

CARGADOR DE BATERÍAS TRIFÁSICO CON ALTO FACTOR DE POTENCIA PARA VEHÍCULOS ELÉCTRICOS

THREE-PHASE BATTERY CHARGER WITH HIGH POWER FACTOR FOR ELECTRIC VEHICLES

Alejandro Ojeda Paz

Tecnológico Nacional de México / IT de Celaya, México
aleojeda9104@gmail.com

Nimrod Vázquez Nava

Tecnológico Nacional de México / IT de Celaya, México
n.vazquez@ieee.org

Marco Liserre

Kiel University, Alemania
ml@tf.uni-kiel.de

Héctor López Tapia

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

Claudia V. Hernández Gutiérrez

Tecnológico Nacional de México / IT de Celaya, México
cvhg@ieee.org

Recepción: 29/abril/2020

Aceptación: 29/octubre/2020

Resumen

Con el avance de la tecnología se hace más notorio el uso de vehículos eléctricos que constituyen grandes cargas a la red eléctrica y requieren procesos de carga eficientes y con alto factor de potencia. En este artículo se propone un cargador de baterías trifásico constituido por un puente activo doble, un rectificador y un filtro, constituyendo un corrector del factor de potencia operando en modo de conducción discontinua. Para evaluar el desempeño se realizaron simulaciones en lazo cerrado del sistema propuesto, donde se aprecian las bondades del sistema.

Palabras Clave: Cargador de baterías trifásico, vehículos eléctricos, factor de potencia, puente activo doble.

Abstract

The advancement of technology, the use of electric vehicles is increasing and they may constitute a large load in the electrical grid, they require efficient charging processes with high power factor. This work proposes a three-phase battery charger based on a double active bridge, a rectifier, and a filter; with a high power factor since it is operated in discontinuous conduction mode. The performance of the system is evaluated by close loop simulation, where the performance of the system is illustrated.

Keywords: *Three-phase battery charger, electric vehicles, power factor, double active bridge.*

1. Introducción

La investigación sobre vehículos eléctricos (VE) se ha incrementado en gran medida en todo el mundo debido a la conciencia de los problemas ambientales y la reducción del consumo de combustibles fósiles [Saeed et al., 2019], [Ebrahimi et al., 2014].

En el despliegue de vehículos eléctricos, los cargadores de baterías tienen un vínculo directo con la vida útil de la batería y el tiempo de carga. Un cargador de batería debe tener propiedades tales como: peso y volumen reducido, altamente confiable y eficiente, mayor densidad de energía y costo mínimo. La corriente de la red eléctrica utilizada en el cargador del VE debe tener una menor distorsión y un alto factor de potencia, para disminuir el impacto de la calidad de la energía y aumentar la potencia [Habib et al., 2017]. Actualmente, todos los diseños modernos de cargadores VE tienen un circuito activo de corrección del factor de potencia (PFC) por medio de un convertidor elevador [Marzouk et al., 2014].

Los cargadores están formados por la unión de varios bloques: convertidor AC-DC, inversor DC-AC, transformador de aislamiento y convertidor AC-DC o rectificador [Transportation & Technology, 2015]. Si el cargador es unidireccional se puede utilizar un rectificador pasivo con diodos como primer bloque para minimizar costos. Como la unión de los tres siguientes bloques del cargador puede usarse un puente activo doble (PAD) por sus características de aislamiento, manejo de alta potencia

y buena eficiencia [Zhao et al., 2014] [Yaqoob et al., 2019] [Shi et al., 2017] [Wang et al., 2019] y [Wu et al., 2019]. Estos se pueden operar en modo de conducción discontinua [Zengin & Boztepe, 2016] y [Vazquez et al., 2019].

Los cargadores de VE pueden ser clasificados, según la fuente de alimentación a la que se conecten, en monofásicos o trifásicos. Son varios los diseños monofásicos [Ebrahimi et al., 2014] [Kim et al., 2016] [Li et al., 2017], más sin embargo la tendencia en potencia de los vehículos eléctrico está en crecimiento, por lo que un sistema monofásico no es lo más adecuado [S. W. Choi et al., 2019].

Los cargadores trifásicos son los más indicados para grandes cargas manteniendo las exigencias de los monofásicos en cuanto a factor de potencia y eficiencia, con ventajas en la potencia superior que pueden entregar para una carga más rápida, y son acoplados a sistemas trifásicos para disminuir efectos de carga en redes residenciales. Aunque hay algunas estructuras de cargadores diferentes [Waltrich et al., 2016] [Anderson et al., 2019], generalmente estos se forman por la unión de tres cargadores monofásicos, uno por fase [S. W. Choi et al., 2019] [Lu et al., 2018] [S.-W. Choi et al., 2020] [Yoo et al., 2013].

En esta investigación se propone un cargador trifásico unidireccional, que opera en modo de conducción discontinuo (MCD), compuesto por una sola estructura (PAD), un rectificador pasivo y filtro trifásicos, que corrige el factor de potencia de las tres fases y regula la potencia de la carga, con un control más simple, compacto y con menos interconexiones.

2. Métodos

En este artículo se propone un cargador de baterías para vehículos eléctricos que se alimenta de una fuente de alimentación trifásica de manera natural, por lo que es posible el incremento de potencia de forma natural. El sistema está además basado en un puente activo doble, como convertidor CD-CD aislado, operado en discontinuo, por lo que se obtiene un alto factor de potencia. El desempeño del sistema es evaluado mediante simulación en PSIM® cerrando el lazo de control.

En la figura 1 se muestra el esquema del cargador de batería trifásico con corrección del factor de potencia propuesto. La topología está compuesta por un

filtro LCL por fase, un rectificador completo trifásico con diodos, y un puente activo doble.

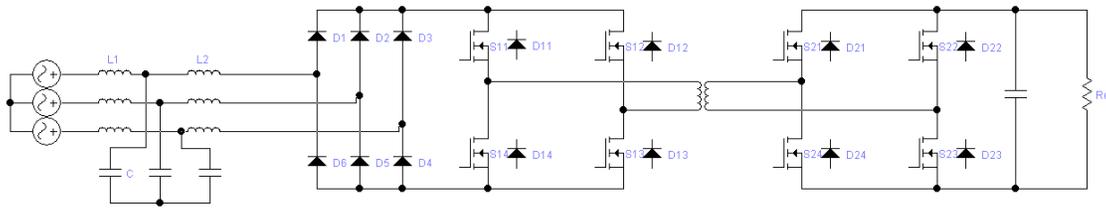


Figura 1 Cargador.

El puente completo de la izquierda funciona como un convertidor CD-CA en alta frecuencia (25 kHz) con ciclo útil del 50 %, para que el transformador opere en alta frecuencia, el segundo puente completo es modulado de forma tal que permite la operación en modo discontinuo, formando un corrector natural del FP con los inductores (L_2) del filtro de la entrada, la tensión eléctrica de salida se regula a partir del ancho de los pulsos del segundo puente.

El filtro (L_1C) permite obtener una corriente sinusoidal continua, es decir filtra la corriente discontinua del inductor L_2 . Esto se aprecia en la figura 2, es importante resaltar que la corriente está en fase con la tensión de alimentación.

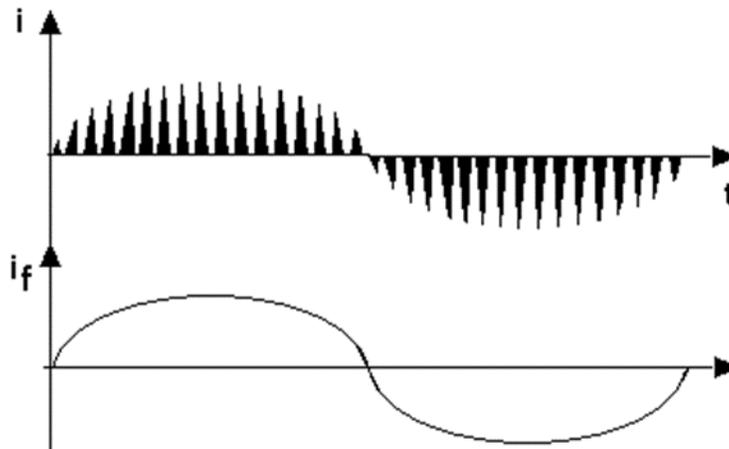


Figura 2 Corriente discontinua por fase (i) y corriente filtrada en el lado de la red (if).

A continuación, se muestra el comportamiento de la corriente en los inductores (figura 3) y los cuatros subcircuitos simplificados (A, B, C, D) que definen el

funcionamiento del sistema propuesto, el cual opera en MCD para corregir el factor de potencia (figura 4-7). El subcircuito A se establece entre 0 y 0.35 veces el período para garantizar MCD. Ciertamente la amplitud y forma de cada corriente depende las tensiones de la red trifásica, por lo que va cambiando dependiendo de ella.

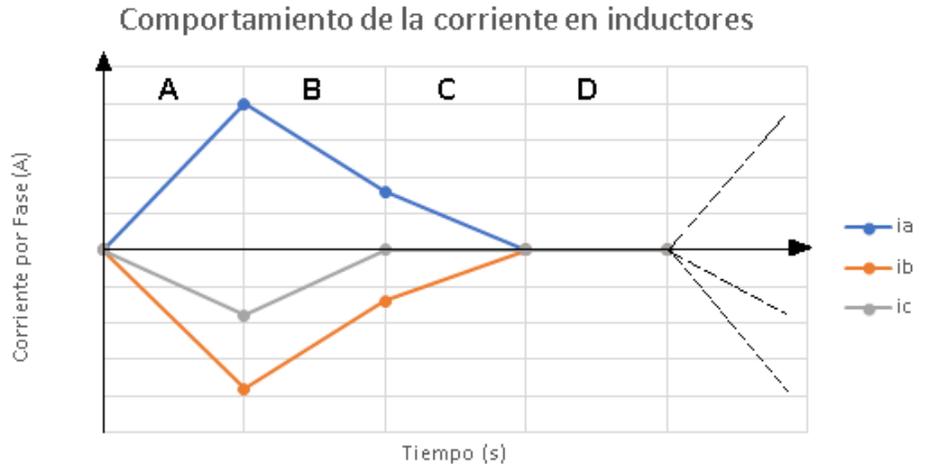


Figura 3 Corriente discontinua en inductores.

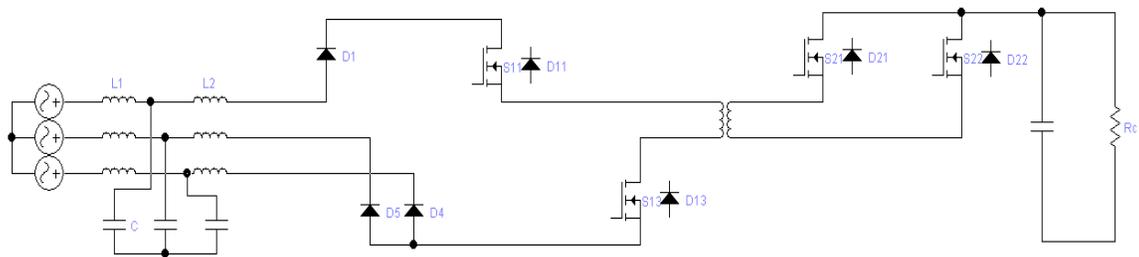


Figura 4 Semiciclo positivo transformador HF, se cargan inductores (subcircuito A).

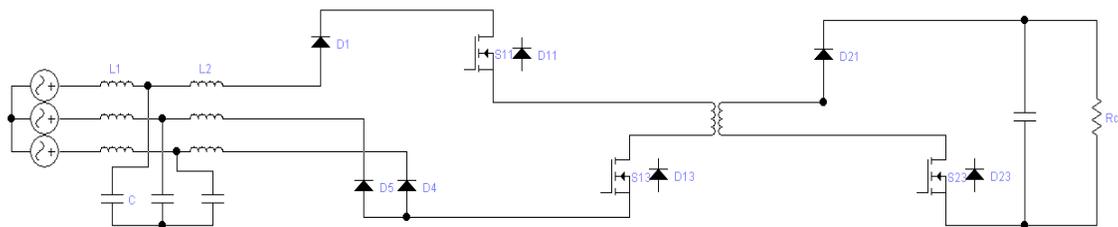


Figura 5 Se descargan inductores y se transfiere energía a la salida (subcircuito B).

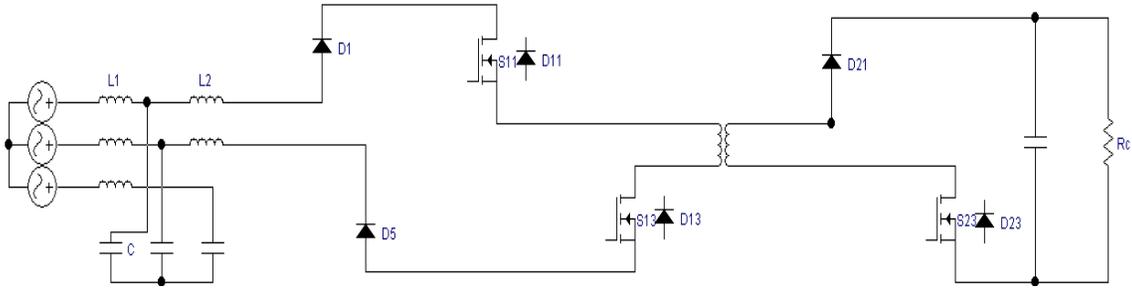


Figura 6 Descarga inductores (uno descargado) y continúa transferencia (subcircuito C).

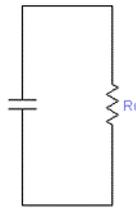


Figura 7 Inductores descargados y no se transfiere energía a la salida (subcircuito D).

Los subcircuitos anteriores solo corresponden al semiciclo positivo de la tensión en el transformador de alta frecuencia. Un proceso similar ocurre en el semiciclo negativo, es decir que el proceso de carga y descarga completa de los inductores L₂ ocurre dos veces en cada período de la tensión del transformador. La magnitud de la corriente de carga de cada inductor es proporcional a la tensión eléctrica de fase correspondiente por lo que se corrige el factor de potencia.

En el circuito los inductores L₁ y L₂ son de 80 nH, los capacitores C son de 1 μF, el capacitor de la salida es de 3300 μF, la carga R_c es de 120 Ω y se conmuta a una frecuencia de 25 kHz. La simulación del cargador en PSIM® se llevó a cabo durante 1 minuto con tiempo de paso de 500 nanosegundos. Se utilizó una fuente de alimentación trifásica con una tensión eléctrica de 220 V línea a línea, es decir, según la ecuación 1, una tensión máxima por fase de 179.63 V (entre línea y neutro)

$$V_{an} = V_{LL\ RMS} \sqrt{\frac{2}{3}} \quad (1)$$

Donde:

V_{an} : Tensión eléctrica máxima entre la fase A y el neutro N (en Volts)

$V_{LL\ RMS}$: Tensión eléctrica RMS entre la fase A y la fase B (en Volts)

El circuito se simula en lazo cerrado, realimentando la tensión eléctrica de salida, con un controlador PI con ganancia unitaria y constante de tiempo 0.9 segundos para una salida de 490 V y una potencia de 2 kW.

Los parámetros medidos en el circuito (de izquierda a derecha) durante la simulación fueron: tensión y corriente (corriente filtrada hacia la red) en una fase de entrada del circuito, mediante los cuales el software PSIM calcula el factor de potencia del cargador (se pusieron ambas curvas juntas en una gráfica y se presionó el botón PF en la ventana Semiview). En segundo lugar, se mide la corriente en inductor L_2 donde se muestra la corriente discontinua (sin filtrar) de una fase, antes del rectificador de diodos. Y en tercer lugar se mide la tensión y la corriente a la salida del cargador, al que se conectó un capacitor y una resistencia de carga, ocupando el lugar de la batería, para ver el comportamiento de la tensión eléctrica de salida y la potencia entregada.

3. Resultados

La tensión eléctrica y la corriente filtrada se encuentran en fase (figura 8), el factor de potencia calculado en PSIM es 0.989.

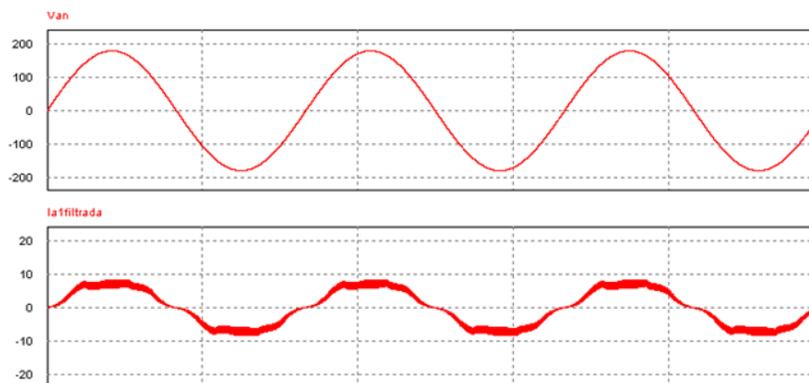


Figura 8 Tensión eléctrica y corriente en fase.

En la figura 9, se muestran la corriente en inductor L_2 , la cual se aprecia que es discontinua, conforma una senoide una vez filtrada hacia la red (i_{a1} y $i_{a1\text{filtrada}}$) (Figura 10). Debido a que opera en MCD los elementos de almacenamiento de energía son de menor capacidad. En la figura 11 se muestra el comportamiento de la tensión

eléctrica de salida de la topología propuesta. La potencia entregada a la carga es de 2 kW.

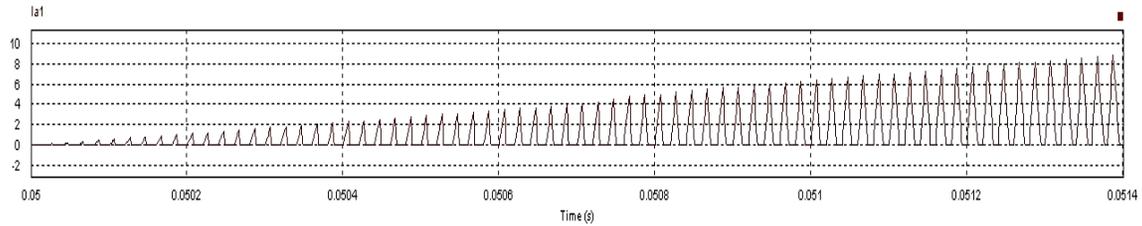


Figura 9 Corriente discontinua en inductor L2.

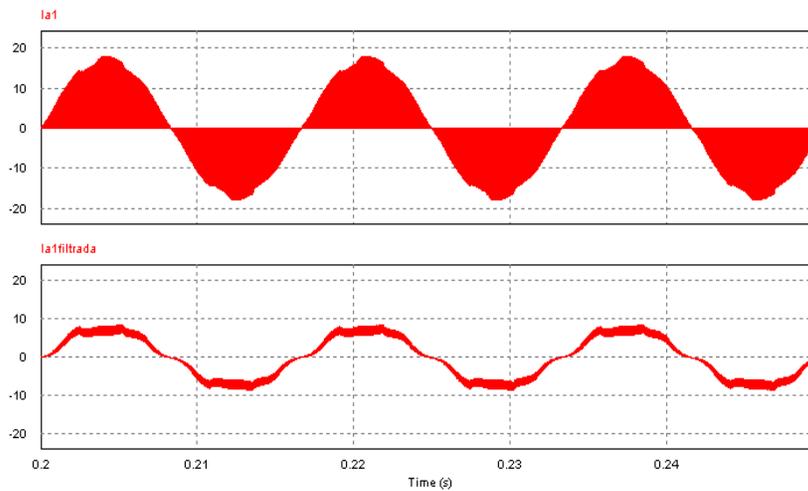


Figura 10 Corriente sin filtrar en L2 y corriente filtrada percibida en la red eléctrica.

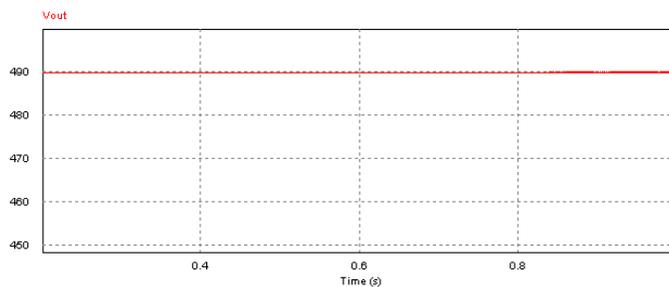


Figura 8 Tensión eléctrica de salida cargador.

4. Discusión

En la tabla 1 se muestra los parámetros de otros cargadores monofásicos, trifásicos y los de este artículo. Se observa que el factor de potencia del sistema es similar al de los otros cargadores trifásicos, la diferencia radica en la potencia que

entregan, la frecuencia de trabajo, el número de componentes de la arquitectura, la complejidad del sistema y el control.

Tabla 1 Comparación de esquemas de cargadores.

	CF-FB PWM 1f (B. K. Lee et al., 2016)	VF-FB PFM SRC 1f (J. Y. Lee et al., 2015)	VF-FB PWM 3f (S. W. Choi et al., 2019)	VF-HB PWM 3f (S.-W. Choi et al., 2020)	Cargador propuesto 3f
P_o	3 kW	1.7 kW	3 x 3.3 Kw	3 x 5 kW	2 kW
V_{AC}	208 V_{RMS}	220 V_{RMS}	220 V_{RMS}	380 V_{RMS}	220 V_{RMS}
V_o	400 V	62-82 V	500 V	800 V	490 V
f_s	10 kHz	Max. 125 kHz	50 kHz	50 kHz	25 kHz
Dispositivos semiconductores de la estructura	1 x 5 interruptores 1 x 9 diodos	1 x 6 interruptores 1 x 8 diodos	3 x 6 interruptores 3 x 2 diodos	3 x 8 interruptores 3 x 4 diodos	1 x 8 interruptores 1 x 6 diodos
FP	>0.984 @ > 874 W	0.992 @ 1.7 kW	> 0.99 @ > 1.5 kW	0.98 @ > 3 kW	0.98
Método de control	Control de corriente / Control de voltaje	Control de voltaje / Control de llenado del valle	Control de voltaje / Compensador prealimentado	Control de voltaje / Compensador prealimentado	Control de voltaje

El cargador propuesto entrega una potencia menor, pero trabaja a menor frecuencia y se traduce en menos pérdidas por conmutación. Posee menor número de componentes y conexiones por lo que es más sencillo de implementar, más robusto, ocupa menos espacio y una solución más económica. El control se lleva a cabo con un solo PI, realimentando la tensión eléctrica de salida, a diferencia de las otras arquitecturas que son más complejas, en general, poseen un cargador monofásico con su respectivo control por cada fase.

En esta investigación en base a lo mencionado anteriormente se propuso y simuló un cargador trifásico unidireccional, con una sola estructura (PAD) y un rectificador pasivo y filtro trifásicos, para corregir el factor de potencia de las tres fases y regular la potencia de carga, con un control más simple, una estructura más pequeña, con menos interconexiones, que lo hacen más confiable, con capacidad de potencia modular y, en general, una solución económica. Al operar en modo de conducción discontinua no requiere inductores y capacitores de gran tamaño.

6. Reconocimiento

Este trabajo fue apoyado por el TecNM bajo el proyecto no. 7608.20-P

7. Bibliografía y Referencias

- [1] Anderson, J. A., Haider, M., Bortis, D., Kolar, J. W., Kasper, M., & Deboy, G. (2019). New synergetic control of a 20kw isolated vienna rectifier front-end ev battery charger. 2019 IEEE 20th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics, COMPEL 2019, 1–8. <https://doi.org/10.1109/COMPEL.2019.8769657>.
- [2] Choi, S.-W., Oh, S.-T., Kim, M.-W., Lee, I.-O., & Lee, J.-Y. (2020). Interleaved Isolated Single-Phase PFC Converter Module for Three-Phase EV Charger. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, PP(c), 1–1. <https://doi.org/10.1109/tvt.2020.2980878>.
- [3] Choi, S. W., Kim, Y. J., & Lee, J. Y. (2019). Design of 10kW three-phase EV charger with wide output voltage range based on voltage-fed isolated PFC converter. *EPE Journal (European Power Electronics and Drives Journal)*, 29(1), 11–24. <https://doi.org/10.1080/09398368.2018.1489483>
- [4] Ebrahimi, S., Tagliavi, M., Tahami, F., & Oraee, H. (2014). A single-phase integrated bidirectional plug-in hybrid electric vehicle battery charger. *IECON Proceedings (Industrial Electronics Conference)*, 1137–1142. <https://doi.org/10.1109/IECON.2014.7048645>.
- [5] Habib, S., Khan, M. M., Hashmi, K., Ali, M., & Tang, H. (2017). A Comparative Study of Electric Vehicles Concerning Charging Infrastructure and Power Levels. *Proceedings - 2017 International Conference on Frontiers of Information Technology, FIT 2017*, 2017-Janua, 327–332. <https://doi.org/10.1109/FIT.2017.00065>.
- [6] Kim, B., Kim, M., & Choi, S. (2016). Single-stage electrolytic capacitor-less AC-DC converter with high frequency isolation for EV charger. 2016 IEEE 8th International Power Electronics and Motion Control Conference, IPEMC-ECCE Asia 2016, 234–238. <https://doi.org/10.1109/IPEMC.2016.7512291>.
- [7] Lee, J. Y., Yoon, Y. D., & Kang, J. W. (2015). A Single-Phase Battery Charger Design for LEV Based on DC-SRC with Resonant Valley-Fill Circuit. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 62(4), 2195–2205. <https://doi.org/10.1109/TIE.2014.2351371>.

- [8] Lee, B. K., Kim, J. P., Kim, S. G., & Lee, J. Y. (2016). A PWM SRT DC/DC Converter for 6.6-kW EV Onboard Charger. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 63(2), 894–902. <https://doi.org/10.1109/TIE.2015.2480384>.
- [9] Li, C., Zhang, Y., Cao, Z., & Xu, D. (2017). Single-Phase Single-Stage Isolated ZCS Current-Fed Full-Bridge Converter for High-Power AC/DC Applications. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 32(9), 6800–6812. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2016.2623771>.
- [10] Lu, J., Bai, K., Taylor, A. R., Liu, G., Brown, A., Johnson, P. M., & McAmmond, M. (2018). A Modular-Designed Three-Phase High-Efficiency High-Power-Density EV Battery Charger Using Dual/Triple-Phase-Shift Control. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 33(9), 8091–8100. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2017.2769661>.
- [11] Marzouk, M., Ferrieux, J. P., Frey, D., & Sarrazin, B. (2014). Considerations to choose an appropriate charger topology for plug-in electric vehicles. 2014 16th European Conference on Power Electronics and Applications, EPE-ECCE Europe 2014, 1–8. <https://doi.org/10.1109/EPE.2014.6910974>.
- [12] Saeed, J., Niakinezhad, M., Wang, L., & Fetnando, N. (2019). An integrated charger with hybrid power source using PV array for EV application. *Proceedings - 2019 IEEE 13th International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering, CPE-POWERENG 2019*. <https://doi.org/10.1109/CPE.2019.8862426>.
- [13] Shi, H., Wen, H., Chen, J., Hu, Y., Member, S., Jiang, L., Chen, G., & Member, S. (2017). Minimum-Reactive-Power Scheme of Dual-Active-Bridge DC – DC Converter With Three-Level Modulated Phase-Shift Control. 53(6), 5573–5586.
- [14] Transportation, I., & Technology, V. (2015). *IEEE Standard Technical Specifications of a DC Quick Charger for Use with Electric Vehicles* IEEE Vehicular Technology Society IEEE Standard Technical Specifications of a DC Quick Charger for Use with Electric Vehicles.
- [15] Waltrich, G., Hendrix, M. A. M., & Duarte, J. L. (2016). Three-Phase Bidirectional DC/DC Converter with Six Inverter Legs in Parallel for EV

- Applications. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 63(3), 1372–1384. <https://doi.org/10.1109/TIE.2015.2494001>.
- [16] Vazquez, N., Zhu, R., & Liserre, M. (2019). Double Active Bridge Operated in Quasi Discontinuous Conduction Mode. 4899–4904. <https://doi.org/10.1109/iecon.2019.8926927>.
- [17] Wang, S., Zheng, Z., Li, C., Wang, K., & Li, Y. (2019). Time Domain Analysis of Reactive Components and Optimal Modulation for Isolated Dual Active Bridge DC/DC Converters. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 34(8), 7143–7146. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2019.2897007>.
- [18] Wu, F., Feng, F., & Gooi, H. B. (2019). Cooperative Triple-Phase-Shift Control for Isolated DAB DC-DC Converter to Improve Current Characteristics. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 66(9), 7022–7031. <https://doi.org/10.1109/TIE.2018.2877115>.
- [19] Yaqoob, M., Loo, K. H., & Lai, Y. M. (2019). A Four-Degrees-of-Freedom Modulation Strategy for Dual-Active-Bridge Series-Resonant Converter Designed for Total Loss Minimization. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 34(2), 1065–1081. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2018.2865969>
- [20] Yoo, K., Kim, K., & Lee, J. (2013). Single- and Three-Phase PHEV Onboard Battery Charger Using Small Link Capacitor. 60(8), 3136–3144.
- [21] Zengin, S., & Boztepe, M. (2016). Trapezoid current modulated DCM AC/DC DAB converter for two-stage solid state transformer. *ELECO 2015 - 9th International Conference on Electrical and Electronics Engineering*, 1(1), 634–638. <https://doi.org/10.1109/ELECO.2015.7394538>.
- [22] Zhao, B., Song, Q., Liu, W., & Sun, Y. (2014). Overview of dual-active-bridge isolated bidirectional DC-DC converter for high-frequency-link power-conversion system. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 29(8), 4091–4106. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2013.2289913>.