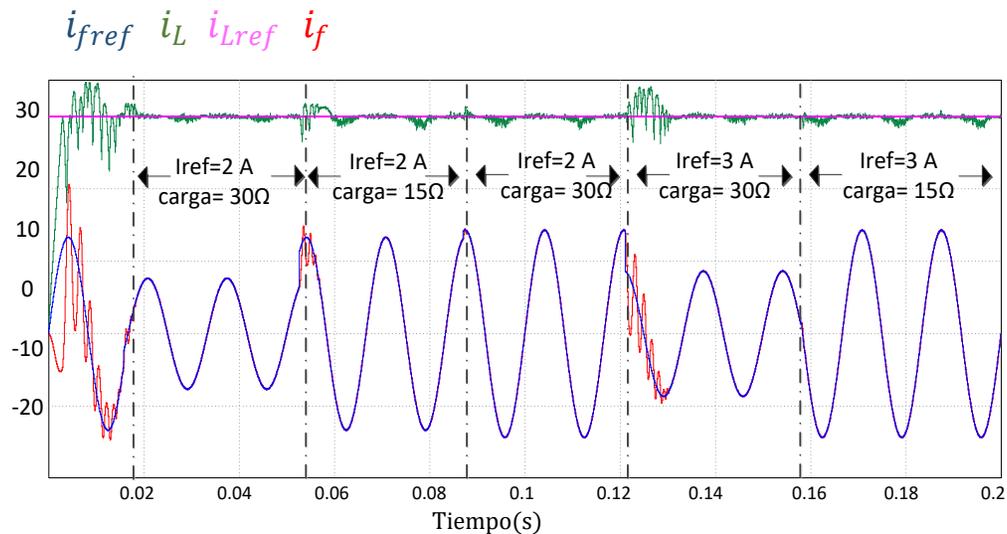


Figura 6 Respuesta dinámica del sistema ante cambios de carga y referencia.

En la tabla 4 se presenta una comparación de las técnicas convencionales de control presentadas en [Yusof, Ahmad,2017] y en [Pokharel, Hildebrandt, Ho y He,2018] con la descrita en este trabajo en el que incluye la Distorsión Armónica y la Respuesta Dinámica.

Tabla 4 Comparativa de rendimiento entre técnicas de control.

Parámetros	Proporcional-Integral	Proporcional-Resonante	Propuesto
Tiempo de estabilización	2.82 ms	2.06 ms	1.66 ms
THD	Entre 1.5 a 2%	Entre 1 a 1.5%	0.33%

Se observa que la técnica de control propuesta ofrece un mejor rendimiento que las técnicas convencionales mencionadas en los artículos revisados.

4. Discusión

Los resultados de la implementación del control predictivo propuesto en el presente artículo indican que la respuesta del sistema cumple con un alto factor de potencia, una baja Distorsión Armónica y estabilidad; también se observa que la respuesta es lenta debido a la naturaleza del filtro de segundo orden; pero, aun así, es más rápida que algunas técnicas de control de artículos revisados. Una de las desventajas de utilizar las técnicas de control predictivo, consta en el desconocimiento matemático que el control clásico si puede brindar; aunque se ha convertido en tendencia por su efectividad.

Es importante mencionar, que el objetivo del presente trabajo se centra en la estrategia de modulación propuesta y no en todas las consideraciones del inversor; por lo que, al realizar las pruebas, se empleó una fuente de voltaje constante, en vez de un arreglo PV y, por lo tanto, no se consideraron algoritmos relacionados con el seguidor del punto de máxima potencia (MPPT). De la misma manera, se realizaron pruebas de simulación únicamente con cargas resistivas. El análisis y las pruebas con cargas reactivas o cargas reactivas no lineales pueden ser consideradas para trabajos futuros.

Para finalizar, cabe destacar que esta técnica de modulación empleada puede adaptarse a otros sistemas de conversión fotovoltaico.

5. Bibliografía y Referencias

- [1] Arab, N., Kedjar, B., Javadi, A., & Al Haddad, K. (2018). A Multifunctional Single-Phase Grid Integrated Residential Solar PV Systems based on LQR Control. *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 55, no.2, pp. 2099-2108.
- [2] Luo, A., Chen, Y., Shuai, Z., & Tu, C. (2013). An improved Reactive Current Detection and Power Control Method for Single-Phase Photovoltaic Grid-Connected DG System. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 28, no.4, pp. 823-831.
- [3] Shen, K., Zhao, D., Zhao, G., & Wang, S. (2017). Photovoltaic Supplied Grid-Connected Modular Multilevel Converter with Active Power Injection and Reactive Power Compensation Capability. *IECON 2017, 43rd Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, pp. 7837-7842.
- [4] Ghaderi, M., Sarikhani, A., & Hamzeh, M. (2019). A New Transformerless Common-Ground Single-Phase Inverter for Photovoltaic Systems. *10th International Power Electronics conference*, pp. 259-264.
- [5] Wang, X., Xiao, H., Wei, Z., & Chen, C. (2019). An Improved Transformerless Photovoltaic Grid-Connected Soft-Switching Inverter. *14th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications*, Pp. 2338-2343.
- [6] Li, H., Yangbin, Z., Bo, Z., Trillion, Q., Ruixiang, H., & Zhichang, Y. (2019). An Improved H5 Topology with low Common-Mode Current for Transformerless PV Grid-Connected Inverter. *IEEE Transaction on Power Electronics*, vol.34, no.2, pp. 1254-1265.
- [7] Liao, Z., Cao, C., Qiu, D., & Xu, C. (2019). Single-Phase Common-Ground-Type Transformerless PV Grid-Connected Inverters. *IEEE Access*, vol.7, pp. 63277- 63287.
- [8] Guo, X., A Novel CH5 Inverter for Single-Phase (2017). Transformerless Photovoltaic System Applications. *IEEE Transactions on Circuits Systems II: Express Briefs*, vol. 64, no.10, pp. 1197-1201.
- [9] López, H., Rodríguez, J., Guo, X., et al. (2018). Transformerless Common-Mode Current-Source Inverter Grid-Connected for PV Applications. *IEEE Access*, vol.6, pp. 62944-62953.

- [10] Li, W., Gu, Y., Cui, W., He, X., & Xia, C. (2015). Topology Review and Derivation Methodology of Single-Phase Transformerless Photovoltaic Inverters for Leakage Current Suppression. *IEEE Transaction on Industrial Electronics.*, vol. 62, no. 7, pp. 4537-4551.
- [11] Islam, M., & Mekhilef, S. (2015). H6-Type Transformerless Single-Phase Inverter for Grid-Tied Photovoltaic System. *IET Power Electronics.*, vol. 8, no.4, pp. 636-644.
- [12] Zhang, L., Sun, K., Xing, Y., & xing, M. (2014). H6 Transformerless Full-Bridge PV Grid-Tied Inverters. *IEEE Transactions on Power Electronics.*, vol.29, no.3, pp. 1229-1238.
- [13] Judewickz, M.G., Gonzalez, S.A., Fischer, J.R., Martinez., & Carrica, D.O. (2018) Inverter-Side Current Control of Grid-Connected Voltage Source Inverters with LCL Filter based on Generalized Predictive Control. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics.*, vol. 6, no.4, pp.1732-1743.
- [14] Mohapatra, S. R., & Agarwal, V. (2018). Model Predictive Controller with Reduced Complexity for Grid Tied Multilevel Inverters. *IEEE Transactions on Industrial Electronics.*, vol.66, no.11, pp.8851-8855.
- [15] Castello, J., Espi, J. M., & García-Gil, R. (2016). A new Generalized Robust Predictive Current Control for Grid-Connected Inverters Compensates Anti-Aliasing Filters Delay. *IEEE Transactions on Industrial Electronics.*, vol. 63, no.7, pp.4485-4494.
- [16] Cortés, P., Wilson, A., Kouro, S., Rodríguez, J., & Abu-Rub, H. (2010). Model Predictive Control of Multilevel Cascaded H-Bridge Inverters. *IEEE Transactions on Industrial Electronics.*, vol. 57, no.8, pp.2691-2699.
- [17] Yusof, N., & Ahmad, A. Z (2017). Single Phase Grid-Connected of PV Inverter using PR current controller. *IEEE Conference on Systems, Process and Control.*, pp. 117-121.
- [18] Pokharel, M., Hildebrandt, N., Ho, & He. Y. (2018). A fast-Dynamic Unipolar Switching Control Scheme for Single Phase Inverters in DC Microgrids. *IEEE Transactions on Power Electronics.*, vol. 34, no.1, pp. 916-927.