

Recibido 13 Septiembre 2019. Aceptado 26 Noviembre 2019. Publicado 20 Diciembre 2019.

ISSN 2448-7775

Análisis y Simulación de Motores de Imanes Permanentes para Aplicaciones a Vehículos Eléctricos

IVAN A. HERNANDEZ-ROBLES*, R. A. ARROYO-PEREZ, J. MERCED LOZANO G, J. MARTINEZ PATIÑO, H. J. ESTRADA GARCIA.

Departamento de Ingeniería Eléctrica/ Universidad de Guanajuato, Salamanca, Gto., México
ia.hernandez@ugto.mx (*Autor de correspondencia)
ra.arroyoperez@ugto.mx
jm.lozano@ugto.mx
jesusmp23@ugto.mx
hestrada@ugto.mx

RESUMEN Con el objetivo de realizar investigación necesaria para el progreso y generación del conocimiento asociado en el diseño de motores eléctricos del tipo compacto (Hub), se realiza este trabajo abordando el análisis y simulación de este tipo de motores para aplicarse como unidades de potencia para automóviles eléctricos. Este trabajo realiza simulación con elemento finito y simulación circuital para estudiar y analizar los parámetros relevantes del motor, como es el par, la velocidad, fuerzas electromotriz inducidas en la fase del motor, además se realizó la comparación de resultados con las dos diferentes técnicas de simulación, la diferencia en resultados es del 12% esto valida al modelo circuital para ser una herramienta útil para implementarse en aplicaciones de diseño de estos motores. El desarrollo de este trabajo contribuye al conocimiento y desarrollo tecnológico de nuevas alternativas de diseño y fabricación de motores eléctricos para vehículos eléctricos.

PALABRAS CLAVE bobinas, campo magnético, motor eléctrico, motor compacto Hub, torque.

I. INTRODUCCIÓN

La mayoría de los actuales avances tecnológicos en los vehículos eléctricos se han centrado en la mejora de la eficiencia energética, por lo que varios estudios de investigación existentes se centran en el desarrollo de nuevas unidades de potencia (propulsión) del vehículo eléctrico, en particular [1]-[3] se investiga el motor eléctrico incrustado en la rueda del vehículo eléctrico. Los scooters eléctricos con propósitos de transporte y entretenimiento se demandan cada vez, esta tendencia es impulsada por el aumento en el desarrollo de tecnologías para vehículos eléctricos. La tecnología de motor en rueda requiere el montaje de un motor eléctrico directamente en el cubo (espacio de rin) de la llanta del vehículo, sin engranajes o cadenas evitando el número de piezas mecánicas de transmisión de potencia y por lo tanto reducir la pérdida de energía [4]. El motor Hub se refiere al motor encapsulado (de ahí su nombre) en el rin de la llanta, este tipo de motor eléctrico actualmente es el más popular que se está analizando para incorporarse dentro en los vehículos eléctricos; el análisis para este tipo de motores se concentra en algunos parámetros como la eficiencia de la transmisión, la fiabilidad y la densidad de energía se está trabajando para mejoras en estos parámetros; el espacio donde son montados (rin de la llanta) limita la potencia del motor, esto incrementa la búsqueda de optimización de tamaño y sin descuidar la potencia; las características de relación de calidad-

precio y par-peso también se intentan reducir, algunos estudios con estos objetivos [5]-[7]. Debido al creciente interés por el desarrollo de vehículos eléctricos surge este trabajo enfocado a revisar el análisis y simulación de motores eléctricos para aplicarse como las unidades de potencia de los vehículos eléctricos. Además, con este trabajo se busca fortalecer la parte académica y de enseñanza en el diseño óptimo de los parámetros relevantes para funcionamiento del motor eléctrico compacto y consolidar la base de conocimiento para una investigación en la optimización de potencia de estos motores.

II. MOTORES ELECTRICOS PARA LA MOVILIDAD DEL FUTURO

A. Modelo fisico del motor Hub

En términos generales un motor eléctrico compacto-Hub es un motor con imanes permanentes, al sistema de movilidad que utiliza un motor compacto Hub como su unidad de potencia lo integran 3 elementos, a) *el motor Hub*, b) *el controlador y accionador (driver)*, c) *el sistema de almacenamiento (batería)*, ver Fig.1a. El motor Hub es alimentado mediante energía eléctrica de corriente continua C.C. por lo general es construido con tres circuitos o fases para su alimentación. Cada una de

estos circuitos se energiza de manera sucesiva mediante el controlador. En el perímetro exterior del motor eléctrico generalmente se colocan los imanes permanentes actualmente de neodimio. Usualmente la estructura que soporta a la flecha contiene también a las bobinas conductoras, ver Fig.1b. Un pulso de energía eléctrica se envía a las bobinas del motor desde el controlador, este pulso produce un campo magnético que interactúa con el campo magnético producido por los imanes, la interacción en los campos magnéticos produce el movimiento (giro) de los imanes. El controlador envía otro pulso de energía eléctrica en los demás circuitos produciendo otra interacción del campo magnético con el campo magnético producido por los imanes permanentes y hará que el rotor continúe girando. Para lograr que la interacción de los campos magnéticos producidos por los imanes permanentes y por los pulsos de energía eléctrica se utilizan sensores de efecto Hall, Fig.1b. Los sensores de efecto Hall se utilizan para mandar la secuencia correcta para que el controlador produzca el disparo de energización de las fases del motor. El controlador determina la velocidad a la que gira el motor. Los pulsos de energía eléctrica enviados al motor Hub están determinadas por la válvula reguladora por ej. el acelerador en una bicicleta eléctrica. El acelerador es un reóstato que regula la cantidad de voltaje enviado al driver, cuando se gira el acelerador se cambia los niveles de voltaje, los sensores de efecto Hall observan este cambio en el voltaje y envían y envían la señal al controlador para lanzar la secuencia correcta para disparar los pulsos de energización. Los pulsos de energización son proporcionados por la batería que por lo general para este sistema de movilidad se emplea de Litio-Ferrofostado (LiFePO4).

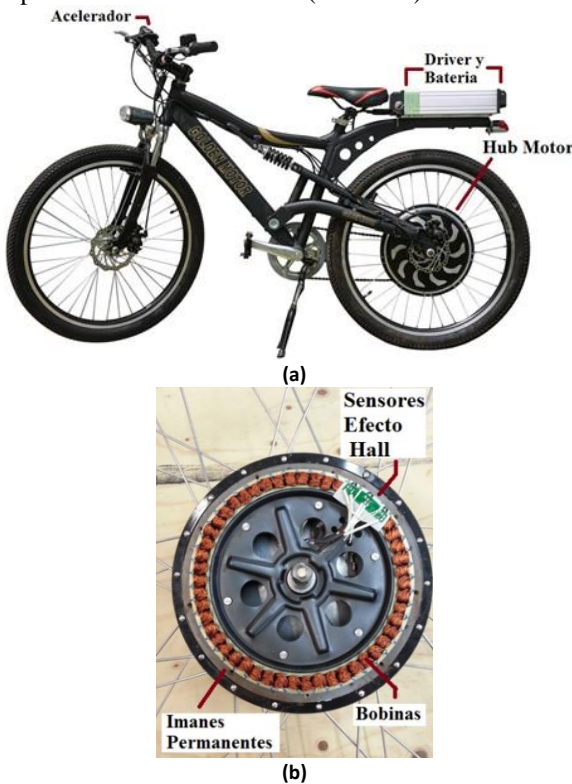


Fig. 1. Sistema de movilidad utilizando motor eléctrico compacto Hub. a) Componentes. b) Motor Hub componentes.

B. Modelo circuital para la operación del motor Hub

Los componentes del sistema de movilidad del motor eléctrico compacto Hub pueden modelarse a través de una batería, controlador, motor Hub, y sensores Hall, Fig.2a. la representación del circuito equivalente se muestra en Fig.2b. Donde $R_a, R_b, R_c, L_a, L_b, L_c$ representan los valores de la resistencia e inductancia de los devanados o fases A, B, C respectivamente. e_A, e_B, e_C , son las fuentes electromotrices inducidas en las fases A, B, C respectivamente, y por ultimo las variables V_a, V_b, V_c , representan los voltajes en las terminales de cada fase, voltajes que determinan la secuencia de energización de los circuitos o fases del motor Hub.

El circuito equivalente de la Fig.2b usando leyes de voltajes de Kirchoff, el voltaje en las terminales del motor Hub puede representarse mediante las ecuaciones de corriente de malla:

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a & 0 & 0 \\ 0 & R_b & 0 \\ 0 & 0 & R_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} L_a & 0 & 0 \\ 0 & L_b & 0 \\ 0 & 0 & L_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_A \\ e_B \\ e_C \end{bmatrix} \quad (1)$$

Donde I_a, I_b, I_c denotan la corriente suministrada a las bobinas A, B, C de los tres circuitos del motor Hub, la fuerza electromotriz inducida se determina aplicando la ley de Faraday, un campo magnético Φ en movimiento o variante en el tiempo produce una fuerza electromotriz inducida, este esta dada por:

$$e = -\frac{Nd\Phi}{dt} = -\frac{Nd(\Phi_m \cos(\omega t))}{dt} = N\omega\Phi_m \sin(\omega t) \quad (2)$$

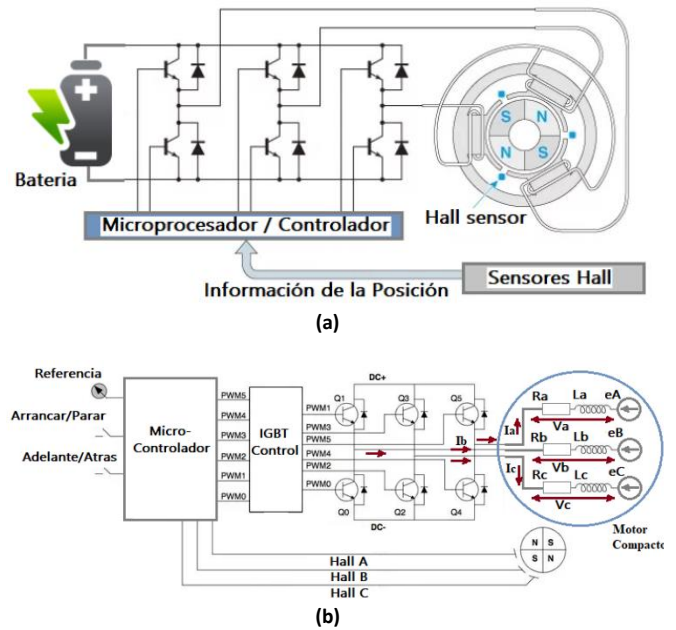


Fig. 2. Modelado del sistema de movilidad utilizando motor eléctrico compacto Hub. a) componentes. b) circuito equivalente.

El vector de la fuerza electromotriz quedaría entonces como:

$$\begin{bmatrix} eA \\ eB \\ eC \end{bmatrix} = k_M \psi B_m \begin{bmatrix} \sin(p\theta) \\ \sin(p\theta - 2\pi/3) \\ \sin(p\theta - 4\pi/3) \end{bmatrix} \quad (3)$$

Donde k_M es la constante del motor, ψ es la velocidad angular mecánica, B_m es la densidad de campo magnético y θ es el ángulo entre el flujo magnético resultante entre el campo magnético producido por los imanes permanentes y las bobinas, p denota el número de polos del motor.

Las ecuaciones del sistema mecánico del motor Hub puede estar dadas por:

$$J \frac{d\psi}{dt} = T_e - T_L - D\psi \quad (4)$$

Donde J es el momento de inercia, D coeficiente de fricción de amortiguamiento, T_L torque de carga y T_e es el torque eléctrico, esté este dado por:

$$T_e = \frac{eAa}{\psi} + \frac{eBb}{\psi} + \frac{eCc}{\psi} \quad (5)$$

III. SIMULACIÓN DEL MOTOR HUB

A. Simulación con Elemento Finito

En este trabajo para realizar la simulación y análisis electromagnético de los campos magnéticos que interactúan en el interior del motor Hub, se utilizó un motor de imanes permanentes de 70 W, la Tabla I contiene los parámetros de este motor analizado, para modelarlo se realizó una inspección interior del motor, se determinó el número de polos, las vueltas en el embobinado, dimensiones de calibre, dimensiones exteriores e interiores accesibles, revisión de conexiones, posición de los sensores Hall; Fig. 3 muestra el interior del motor Hub analizado.

La simulación electromagnética del motor se hace con el software comercial e elemento finito COMSOL con el módulo AC/DC-Rotative/Machinery; de acuerdo con la inspección interna, a las dimensiones extraídas y complementada con las dimensiones especificadas del fabricante se logra modelar al motor en el ambiente del simulador Fig.4a; con el modelo geométrico del motor se le adiciona la fuente de excitación, el resultado de la simulación arroja la densidad del flujo magnético y las líneas de flujo obtenido, en estado estable ($t=0$) se muestra en la Fig.4b.

El rango de tiempo de simulación es hasta 2 segundos con pasos de tiempo de 0.1 ms. Las características de torque-tiempo y velocidad-tiempo se muestran en Fig.5. El torque nominal de acuerdo con la especificación del fabricante es de 0.22 N*m.

TABLA I. PARÁMETROS DEL MOTOR HUB ANALIZADO

PARÁMETRO	VALOR
Voltaje DC en las Terminales [V]	24
Velocidad Nominal [rpm]	3000
Par constante y mantenido [N*m]	0.22
Potencia Nominal [W]	70
Torque Pico [N*m]	0.8
Corriente Pico [A]	13.2
Resistencia Línea-Línea [Ohms]	0.65
Inductancia Línea-Línea [H]	1.1
Back EMF [V/krpm]	6.5
Momento de Inercia [gr*cm ²]	72
Peso [kg]	0.75

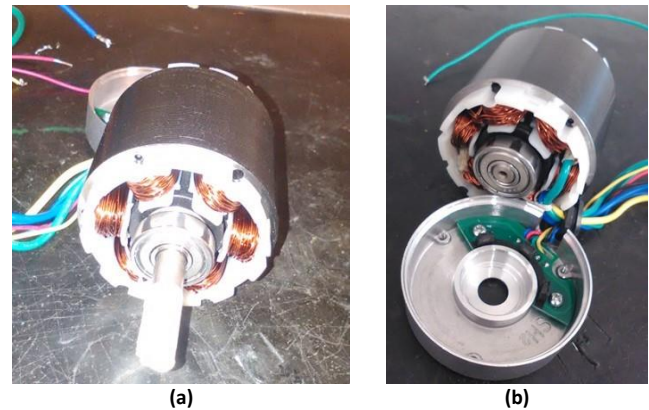
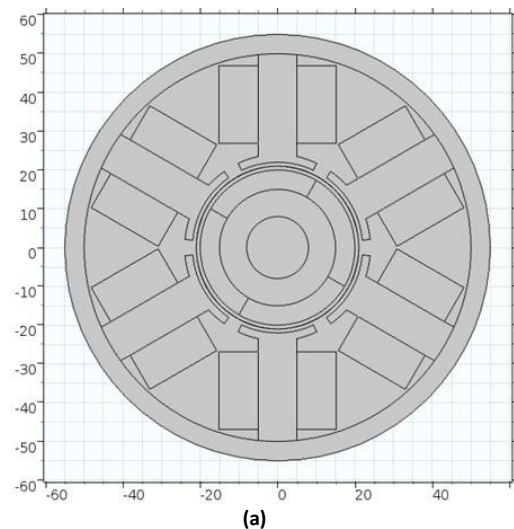


Fig. 3. a) Interior motor Hub. b) posicionamiento de los sensores Hall del motor analizado.



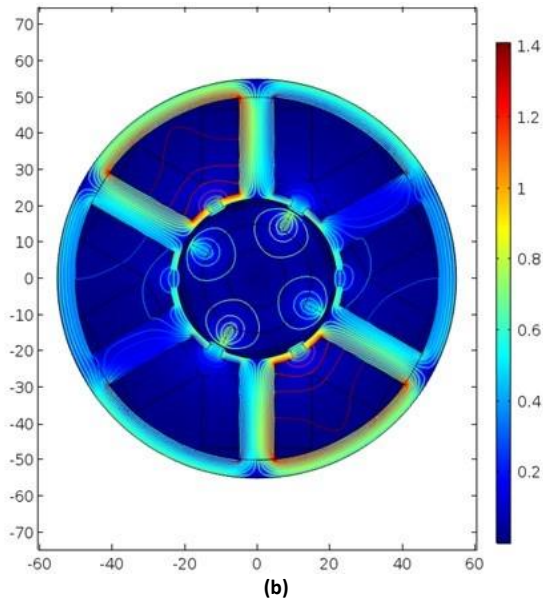


Fig. 4. a) Interior del motor BLDC-8105A en el ambiente del simulador COMSOL. b) Densidad del Flujo Magnético y líneas de flujo magnético producidas por la energización de las bobinas del motor mediante su driver.

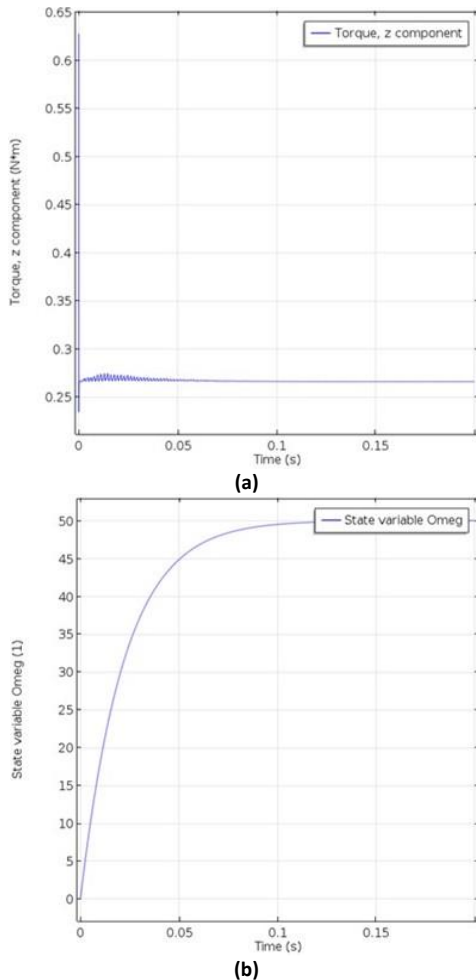


Fig. 5. a) Característica Torque ($N \cdot m$) vs tiempo obtenía por simulación electromagnética. b) Característica Velocidad (Hz).

B. Simulación el software Matlab

El modelo del circuito equivalente de la Fig.2 fue realizado en el programa de simulink y los parámetros del motor compacto Hub, de la Tabla 1 fueron introducidos, se obtuvieron los resultados del par electromagnético, corriente en la fase, la fuerza electromotriz inducida en la fase del motor, la velocidad mecánica, estos parámetros son esenciales para diseñar y probar al motor Hub. El voltaje de suministro para este motor es de 24V de CD, Fig.6a muestra la fuerza electromotriz (3) inducida en la fase A en el motor, los valores obtenidos de eA son de 21 V pico. La corriente en la fase A obtenida es 8 A pico, esta puede observarse en Fig.6b. La velocidad de referencia es de 3000 rpm tanto por simulación electromagnética como circuital esta fue obtenida, Fig5b dada en revoluciones por segundo y Fig. 7b por simulación circuital. Con respecto al par electromagnético (5) que se obtuvo por simulación electromagnética fue de $0.275 N \cdot m$ Fig.5a, y a través de circuital fue de $0.32 N \cdot m$. Los valores y graficas obtenidas tanto en simulación electromagnética y circuital tienen una diferencia del 12%.

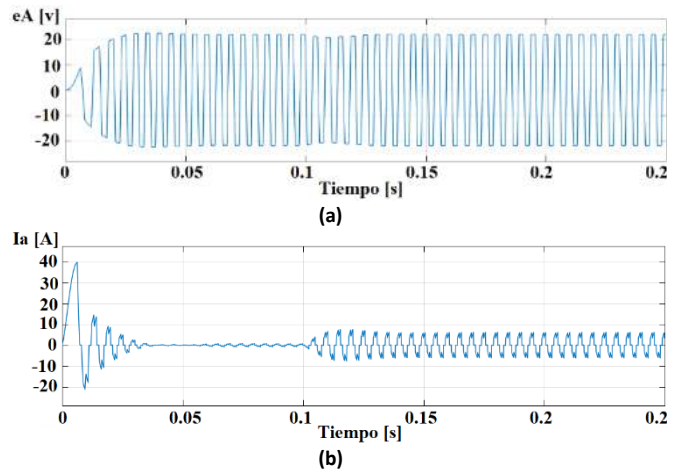


Fig. 6. a) Característica fuerza electromotriz inducida (V) versus tiempo obtenía por simulación circuital. b) Característica de la corriente por fase (A).

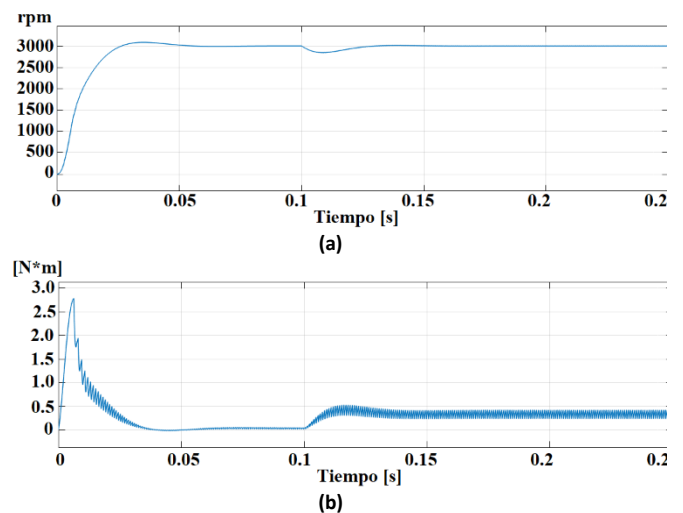


Fig. 7. a) Característica velocidad (rpm) versus tiempo obtenía por simulación circuital. b) Característica del par electromagnético ($N \cdot m$) de (5).

IV. CONCLUSIONES

Existe un creciente interés para desarrollar vehículos eléctricos, este trabajo abordó el análisis y simulación de motores compactos Hub para aplicarse como unidades de potencia para automóviles eléctricos. Las ecuaciones analíticas que presenta este trabajo para modelar a estos motores Hub fueron validas a través de la simulación con elemento finito. El trabajo se enfocó a estudiar y analizar los parámetros relevantes del motor, como es el par, la velocidad, fuerzas electromotrices inducidas en la fase del motor. Como herramienta de validación se utilizó la simulación electromagnética del motor Hub, además de validar al modelo circuital, permitió comprender y determinar el campo magnético resultante de la interacción entre el flujo magnético de los imanes y de las bobinas. La comparación de resultados con las dos diferentes técnicas de simulación, arrojó una diferencia del 12% a pesar de no estar entre abajo del 10% de diferencia, este trabajo confirma que el modelo circuital es una buena aproximación y por su simplicidad puede utilizarse como una herramienta útil para implementarse en aplicaciones de diseño de estos motores Hub. El desarrollo de este trabajo contribuye al conocimiento y desarrollo tecnológico de nuevas alternativas de diseño y fabricación de motores eléctricos para vehículos eléctricos.

REFERENCIAS

- [1] Kazim Cakir and A. Sabanovic, In-wheel Motor Design for Electric Vehicles, AMC'06-Istanbul, Turkey, 2006, pp. 613-618.
- [2] Manu Jain, and Sheldon S. Williamson, Suitability Analysis of In-Wheel Motor Direct Drives for Electric and Hybrid Electric Vehicles, IEEE Electrical Power & Energy Conference, 2009.
- [3] Shin-ichiro Sakai, Hideo Sado, and Yoichi Hori, 1999, Motion Control in an Electric Vehicle with Four Independently Driven In-Wheel Motors, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 4, No. March 1999.
- [4] Yee-Pien Yang and Down Su Chuang, 2007, Optimal Design and Control of a Wheel Motor for Electric Passenger Cars, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 43, No. 1, January 2007.
- [5] Bianchi, N.; Bolognani, S.; Zigliotto, M.; "High-performance PM synchronous motor drive for an electrical scooter," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 37, no. 5, pp. 1348-1355, Sep/Oct 2001 .
- [6] Ravi, N.; Ekram, S.; Mahajan, D.; "Design and Development of a InWheel Brushless D.C. Motor Drive for an Electric Scooter," Proceedings of the International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES), Dec. 2006.
- [7] Byeong-Mun Song; Ki-Chan Chang; Jang-Young Choi; "Design of an outer-rotor-type permanent magnet motor for electric scooter propulsion systems," Proceedings of the International Power Electronics Conference (IPEC), pp.2763-2742, June 2010.