

Modulación-Demodulación en amplitud para el proceso de sincronía eléctrica

RUEDA-GERMÁN, Clementina^{†*}, RIVAS-CAMBERO, Iván de Jesús, ARROYO-NÚÑEZ, José Humberto y ELIZALDE-CANALES, Francisca Angélica

Departamento de Energías Renovables, Universidad Politécnica de Tulancingo

Recibido 24 de Abril, 2017; Aceptado 19 de Junio, 2017

Resumen

Los requisitos para la interconexión entre una fuente de generación de energía distribuida a pequeña escala y el sistema eléctrico nacional, van ligados con la sincronía eléctrica; un proceso en el que una señal de referencia interna formada por un algoritmo de control, permite que la señal de salida de un convertidor de potencia opere en sincronismo con la componente fundamental de la red. La señal conformada mediante el convertidor deberá permanecer en un rango de frecuencia entre 59.5 a 60.5 Hz sintonizada en fase. La transformada de Hilbert es una herramienta matemática que sirve para detectar la envolvente compleja de una señal modulada por una portadora, empleada en sistemas de telecomunicaciones. En este trabajo se adapta un demodulador de amplitud basado en la transformada de Hilbert, una señal de referencia es modulada empleando una senoidal de mayor frecuencia, para después demodularla y obtener su envolvente, esta contiene información de fase y frecuencia con el fin de fortalecer el proceso de enganche de un PLL (Phase Locked Loop), siendo este modelo de fácil implementación e idóneo ante cambios abruptos de amplitud, frecuencia y fase, evitando la pérdida de sintonía con la señal de referencia.

Amplitud, modulación, Transformada de Hilbert, envolvente, PLL

Abstract

The requirements for the interconnection between a small-scale distributed power generation source and the national electricity system are associated to the electrical synchrony that is a process in which an internal reference signal formed by a control algorithm generates an output signal in a power converter in synchrony with the fundamental component of the electrical grid. The signal generated by the power converter must remain in a frequency range between 59.5 to 60.5 Hz, tuned in phase. The Hilbert transform is a mathematical tool that is used to detect the complex envelope of a signal modulated by a carrier; it is used in telecommunications systems. In this work, an amplitude demodulator based on the Hilbert transform is adjusted, a reference signal is modulated using a higher frequency sine signal, then use a demodulator to obtain the envelope, this contains the phase and frequency information in order to strengthen the PLL (Phase Locked Loop) tune in process, this model is easy to implement and also suitable for abrupt changes in amplitude, frequency and phase, avoiding the loss of tuning with the reference signal.

Amplitude, modulation, Hilbert Transform, envelope, PLL

Citación: RUEDA-GERMÁN, Clementina, RIVAS-CAMBERO, Iván de Jesús, ARROYO-NÚÑEZ, José Humberto y ELIZALDE-CANALES, Francisca Angélica. Modulación-Demodulación en amplitud para el proceso de sincronía eléctrica. Revista de Ingeniería Innovativa 2017. 1-2:9-16

*Correspondencia al Autor (Correo Electrónico: clementina.rueda@upt.edu.mx)

† Investigador contribuyendo como primer autor.

Introducción

La liberación del mercado eléctrico contribuye al incremento de la generación distribuida a través del empleo de energías renovables. En México con la publicación de la Ley para el Aprovechamiento de las Energías Renovables y el Financiamiento de la Transición Energética (LAERFTE), se crea la Comisión Reguladora de Energía (CRE); la cual expide un contrato de interconexión, para que casas habitación y pequeños negocios puedan generar su propia energía eléctrica y en caso de tener algún excedente de electricidad, el particular pueda intercambiar energía con la empresa paraestatal proveedora de electricidad, compensándola contra el consumo. Sin embargo la electricidad tiene ciertas características técnicas que le diferencian de otros productos que se compran y se venden en diferentes mercados.

La problemática a la que se enfrentan los instaladores de sistemas fotovoltaicos conectados a red es que deben de considerar aspectos fundamentales de calidad de suministro en el punto de conexión, además, el ángulo de fase del voltaje de la red eléctrica y su frecuencia, contienen información crítica para poder conectar un sistema local de generación de energía con el sistema eléctrico nacional. Con el fin de lograr una interconexión exitosa, existen muchos sistemas empleados en el seguimiento de fase de una señal de referencia entre ellos es posible mencionar el detector de cruce por cero, el Phase Locked Loop (PLL), los detectores de fase basados en referencias estacionarias síncronas (SRF), entre otros.

El ángulo de voltaje de red, sirve como marco de referencia para la sincronía y se determina a través de un PLL el cual tiene como objeto la generación de una señal de salida con amplitud fija y frecuencia coincidente con la entrada, dentro de rango de un margen determinado, pero muestra algunas deficiencias cuando la señal de referencia contiene disturbios, por lo que es necesario incluir técnicas que mejoren el proceso de enganche; la técnica de modulación/demodulación es una propuesta con la que se pretende fortalecer el proceso aun con disturbios.

Existe evidencia fundamental que muchas de las señales naturales pueden ser representadas como moduladores de baja frecuencia que modulan señales portadoras de alta frecuencia. La modulación en amplitud consiste en variar la amplitud de una senoide de acuerdo al mensaje que se desea transmitir, la principal ventaja de modular en AM radica en que es posible recuperar el mensaje (demodular) con un simple detector de envolvente

En este trabajo se propone una técnica de sincronía eléctrica basada en la modulación en amplitud, la detección de su envolvente por medio de la Transformada de Hilbert (TH), la sintonía a través de un PLL y la aplicación de la función de Walsh, con el fin de crear pulsos de sincronía que pudieran ser auxiliares para la inversión de señales de corriente directa a corriente alterna y la posible conexión de sistemas locales de generación de electricidad con el sistema eléctrico, teniendo como resultados el seguimiento de fase ante la presencia de ciertos disturbios eléctricos, mejorando el desempeño comparado con un PLL de segundo grado.

Este documento contiene en la primera sección una breve descripción de la transformada de Hilbert, la cual es empleada en sistemas de telecomunicaciones con el fin de obtener los mensajes inmersos en las ondas de radio, los conceptos referentes a la modulación – demodulación en amplitud, son presentados en la segunda sección, para continuar con el desarrollo, en donde se presenta la técnica empleada con el fin de fortalecer el enganche o sintonía de igual forma se presentan las deficiencias del PLL de segundo orden. En los resultados se muestran los productos obtenidos al simular una falla denominada brinco de fase presente en la señal de referencia.

Transformada de Hilbert

La transformada de Hilbert es también llamada filtro de cuadratura, es una herramienta matemática que permite variar el ángulo de fase de la señal de entrada entre valores de $\pm \pi/2$ de acuerdo al valor de frecuencia, esta acción solo afecta al ángulo de fase sin modificar la amplitud de la señal. Para una señal variable real $x(\tau)$ la transformada Hilbert (H) es definida como se muestra en la ecuación (1); donde P es el valor principal de Cauchy de la integral singular.

$$\hat{x}(t) = H(x) = \frac{P}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x(\tau)}{t-\tau} dt \quad (1)$$

El valor principal de Cauchy es un método que permite asignar valores a ciertas integrales impropias que resultarían en indefinidas.

Un detector de fase de alta resolución puede ser realizado usando el concepto de señal analítica. Una señal analítica se obtiene desde una señal real empleando la transformada de Hilbert.

La transformada discreta de Hilbert es formulada a través de una convolución con una respuesta en frecuencia como en la ecuación (2)

$$H_H(e^{j\Omega}) = \begin{cases} -j & (0 < \Omega < \pi) \\ j & (-\pi < \Omega < 0) \\ 0 & (\Omega = 0) \end{cases} \quad (2)$$

En donde $\Omega = 2\pi f/f_s$, f_s es la frecuencia de muestreo en Hz y $j = \sqrt{-1}$. El valor absoluto de la amplitud es uno para todas las frecuencias diferentes de cero, la fase es -90° para todos los valores positivos y 90° para todas las frecuencias negativas.

Al utilizar el transformador de Hilbert, es posible generar una señal, que es ortogonal con la señal de entrada al aprovechar el hecho que la transformada de Hilbert de la función seno, es la función coseno y viceversa. Por tanto, se puede utilizar para encontrar la fase de la señal de entrada.

En líneas de energía eléctrica los disturbios pueden causar problemas en dispositivos electrónicos por lo que es fundamental el monitoreo en el campo de la calidad de energía, en se realiza la estimación de disturbios haciendo uso de dos métodos diferentes de procesamiento de señales, uno de ellos es el procesamiento de wavelets y el otro es a través de la transformada de Hilbert (TH). La detección de transitorios e interrupciones cortas de energía eléctrica se efectúa usando la transformada de Hilbert, la cual detecta la envolvente de la función original a través del tiempo.

Demodulación

Un sistema de comunicación transmite señales con información a través de un canal que separa el transmisor del receptor.

El término banda base se utiliza para denominar la banda de frecuencias que representa la señal original que lleva la información. La utilización eficiente del canal de comunicación requiere desplazar las frecuencias banda base a otro rango de frecuencias más adecuado para la transmisión. En recepción se realizará el desplazamiento inverso en frecuencia al rango original de banda base. El desplazamiento del rango de frecuencias se consigue mediante un proceso denominado modulación con el que alguna de las características de la portadora se modifica en concordancia con la señal que tiene la información. La señal banda base se denomina señal moduladora y la señal resultante del proceso de modulación se llama modulada. En el extremo receptor se requiere devolver a la señal modulada su forma original, este proceso se denomina demodulación y es el inverso de la modulación. Para generar una señal de AM se emplea la ecuación (3) en donde $c(t)$ es la señal portadora, $m(t)$ la señal en banda base que contiene la información o de referencia, k_a es la constante de sensibilidad en amplitud del modulador.

$$s(t) = c(t)[1 + (k_a m(t))] \quad (3)$$

La portadora es la señal que transporta la información, la envolvente de AM es la forma de la onda modulada, cuando no hay señal modulante, la forma de onda de salida no es más que la señal de la portadora.

La función de un detector de AM es demodular la señal y recuperar o reproducir la información de la fuente original. La señal recuperada debe contener la misma frecuencia que la de información original y tener las mismas características de amplitud relativa.

Desarrollo

Con el fin de observar el desempeño del detector de envolvente, se emplea una señal sintetizada construida a través de Matlab, capaz de generar disturbios de diferentes magnitudes, duración y fase. La señal de prueba o moduladora está compuesta de una señal sinusoidal con una frecuencia de 60 Hz y una amplitud igual a 2 Volts. La modulación en amplitud se muestra en el gráfico 1.

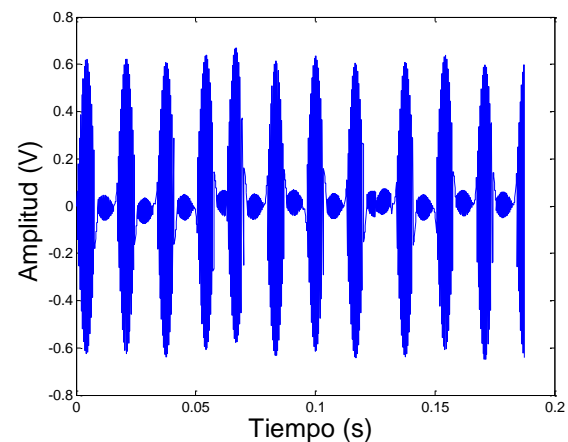


Figura 1 Señal modulada en amplitud

Fuente: Elaboración propia

Para detectar los cambios de la señal de referencia en fase y frecuencia se emplea un sistema de demodulación de la señal modulada, a través de la obtención de la envolvente empleando la transformada de Hilbert, con la cual se procesa la señal analítica en tiempo discreto $X = X_r + i * X_i$ en donde X_i es la transformada de Hilbert de X_r y además, se obtiene la FFT de X_r , estableciendo los elementos de FFT que correspondan al rango de frecuencia $\pi < \omega < 0$, asignándoles un valor de cero y por último, se aplica la inversa de la FFT, extrayendo como resultado la envolvente simple de la señal ya modulada la cual se exhibe en la Figura 2.

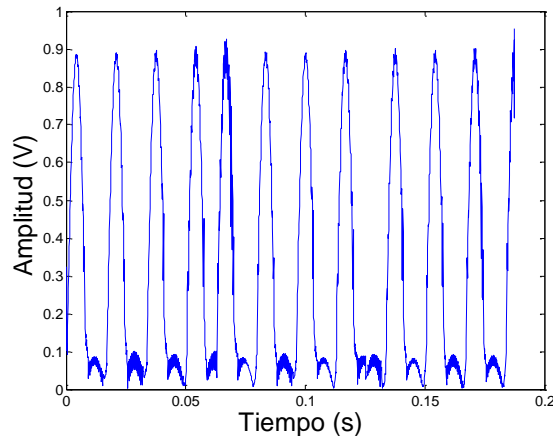


Figura 2 Envolvente de la señal modulada

Fuente: *Elaboración propia*

Con el fin de mantener la sincronía para interconectar sistemas locales de generación de energía eléctrica, cuya frecuencia central es de 60 Hz se fortalece esta propuesta con un PLL de segundo grado modelado mediante software cuya función de transferencia está representada en (4).

$$H(s) = \frac{2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (4)$$

En donde la variable ω_n es la frecuencia natural de oscilación y el coeficiente de amortiguamiento elegido es de $\zeta=0.7$ ya que con este valor el filtro converge rápidamente y no genera un gran sobretiro.

El PLL de segundo grado es suficiente en el proceso de sincronía cuando la señal de referencia no contiene ningún disturbio, como se observa en la Figura 3 en donde una onda sinusoidal, es empleada como referencia, de la cual se obtiene a través de un PLL, el pulso de sincronía (señal cuadrada). Al realizar la comparación visual entre ambas señales, se advierte que se encuentran en sintonía de fase y frecuencia.

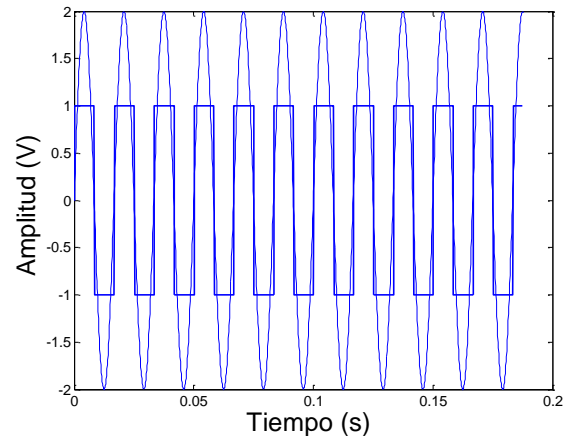


Figura 3 Pulso de sincronía en concordancia con la señal de referencia

Fuente: *Elaboración propia*

Resultados

Algunas veces la red eléctrica está sometida a perturbaciones y fallos desequilibrados; un brinco de fase podría ocurrir si una gran carga es conectada de repente o si existe una falla en la red eléctrica, durante este tipo de fallos, los inversores están expuestos a problemas graves como son: una tensión excesiva del circuito intermedio, pérdida de la sincronización del voltaje de la red, entre otros. Los dos brinco de fase se exponen en la Figura 4 Brincos de fase marcados mediante círculos.

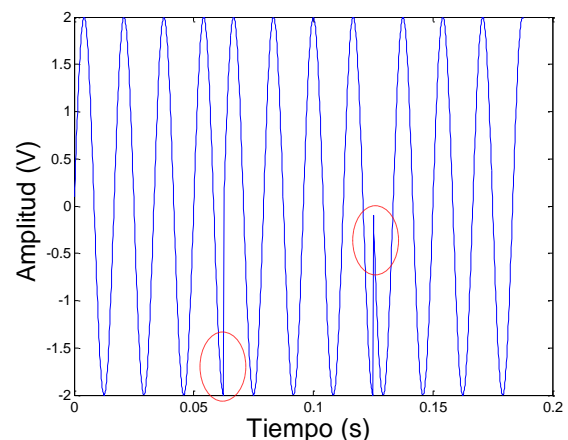


Figura 4 Brincos de fase

Fuente: *Elaboración propia*

Ante saltos de fase, el PLL convencional pierde su estado de enganche, como se observa en la Figura 5, el recuadro indica la zona en donde ocurren las perturbaciones y se pierde la sincronía.

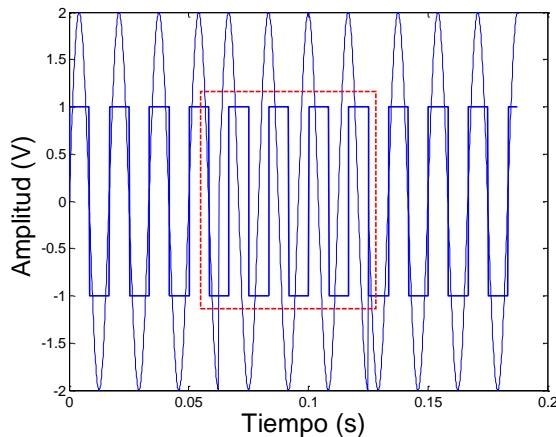


Figura 5 Pérdida de sincronía con PLL convencional

Fuente: Elaboración propia

El proceso de enganche aun con perturbaciones, se fortalece, llevando a cabo la modulación de la señal de referencia y su demodulación a través de la transformada de Hilbert, con el fin de que la envolvente sea tomada como entrada en el PLL, con este paso se consigue que la señal de referencia permanezca en sintonía con la señal de sincronía.

La señal modulada conseguida es expuesta en la Figura 1, la cual fue lograda mediante el proceso de multiplicar la señal de referencia con una portadora de alta frecuencia. De la señal modulada se obtiene la envolvente la cual se muestra en la Figura 6, extrayéndola con la transformada de Hilbert, dicha señal se computa como entrada de un PLL convencional de segundo orden.

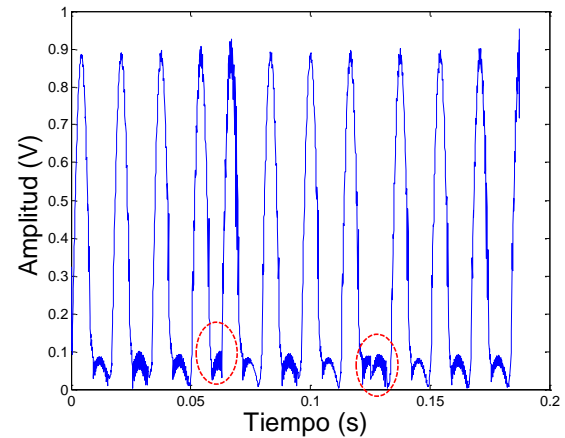


Figura 6 Envolvente de la onda modulada

Fuente: Elaboración propia

El pulso de sincronía y la señal de referencia con salto de fase se observan en la Figura 7. Es notorio que solo hay una pérdida de sincronía en el tiempo en el cual ocurre la perturbación, por un lapso pequeño de tiempo, para después continuar ambas señales en sincronía.

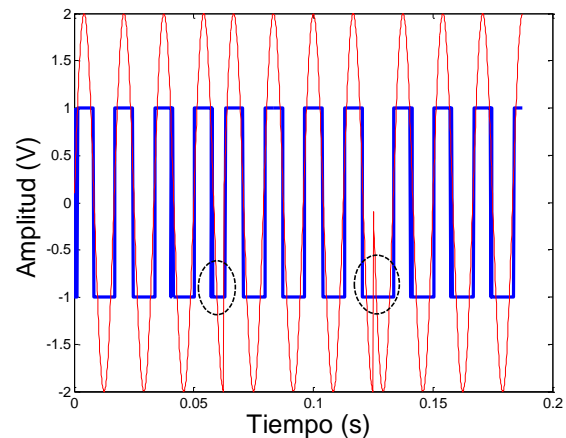


Figura 7 Permanencia de sincronía del modelo propuesto

Fuente: Elaboración propia

Conclusiones

El método de modulación-demodulación presentado para el proceso de sincronía muestra que es posible modular una señal que sirviese de referencia para crear un pulso en concordancia en fase y frecuencia. Mediante la demodulación empleando la transformada de Hilbert, se obtiene una señal denominada envolvente la cual contiene información de fase y frecuencia que sirve como entrada al lazo cerrado de segundo grado denominado PLL, con el objetivo de mejorar la sincronía aun con perturbaciones, aportando una mejoría en el seguimiento ante saltos de fase. Se pretende una implementación en un procesador digital de señales. Los resultados muestran que las fallas en fase de la señal de referencia son percibidas en la modulación y demodulación y al obtener la envolvente la cual ingresa al PLL se obtiene un pulso de sincronía que pierde el enganche solo en el tiempo que dura la perturbación para después continuar sintonizado. Se trabaja en mejoras para que este modelo funcione todas las perturbaciones.

Referencias

- González, R., Jiménez, H. R., & Lagunas, J. (2003). Sistemas fotovoltaicos conectados a la red. *Boletín IEE*, pp. 140-144.
- Aquino, J., Fernández, C., & Corona, L. (2016). Génesis del mercado eléctrico minorista y de baja potencia, con tecnologías de microgeneración renovable en México. *Revista de Investigación y Desarrollo*, 2, pp. 1-19.
- Hernández, J. C., & Medina, A. (2006). Conexión de sistemas fotovoltaicos a la red eléctrica: calidad de suministro. *Sumuntán*, 23, pp.33-44.
- Bobrowska, M., Rafal, K., Jasinski, M., & Kazmierkowski, M. (2011). Grid synchronization and symmetrical components extraction with PLL algorithm for grid connected power electronic converters – a review. *Bulletin of the Polish academy of sciences Technical Sciences*, 59, pp. 485-497.
- Hernández, O., Mina, J., & Claudio, A. (2016). Emulador de Turbina Eólica basado en el Control Vectorial de una Máquina Eléctrica. *Revista de aplicaciones de la Ingeniería*, 3, pp. 117-130.
- Pindado, R. (1997). Lazo por enganche de fase PLL. En *Electrónica analógica integrada* (pp.424-437). Barcelona: S.A. Marcombo.
- Rueda, C., Rivas, I., & Arroyo H. (2015). Simulation of a Software Phase-Locked Loop for Typical Grid Disturbances. *International Journal of Engineering Research and Technology*, 4, pp. 998-1002.
- Schimmel, S. M., & Atlas, L. E. (2005). Coherent Envelope Detection for Modulation Filtering of Speech. *Acoustics, Speech, and Signal Processing. IEEE International Conference*, 1, pp. 221-224.
- Saz, I. & Sanchis, E. (2004). *Fundamentos y Electrónica de las comunicaciones*. Valencia: Universitat de Valencia. Servei de publicacions.
- Behera, R. R., & Thakur, A. N. (2016, March). An overview of various grid synchronization techniques for single-phase grid integration of renewable distributed power generation systems. *Electrical, Electronics, and Optimization Techniques (ICEEOT), International Conference*. pp. 2876-2880.
- Kanwal P. (1996). *Linear Integral Equations: theory and technique*. Boston: Birkhäuser. p. 191

Kumm, M., & Sanjari, M. S. (2008, September). Digital Hilbert transformers for FPGA-based phase-locked loops. *International Conference on Field Programmable Logic and Applications*. pp. 251-256.

Sanabria, T., Camilo, A., Bello, G. & Delby, A. (2013). Análisis y comparación de topologías de PLL para sistemas monofásicos. *Ingenio Magno*, 4, pp. 61-67.

Caciotta, M., Giarnetti, S., Leccese, F., Leonowicz, Z., Rezmer, J., & Janik, P. (2009). Wavelets an Hilbert Transform methods for detection of voltage dips and micro interruptions.

Caciotta, M., Giarnetti, S., Leccese, F., & Leonowicz, Z. (2009). Detection of short transients and interruptions using the Hilbert transform. *19th IMEKO World Congr. Fundam. Appl. Metrol.* pp. 913-916.

Fernández, M. (2010). *Modulación en amplitud*. ETS de Ingenieros de Comunicación, Universidad de Valladolid. <http://lmi.bwh.harvard.edu/papers/pdfs/2002/martinfernandezCOURS E02.pdf>.

Tomasi, W. (2003). *Sistema de Comunicaciones Electrónicas*. Phoenix: Prentice Hall.

King, F. (2009). *Hilbert Transforms*. (Vol. 2). Cambridge: Cambridge University Press.

Bore, K., Akos, D. M., & Bertelsen, N. (2007). *A software-defined GPS and Galileo receiver*. Springer Science & Business Media.

Valderrabano A., Rosas, J. C., Tapia, R., Beltran, F., & Gomez J. F. (2013). Single phase angle tracking method for power switches gating synchronization. *Electric Power Systems Research*, 105, pp. 88-94.

Jaalam, N., Rahim, N. A., Bakar, A. H. A., Tan, C., & Haidar, A. M. (2016). A comprehensive review of synchronization methods for grid-connected converters of renewable energy source. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 59, pp.1471-1481.