

Single-phase D-STATCOM prototype based on the use of an Arduino nano controller

Mauricio José Triana Figueroa, Eng. , Jorge Luis Díaz Rodríguez, Ms.  y Aldo Pardo García, PhD. 
¹ Universidad de Pamplona, Colombia, trianatx@hotmail.com, jdiazcu@gmail.com, apardo13@hotmail.com

Abstract– This paper deals with the design, tests, and results obtained by implementing a D-STATCOM prototype. The process is detailed from the point of view of the design, going to the operation of the D-STATCOM and ending with the design of the prototype. Finally, an analysis of the tests and results obtained is carried out to validate the design and the developed prototype.

Keywords: prototyping, power electronics, FACTS, D-STATCOM, Arduino nano.

Digital Object Identifier: (only for full papers, inserted by LACCEI).
ISSN, ISBN: (to be inserted by LACCEI).
DO NOT REMOVE

Prototipo D-STATCOM monofásico basado en el uso de un controlador Arduino nano

Mauricio José Triana Figueroa, Ing. , Jorge Luis Díaz Rodríguez, Ms.  y Aldo Pardo García, PhD. 

¹ Universidad de Pamplona, Colombia, trianax@hotmail.com, jdiazcu@gmail.com, apardo13@hotmail.com

Abstract– This paper deals with the design, tests, and results obtained by implementing a D-STATCOM prototype. The process is detailed from the point of view of the design, going to the operation of the D-STATCOM and ending with the design of the prototype. Finally, an analysis of the tests and results obtained is carried out to validate the design and the developed prototype.

Keywords: prototyping, power electronics, FACTS, D-STATCOM, Arduino nano.

I. INTRODUCCIÓN

Los sistemas generación, transmisión y distribución de energía se diseñan para garantizar el suministro de energía eléctrica hasta cierta capacidad, esa capacidad representa cierta cantidad de casas, pequeñas, medianas o grandes industrias, comercios etc.

El problema es que con el paso de los años la demanda eléctrica va aumentando debido al aumento de diferentes tecnologías, donde muchas de estas tecnologías son utilizadas por las industrias y comercios.

Este aumento de la demanda eléctrica exige aumentar sistemas de generación, transmisión y distribución eléctrica a nivel estructural, esto conlleva a un aumento significativo en las inversiones económicas por parte de las empresas a fines para cubrir la demanda [1], [2].

Otro problema que acarrea el aumento constante de la demanda eléctrica, es el aumento de los dispositivos eléctricos que generan mucha carga reactiva en la red disminuyendo su capacidad debido a las cargas no lineales, modificación de las cargas domiciliarias a cargas comerciales e industriales [3], [4].

En este trabajo se aborda uno de los dispositivos FACTS (*Flexible AC Transmission Systems*), donde se creó un prototipo basado en el funcionamiento del D-STATCOM y sus características mostrando los resultados obtenidos.

II. EFECTOS DE LA POTENCIA REACTIVA

Las cargas eléctricas las podemos simplificar en un circuito básico basado en una suma fasorial entre una carga resistiva y una reactiva como lo podemos ver en la Fig.1, esta representación simple de una lavadora lo podemos hacer con cargas más grandes como por ejemplo casas, industrias y comercios.

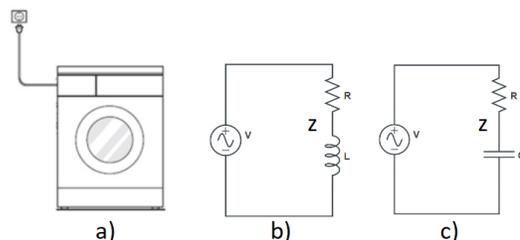


Fig. 1. Representación en un circuito de un electrodoméstico como carga.

$$Z = R + jX \quad (1)$$

R = Representa la cantidad parcial o total de la carga resistiva conectada a la fuente.

jX = Representa la cantidad parcial o total de la carga reactiva conectada a la fuente.

El problema que estamos mostrando en este artículo, es el efecto negativo que produce las cargas reactivas en los sistemas de suministro eléctrico, este efecto consiste en desfase el voltaje y la corriente en AC ya que los dispositivos reactivos almacenan energía que la va liberando poco a poco.

En la Fig.2 se puede observar 2 ejemplos de desfases producidos por las cargas, donde la Fig.2.a representa una carga donde su parte reactiva es mayormente inductiva, observamos que la corriente se atrasa respecto al voltaje, caso contrario, la Fig.2.b representa una carga donde su mayor carga reactiva es capacitiva generando un adelanto en la corriente respecto al voltaje.

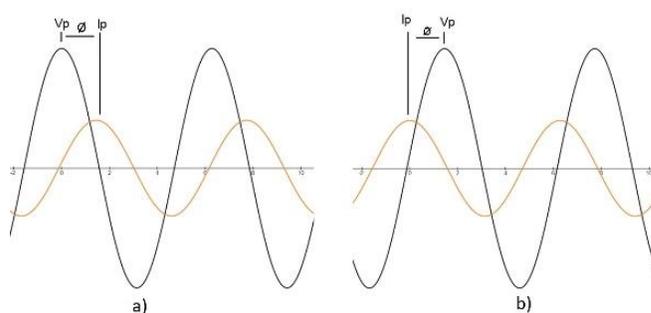


Fig.2. Desfase de la corriente producida por el tipo de carga reactiva.

Matemáticamente la educación del suministro de potencia útil también conocido como potencia activa la vemos en ecu. (1).

$$P = |V_{rms}| \cdot |I_{rms}| \cdot \cos(\Theta_v - \Theta_i) \quad (w) \quad (2)$$

Donde la potencia se calcula como un producto entre la magnitud del voltaje eficaz (rms), la magnitud de la corriente eficaz por el coseno de la diferencia entre los ángulos de fase del voltaje y la corriente Fig.3.

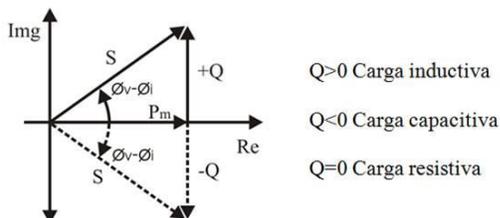


Fig.3. Relación de la potencia reactiva respecto al ángulo de desfase.

El $\cos(\Theta_v - \Theta_i)$ se conoce como factor de potencia y su valor varío entre 0 y 1, y lo ideal sería que al calcular su valor el resultado sea 1, indicándonos que el desfase sería igual a cero, ya que al ir aumentando el desfase $\Theta_v - \Theta_i$ en la fig.3 el cálculo del $\cos(\Theta_v - \Theta_i)$ va alejándose de 1, esto significa que el suministro de potencia útil a la carga disminuye haciendo que la carga le exija más corriente al sistema para tratar de mantener la potencia necesaria de trabajo. Este aumento de corriente provocado por el aumento de la carga reactiva disminuye la capacidad del sistema eléctrico, quitándole capacidad a la energía generada, transmitida y distribuida.

Otro problema que acarrea el aumento de potencia reactiva, es que los sistemas de transmisión y distribución utilizan diferentes dispositivos en su funcionamiento, dispositivos como transformadores, reconectores, cortacircuitos, etc. Estos dispositivos también se instalan bajo parámetros de diseño como lo es la capacidad de carga, y si aumenta la corriente debido al aumento de la carga reactiva, estos dispositivos disminuyen su capacidad llegando a trabajar sobre el límite en un tiempo menor al calculado provocando averías con más frecuencia generando mayores costos de mantenimiento.

III. ESTRATEGIAS PARA CORREGIR EL EFECTO DE LA POTENCIA REACTIVA

Como se mencionó en el capítulo anterior, las cargas reactivas generan un problema de desfase entre el voltaje y la corriente, pero estas mismas cargas pueden ayudar a solucionar si se utilizan con estrategia, ya que si observamos la fig. 2 dependiendo de la carga reactiva a que predomine, la corriente se atrasa o adelanta respecto al voltaje, estos efectos contrarios

sirven para poder corregir el desfase producido por una carga reactiva colocando su contraparte.

En la Fig.4 observamos un ejemplo de corrección del factor de potencia utilizando esta técnica, observamos que la carga analizada Fig.4.a este compuesto por una carga resistiva sumada fasorialmente a una carga reactiva, en paralelo Fig.4.b se instaló un capacitor para generar el efecto contrario de la carga inductiva, esta técnica permite que el desfase entre la corriente y el voltaje disminuya Fig.4.c

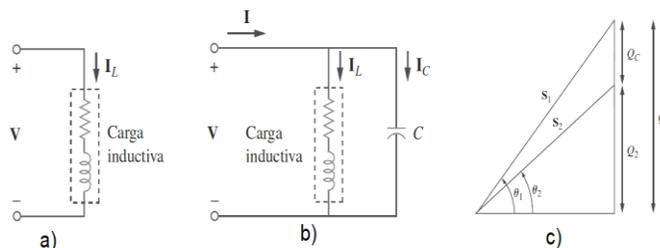


Fig.4. Corrección del Factor de Potencia utilizando un capacitor en paralelo.

$$C = \frac{Q_C}{\omega V_{rms}^2} = \frac{P(\tan\theta_1 - \tan\theta_2)}{\omega V_{rms}^2} \quad (3)$$

La ecuación anterior permite calcular el tamaño del capacitor la podemos ver en (3), sin embargo y aunque muy utilizada, esta técnica tiene la limitación de corregir una cantidad fija por capacitor instalado.

Hoy en día gracias a la electrónica de potencia existen diferentes técnicas para reducir estas limitaciones aumentando el rango de operatividad, esta tecnología se conoce como FACTS y consiste en una combinación entre electrónica y técnicas de control.

El prototipo D-STATCOM (fig. 5) es un dispositivo FACTS que en esencia está compuesto por un inversor de voltaje y un convertidor DC-DC, su funcionamiento consiste en sincronizar la frecuencia, ángulo de fase y voltaje RMS con el de la red eléctrica.

Cuando el voltaje del dispositivo aumenta por encima del voltaje de referencia, en este caso la red eléctrica, el D-STATCOM se estaría comportando como un capacitor variable inyectando corriente en adelante, algo contrario pasa cuando la amplitud del D-STATCOM es menor, estaría comportándose como inductor.

Estas funciones se pueden controlar en tiempo real manteniendo el factor de potencia cercano a la unidad. Otro funcionamiento sería el control de potencia activa que se puede realizar controlando el ángulo de fase del inversor.

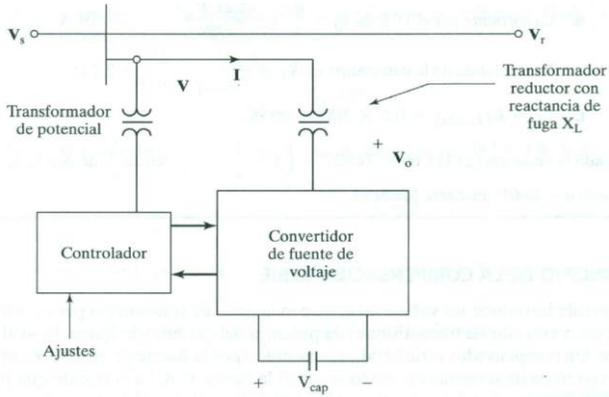


Fig.5. Modelo D-STATCOM conectado a la red eléctrica.

El D-STATCOM es uno de los dispositivos FACTS más utilizados gracias a sus múltiples funciones ya que tiene una alta eficiencia y un costo relativamente bajo en el control de una carga grande mejorando la capacidad del sistema de distribución [5], [6]. No obstante, el D-STATCOM debe ser analizado para su ubicación óptima para aprovechar al máximo su capacidad [7].

IV. PROTOTIPO D-STATCOM BASADO EN EL ARDUINO NANO

El prototipo está compuesto por dos partes, en la fig. 6 vemos la tarjeta base conformada por un Arduino nano atmega328, esta tarjeta tiene la etapa de potencia del puente H Fig.6 encargada de la generación en AC del lado de baja del transformador, se diseñó con la finalidad de conectar hasta 2 Mosfet de potencia en paralelo aumentando su capacidad de corriente y disminuyendo el calentamiento de los mismos.

Los Mosfet que se utilizaron fue el IRF540 con una capacidad promedio de hasta 25 A, donde la combinación de ambos puede sumar hasta 50 A, no obstante, la capacidad final de corriente del prototipo depende del dispositivo más débil, sin embargo y de ser necesario, en la tarjeta se puede conectar un ventilador que permita disminuir el calor generado por los Mosfet al ser sometidos a cargas cuya corriente exija su capacidad máxima.

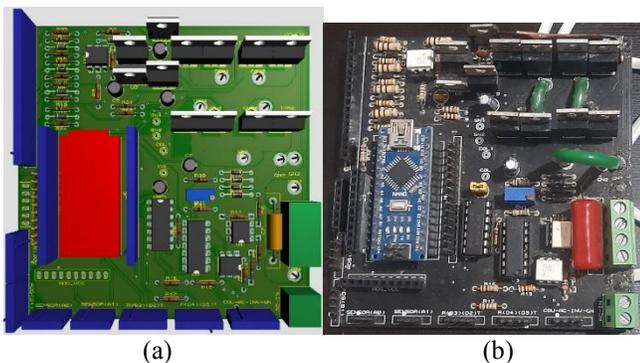


Fig.5 Tarjeta Base del prototipo D-STATCOM.

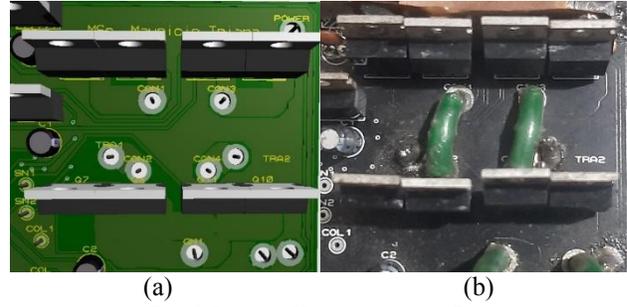
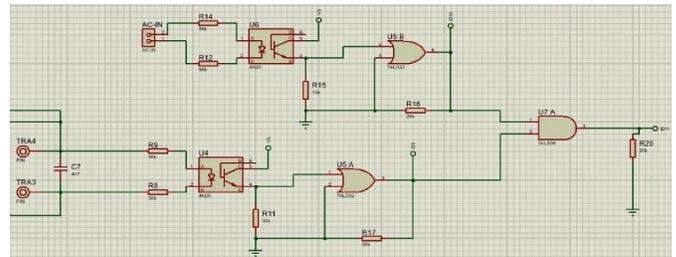


Fig.6 Puente H de la tarjeta Base.

Debido a que el D-STATCOM funciona sincronizándose a la red eléctrica, se deben igualar la frecuencia, magnitud y ángulo de fase antes de la conexión, para esto se diseñó la entrada de la Fig.7 donde se permite conectar la red eléctrica de referencia, esta entrada va hacia el circuito detector de secuencia de fase Fig.7.a compuesto por el optoacoplador 4N25 y 2 resistencias de 50 KΩ que disminuyen la corriente máxima producida por la red a sincronizar.

Esta señal generada por el optoacoplador se redirige a una compuerta lógica 74LS32 para obtener una señal cuadrada cada vez que detecta la secuencia positiva de la red, a su vez internamente la señal del inversor del lado de alta también va conectada al mismo circuito con el fin de tener la misma señal cuadrada, estas señales sirven como referencia en el momento de la sincronización donde también se agregó una compuerta multiplicadora 74LS08 que nos da una señal cuadrada cada vez que las dos señales estén activadas permitiéndonos hacer ajustes de ser necesario.



(a)

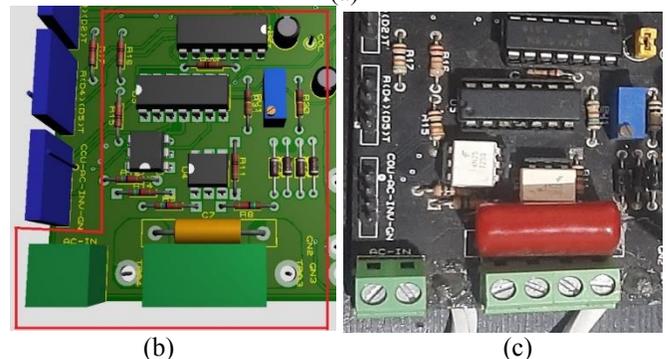


Fig.7 Entrada de referencia de la red eléctrica.

V. PRUEBAS Y RESULTADOS

La tarjeta base también cuenta con una ranura (fig. 8) que permite la conexión externa de un generador de señales SPWM compatible con la tarjeta EGS002 (fig.8.a) o una diseñada como se puede observar en la fig. 8.b. Esta conexión permite que el prototipo funcione como inversor o como laboratorio de control y de investigación.

Para el prototipo se diseñó la tarjeta de la fig. 8.b que también consta de un Arduino nano atmega328, donde se utilizan las interrupciones internas generando las señales SPWM necesarias para la activación del puente H.

Gracias a estas señales y conectando en el lado de alta a un capacitor fig. 9 se puede controlar la carga y descarga del mismo generando una señal sinusoidal bastante precisa fig. 10. para el inversor.

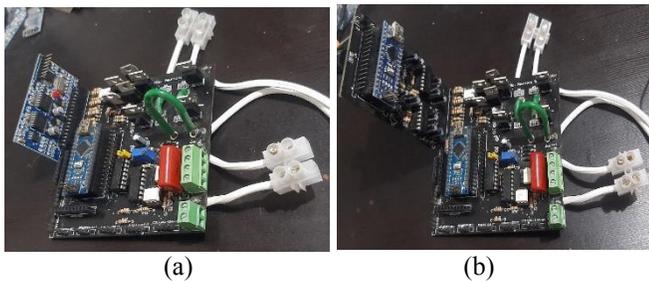


Fig.8 puerto de conexión para generador externo.



Fig.9 Capacitor para crear la onda sinusoidal.

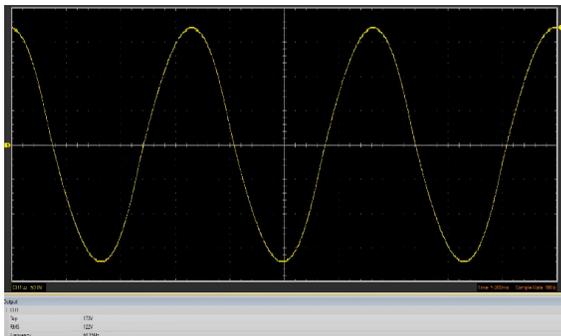


Fig.10 Señal sinusoidal generada por la etapa inversora.

La tarjeta generadora SPWM compuesta por el Arduino nano de la fig.11 permite modificar la frecuencia, la amplitud y el ángulo de fase a nivel de código, utilizando la función de la detección de la secuencia de fase fig.12.

A través de esta detección podemos decirle al Arduino que mueva la señal hacia la izquierda o derecha según lo requiera la sincronización, a su vez que modifique la frecuencia disminuyéndolo o aumentándolo.

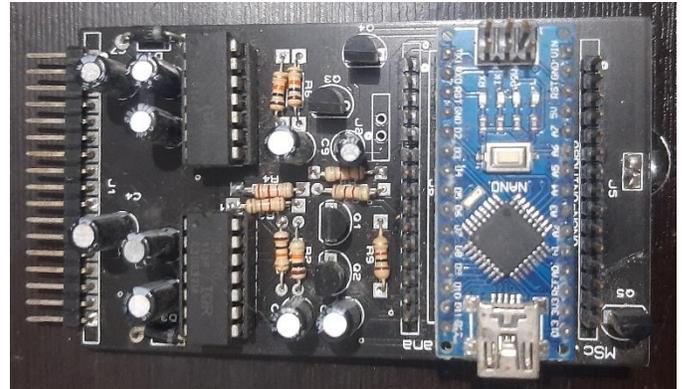


Fig.11 Tarjeta generadora SPWM.

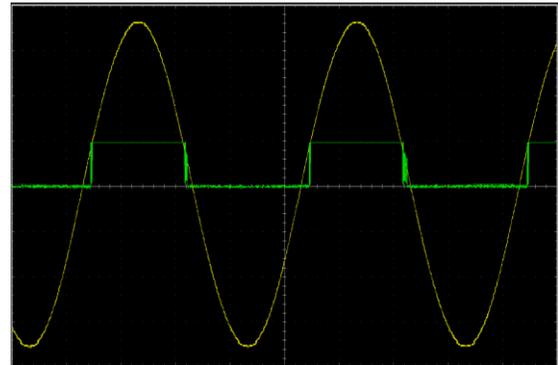
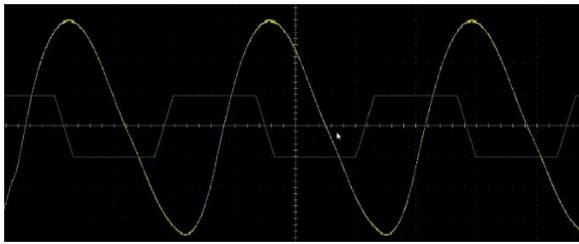


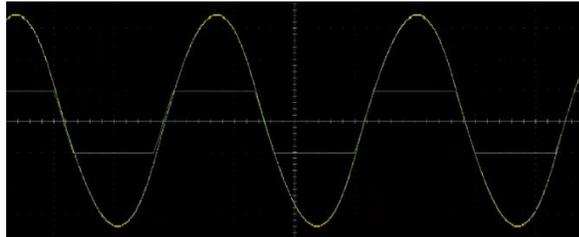
Fig.12 Detección de la secuencia de fase de la red eléctrica.

En la fig.13.a podemos observar una de las funciones principales del D-STATCOM que es la sincronización [8].

El encendido del inversor y como se encuentran desfasadas, siendo la señal de la red eléctrica de color verde como la señal de color amarillo la del inversor, en la fig. 13.b vemos después de unos segundos como las dos señales se mantienen sincronizadas alrededor del 99% lo cual es una sincronización bastante precisa.



(a)



(b)

Fig.13 Sincronización del inversor con la red eléctrica.

Una de las funciones del D-STATCOM es el control de la amplitud con base al factor de potencia detectado, para esto se diseñó un convertidor DC-DC de tipo elevador fig. 14.

Aunque a nivel de código y desde la tarjeta generadora fig. 11 se puede modificar el ancho de pulso cambiando la amplitud del inversor, el problema es que el rango que se puede manejar es muy corto, por esta razón al incorporar el convertidor DC-DC que nos permite tener un mayor rango de control de la amplitud del inversor lo cual sería de gran utilidad, ya que en un inversor simplemente al conectar una carga, el voltaje RMS bajaría perdiendo rango de operatividad si sólo se controla la amplitud desde la tarjeta generadora SPWM [2], [9], [10].

El control del convertidor DC-DC se puede hacer directamente desde el Arduino nano incorporado en la tarjeta base fig.5 o desde una tarjeta externa.



Fig.14 Convertidor elevador DC-DC

El sensor PZEM-004T Fig.15 nos permite obtener datos como el voltaje RMS, corriente RMS, potencia, frecuencia y factor de potencia, con estos datos y la estrategia de control adecuada podemos controlar el voltaje RMS manteniéndolo al nivel deseado, recordando que la sincronización la mantiene el control de la tarjeta generadora de la fig. 11.

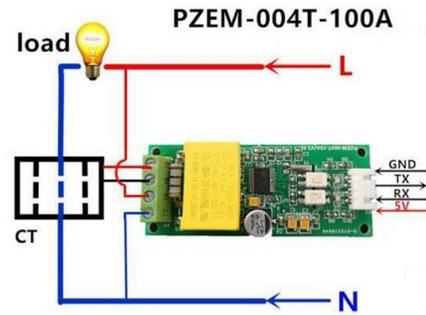


Fig.15 Sensor PZEM-004T.

VI. CONCLUSIONES

El prototipo D-STATCOM diseñado y construido además de funcionar como monofásico, su diseño le permite funcionar como laboratorio de control y de compensación reactiva, ya que sus conexiones permiten probar diferentes técnicas de control, además que su conexión con la carga puede ser en serie o derivativa a través del transformador en el lado de alta.

La entrada de referencia de la red eléctrica permite que se puedan conectar 3 tarjetas en cascada para obtener un generador o D-STATCOM trifásico.

Otra ventaja añadida que tiene el D-STATCOM es que se puede usar para mejorar la estabilidad de la tensión y disminuir la distorsión armónica.

REFERENCIAS

- [1] W. N. Chang and K. D. Yeh, "Design and implementation of DSTATCOM with symmetrical components method for fast load compensation of unbalanced distribution systems," *Proceedings of the International Conference on Power Electronics and Drive Systems*, vol. 2, pp. 1547–1551, 2003, doi: 10.1109/PEDS.2003.1283219.
- [2] Y. Wang, J. Tang, and X. Qiu, "Analysis and control of D-STATCOM under unbalanced voltage condition," *Proceedings 2011 International Conference on Mechatronic Science, Electric Engineering and Computer, MEC 2011*, pp. 1623–1625, 2011, doi: 10.1109/MEC.2011.6025788.

- [3] E. F. Fuchs, M. A. S. Masoum. Power quality in power systems and electrical machines, Ed. Academic Press, 2015. <https://doi.org/10.1016/C2013-0-18758-2>.
- [4] D. Committee of the IEEE Power and E. Society, "IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems Sponsored by the Transmission and Distribution Committee IEEE Power and Energy Society."
- [5] A. R. Gupta and A. Kumar, "Impact of DG and D-STATCOM Placement on Improving the Reactive Loading Capability of Mesh Distribution System," *Procedia Technology*, vol. 25, pp. 676–683, 2016, doi: 10.1016/j.protcy.2016.08.160.
- [6] A. R. Gupta and A. Kumar, "Energy Savings Using D-STATCOM Placement in Radial Distribution System," in *Procedia Computer Science*, 2015, vol. 70, pp. 558–564. doi: 10.1016/j.procs.2015.10.100.
- [7] S. Hussain and N. Visali, "Identification of weak buses using Voltage Stability Indicator and its voltage profile improvement by using DSTATCOM in radial distribution systems." [Online]. Available: www.iosrjournals.org
- [8] Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2019 *Innovations in Power and Advanced Computing Technologies (i-PACT)*.
- [9] S. A. Chatterjee and K. D. Joshi, "Comparison of double loop, Direct-Output-Voltage and Fuzzy-PI control strategies for D-STATCOM," *Proceedings - 3rd International Conference on Emerging Trends in Engineering and Technology, ICETET 2010*, pp. 322–327, 2010, doi: 10.1109/ICETET.2010.47.
- [10] R. Madhusudan, G. Ramamohan Rao, I. Scholar, and E. Engineering, "Modeling and Simulation of a Distribution STATCOM (D-STATCOM) for Power Quality Problems-Voltage Sag and Swell Based on Sinusoidal Pulse Width Modulation (SPWM)," pp. 436–441, 2012.