

Análisis de los modelos de carga propuestos para los vehículos eléctricos

Analysis of proposed load models for electric vehicles

J. Gil-Aguirre¹, S. Pérez-Londoño², J. Mora-Flórez³

¹Grupo ICE³, Programa de Ingeniería Eléctrica, Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia. Email: juanfer26@utp.edu.co

²Grupo ICE³, Programa de Ingeniería Eléctrica, Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia. Email: saperez@utp.edu.co

³Grupo ICE³, Programa de Ingeniería Eléctrica, Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia. Email: jjmora@utp.edu.co

RECIBIDO: abril 21, 2017. ACEPTADO: junio 02, 2017. VERSIÓN FINAL: noviembre 01, 2017

RESUMEN

En este artículo se presenta una revisión de los principales modelos de carga propuestos para representar las características más relevantes del vehículo eléctrico (VE). A partir del análisis bibliográfico se proponen tres enfoques principales para el modelado del vehículo eléctrico, lo cuales se pueden clasificar en modelos de carga tradicionales, modelos derivados y las aproximaciones que consideran modelos con incertidumbre de tipo aleatoria. Adicionalmente y a partir del enfoque en el cual se puede clasificar el modelo del vehículo, se realiza una discusión en torno al campo de estudio para el que mejor se ajusta cada modelo.

PALABRAS CLAVE: Vehículo eléctrico, Modelado de carga, sistemas eléctricos.

ABSTRACT

This paper presents a review of the main models proposed to represent the most relevant features of the electric vehicle. From the bibliographic analysis, three main approaches are proposed for the modelling of the electric vehicle. These can be classified into modelling using traditional load models, these that use derived models and finally the approaches that consider random uncertainty models. In addition, based on each approach, a discussion for the best application field for each model is presented.

KEYWORDS: Electric vehicle, Load modeling, Electric systems.

1. INTRODUCCIÓN

El desarrollo sustentable está ligado, entre otros, a los avances tecnológicos que se puedan aplicar para producir y usar la energía en una forma eficiente y amigable con el medio ambiente. Una de las grandes preocupaciones en las sociedades modernas, está relacionada con encontrar diversas alternativas, para lograr disminuir la dependencia de los combustibles fósiles y sus derivados, en las diferentes facetas de producción, transporte, comercialización y consumo de bienes y servicios, que han contribuido en gran medida al cambio climático. En la actualidad en el área de la movilidad sostenible, el vehículo eléctrico (VE) se presenta como una alternativa interesante al uso del automóvil de combustión interna, específicamente en grandes áreas urbanas. Según reporte reciente de la agencia Internacional de Energía (International Energy Agency, IEA) [1], ciudades como París, Amsterdam y

Londres en Europa y San Francisco, Seattle y los Ángeles en Estados Unidos, han presentado crecientes esfuerzos por plantear políticas y directrices que incentiven la utilización de vehículos eléctricos, con el ánimo de reducir los niveles de dióxido de carbono (CO₂). Tal ha sido el éxito de estas políticas, que se estima que en el año 2016 circularon cerca de 2 millones de vehículos eléctricos, alrededor del mundo.

Iniciativas como el Acuerdo de París (COP 21) [2], y los recientes incentivos tributarios para la importación de estos vehículos en varios países, hacen necesario una adecuada planificación e implementación de estrategias para el estudio del impacto que puede traer su masiva inclusión en los sistemas de distribución actuales.

Al considerar la característica bidireccional del flujo de potencia del VE (consume o entrega energía por determinados periodos), se requiere disponer de

modelos matemáticos del mismo, que permitan analizar su comportamiento e interacción con el sistema, para que no se vean afectada la calidad y confiabilidad en el servicio eléctrico. Pero es importante considerar que el modelado del (VE) se enfrenta ante los mismos retos de otras cargas: comportamiento variable en cuanto a composición y cantidad de cargas conectadas en un determinado instante, diversidad en los tipos de vehículos empleados (solo de baterías o híbridos) y/o ausencia de mediciones en las barras, que permitan caracterizar un modelo, entre otras [3].

A partir de la revisión bibliográfica de los modelos utilizados para el estudio del vehículo eléctrico y su interacción con la red, se encuentra que existen diversas variables que pueden influir en el modelado del mismo, por ejemplo: Dinámica del vehículo, al considerar las fuerzas que interactúan en la tracción del motor y el torque en el eje del generador eléctrico, ciclo de conducción, las condiciones climáticas, la inclinación de la carretera, el peso y la superficie del vehículo [4], hasta variables netamente eléctricas como pueden ser el tipo de la batería, la configuración del convertidor, los flujos bidireccionales que permiten estas nuevas cargas entre otros. De esta manera, dependiendo del tipo de estudio que se requiera realizar, análisis de estabilidad, calidad de la energía, análisis comparativo de la

eficiencia de una tecnología de vehículo sobre otra, entre otras, se empleará un modelo determinado que considere las variables respectivas.

Dada la gran cantidad de información relacionada con el vehículo eléctrico, se identifica una gran falencia respecto a la organización y clasificación de los modelos de acuerdo al tipo de estudio requerido. Debido a lo anterior, en este artículo, se propone la clasificación del modelado del VE en tres enfoques. Además se incluye al final, una descripción de su utilización, de acuerdo a su posible campo de estudio.

En la sección 2 de artículo se presenta la propuesta de clasificación y sus correspondientes subdivisiones. En la sección 3 se analiza en forma breve la aplicabilidad de dichos enfoques en diversas áreas de estudio y finalmente en la sección 4 se presentan las conclusiones del trabajo realizado.

2. CLASIFICACIÓN DE LOS MODELOS

Con la revisión realizada, se encuentra una gran cantidad de modelos, los cuales se pueden clasificar en: modelos de carga tradicionales, modelos derivados y las aproximaciones que consideran modelos con incertidumbre de tipo aleatoria. En la figura 1, se presenta la división de los modelos en tres enfoques.

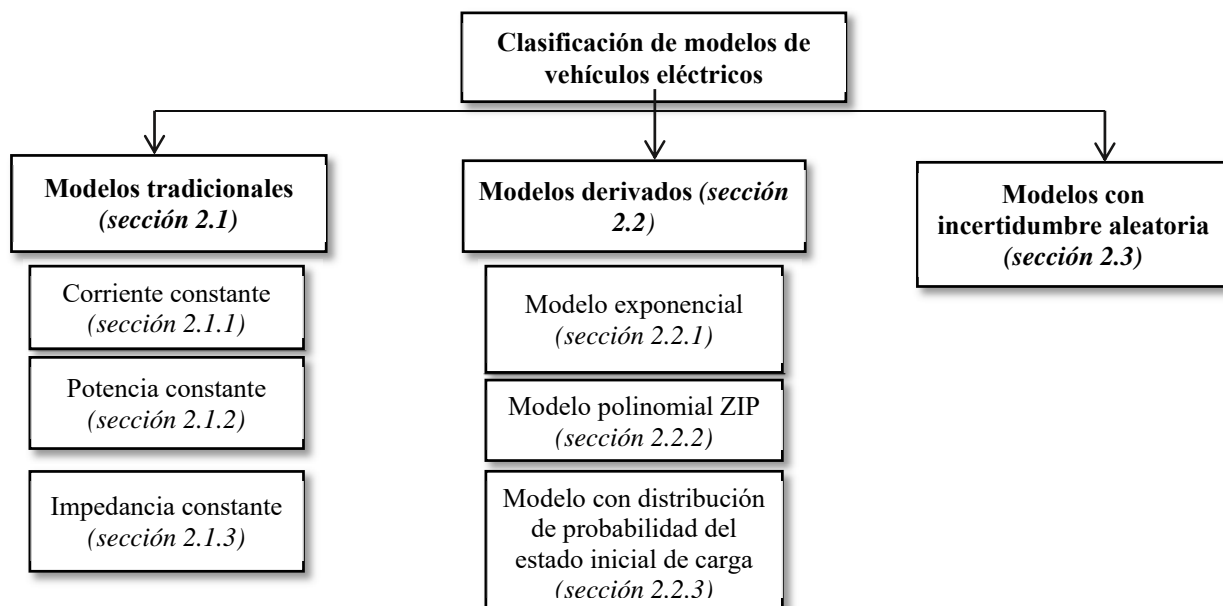


Figura 1. Propuesta de clasificación para modelos de vehículos eléctricos. **Fuente.** Elaboración propia.

2.1 MODELADO A TRAVÉS DE MODELOS DE CARGA TRADICIONALES

Este tipo de enfoque es quizás el más simplificado de los tres, ya que se emplean los modelos de carga clásicos de impedancia, corriente o potencia constante, para aproximar el comportamiento del vehículo

eléctrico cuando se encuentra conectado a la red. La justificación para este tipo de aproximación radica, en que aunque existen gran variedad de métodos para recargar las baterías de los vehículos eléctricos, los más utilizados son los métodos de corriente constante y de voltaje constante, en los cuales los vehículos pueden ser

vistos como una carga de tensión, corriente o potencia constante. Sin embargo, recientemente se está empleando la combinación de ambos métodos y de algunos más robustos como los descritos en [5], [6], [7], por lo tanto podría pensarse que estos modelos deben ser refinados para reproducir estos nuevos comportamientos.

2.1.1 Modelo del vehículo eléctrico como corriente constante

Como se ha mencionado anteriormente, se hace uso del modelo de corriente constante para el modelado del vehículo, aprovechando el método de carga de baterías a través de corriente constante.

Este modelo es utilizado por [8] en un estudio de estabilidad de pequeña señal, en el que se desea observar si el sistema de prueba sobrepasa su límite de estabilidad, al considerar alta penetración de vehículos eléctricos. De igual forma en [9], se analiza el impacto que pueden tener los vehículos eléctricos sobre la estabilidad de tensión de corto plazo, cuando éstos suministran potencia a la red (esta modalidad se conoce como vehículo a la red (V2G, *Vehicle to Grid*). Para este estudio, los vehículos eléctricos también son modelados como cargas de corriente constante, ya que son conectados a la red, a través de una interfaz basada en electrónica de potencia.

2.1.2 Modelado del vehículo eléctrico como potencia constante

El modelo de potencia constante es ampliamente utilizado en aquellos estudios, donde se pretende analizar los diferentes fenómenos que pueden presentarse en los sistemas eléctricos de distribución, durante el período de recarga de los vehículos eléctricos. Sin embargo, se considera que este tipo de aproximación es muy simplificada, ya que se consideran las variaciones de potencia activa y reactiva en los vehículos eléctricos, independientes de las de tensión.

En [10], se plantea un estudio de estabilidad de tensión de un sistema de distribución con alta penetración de vehículos eléctricos. Esta consideración se realiza mediante el modelado de consumos constantes de potencia en una flota de vehículos eléctricos.

De la misma manera, en [11] se realiza un estudio en un sistema IEEE de 34 nodos modificado, en el que se satisfacen las restricciones de operación del sistema, al tiempo que se minimiza el costo en la recarga del vehículo eléctrico.

En [12], se propone un esquema de recarga de vehículos eléctricos en línea, en donde se monitorea que los vehículos que ingresan a recargar sus baterías no lleven al colapso del sistema.

2.1.3 Modelo del vehículo eléctrico como impedancia constante

En este tipo de modelo, la potencia varía directamente con el cuadrado de la tensión, al tiempo que la impedancia de entrada del cargador se considera constante, de esta forma se garantiza una variación constante entre la tasa de cambio de la tensión y la corriente de entrada al vehículo eléctrico.

En [8] se propone que al modelar los vehículos eléctricos como impedancia constante, se obtienen mejores indicadores de estabilidad y por tanto niveles más altos de penetración de vehículos, en comparación con el modelo de potencia constante.

2.2 MODELADO A TRAVÉS DE MODELOS DERIVADOS

Recientemente, varios autores han encontrado deficiencias en el uso de los modelos tradicionales para el modelado del comportamiento del vehículo eléctrico, ya que modelos como el de potencia constante, no considera las variaciones en la tensión del vehículo. Por otro lado, el avance en el estudio de las baterías, sugiere que el consumo energético del vehículo es función de la tensión en las baterías a diferentes rangos del estado de carga (en inglés, *State Of Charge* SOC), debido a los cambios en las tasas de carga de las mismas.

Por esta razón, se han propuesto diferentes modelos derivados de los tradicionales, en los que se incluyen estas nuevas consideraciones y se analiza el desempeño de los cargadores de baterías de los vehículos, para estimar estos modelos. En [13] se muestran de manera general, las posibles problemáticas en cuanto al tema de armónicos, desbalance entre fases y aumento en las pérdidas del sistema que se deberán considerar al modelar los vehículos eléctricos, teniendo en cuenta las consideraciones antes descritas.

A continuación se presentan los principales representantes de los modelos derivados.

2.2.1 Modelo exponencial

Es un modelo estático del vehículo eléctrico desarrollado por [14], a partir del comportamiento de un cargador de baterías, el cual consiste en dos etapas principales, un rectificador de la tensión de red con control del factor de potencia y un convertidor DC/DC con modulación por ancho de pulso (PWM), para conectar con las baterías del vehículo. A partir del comportamiento desarrollado por este cargador, se realiza el ajuste de la curva, que relaciona la dependencia entre la tensión y los diferentes estados de carga (SOC) de la batería del vehículo eléctrico, y se obtiene la expresión mostrada en (1).

$$P/P_0 = k_{cp} + k_{va}(v/v_0)^\alpha \quad (1)$$

Donde P_0 es la potencia consumida a la tensión de referencia v_0 . Además, k_{cp} representa la tasa de variación de la componente total de potencia P_{cp} respecto a la entrada total de potencia P a la tensión de referencia, k_{vd} representa la tasa de variación de la componente dependiente de tensión P_{vd} respecto a la entrada total de potencia P a la tensión de referencia, finalmente, α es el parámetro que determina el tipo de variación que puede darse entre la potencia y la tensión del vehículo [14].

Como se puede notar de (1), se presenta una componente de potencia constante y otra que es dependiente de la tensión. Esta dependencia es de gran importancia para determinar la estabilidad en sistemas con presencia de vehículos eléctricos. Para este estudio se evidencia, que el margen de cargabilidad del sistema decrece con α . Finalmente, para las pruebas llevadas a cabo en este estudio, se observa que α toma valores negativos, a diferencia del caso de los modelos tradicionales en los cuales tomaba valores de 0, 1 ó 2 para los casos de potencia, corriente ó impedancia constante respectivamente. De la misma manera [15] y [16] emplean este modelo para estudios sobre el impacto en las redes actuales y en la estabilidad oscilatoria de los vehículos eléctricos. Por otra parte en [17] se utiliza este modelo, con el propósito de encontrar la mejor ubicación para una estación de carga de vehículos eléctricos, considerando márgenes de estabilidad y cargabilidad del sistema de distribución.

2.2.2 Modelo polinomial ZIP [18]

Al igual que en el caso anterior, el modelo ZIP para el vehículo eléctrico se desarrolla a partir de un cargador para vehículos, el cual consiste de un convertidor AC/DC totalmente controlado con un filtro en el lado AC y un convertidor Buck DC/DC. Cada convertidor tiene su etapa de control y de modulación PWM.

En este caso se realizan variaciones en la corriente de carga y la tensión de la batería para un rango del SOC entre el 10 y 100%, y se encuentra que la relación entre la potencia consumida por el vehículo y estas variables se pueden describir según las ecuaciones (2) y (3).

$$P_{ZIP}^{dk} = P_0^{EV} (Z_p^{EV} (V_0^{EV})^2 + I_p^{EV} V_0^{EV} + P_p^{EV}) \quad (2)$$

$$Q_{ZIP}^{dk} = Q_0^{EV} (Z_q^{EV} (V_0^{EV})^2 + I_q^{EV} V_0^{EV} + P_q^{EV}) \quad (3)$$

Donde P_0^{EV} , Q_0^{EV} son la potencia activa y reactiva a la tensión nominal en el barraje del vehículo eléctrico. Z_p^{EV} , I_p^{EV} , P_p^{EV} , Z_q^{EV} , I_q^{EV} y P_q^{EV} son los parámetros ZIP que mejor se ajustan al modelo.

2.2.3 Modelo con distribución de probabilidad del estado inicial de carga (SOC)

Este modelo es propuesto por [19], y principalmente busca caracterizar el comportamiento de un cargador de baterías para vehículos eléctricos, al igual que en los casos del modelo exponencial y polinomial ZIP, sin embargo no se hace énfasis en los dispositivos que constituyen al mismo, sino que analiza el algoritmo de carga de corriente constante/voltaje constante y la distribución de probabilidad que pueden presentar diferentes estados iniciales de carga.

Al realizar el ajuste de la curva a las características descritas anteriormente, se llega a la siguiente formulación:

$$SOC = \begin{cases} kt + SOC_0 & \text{para } u \leq U_{cr} \\ C_2 \exp(D_2 t) + C_3 & \text{para } u \geq U_{cr} \end{cases} \quad (4)$$

$$V_{bat} = Q(A_1 soc + B_1) \quad (5)$$

$$i = Q(A_2 soc + B_2) \quad (6)$$

Donde SOC_0 es el estado de carga inicial de la batería, A_1 , A_2 , B_1 , B_2 , C_2 , C_3 , D_2 son parámetros del modelo. Además Q es la capacidad de la batería en Amperios-hora, u es la tensión instantánea en terminales de la batería, U_{cr} es la tensión en la cual se presenta el cambio de corriente cosntante a voltaje constante durante el período de carga de la batería y soc es el estado de carga actual de la batería.

2.3 MODELADO A TRAVÉS DE LA INCERTIDUMBRE ALEATORIA

Este tipo de modelos sugeridos para el vehículo eléctrico se diferencian de los modelos determinísticos descritos hasta ahora, porque consideran la distribución espacial y temporal de los vehículos eléctricos. En algunos casos también se analizan los hábitos y el comportamiento de los conductores con el propósito de predecir rutas óptimas, horarios para la recarga de los vehículos o para vender energía a la red, soluciones en movilidad; a partir del análisis de los procesos estocásticos y para el planeamiento de los sistemas eléctricos a partir de las necesidades de estos vehículos.

Estos modelos no presentan una clasificación tan detallada como en casos anteriores, ya que se aplican para el estudio de fenómenos muy particulares de los vehículos eléctricos como los mencionados anteriormente.

En [20] por ejemplo, se propone una estrategia de control para la demanda de los vehículos eléctricos en un sistema de distribución. Dicho control se realiza con base en los estados iniciales del SOC y el precio de la electricidad, además se toman como señales de control el precio de electricidad de referencia y el tiempo estimado de parqueo de los vehículos.

En [21], se propone un modelo anual probabilístico de la energía consumida por una flota de vehículos eléctricos, basado en la simulación de Monte Carlo, con el propósito de definir los límites de penetración de vehículos en cada sistema de distribución.

Por otro lado, en [22] se analiza el impacto que pueden tener dos modos de operación para las estaciones de carga de las baterías; a saber, modo de carga rápida y modo de intercambio de baterías, esto a partir del análisis de los patrones de conducción que presentan los conductores y frecuencia con la que recargan sus vehículos.

Por su parte [23-27], presentan estudios sobre sistemas eléctricos de distribución, considerando diferentes tipos de incertidumbres en la operación con vehículos eléctricos, entre las que se pueden mencionar: la hora del día en la que los vehículos iniciarían el proceso de carga (esto a partir de una base de datos sobre las actividades diarias de sus propietarios), el período de carga más probable para los vehículos, la estimación de perfiles de demanda horaria para vehículos eléctricos, seleccionando de manera aleatoria secciones del circuito de distribución, en donde una gran flota de vehículos eléctricos pudiera ser conectados a la red, entre otras.

En [28] se estudia la operación de una estación de carga para vehículos eléctricos, al considerar aspectos determinísticos como el total de vehículos en cierta área, el porcentaje de penetración de los mismos y la capacidad de la estación de carga; además, aspectos aleatorios como la capacidad de las baterías de los vehículos que arriban a recargar, la probabilidad de cada usuario de recargar su vehículo en su hogar en lugar de la estación de recarga y las horas que el vehículo se encuentra parqueado en el lugar de trabajo del usuario.

3. CONSIDERACIONES FINALES

Finalmente y a manera de resumen, se aprecia que el modelado de los vehículos eléctricos puede considerar un gran variedad de elementos, que van desde su desempeño físico y dinámico, hasta su impacto e interacción con las redes eléctricas. Este último a su vez, también considera aspectos particulares dependiendo del estudio a realizar.

A manera de ejemplo, los modelos tradicionales al ser los más simplificados, son utilizados en estudios en los cuales los fenómenos transitorios no son relevantes, sino en aquellos en los que se hace necesario establecer si el sistema eléctrico está en la capacidad de suplir las nuevas demandas sin exceder límites operativos como cargabilidad o regulación de tensión. Los modelos derivados, que al ser formulados en su mayoría a partir del análisis circuital de los cargadores de batería y de las estaciones de carga conectadas a la red, consideran la respuesta de los controladores en los convertidores y pueden ser utilizados para estudios dinámicos sobre las

redes, al considerar diferentes tipos de perturbaciones. Finalmente, los modelos de incertidumbre aleatoria tienen su aplicación en estudios generalmente de optimización y en aquellos que consideran comportamientos y patrones no determinísticos, que son inherentes al uso de este medio de transporte.

4. CONCLUSIONES

Con el propósito de analizar los diferentes modelos del vehículo eléctrico, se presentó en este artículo una clasificación en subcategorías para una mejor comprensión de los principales enfoques propuestos para el modelado del vehículo eléctrico, sus principales características y campos de aplicación práctica.

Como aspectos relevantes en esta revisión, se determinó que existen una gran variedad de modelos para describir el comportamiento del vehículo eléctrico, sin embargo se debe tener claridad a cerca del estudio que se desea realizar para no seleccionar modelos demasiado complejos y cuyos resultados no evidencien respuestas de mejor calidad a las que pudieran obtener los modelos más sencillos.

5. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo de investigación es apoyado por la Vicerrectoría de Investigaciones, Innovación y Extensión bajo el proyecto “Modelado de carga dinámica a partir de Mediciones en sistemas de potencia modernos” contrato número 6175-2017, y el programa de Maestría en Ingeniería Eléctrica de la Universidad Tecnológica de Pereira.

6. REFERENCIAS

- [1] International Energy Agency", *Iea.org*, 2017. [Online]. Available: <http://www.iea.org>. [Accessed: 11-Jul- 2017].
- [2] UNFCCC, “Paris Agreement - Status of Ratification (December 2015),” *United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization*, 2016. [Online]. Available: http://unfccc.int/paris_agreement/items/9444.php.
- [3] A. Arif, Z. Wang, J. Wang, B. Mather, H. Bashualdo and D. Zhao, "Load Modeling – A Review", *IEEE Transactions on Smart Grid*, pp. 1-1, 2017.
- [4] S. Alegre, J. Míguez and J. Carpio, "Modelling of electric and parallel-hybrid electric vehicle using Matlab/Simulink environment and planning of charging stations through a geographic information system and genetic algorithms", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 74, pp. 1020-1027, 2017.
- [5] J. Bendien, G. Fregien and J. van Wyk, “High-efficiency on-board battery charger with transformer isolation, sinusoidal input current and maximum power

- factor", *IEE Proceedings B Electric Power Applications*, vol. 133, no. 4, p. 197, 1986.
- [6] X Yan and D Patterson, "A high efficiency on-board battery charger with unity input power factor", in *Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC)*, Darwin, 26-29 September 1999.
- [7] J. Marcos *et al.*, "Fast Lead-Acid Battery Charge Strategy," *Twenty-First Annu. IEEE Appl. Power Electron. Conf. Expo. 2006. APEC '06.*, 2006.
- [8] T. Das and D. C. Aliprantis, "Small-signal stability analysis of power system integrated with PHEVs," in *2008 IEEE Energy 2030 Conference, Atlanta GA*, 17-18.
- [9] M. El Chehaly, O. Saadeh, C. Martinez, and G. Joos, "Advantages and applications of vehicle to grid mode of operation in plug-in hybrid electric vehicles," in *2009 IEEE Electrical Power and Energy Conference*.
- [10] Y. Zhang, X. Song., F. Gao., and J. Li. "Research of voltage stability analysis method in distribution power system with plug-in electric vehicle", in *2016 IEEE Power and Energy Engineering Conference*.
- [11] Lunci Hua, Jia Wang and Chi Zhou, "Adaptive Electric Vehicle Charging Coordination on Distribution Network", *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 5, no. 6, pp. 2666-2675, 2014.
- [12] O Onar and A Khaligh, "Grid interactions and stability analysis of distribution power network with high penetration of plug-in hybrid electric vehicles", *Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2010 Twenty-Fifth Annual IEEE* pp. 1755-1762, 2010.
- [13] Z Zhao, B Zhao and Y Xia, "Research on Power Grid Load after Electric Vehicles Connected to Power Grid", *IEEE Grid and Distributed Computing (GDC), 2015 8th International Conference* pp. 36-39, 2015.
- [14] C. H. Dharmakeerthi, N. Mithulananthan, and T. K. Saha, "Modeling and planning of EV fast charging station in power grid," in *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, 2012.
- [15] C. H. Dharmakeerthi, N. Mithulananthan, and T. K. Saha, "Overview of the impacts of plug-in electric vehicles on the power grid," in *2011 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies, ISGT Asia 2011 Conference: Smarter Grid for Sustainable and Affordable Energy Future*, 2011.
- [16] C. H. Dharmakeerthi, N. Mithulananthan, and T. K. Saha, "Impact of electric vehicle load on power system oscillatory stability", *Australas. Univ. Power Eng. Conf. AUPEC 2013*, 2013.
- [17] M. M. Rahman, S. Barua, S. T. Zohora, K. Hasan, and T. Aziz, "Voltage sensitivity based site selection for PHEV charging station in commercial distribution system", in *Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, APPEEC*, 2013.
- [18] A Haidar and K. Muttaqi, "Behavioral Characterization of Electric Vehicle Charging Loads in a Distribution Power Grid Through Modeling of Battery Chargers", *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 52, no. 1, pp. 483-492, 2016.
- [19] M Zhang, J Zheng, W Wang and M Dai, "Research on static voltage stability based on EV charging station load modeling", in *IEEE Advanced Power System Automation and Protection (APAP), International Conference on* vol. 2, pp. 1094-1099, 2011.
- [20] A Selim, M Abdel-Akher and M Aly, "Plug-in hybrid electric vehicles aggregation and real-time active power control simulation analysis in distribution systems", *IEEE Power Systems Conference (MEPCON), Eighteenth International Middle East* pp. 723-728, 2016.
- [21] M. F. Shaaban and E. F. El-Saadany, "Probabilistic modeling of PHEV charging load in distribution systems," *3rd International Conference on Electric Power and Energy Conversion Systems, EPECS 2013*, pp 1-6, 2013.
- [22] B. Liao *et al.*, "Load modeling for electric taxi battery charging and swapping stations: Comparison studies", *IEEE 2nd Annual Southern Power Electronics Conference, SPEC 2016*, pp 1-6, 2017.
- [23] R Leou, C Su and N Lu. "Impact analysis of electric vehicles on distribution systems considering uncertainties", *IEEE Industrial Electronics Society, IECON 2013-39th Annual Conference of the IEEE* pp 2063-2068, 2013.
- [24] C. Farmer, P. Hines, J. Dowds, and S. Blumsack, "Modeling the impact of increasing PHEV loads on the distribution infrastructure," in *Proceedings of the Annual Hawaii International Conference on System Sciences*, 2010.
- [25] P. Grahn, K. Alvehag and L. Soder, "PHEV Utilization Model Considering Type-of-Trip and Recharging Flexibility", *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 5, no. 1, pp. 139-148, 2014.
- [26] S Zeng, J Zhang, Z Chi, X Li and Y Chen, "The research of temporal and spatial uncertainty of electric vehicle charging load impact on power system", *IEEE Power System Technology (POWERCON), 2014 International Conference* ,pp. 3265-3270, 2014.
- [27] C Chan, H Liou and C Lu, "Operation of distribution feeders with electric vehicle charging loads", *Harmonics and Quality of Power and IEEE 15th International Conference*, pp. 695-700, 2012.
- [28] G Celli, G Soma, F Pilo, F Lacu, S Mocci and N Natale, "Aggregated electric vehicles load profiles with fast charging stations", *IEEE Power Systems Computation Conference (PSCC), 2014* , pp. 1-7, 2014.