

전기자동차의 연비향상을 위한 매입형 영구자석 동기전동기의 효율특성 분석

김종희, 김기찬, 이대동*
한밭대학교 전기공학과

Analysis on Efficiency Characteristics of IPMSM for fuel Economy Improve of Electric Vehicle

Jong-Hee Kim, Ki-Chan Kim, Dae-Dong Lee*
Department of Electrical Engineering, Hanbat National University

요 약 전기자동차용 전동기는 운전모드에 따라 효율특성이 차이가 나기 때문에 저속 및 고속의 운전모드에서 고효율특성을 평가하기 위한 연구는 매우 중요하다. 따라서 전기자동차 구동용 전동기의 고티크 및 고풍력 밀도, 고효율특성을 변경할 수 있는 설계 방안이 필요하다. 본 논문에서는 매입형 영구자석 동기전동기의 고정자와 회전자의 직경비를 각각 0.62, 0.65, 0.68로 변경 설계하여 전 운전구간의 효율특성과 시내 및 고속도로 운전모드에서의 평균효율특성을 분석하였다. 전 운전구간의 효율특성을 분석한 결과, 직경비가 증가할수록 고효율 구간이 저속 저토크 구간으로 이동하고, 직경비가 감소할수록 고효율 구간이 고속 저토크 부근으로 이동함을 확인하였다. 시내 및 고속도로 운전모드에서의 평균효율특성을 분석한 결과, 직경비 0.68 모델이 직경비 0.63 및 0.65 모델보다 평균효율이 높게 분석되었으며 시내 및 고속도로 주행모드에 적합함을 확인하였다.

주제어 : 매입형 영구자석 동기전동기, 연비, 직경비, 전기자동차, 효율특성

Abstract Electric motors for electric vehicles differ in efficiency characteristics depending on the operation modes, studies for evaluating high efficiency characteristics in low speed and high speed operation modes are very important. Therefore, it is necessary to design method that can change the high torque, high output density, and high efficiency characteristics of driving motors for electric vehicles. In this paper, the diameter ratio of stator and rotor for the interior permanent magnet synchronous motor is change of designed 0.62, 0.65, and 0.68, respectively, and the efficiency characteristics of the entire operation section, average efficiency characteristics of the city driving modes and express highway driving modes are analyzed. As a result of analyzing the efficiency characteristics of the entire operating section, it was confirmed that as the diameter ratio increases, the high efficiency section moves to the low speed and low torque section and the high efficiency section moves to the high speed and low torque neighborhood as the diameter ratio decreases. As a result of analyzing the average efficiency characteristics in the city driving modes and express highway driving modes, the average efficiency of 0.68 model is analyzed to be more efficient than the 0.63 and 0.65 model ratio, and it is confirmed that it is suitable for city driving modes and express highway driving modes.

Key Words : IPMSM, Fuel economy, Diameter ratio, EV, Efficiency characteristics

*Corresponding Author : Dae-Dong Lee (idd77@hanbat.ac.kr)

Received February 6, 2018
Accepted April 20, 2018

Revised March 15, 2018
Published April 28, 2018

1. 서론

세계 각국에서는 내연기관 자동차의 배기가스로 인한 환경오염이 심각해짐에 따라 친환경 자동차 및 하이브리드 자동차에 대한 관심이 증가하고 있다[1-3]. 이 중에서도 전기자동차(Electric Vehicle, EV)는 내연기관의 엔진을 대신하여 시스템 내에서 전기에너지만 사용하기 때문에 연비가 절감되고 유해 배기가스의 배출이 전혀 없는 무공해 자동차로 각광받고 있다[4-6].

따라서 EV는 화석연료고갈 및 환경문제를 해결하기 위한 방안 중 하나로 제시되고 있으며 전 세계적으로 이에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다[7].

매입형 영구자석 동기전동기(Interior Permanent Magnet Synchronous Motor, IPMSM)는 영구자석이 회전자의 철심에 매입된 구조로 d-q축의 인덕턴스 차이에 따라 약자속 영역 운전의 범위를 넓게 할 수 있으므로 넓은 가변속 운전이 요구되는 EV 또는 하이브리드 전기 자동차(Hybrid Electric Vehicle, HEV)에 널리 사용되고 있다[8-11].

EV 구동용 전동기는 효율에 따른 일 충전 주행거리뿐만 아니라, 진동과 소음에 따른 승차감, 최대 속도, 가속력 등이 결정되어 EV의 성능에 큰 영향을 미치기 때문에 고평토크 및 고회력 밀도와 고효율 특성을 변경할 수 있는 설계 방안을 도출하여야 한다[12-15].

본 논문에서는 IPMSM의 전기장하와 자기장하의 비를 변경하기 위해 고정자와 회전자의 직경비를 변경하는 방법을 제안하였다. 직경비 변경 설계는 Maxwell 프로그램을 이용하였으며 고효율 구간 이동에 따른 IPMSM의 효율특성을 분석하기 위해 해석모델의 코일 턴(turn)수는 9턴, 릴(reel)수는 12릴로 동일하게 선정하였다. 또한 유한요소법(Finite Elements Method, FEM)을 이용한 전자장 해석을 통해 운전모드에 따른 평균효율특성을 분석하였다.

2. IPMSM 해석 모델 사양 및 전자기적 특성

Fig. 1은 본 논문에서 사용된 80 kW급 IPMSM의 해석 모델로서 Fig. 1(a)는 2D FEM 모델과 Fig. 1(b)은 3D FEM 모델을 보여준다. 그리고 Table. 1은 IPMSM 해석 모델의 기본사양이다. 본 모델은 8극 48슬롯으로 구성되

어져 있으며 최대출력은 80 kW, 최대토크는 254.6 Nm, 정격속도는 3,000 rpm이다. IPMSM는 마그네틱 토크와 릴럭턴스 토크를 같이 사용함으로 역돌극성에 의하여 전기자 전류 위상각의 제어를 통해 정출력 구간에서 약자속 제어가 사용된다[16].

이러한 이유로 인해 본 논문에서 사용된 모델은 최대 속도 10,000 rpm까지 운전이 가능하며 전기자 전류의 고조파 성분을 줄이기 위해서 코깁토크를 고려하여 전기자 권선은 분포권으로 사용된다. 회전자의 매입형 영구자석 형상은 V type으로 다른 영구자석 형상보다 자속이 더 집중될 수 있다. 모델의 배터리 제한 전압은 360 Vdc이며, 제작성을 고려하여 공극길이 0.5 mm로 선정하였다.

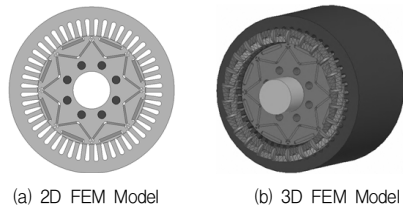


Fig. 1. Analysis model of 80 kW class IPMSM

Table 1. Specification of IPMSM analysis model

Parameter		Specification
Maximum Power		80 kW
Maximum Torque		254.6 Nm
Rated Speed		3,000 rpm
Maximum Speed		10,000 rpm
Number of Phases		3
Battery Limited Voltage	DC	360 Vdc
	AC	254.6 Vrms
Number of Slots		48
Stator Outer Diameter		200 Φ
Stator Inner Diameter		131 Φ
Rotor Outer Diameter		130 Φ
Rotor Inner Diameter		45 Φ
Stack Length		140 mm

Fig. 2는 기본모델의 무부하 역기전력과 코깁토크 파형을 나타낸다. Fig. 2(a)는 전동기 회전속도 1,000 rpm의 경우 역기전력 파형으로 실효치는 20.65 Vrms이다. 무부하 역기전력의 배터리 제한 전압이 360 Vdc이므로 무부하에서는 이론적으로 7,100 rpm까지 운전이 가능하다는 것을 확인할 수 있다. Fig. 2(b)는 전동기 회전속도 1,000 rpm의 경우 코깁토크 파형으로 3.73 Nm의 값이 최대토크의 약 1.47 %이므로 EV 구동용 전동기로 사용되기에 적합한 수준이다.

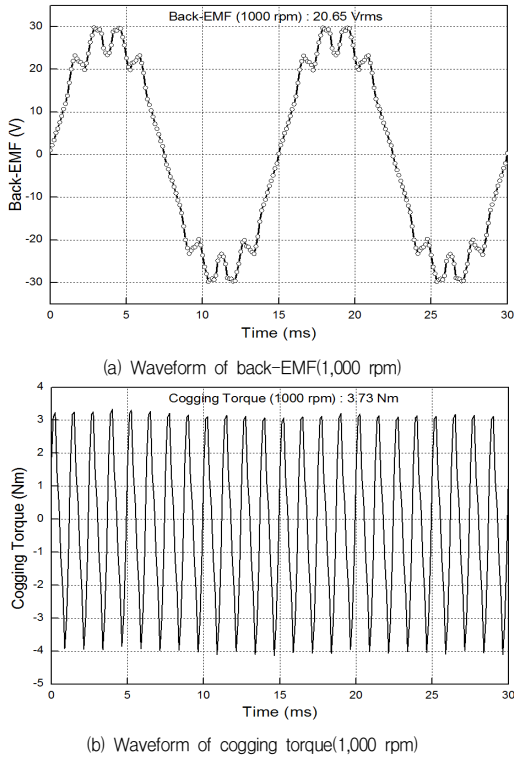


Fig. 2. Characteristics of no-load for base model

3. 결과 및 분석

3.1 직경비에 따른 IPMSM의 효율특성 분석

Fig. 3은 IPMSM의 고정자와 회전자의 직경비 (Diameter Ratio)를 각각 0.62, 0.65, 0.68로 변경 설계하였을 때 전 운전구간의 효율 맵을 나타낸다. Fig. 3(a)은 직경비를 0.62로 적용한 모델의 전 운전구간 효율 맵으로 전압의 포화는 약 5,000 rpm에서 이루어지며 최대효율 구간은 약 5,000 rpm에서 발생되는 것을 확인할 수 있다. 그림 Fig. 3(b)은 직경비를 0.65로 증가한 모델의 전 운전구간 효율 맵으로 전압의 포화는 약 4,000 rpm에서 이루어지며 최대효율 구간은 약 4,000 rpm에서 발생되는 것을 확인할 수 있다. Fig. 3(c)은 직경비를 0.68로 증가한 모델의 전 운전구간 효율 맵으로 전압의 포화는 약 3,000 rpm에서 빠르게 이루어지며 최대효율 구간은 약 3,000 rpm에서 발생되는 것을 확인할 수 있다.

따라서 직경비가 증가할수록 영구자석의 단면적 및 자기장하가 비례하여 증가하므로 전압의 포화가 더욱 더 빠르게 이루어지며 최대 효율범위가 더욱 넓어지는 것을

확인할 수 있다.

또한 IPMSM의 고효율 구간이 전압 포화지점 근처에서 나타나는 특성을 고려했을 때, 직경비를 증가한 모델의 경우, 영구자석의 단면적이 증가함에 따라 고효율 구간이 저속 저토크 구간으로 이동하며, 이와 반대로 직경비를 감소한 모델의 경우, 영구자석의 단면적이 감소함에 따라 영구자석의 자속량이 감소하므로 전압의 포화가 기존모델에 비해 늦게 이루어지는 것을 확인하였다. 결과적으로, 직경비가 작은 모델의 경우 고효율 구간이 고속 저토크 부근에서 높게 나타나는 것을 확인하였다.

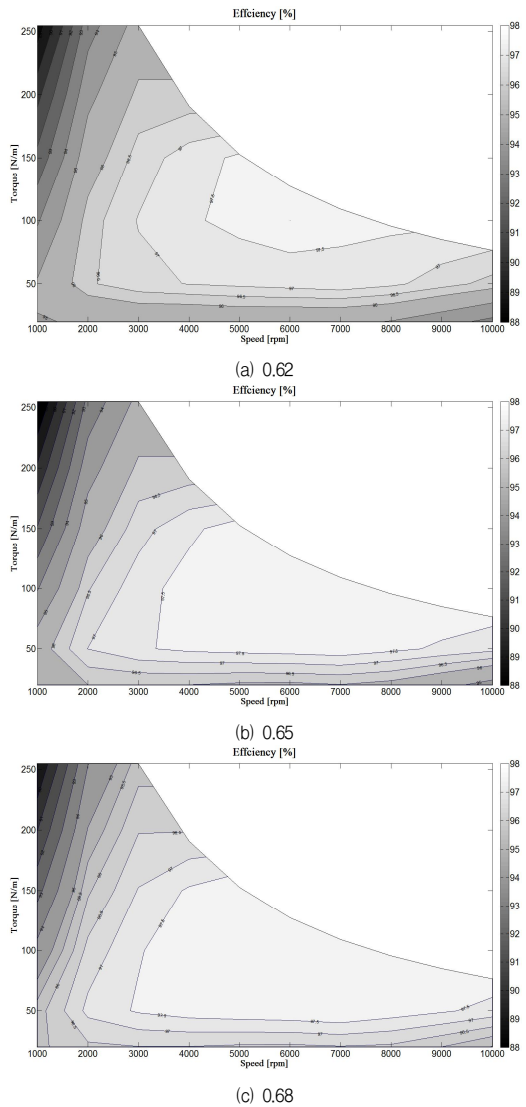


Fig. 3. Efficiency map according to changes of diameter ratio

Fig. 4는 IPMSM의 고정자와 회전자 직경비를 각각 0.62, 0.65, 0.68로 변경 설계하였을 때 전 운전구간의 철손 맵을 나타낸다. Fig. 3에서 효율 맵을 설명한 바와 같이 직경비가 증가할수록 영구자석의 단면적 및 자기장하가 비례하여 증가하므로 전압의 포화가 저속으로 이동하며 빠르게 이루어지는 것을 확인 할 수 있다. 또한 자기장하 변화로 인해 철손도 변화하기 때문에 직경비가 증가할수록 철손도 고속 구간에서 증가되는 것을 확인하였다.

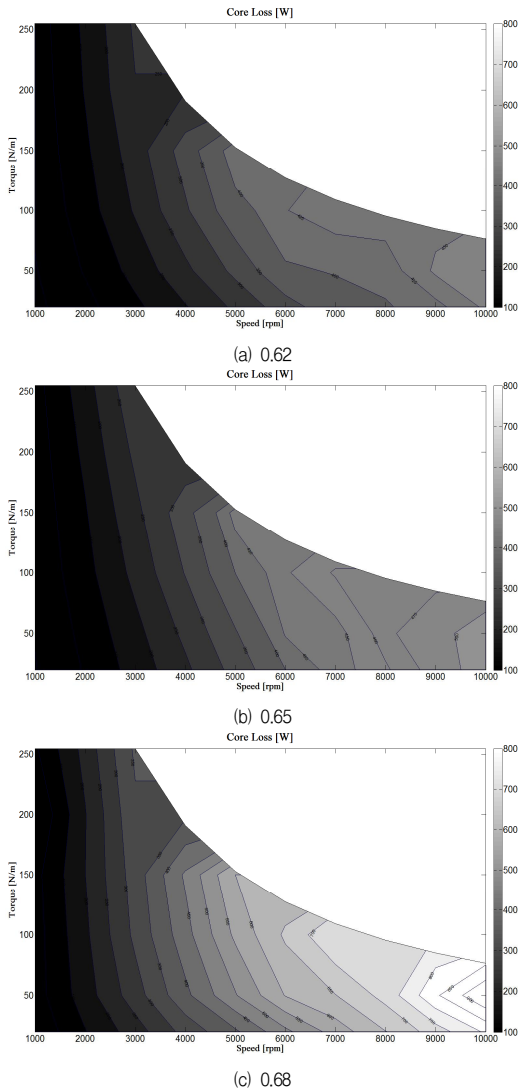


Fig. 4. Core loss map according to changes of diameter ratio

3.2 운전모드에 따른 평균효율특성 분석

Fig. 5는 일반적인 EV의 시내 및 고속도로 주행모드

에 따른 운전점 분포도를 나타낸다[17,18]. Fig. 5에서 보는 바와 같이, x축의 실선부분은 토크, y축은 속도를 나타낸 전동기 운전곡선으로, 점선부분은 실제로 많이 사용되는 구간이다. 실제 EV의 시내 주행모드의 경우 속도가 낮아 전동기에서 발생하는 토크도 낮으며, 고속도로 주행모드의 경우 속도는 증가하고 전동기에서 발생하는 토크는 낮다. 따라서 저속 저토크 구간은 시내 주행모드로 주로 사용되며, 고속 저토크 구간은 고속도로 주행모드로 주로 사용되어진다.

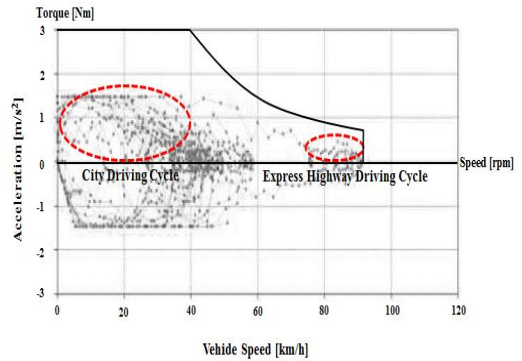


Fig. 5. Distribution map of operating point according to driving modes of typical EV

Table. 2~Table. 4는 IPMSM의 고정자와 회전자 직경비를 각각 0.62, 0.65, 0.68로 변경 설계하였을 때 각 모델의 전 운전점의 효율특성을 나타낸 데이터이다. 운전속도 1,000 rpm~3,000 rpm에 대한 전동기에서 발생하는 토크 20~100 Nm를 나타내는 점선 구간은 시내 주행모드에 해당되고, 운전속도 8,000 rpm~10,000 rpm에 대한 전동기에서 발생하는 토크 20~50 Nm를 나타내는 실선 구간은 고속도로 주행모드에 해당된다.

Table. 5는 직경비의 크기에 따른 각 모델의 시내 주행모드 및 고속도로 주행모드에 해당되는 평균효율특성을 분석한 데이터이다. 직경비 0.62 모델의 경우 시내 주행모드에서의 평균효율은 95.64 %, 고속도로 주행모드에서의 평균효율은 95.54 %로 분석되어졌으며, 직경비 0.65 모델의 경우 시내 주행모드에서의 평균효율은 96.14 %, 고속도로 주행모드에서의 평균효율은 96.33 %로 분석되어졌다. 또한 직경비 0.68 모델의 경우 시내 주행모드에서의 평균효율은 96.41 %, 고속도로 주행모드에서의 평균효율은 96.76 %로 분석되어졌다. Table. 5의 데이터를 비교 분석한 결과, 시내 및 고속도로 주행모드에서 직경

Table 2. Efficiency data of operating point according to diameter ratio 0.62

		Efficiency(%)									
Torque [Nm]	254.65	88.35	93.56	95.41							
	200	90.67	94.73	96.16							
	150	92.28	95.58	96.71	97.21	97.60					
	100	93.89	96.26	97.03	97.43	97.65	97.78	97.62			
	50	95.10	96.42	96.85	97.02	97.13	97.23	97.33	97.13	96.72	96.31
	20	94.97	95.05	95.20	95.13	95.24	95.21	95.21	94.96	94.39	93.72
		1,000	2,000	3,000	4,000	5,000	6,000	7,000	8,000	9,000	10,000
		Speed[RPM]									

Table 3. Efficiency data of operating point according to diameter ratio 0.65

		Efficiency(%)									
Torque [Nm]	254.65	87.78	93.30	95.28							
	200	90.16	94.59	96.15							
	150	92.07	95.58	96.79	97.39	97.74					
	100	93.92	96.45	97.30	97.71	97.94	98.13	98.06			
	50	95.61	97.01	97.44	97.62	97.71	97.78	97.85	97.64	97.41	97.17
	20	95.53	96.00	96.02	95.99	95.89	95.87	95.97	95.78	95.30	94.65
		1,000	2,000	3,000	4,000	5,000	6,000	7,000	8,000	9,000	10,000
		Speed[RPM]									

Table 4. Efficiency data of operating point according to diameter ratio 0.68

		Efficiency(%)									
Torque [Nm]	254.65	88.94	93.97	95.76							
	200	90.97	95.04	96.47							
	150	92.68	95.91	97.03	97.58	97.90					
	100	94.31	96.67	97.45	97.83	98.05	98.21	98.12			
	50	95.76	97.14	97.57	97.75	97.84	97.91	98.00	97.77	97.58	97.32
	20	95.87	96.40	96.48	96.48	96.41	96.40	96.47	96.40	96.00	95.47
		1,000	2,000	3,000	4,000	5,000	6,000	7,000	8,000	9,000	10,000
		Speed[RPM]									

비 0.68 모델이 직경비 0.62 및 0.65 모델보다 평균효율이 높게 분석되어져 시내 및 고속도로 주행모드에 가장 적합하다고 판단되어진다.

Table 5. Average efficiency data according to diameter ratio

Category	Diameter Ratio vs. Efficiency		
	0.62	0.65	0.68
City Driving Cycle	95.64 %	96.14 %	96.41 %
Express Highway Driving Cycle	95.54 %	96.33 %	96.76 %

4. 결론

본 논문에서는 EV 구동용 IPMSM 고정자 및 회전자의 직경비 변경 설계에 따른 고효율 구간 이동에 대한 특

성 연구를 수행하였으며 연구결과를 요약하면 다음과 같다. IPMSM 기본모델에 따른 무부하 역기전력과 코깁토크 파형을 분석하였으며, 그 결과 값이 EV 구동용 전동기에 적합함을 확인하였다. 고효율 구간 이동에 따른 효율특성을 분석하기 위해 IPMSM의 고정자와 회전자의 직경비를 각각 0.62, 0.65, 0.68로 변경 설계하였다.

직경비에 따른 IPMSM의 효율특성을 분석한 결과, 직경비가 증가할 경우 영구자석의 단면적이 증가함에 따라 자기장하 증가로 전압의 포화가 기존모델에 비해 빠르게 이루어져 고효율 구간이 저속 저토크 구간으로 이동함을 확인하였다. 이와 반대로, 직경비가 감소할 경우 영구자석의 단면적이 감소함에 따라 영구자석의 자속량이 감소하므로 전압의 포화가 기존모델에 비해 늦게 이루어져 고효율 구간이 고속 저토크 부근에서 높게 나타나는 것을 확인하였다. 직경비에 따른 각 모델의 시내 및 고속도

로 주행모드에 해당되는 운전점의 평균효율특성을 분석한 결과, 직경비 0.68 모델이 시내 및 고속도로 주행모드에 적합하다고 판단되어진다.

본 논문에서 알 수 있듯이, 전기장하와 자기장하의 비를 조정함으로써 고효율 구간이 변경된다. 따라서 전기장하와 자기장하의 비를 조정하기 위한 IPMSM의 설계 파라미터를 선정하여 EV의 주 사용구간에 전동기의 고효율 구간이 나타나도록 하는 변경 설계가 필요하다.

REFERENCES

- [1] D. Y. Lim, J. K. Im, J. H. Choi & G. B. Chung. (2010). PSIM Simulator for Analysis of Series HEV Operation. *The Transactions of the Korean Institute of Power Electronics*, 15(6), 487-497.
DOI: 10.6113/TKPE.2010.15.6.487
- [2] J. W. Gu, J. H. Lee, M. S. Chung & J. Y. Lee. (2017). Electric Vehicle Technology Trends Forecast Research Using the Paper and Patent Data. *Journal of Digital Convergence*, 15(2), 165-172.
DOI: 10.14400/JDC.2017.15.2.165
- [3] C. K. Park, D. Y. Choi & H. J. Kim. (2013). Analysis of the Impact of Smart Grids on Managing EVs' Electrical Loads. *The Journal of Digital Policy & Management*, 11(11), 767-774.
DOI: 10.14400/JDPM.2013.11.11.767
- [4] S. E. Yoo & D. H. Shin. (2010). Electric Vehicle Market and Technology Trend. *Auto Journal, Journal of the Korean Society of Automotive Engineers*, 32(8), 22-27.
- [5] D. H. Lee, H. W. Seo, J. Y. Jeong, Y. I. Park & S. W. Cha. (2012). The Analysis of Energy Consumption for an Electric Vehicle under Various Driving Circumstance. *Transaction of the Korean Society of Automotive Engineers*, 20(2), 38-46.
- [6] M. H. Lee, S. W. Kim & K. H. Kim. (2017). The Efficiency Characteristics of Electric Vehicle (EV) According to the Diverse Driving Modes and Test Conditions. *Trans. of Korean Hydrogen and New Energy Society*, 28(1), 56-62.
DOI: 10.7316/KHNES.2017.28.1.56
- [7] M. H. Kim. (2011). Standardization Strategy for Electric Vehicle. *Auto Journal, Journal of the Korean Society of Automotive Engineers*, 33(6), 71-74.
- [8] T. H. Ko & S. H. Kim. (2017). Voltage Angle Control of an IPMSM for Electric Vehicle Drives. *The Transactions of the Korean Institute of Power Electronics*, 22(5), 397-403.
DOI: 10.6113/TKPE.2017.22.5.397
- [9] K. Y. Cho, B. G. Woo, G. M. Kim, C. H. Kang, H. K. Shin, B. C. Yoon & M. G. Park. (2011). Analysis of Flux Weakening Operating Regions for a PM Synchronous Motor in HEV by considering Back EMF Harmonics. *The Transactions of the Korean Institute of Power Electronics*, 16(2), 152-161.
- [10] N. Bianchi, S. Bolognani & B. J. Chalmers. (2000). Salient-Rotor PM Synchronous Motors for an Extended Flux-Weakening Operation Range. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 36(4), 1118-1125.
DOI: 10.1109/28.855968
- [11] K. M. Rahman, S. Jurkovic, C. Stancu, J. Morgante & P. J. Savagian. (2015). Design and Performance of Electrical Propulsion System of Extended Range Electric Vehicle (EREV) Chevrolet Volt. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 51(3), 2479-2488.
DOI: 10.1109/TIA.2014.2363015
- [12] H. K. Lee & K. H. Nam. (2016). An Overview: Current Control Technique for Propulsion Motor for EV. *The Transactions of the Korean Institute of Power Electronics*, 21(5), 388-395.
DOI: 10.6113/TKPE.2016.21.5.388
- [13] H. C. Jung, D. J. Kim, C. B. Lee, J. H. Ahn & S. Y. Jung. (2014). Numerical and Experimental Design Validation for Adaptive Efficiency Distribution Compatible to Frequent Operating Range of IPMSM. *IEEE Transactions on Magnetics*, 50(2), Art. No. 7021804.
DOI: 10.1109/TMAG.2013.2285409
- [14] L. Fang, S. L. Kim, S. O. Kwon & J. P. Hong. (2010). Novel Double-Barrier Rotor Designs in Interior-PM Motor for Reducing Torque Pulsation. *IEEE Transactions on Magnetics*, 46(6), 2183-2186.
DOI: 10.1109/TMAG.2010.2041329
- [15] H. C. Jung, G. J. Park, D. J. KIM & S. Y. Jung. (2017). Optimal Design and Validation of IPMSM for Maximum Efficiency Distribution Compatible to Energy Consumption Areas of HD-EV. *IEEE Transactions on Magnetics*, 53(6), Art. No. 8201904.
DOI: 10.1109/TMAG.2017.2660524
- [16] Z. Yang, F. Shang, I. P. Brown & M. Krishnamurthy. (2015). Comparative Study of Interior Permanent Magnet, Induction, and Switched Reluctance Motor Drives for EV and HEV Applications. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 1(3), 245-254.

DOI: 10.1109/TTE.2015.2470092

[17] S. M. Yang, N. T. Jeong, K. S. Kim, S. B. Choi, M. Wang, H. S. Kim & M. W. Suh. (2014). Development of Urban Driving Cycle for Performance Evaluation of Electric Vehicles Part I : Development of Driving Cycle. *Transaction of the Korean Society of Automotive Engineers*, 22(7), 117-126.

DOI: 10.7467/KSAE.2014.22.7.117

[18] N. T. Jeong, S. M. Yang, K. S. Kim, S. B. Choi, M. Wang, S. H. You, H. S. Kim & M. W. Suh. (2015). Development of Urban Driving Cycle for Performance Evaluation of Electric Vehicles Part II : Verification of Driving Cycle. *Transaction of the Korean Society of Automotive Engineers*, 23(2), 161-168.

DOI: 10.7467/KSAE.2015.23.2.161

이 대 동(Dae-Dong Lee)

[정회원]



- 2002년 2월 : 우송대학교 전자공학과 (공학사)
- 2004년 2월 : 한밭대학교 전기공학과 (공학석사)
- 2014년 2월 : 한양대학교 전기공학과 (공학박사)

- 2004년 3월 ~ 현재 : 한밭대학교 전기공학과 조교
- 관심분야 : 고속철도, 전기화재 진단
- E-Mail : ldd77@hanbat.ac.kr

김 중 희(Jong-Hee Kim)

[정회원]



- 2014년 2월 : 한밭대학교 전기공학과 (공학사)
- 2018년 2월 : 한밭대학교 전기공학과 (공학석사)
- 2014년 3월 ~ 현재 : 한밭대학교 전기공학과 조교

- 관심분야 : 전기기기, 전기자동차
- E-Mail : kjh33@hanbat.ac.kr

김 기 찬(Ki-Chan Kim)

[정회원]



- 1998년 2월 : 한양대학교 전기공학과 (공학석사)
- 1998년 2월 ~ 2005년 1월 : 현대중공업 기계전기연구소 선임연구원
- 2008년 2월 : 한양대학교 전기공학과 (공학박사)

- 2009년 1월 ~ 현재 : 한밭대학교 전기공학과 교수
- 관심분야 : 전기기기 및 제어, 전기자동차 구동시스템
- E-Mail : kckim@hanbat.ac.kr