

Control IDA-WAC para cargador de baterías de vehículos eléctricos conectado a la red con filtro LCL y convertidor buck interleaved

IDA-WAC control for grid-connected electric vehicle battery charger with LCL filter and interleaved buck converter

Lucas L. Martín Fernández ¹, Federico M. Serra ¹, Eduardo M. Asensio ¹ y Cristian De Angelo ²

 ¹ Laboratorio de Control Automático (LCA), Facultad de Ingeniería y Ciencias Agropecuarias, Universidad
 ² Instituto de Investigaciones en Tecnologías Energéticas y Materiales Avanzados (ITTEMA), Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Rio Cuarto, CONICET, Rio Cuarto, Argentina

lucasfern@unsl.edu.ar, fmserra@unsl.edu.ar, emasensio@unsl.edu.ar, cdeangelo@ing.unrc.edu.ar

CientiFICA Nº1 Año: 2024 pp. 129 – 138

Historial del Artículo Recibido: 19/04/2024 Enviado revisión: 20/04/2024 Aceptado: 26/04/2024

Área temática: Modelado, control y simulación de sistemas

Palabras Claves: Vehiculos Electricos, Estacion de carga, Conexion a la red.

Keywords: Electric Vehicles, Charging Station, Grid Connection **Resumen:** En este trabajo se presenta una estrategia de control para un cargador de baterias para vehiculos electricos. El sistema consiste en, un convertidor trifasico con filtro LCL conectado al sistema electrico de potencia, mientras que la carga de la bateria se realiza con un convertidor del tipo buck-interleaved. La estrategia de control propuesta consiste en un controlador basado en energia, usando la tecnica basada en pasividad, combinado con un control por ponderacion de pesos de las corrientes circundantes en el sistema, que permite reducir el orden del mismo, mientras se asegura la estabilidad en lazo cerrado. Los objetivos de control del cargador de baterias son generar un perfil de carga controlando la corriente y la tension en el lado de corriente continua y asegurar corriente sinusoidal balanceada y en fase con la tension de red en el lado de alterna, manteniendo su distorsion armonica dentro de limites establecidos en las normativas. La estrategia de control propuesta es validada mediante resultados de simulacion.

Abstract: In this work, a control strategy for a battery charger for electric vehicles is presented. The system consists of a three-phase converter with LCL filter connected to the electrical power system, while the battery charging is carried out with a buck-interleaved type converter. The proposed control strategy consists of an energy-based controller, using the passivity-based technique, combined with weight-weighted control of the surrounding currents in the system, which allows reducing its order, while ensuring stability in closed loop. The control objectives of the battery charger are to generate a charge profile by controlling the current and voltage on the direct current side and to ensure balanced sinusoidal current and in phase with the mains voltage on the alternating side, maintaining its harmonic distortion within of limits established in the regulations. The proposed control strategy is validated through simulation results.



INTRODUCCIÓN

En los últimos años, ha habido un crecimiento exponencial en la utilización de vehículos eléctricos (VE) como medio de transporte. Esto se debe a varias razones: en primer lugar, la preocupación por el agotamiento de recursos fósiles y el aumento del valor del petróleo; en segundo lugar, la necesidad de combatir el cambio climático; también influye el avance en la tecnología y las regulaciones comerciales de las energías renovables, así como los avances en la electrónica de potencia y los sistemas de control utilizados en la propulsión de los VE; y por último, los avances en las estructuras de carga, comúnmente conocidas como estaciones de carga. Estas últimas, son la clave para afianzar el uso de VE de forma masiva, ya que una de las principales problemáticas es la necesidad de recarga del banco de baterías (BB) del vehículo y los tiempos que esto conlleva, sumado a la autonomía del BB. Estas estructuras de carga pueden obtener su energía desde la red eléctrica convencional, fuentes de energías alternativas y microredes de corriente continua o alterna [1,2,3].

Una de las alternativas para la estación de carga o cargador de batería (CB) es utilizar un convertidor trifásico conectado a la red eléctrica mediante un filtro que cumpla con las exigencias de la normativa vigente para este propósito [6]. Además, que incluya un convertidor que permita la recarga de la batería del vehículo eléctrico mediante un perfil de carga adecuado, garantice el mayor estado de carga (State of Charge, SOC) en el menor tiempo posible y a su vez que maximice la vida útil del BB [8].

En este trabajo se propone una estación de carga cuya topología consiste en, del lado de la conexión a la red eléctrica un inversor trifásico y del lado de carga del BB un convertir del tipo Buck-inteleaved de tres piernas. Para el conexionado a la red eléctrica se propone un convertidor trifásico conectado mediante un filtro inductor-capacitor-inductor (LCL), este tiene la particularidad de mejorar la atenuación del contenido armónico a las frecuencias de conmutación con respecto a los filtros inductivos puros tradicionales. Por otro lado, la implementación de los filtros LCL tienen el inconveniente de aumentar el orden del sistema significativamente, son susceptibles a las interferencias y a entrar en resonancia, por lo que se requieren técnicas de control más complejas [14,13,11]. Ademas, para el lado de carga del BB se elige un convertidor de tipo interleaved que permita minimizar el estrés en las llaves semiconductoras, disminuya el tamaño de los elementos pasivos como inductores y capacitores, permitiendo una mayor densidad de corriente, a la vez que se minimiza el ripple de tensión y corriente de carga. [15].

En este trabajo, se presenta una estrategia de control para una estación de carga trifásica para VE conectada a la red con filtro LCL + buck-interleaved, cuyo esquema se ve en la Fig. 1. Por ser un sistema de alto orden (decimocuarto), se aplica un promedio ponderado de las corrientes del lado de inversor-red (Weighted Average Current, WAC) que permite la reducción del orden del mismo, obteniendo un sistema de séptimo orden [16, 17]. Luego se diseña un control basado en pasividad conocido como asignación de interconexión y amortiguamiento (Interconnection and Damping Assigment, IDA), el cual asegura la estabilidad del sistema en lazo cerrado [8,19,18]. El controlador permite un acoplamiento del sistema logrando aplicar un perfil de carga de BB, al mismo tiempo que se consume una corriente con bajo contenido armónico (Total Harmonic Distortion, THD) y factor de potencia unitario, acorde a las exigencias impuestas por las normas. El trabajo está ordenado de la siguiente manera. En la sección II se presenta el modelo dinámico del sistema, el control propuesto y las ecuaciones que permiten independizarse de los sensores de las corrientes del inversor. En la sección III se presentan los resultados de simulación. Por último, en la sección IV las conclusiones.



Figura 1. Cargador de baterías trifásico conectado a la red con filtro LCL.



MODELO DINÁMICO PARA CARGADOR DE BATERÍA TRIFÁSICO CON FILTRO LCL

El CB propuesto está conformado por un convertidor AC-DC (Alternating Current-Direct Current,AD-DC) conectado con la red eléctrica y un convertidor DC-DC (Direct Current-Direct Current,DC-DC) encargado de cargar el BB. Estos dos convertidores están unidos por medio de una barra de DC. El convertidor AC-DC con filtro LCL es una fuente de tensión trifásica que permite la conexión al sistema eléctrico de potencia. Este convertidor y la barra de DC son los encargados de transferir energía al convertidor DC-DC asegurando que la corriente consumida de la red se ajuste a los requerimientos establecidos por la norma. El convertidor DC-DC es un convertidor buck-interleaved de tres piernas cuya salida está compuesta por un filtro pasabajos que permite filtrar la tensión y la corriente que llega al BB, y es el encargado de realizar el perfil de carga requerido. En la Fig. 1 se muestra el circuito esquemático del sistema completo que se propone.

La dinámica del inversor está representada en coordenadas abc, que en conjunto con la dinámica del convertidor buck-interleaved, forman un sistema de catorce ecuaciones que representa el comportamiento de todo el sistema, según se puede observar a continuación [16]

$$L_{g} \mathbf{i}_{gabc} = -r_{g} \mathbf{i}_{gabc} - \mathbf{u}_{abc} + \mathbf{e}_{gabc}$$

$$C \mathbf{\dot{u}}_{cabc} = -\mathbf{i}_{fabc} + \mathbf{i}_{gabc}$$

$$L_{f} \mathbf{i}_{fabc} = -r_{f} \mathbf{i}_{fabc} - \mathbf{u}_{abc} + V_{dc} \left(\frac{\mathbf{m}_{abc}}{2} - \frac{\sum_{i=abc} \mathbf{m}_{i}}{3} \right)$$

$$L_{b1} \mathbf{i}_{L_{b1}} = -r_{b1} \mathbf{i}_{L_{b1}} - V_{bat} + V_{dc} \mathbf{m}_{B1}$$

$$L_{b2} \mathbf{i}_{L_{b2}} = -r_{b2} \mathbf{i}_{L_{b2}} - V_{bat} + V_{dc} \mathbf{m}_{B2}$$

$$L_{b3} \mathbf{i}_{L_{b3}} = -r_{b3} \mathbf{i}_{L_{b3}} - V_{bat} + V_{dc} \mathbf{m}_{B3}$$

$$C_{b} \dot{V}_{bat} = \mathbf{i}_{L_{b1}} + \mathbf{i}_{L_{b2}} + \mathbf{i}_{Lb3} - \mathbf{i}_{bat}$$
(1a)

De la ecuación (1a) se diferencia, $\mathbf{i}_{f_{abc}} \in \mathbf{i}_{g_{abc}}$ que son los vectores cuyas componentes son las corrientes del lado de inversor y de lado de red respectivamente, $\mathbf{u}_{c_{abc}}$ es el vector de las tensiones del banco capacitivo del filtro con *C* como el valor capacitancia, \mathbf{e}_{gabc} es el vector cuyas componentes son las tensiones de red. Por otro lado, r_f y r_g representan las perdidas en los inductores del filtro L_f y L_g , C_{dc} es la capacitancia del bus de corriente continua, i_{L_b} , i_{bat} y V_{bat} son las corrientes y tensión asociada al lado de DC respectivamente y L_b y C_b representan la inductancia y capacitancia del filtro de salida del convertidor buck. Finalmente, \mathbf{m}_{abc} y m_B son las señales de control.

El modelo dado por (1a) que representa el sistema completo, donde la parte del inversor conectado a la red se reemplaza por un sistema en un marco de referencia sincrónico (dq0) utilizando la transformada de Park invariante en potencia, presenta en [13], permite hacer un diseño de control para todo el cargador sin necesidad de tener que diseñar un controlador individual para cada convertidor. Luego, haciendo una combinación de las corrientes involucradas entre el inversor y la red (WAC), se logra una reducción del orden del sistema, tal como fue realizado en [16, 17, 18], obteniendo un modelo en el espacio de estados que representa la dinámica completa del cargador de baterías conectado a la red en un conjunto de siete ecuaciones, de la siguiente manera,

$$L\mathbf{i}_{wdq} = -R\mathbf{i}_{wd} - L\omega_{dq}\mathbf{J}_{wdq} - V_{dc}\mathbf{m}_{dq} + \mathbf{e}_{gdq}$$

$$C_{dc}\dot{v}_{dc} = \mathbf{i}_{wdq}\mathbf{m}_{dq} - \mathbf{i}_{L_{1123}}\mathbf{m}_{B123}$$

$$L_{b2}i_{L_{b2}} = -r_{b2}i_{L_{b2}} - V_{bat} + V_{dc}m_{B2}$$

$$L_{b3}i_{L_{b3}} = -r_{b3}i_{L_{b3}} - V_{bat} + V_{dc}m_{B3}$$

$$C_{b}\dot{V}_{bat} = i_{L_{b1}} + i_{L_{b2}} + i_{L_{b3}} - i_{bat}.$$
(1b)

CONTROL IDA-WAC

El método de control propuesto para el *CB* conectado a la red con filtro *LCL*, consiste en aplicar una técnica basada en pasividad al sistema en WAC, con el objetivo de lograr que las variables de estado del sistema alcancen al vector de referencias propuesto. El diseño del controlador se realiza utilizando IDA



(Interconnection and Damping Assignmet, IDA), para lo cual se quiere representar el sistema en su modelo Hamiltoniano por puertos (port Hamiltonian, pH), [7,8,9,10]. El modelo pH de un sistema está representado por,

$$\begin{bmatrix} \dot{L}i_{wq} \\ \dot{L}i_{wq} \\ \dot{C}_{dc}\dot{V}_{dc} \\ \dot{L}_{b1}i_{L_{b1}} \\ \dot{L}_{b2}\dot{i}_{L_{b2}} \\ \dot{L}_{b3}\dot{L}_{L_{b3}} \\ CV_{bat} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R & -\omega_{dq}L & -m_{d} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \omega_{dq}L & -R & -m_{q} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ m_{d} & m_{q} & 0 & -m_{B1} & -m_{B2} & -m_{B3} & 0 \\ 0 & 0 & m_{B1} & -R_{b1} & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & m_{B2} & 0 & -R_{b2} & 0 & -1 \\ 0 & 0 & m_{B3} & 0 & 0 & -R_{b3} & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{i}_{wd} \\ \dot{i}_{wq} \\ V_{dc} \\ \dot{i}_{L_{b1}} \\ \dot{i}_{b2} \\ \dot{i}_{L_{b3}} \\ V_{bat} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_{gd} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -\dot{i}_{bat} \end{bmatrix}$$
(2)
$$\dot{\mathbf{x}} = [\mathbf{J}(\mathbf{x}, \mathbf{m}) - \mathbf{R}(\mathbf{x})]\nabla_{\mathbf{x}}H(\mathbf{x}) + \phi \\ \mathbf{y} = \phi^{T}\nabla_{\mathbf{x}}H(\mathbf{x})$$
(3)

donde x es el vector de estados, m es el vector de control, J(x, m) es la matriz de interconexión, R(x) es la matriz de amortiguamiento, H(x) es la función de energía del sistema, ϕ es la matriz de fuentes y/o perturbaciones externas al sistema, e y el vector de salida. El vector de estados está definido como,

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} Li_{wd} & Li_{wq} & C_{dc}v_{wq} & L_{b1}i_{b1} & L_{b2}i_{b2} & L_{b3}i_{b3} & C_bV_{bat} \end{bmatrix}^T$$
(4)

El vector de control es,

$$\mathbf{m} = [m_d \ m_q \ 0 \ m_{B1} \ m_{B2} \ m_{B3} \ 0]^T.$$
(5)

Del sistema representado en el espacio de los estados, ecuación (3), se identifican las matrices de interconexión y amortiguamiento como, Donde $J(\mathbf{m}) = -J(\mathbf{m})^T$ es antisimétrica y $\mathbf{R} = \mathbf{R}^T \ge 0$ es simétrica semidefinida positiva. La función de energía del sistema $H(\mathbf{x})$, se obtiene como la sumatoria de la energía almacenada en cada uno de los elementos almacenadores de energía.

$$H(\mathbf{x}) = \frac{1}{2} \left(L i_{wd}^2 + L i_{wq}^2 + C_{dc} V_{dc}^2 + L_{b1} i_{L_{b1}}^2 + L_{b2} i_{L_{b2}}^2 + L_{b3} i_{L_{b3}}^2 + C_b V_{bat}^2 \right)$$
(6)

De (6) se calcula el gradiente de la función de energía,

$$\nabla_{x} H(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} i_{wd} & i_{wq} & V_{dc} & i_{L_{B1}} & i_{L_{B2}} & i_{L_{B3}} & V_{bat} \end{bmatrix}^{T}$$
(7)

Finalmente, el vector de salida se define como,

$$\mathbf{y} = \begin{bmatrix} i_{wd} & i_{wq} & 0 & -i_{b1} & -i_{b2} & -i_{b3} & 0 \end{bmatrix}^T$$
(8)

La propuesta de control para la estación de carga conectada a la red con filtro LCL tiene dos objetivos principales realizar un perfil de carga para el BB, este consiste en un primer instante inyectar a las baterías una corriente constante, hasta que la tensión llegue a su valor umbral, para pasar a cargarse a tensión constante, hasta que la corriente en la batería llegue a un valor mínimo que indica que la carga fue completada. Y como segundo objetivo lograr baja distorsión armónica en la corriente de red y factor de potencia unitario.



DISEÑO DEL CONTROL

El diseño de control consiste en lograr que las variables de estado del sistema alcancen al vector de referencia, las referencias de corriente de red están en función de la corriente requerida en la carga del BB y las referencias de las corrientes de buck-interleaved se obtiene dividiendo en partes iguales la corriente de

carga para obtener un balance en dichas corrientes, $i_{Lb123} = \frac{i_{bat}^*}{2}$.

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} Li_{wd}^* & Li_{wq}^* & C_{dc}v_{dc}^* & L_{b1}i_{b1}^* & L_{b2}i_{b2}^* & L_{b3}i_{b3}^* & C_bV_{bat}^* \end{bmatrix}^T$$
(9)

Para lograr el objetivo de control, se debe diseñar una ley de control $\mathbf{m} = \beta(\mathbf{x})$ tal que el sistema en lazo cerrado quede representado por la dinámica,

$$\dot{\mathbf{x}} = [\mathbf{J}_d(\mathbf{x}, \mathbf{m}) - \mathbf{R}_d(\mathbf{x})] \nabla_{\mathbf{x}^*} H_d(\mathbf{x})$$
(10)

De (4) podemos determinar que la matriz $H_d(\mathbf{x})$ es la función de energía deseada del sistema, donde se debe cumplir que \mathbf{x}^* sea un mínimo de $H_d(\mathbf{x})$ y las matrices $\mathbf{J}_d(\mathbf{x}, \mathbf{m})$ y $\mathbf{R}_d(\mathbf{x})$ son las matrices de interconexión y amortiguamiento deseadas del sistema en lazo cerrado.

$$\mathbf{J}_{d}(\mathbf{x}, \mathbf{m}) = \mathbf{J}(\mathbf{x}, \mathbf{m}) + \mathbf{J}_{a}(\mathbf{x}, \mathbf{m}) = -\mathbf{J}_{d}(\mathbf{x}, \mathbf{m})^{T}$$

$$H_{d}(\mathbf{x}) = H(\mathbf{x}) + H_{a}(\mathbf{x})$$

$$\nabla_{\mathbf{x}}H_{d}(\mathbf{x}) = \nabla_{\mathbf{x}}H(\mathbf{x}) + \nabla_{\mathbf{x}}H_{a}(\mathbf{x})$$
(11)

Siendo $J_a(\mathbf{x}, \mathbf{m})$ y $\mathbf{R}_a(\mathbf{x})$ las matrices asignadas que logran el control propuesto. Estas matrices se eligen de manera que permitan sintetizar la estrategia planteada, donde $\mathbf{R}_a(\mathbf{x})$, es la matriz que contiene el amortiguamiento que se debe añadir al sistema para lograr la estabilidad deseada y $J_a(\mathbf{x}, \mathbf{m})$ es una matriz que permite definir las interconexiones dentro del sistema y facilitar la determinación de los parámetros del mismo.

Para lograr que los estados alcancen al vector de referencia, $H_d(\mathbf{x})$ se propone una función de Lyapunov de la forma,

$$H_d(\mathbf{x}) = \frac{1}{2} (\boldsymbol{\epsilon}^T \mathbf{P}^{-1} \boldsymbol{\epsilon})$$
(14)

Donde ϵ es el vector de los errores de los estados y $[i_{wd}^*, i_{wq}^*, V_{dc}^*, i_{L_{b1}}^*, i_{L_{b2}}^*, i_{L_{b3}}^*, V_{bat}^*]$ son las referencias deseadas para los estados del sistema, **P** es una matriz diagonal que contiene los valores de los elementos que almacenan energía en el sistema,



$$\boldsymbol{\epsilon} = \begin{bmatrix} \epsilon_{i_{wd}} \\ \epsilon_{i_{wq}} \\ \epsilon_{V_{dc}} \\ \epsilon_{i_{Lb1}} \\ \epsilon_{i_{Lb2}} \\ \epsilon_{i_{Lb3}} \\ \epsilon_{V_{bat}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L(i_{wd} - i_{wd}^{*}) \\ L(i_{wq} - i_{wq}^{*}) \\ C_{dc}(V_{dc} - V_{dc}^{*}) \\ L_{b1}(i_{Lb1} - i_{Lb1}^{*}) \\ L_{b2}(i_{Lb2} - i_{Lb2}^{*}) \\ L_{b2}(i_{Lb2} - i_{Lb3}^{*}) \\ L_{b3}(L_{Lb3} - i_{Lb3}^{*}) \\ C_{b}(V_{bat} - V_{bat}^{*}) \end{bmatrix}$$
(15)

$$\mathbf{P} = \operatorname{diag}\left[LLC_{dc}L_{b1}L_{b2}L_{b3}C_{b}\right]$$
(16)

Donde la derivada en el tiempo de $H_d(\mathbf{x})$ es,

$$\dot{H}_d = \boldsymbol{\epsilon}^T \mathbf{P}^{-1} \mathbf{R}_d \mathbf{P}^{-1} \boldsymbol{\epsilon} < 0 \tag{17}$$

por lo tanto, $\mathbf{R}_d(\mathbf{x})$ debe ser definida positiva para garantizar la convergencia a cero del error, entonces la elección de los elementos de $R_a(\mathbf{x})$ quedan condicionados, por lo que deben ser mayores que cero.

Utilizando (10) y (11) se obtiene la siguiente ecuación diferencial,

$$[\mathbf{J}(\mathbf{x},\mathbf{m}) - \mathbf{R}(\mathbf{x})]\nabla_{\mathbf{x}}H(\mathbf{x}) + \mathbf{g}(\mathbf{x}) = [\mathbf{J}_d(\mathbf{x},\mathbf{m}) - \mathbf{R}_d(\mathbf{x})]\nabla_{\mathbf{x}}H_d(\mathbf{x})$$
(18)

El sistema pH presentado en la ecuación diferencial (18), determina la dinámica del sistema en lazo cerrado, y resolviendo la antes mencionada, obtenemos las leyes de control para el cargador propuesto,

$$-Ri_{wd} - L\omega_{dq}i_{wq} - m_d V_{dc} + e_{gd} = -R\epsilon_{i_{wd}} - R_1\epsilon_{i_{wd}},$$
(19)

$$L\omega_{dq}i_{wd} - Ri_{wq} - m_q V_{dc} + e_{gq} = -R\epsilon_{i_{wq}} - R_2\epsilon_{i_{wq}},$$
(20)

$$m_d i_{wd} + m_q i_{wq} - m_{B1} i_{L_{b1}} - m_{B2} i_{L_{b2}} - m_{B3} i_{L_{b3}} = -R_3 \epsilon_{V_{dc}},$$
(21)

$$m_B V_{dc} - r_b i_{L_b} - V_{bat} = -R_4 \epsilon_{i_{L_b}} - r_b \epsilon_{i_{L_b}}, \tag{22}$$

$$m_B V_{dc} - r_b i_{L_b} - V_{bat} = -R_5 \epsilon_{i_{L_b}} - r_b \epsilon_{i_{L_b}}, \tag{23}$$

$$m_B V_{dc} - r_b i_{L_b} - V_{bat} = -R_6 \epsilon_{i_{L_b}} - r_b \epsilon_{i_{L_b}}, \tag{24}$$

$$i_{L_{b1}} + i_{L_{b2}} + i_{L_{b3}} - i_{bat} = \epsilon_{i_{L_{b1}}} + \epsilon_{i_{L_{b2}}} + \epsilon_{i_{L_{b3}}} - R_7 \epsilon_{\nu_{bat}}.$$
(25)

A partir de las ecuaciones (19) a (29) obtenemos los índices de modulación para el manejo de la estación de carga conectada a la red, de la siguiente manera;

$$m_{d} = \frac{\left\{-Ri_{wd}^{*} - L\omega_{dq}i_{wq} + e_{gd} + R_{1}\epsilon_{i_{wd}}\right\}}{V_{dc}}$$

$$m_{q} = \frac{\left\{-L\omega_{dq}i_{wd} - Ri_{wq}^{*} - L\omega_{dq}i_{wq} + e_{gq} + R_{2}\epsilon_{i_{wq}}\right\}}{V_{dc}}$$

$$m_{B2} = \frac{\left\{R_{B}i_{LB2}^{*} + V_{Bat}^{*} + R_{5}\epsilon_{i_{LB2}}\right\}}{V_{dc}}$$

$$m_{B3} = \frac{\left\{R_{B}i_{LB3}^{*} + V_{Bat}^{*} + R_{6}\epsilon_{i_{LB3}}\right\}}{V_{dc}}$$
(26)



Por último, i_{wd}^* se puede obtener de las ecuaciones (19)-(23), teniendo en cuenta las siguientes consideraciones,

$$i_{wd}=i^*_{wd}
ightarrow\epsilon_{i_{wd}}=0$$
, $i_{wq}=i^*_{wq}=e_{gq}=0$

Suponiendo, que la corriente en la batería se ha establecido $(i_{L_{b123}} = i^*_{L_{b123}})$,

$$i_{wd}^* = -\frac{b}{2} - \frac{1}{2}\sqrt{b^2 - 4c}$$
⁽²⁷⁾

donde:

$$b = \frac{-e_{gd}}{R}$$

$$c = i_{wq}^{*2} + \frac{3i_b^*}{R} [V_{bat}^* + r_b i_b^*] - \frac{R_3 \epsilon_{V_{dc}} V_{dc}}{R}$$

Para este controlador la dinámica del error resulta,

$$\dot{\epsilon}_{i_{wd}} = -\frac{R_1 + R}{\frac{L}{P_1 + P_2}} \epsilon_{i_{wd}},\tag{28}$$

$$\dot{\epsilon}_{i_{wq}} = -\frac{R_2 + R}{L} \epsilon_{i_{wq}},\tag{29}$$

$$\dot{\epsilon}_{V_{dc}} = -\frac{\kappa_3}{C} \epsilon_{V_{dc'}} \tag{30}$$

$$\dot{\epsilon}_{i_{L_{b1}}} = -\frac{R_4 + r_b}{L_{b1}} \epsilon_{i_{L_{b1}}} - \frac{\epsilon_{V_{bat}}}{C_b},\tag{31}$$

$$\dot{\epsilon}_{i_{L_{b2}}} = -\frac{R_5 + r_b}{L_{b2}} \epsilon_{i_{L_{b2}}} - \frac{\epsilon_{V_{bat}}}{C_b},\tag{32}$$

$$\dot{\epsilon}_{i_{L_{b3}}} = -\frac{R_6 + r_b}{L_{b3}} \epsilon_{i_{L_{b3}}} - \frac{\epsilon_{V_{\text{bat}}}}{C_b},\tag{33}$$

$$\dot{\epsilon}_{V_{bat}} = \frac{\epsilon_{i_{L_b}}}{L} - \frac{R_7}{C_b} \epsilon_{V_{bat}},\tag{34}$$

donde se puede ver que el sistema de lazo cerrado es estable, con convergencia asintótica del error a cero. De (28)-(34) se calculan los valores de R_1 a R_7 para obtener la velocidad de convergencia deseada para cada error. Asimismo, demuestran que el sistema queda desacoplado lo que permite que las perturbaciones del lado de la red no afecten el comportamiento del convertidor DC-DC que carga la batería y viceversa. Finalmente, los elementos del vector de referencias, \mathbf{x}^* , se eligen de acuerdo a los objetivos de control. Así, la referencia de la tensión de la batra de DC se elige constante ($V_{dc}^* = cte$) y i_{wq}^* se hace cero para que el sistema consuma corriente con factor de potencia unitario. Para el control del perfil de carga de la batería se usa (27) con $V_{bat}^* = cte$ para el control a tensión constante e $i_{Lbat}^* = cte$ para el control a corriente constante. Este último tiene tres etapas, para evitar el recalentamiento en el BB y así preservar su vida útil, si el banco de baterías está totalmente descargado o su SOC está por debajo del 20% se carga con $i_{bat 1}^*$, cuando el SOC es mayor al 20% y menor al 80% se carga con i_{bat2}^* y cuando el SOC es mayor al 80% con i_{bat3}^* .

Tabla 1. Parametros del sistema

Parámetros	valores
Lf	1.25[mH]
Lg	0.625[mH]
Cdc	1100[µF]
С	4.4[µF]
L _b	5[mH]
Cb	4.4[µF]
r _f	0.2[Ω]
r _g	0.1[Ω]
r _b	0.1[Ω]
V _{dc}	600[V]

V _{bat}	200[V]
egabc	220[V _{rms}]
Fred	50[Hz]
F _{sample}	20[KHz]

RESULTADOS DE SIMULACIÓN

Para la validación del control IDA-WAC propuesto se utilizó Simulink de Matlab con los parámetros presentados en la tabla 1. El sistema presentando en la Fig. 1 fue simulado implementando un perfil de carga de batería, este consiste en una carga a corriente constante en 3 etapas hasta alcanzar el umbral de tensión en la batería, necesario para pasar a carga a tensión constante y finalizar la carga de la misma. Para evitar tiempos de simulación demasiados extensos se modificaron algunos parámetros al modelo de batería presente en la librería de simulink.

El perfil mencionado consiste en la carga a corriente constante mediante las siguientes referencias, $I_{bat 1}^* = 40[A]$, $I_{bat 2}^* = 90[A]$ e $I_{bat 3}^* = 20[A]$, hasta que la tensión en bornes de la batería alcanza un valor de 220[V], momento en que la carga se hace a una tensión constante con $V_{bat}^* = 225[A]$ que es el umbral de tensión de carga de la batería, luego se comienza a cargar a una tensión constante hasta que la corriente de batería llega a un valor cercano a cero para completar la recarga.



Figura 2. Corriente, tensión en la batería y estado de carga [SOC %].

En la Fig. 2, se observa en la gráfica superior como la corriente de carga de batería sigue el perfil antes mencionado para la carga a corriente constante. En la gráfica intermedia se ve la evolución de la tensión en bornes de la batería, pasando por los tres niveles de corriente de carga y el aumento en conjunto del SOC. Tal como se muestra, la corriente se mantiene constante y la tensión en bornes de batería comienza a aumentar hasta los 2,25 segundos, dónde el control pasa a mantener la tensión constante en 225[*V*]. En la Fig. 3 se puede observar la corriente de referencia de carga de batería (morado) y las corrientes del buck-interleaved (rojo, azul, amarillo) donde se observa que el balance de corrientes se realiza correctamente tanto en el transitorio como en régimen permanente.





Figura 3. Corrientes del convertidor buck-interleaved (rojo, azul, amarillo) y referencia de corriente de carga de batería (morado).



Figura 4. Se muestra la corriente (i_{ga} en rojo). y tensión de la fase a (e_{ga} en azul) durante la carga del BB.

En la Fig. 4 se muestra la corriente y tensión de la fase a, con lo que se puede observar cómo la corriente está en fase con la tensión, verificado con el bajo contenido armónico observado en la Fig. 5 de la corriente consumida de la red durante la recarga de la batería, este se logra sin necesidad de hacer un control específico de armónicos en el sistema.



Figura 5. Espectro de frecuencia de la corriente de red durante la carga de la batería.

CONCLUSIONES

En este trabajo se propuso un control IDA-WAC para la carga de un BB de EV con un perfil de carga definido, y también controlar la corriente consumida de la red eléctrica en una estación de carga de vehículos eléctricos conectada a la red con filtro LCL. La ley de control es diseñada a partir de un modelo del sistema unificando los dos convertidores involucrados en el CB, permitiendo cumplir con las especificaciones de diseño tanto del lado de la red como en la carga de la batería. El diseño aplicando IDA-WAC logra garantizar la estabilidad y adicionalmente una reducción en el orden del sistema. Esto se logra aplicando al sistema en coordenadas de Park una ponderación de pesos de las corrientes WAC, pasamos de un sistema de 14^{to} a uno de 7^{mo} orden. Además, el controlador diseñado permitió cargar el BB respetando el perfil de carga con etapa de corriente constante en tres niveles y de tensión constante, al mismo tiempo que se consumió de la red eléctrica una corriente con un bajo contenido armónico sin necesidad de hacer un control específico.



AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo brindado por la Universidad Nacional de San Luis (UNSL) y la Red Temática 723RT0150 "Red para la integración a gran escala de energías renovables en sistemas eléctricos (RIBIERSECYTED)" financiada por la convocatoria de Redes Temáticas del CYTED (Programa iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo) del año 2022.

REFERENCIAS

Artículos en publicaciones periódicas:

- [1] S. M. Arif, T. T. Lie, B. C. Seet, S. Ayyadi, and K. Jensen, (2021) "Review of Electric Vehicle Technologies, Charging Methods, Standards and Optimization Techniques" Electronics, vol. 10, no. 16, p. 1910, Aug. 2021, doi: 10.3390/ electronics 10161910.
- [2] S. Rivera, S. Kouro, S. Vazquez, S. M. Goetz, R. Lizana and E. Romero-Cadaval, (2021) "Electric Vehicle Charging Infrastructure: From Grid to Battery" in IEEE Industrial Electronics Magazine, vol. 15, no. 2, pp. 37-51, June 2021, doi: 10.1109/MIE.2020.3039039.
- [3] M. Kesler, M. C. Kisacikoglu and L. M. Tolbert, (2014) "Vehicle-to-Grid Reactive Power Operation Using Plug-In Electric Vehicle Bidirectional Offboard Charger" in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 61, no. 12, pp. 6778-6784, Dec. 2014. doi: 10.1109/TIE.2014.2314065.
- [4] M. Ahmadi, N. Mithulananthan and R. Sharma, (2016) "A review on topologies for fast charging stations for electric vehicles" 2016 IEEE International Conference on Power System Technology (POWERCON), Wollongong, NSW, pp. 1-6. doi: 10.1109/POWERCON.2016.7753886.
- [5] K. M. Tan, V. K. Ramachandaramurthy and J. Y. Yong, (2016) "Three-phase bidirectional electric vehicle charger for vehicle to grid operation and grid voltage regulation" 2016 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific), Busan, 2016, pp. 007-012. doi: 10.1109/ITECAP.2016.7512913.
- [6] IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems, in IEEE Std 519-2014 (Revision of IEEE Std 519-1992), vol., no., pp.1-29, 11 June 2014.
- [7] F. M. Serra, C. H. De Angelo & D. G. Forchetti, (2014) "Interconnection and damping assignment control of a three-phase front end converter" International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Elsevier, Vol. 60, pp.317-324, 01 September 2014. ISSN 0142-0615, doi.org/10.1016/j.ijepes.2014.03.033.
- [8] F. M. Serra, C. H. De Angelo, (2016) "IDA-PBC Control of a Single-Phase Battery Charger for Electric Vehicles with Unity Power Factor" 2016 IEEE Conference on Control Applications (CCA) Part of 2016 IEEE MultiConference on Systems and Control, September 19-22. Buenos Aires, Argentina.
- [9] F. M. Serra, C. De Angelo and D. Forchetti, (2016) "IDA-PBC control of a DC-AC converter for sinusoidal threephase voltage generation", International Journal of Electronics, 104. 10.1080/00207217.2016.1191087.
- [10] O. D. Montoya, F. M. Serra and G. Espinosa-Pérez, .(2023) On the Equivalence between PI-PBC and IOC Designs: An Application Involving Three-Phase Front-End Converters, in IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, doi: 10.1109/TCSII.2023.3299203.
- [11] N. Lai and K. Kim, (2018) "Robust Control Scheme for Three-Phase Grid-Connected Inverters With LCL-Filter Under Unbalanced and Distorted Grid Conditions" in IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 33, no. 2, pp. 506-515, June 2018. doi: 10.1109/TEC.2017.2757042.
- [12] N He, D. Xu, Ye Zhu, J. Zhang, G. Shen, Y. Zhang, J. Ma and C. Liu (2013) "Weighted Average Current Control in a Three-Phase Grid Inverter With an LCL Filter" in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 28, no. 6, pp. 2785-2797, June 2013. doi: 10.1109/TPEL.2012.2219322.
- [13] A. Doria-Cerezo, F. M. Serra and M. Bodson, (2018) "Complex-based controller for a three-phase inverter with an LCL filter connected to unbalanced grids" in IEEE Transactions on Power Electronics. doi: 10.1109/TPEL.2018.2854576.