

EV 구동용 유도전동기와 IPMSM의 토크특성 및 효율비교

전경원, 한성진
동아대학교 전기공학과

Compare with Torque Characteristic and Efficiency of IM and IPMSM for EV Drive

Kyung-Won Jeon, Sung-Chin Hahn
Dept. of Elec. Eng. Dong-A University

Abstract - 본 논문에서는 EV 구동용 유도전동기와 매입형 영구자석 동기전동기(IPMSM)의 동작특성과 효율을 비교하기 위하여 농형구조 유도전동기와 단층구조 IPMSM을 설계 하였다. EV 구동용 전동기는 정속운전 뿐만 아니라 가변속 운전이 필수적이므로 유도전동기는 V/f 제어, IPMSM은 약계자 제어를 사용하여 가변속 상태에서의 운전토크와 효율을 유한요소법을 이용하여 해석하였다.

1. 서 론

자동차산업은 조선 및 반도체산업과 더불어 주요 수출산업으로 육성되어 세계시장에서 무한 경쟁해야하는 상황에 놓여있다. 하지만 환경문제가 이슈화 되어 에너지절약과 환경오염을 최소화 할 수 있는 친환경 자동차가 크게 부각되고 있다. 친환경 자동차는 선진국을 중심으로 순수 전기자동차(EV) 및 하이브리드 전기자동차(HEV)의 상용화가 진행되고 있으며, 시스템의 구동원인 전동기의 중요성이 증대되고 있다[1].

EV 구동용 전동기는 구동방식, 차량시스템 등의 특성에 따라 DC전동기, 영구자석형 동기전동기(PMSM), 유도전동기와 동기 릴럭턴스 전동기(SRM)가 주로 사용되고 있다.

<표 1>에서 EV 구동용 전동기의 대표적인 특징을 비교하였다.

<표 1> EV 구동용 전동기의 대표적인 특징 비교

종류 항목	DCM	PMSM	IM	SRM
효율[%]	85~89	95~97	94~95	90미만
비용/출력	10	10~15	8~12	6~10
견고성	상	상	최 상	상
신뢰성	중	상	최 상	상

EV 구동용 전동기는 경제성 및 실용성을 감안하여 경량화, 고효율화, 고토크화 그리고 고효율화 연구가 활발히 진행되고 있다. 따라서 본 논문에서는 EV 구동용 전동기로 경제성 및 신뢰성면에서 뛰어난 성능을 보이는 유도전동기와 효율성과 경량화 면에서 뛰어난 IPMSM 전동기를 선정하여 운전특성과 효율을 비교하고자 한다.

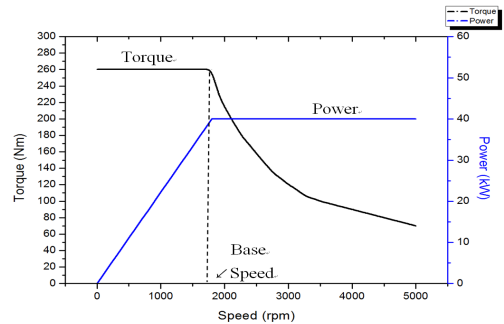
2. 본 론

2.1 EV구동용 전동기의 동작특성

자동차는 정지부터 고속주행, 후진 등 다양한 운전 상태에서 주행이 가능해야 하며, 각각의 속도로 가속이나 등판이 가능하게 하는 구동력이 요구된다. EV에 사용되는 전동기에는 자동차의 구동력에서 요구되는 출력특성을 만족함과 동시에 다음과 같은 특징을 요구한다[1].

- 저속에서 기동과 등판시 고토크
- 일정한 토크와 출력범위 내에서의 넓은 속도범위
- 넓은 속도와 토크범위를 통한 고효율 달성
- 운전시의 진동이나 다양한 온도조건에서 운전되므로 신뢰성이 높고 보수성이 우수
- 빠른 토크응답
- 제동회생을 통한 높은 효율
- 소형, 경량, 저가

<그림 1>은 자동차의 구동특성을 나타내는 것으로 높은 기동토크가 필요하다는 것을 보여주고 있다.



<그림 1> EV 구동용 전동기의 특성

2.2 EV 구동용 전동기

2.2.1 유도전동기의 유한요소 정식화

유도전동기의 고정자 권선 또는 도체전류가 축방향으로만 흐른다고 가정하면 자기벡터포텐셜 A 는 z축 성분만 존재한다. 입력전류밀도가 주어지면 회전자 도체바 내에서의 전기스칼라 포텐셜 ϕ 의 미분형은 식(1)로 나타낼 수 있으며 유도전동기의 지배방정식을 식 (2)와 같이 나타낸다[3].

$$\nabla \phi = \frac{\partial \phi(z,t)}{\partial z} \hat{z} \quad (1)$$

$$\frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial^2 A}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A}{\partial y^2} \right) + \vec{J}_0 + \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial A}{\partial t} - \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) = 0 \quad (2)$$

2.2.2 IPMSM의 유한요소 정식화

영구자석의 잔류 자화량 M_r 은 x, y 성분만 존재한다면 영구자석을 포함하는 IPMSM의 지배방정식은 자기벡터 포텐셜, 입력전류밀도 그리고 영구자석의 잔류 자화량으로 식 (3)과 같이 나타낸다.

$$\frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial^2 A}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A}{\partial y^2} \right) + \vec{J}_0 + \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial M_{ry}}{\partial x} - \frac{\partial M_{rx}}{\partial y} \right) = 0 \quad (3)$$

여기서, μ 는 투자율, A 는 자기벡터포텐셜, \vec{J}_0 는 입력 전류밀도, M_{rx} , M_{ry} 는 각각 x, y 방향의 영구자석 잔류 자화량이다. 식 (3)에서 자기벡터 포텐셜 A를 구하고 식 (4)를 이용하여 자속밀도 B 를 구할 수 있다.

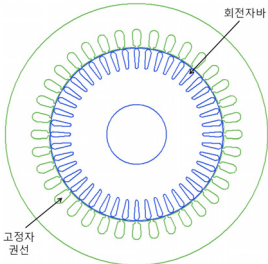
$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A} \quad (4)$$

2.2.3 전동기 설계사양

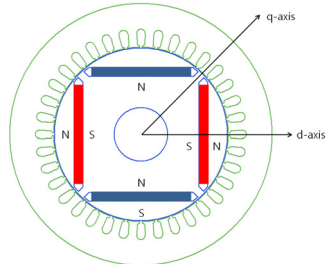
본 논문에서는 EV구동용 유도전동기와 IPMSM의 동작특성과 효율을 비교하기 위하여 <표 2>와 같이 전동기의 사양을 선정하였다[2][3]. 유도전동기는 NEMA class A등급의 표준 농형 유도전동기를 선정하여 전압 380V, 4극, 40kW급으로 설계하였고, IPMSM은 단층구조로 선정하여 유도전동기와 동일한 입력 조건으로 설계 하였다. 또한 넓은 운전영역을 고려해야 하는 EV의 특성에 맞춰 유도전동기는 V/f 제어를 통해 속도 범위를 달성하였고, IPMSM은 약계자 제어를 통하여 속도 범위를 달성 하였다.

〈표 2〉 유도전동기와 IPMSM의 목표사양

항목	유도전동기	IPMSM
정격출력 [kW]	40	40
정격전압 [V]	380	380
정격속도 [rpm]	1750	1800
최대속도 [rpm]	6300	6300
극 수	4	4
제어방법	V/f제어	약계자제어



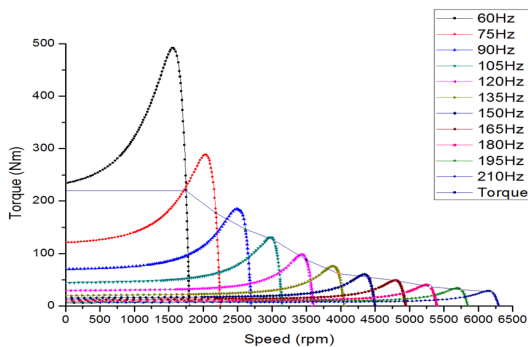
〈그림 2〉 유도전동기 형상



〈그림 3〉 IPMSM 형상

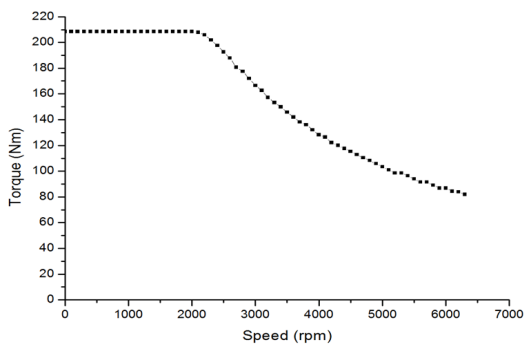
2.3 동작특성 해석결과

본 논문에서는 유도전동기와 IPMSM의 동작 특성을 해석하기 위하여 유도전동기는 V/f 제어를, IPMSM은 약계자 제어를 사용하였다. 〈그림 4〉는 V/f 제어를 통한 유도전동기의 속도-토크 곡선을 나타내었다. 슬립에 의해 1750rpm의 속도까지는 217Nm로 정토크가 유지되는 것을 볼 수 있다. 1750rpm이후부터는 주파수제어를 통해 속도가 증가되고 이때부터 토크는 감소한다.



〈그림 4〉 유도전동기 속도-토크 곡선

〈그림 5〉는 약계자 제어를 통한 IPMSM의 속도-토크 곡선을 나타내었다. 1800rpm의 속도까지는 209Nm로 정토크가 유지되는 것을 볼 수 있다. 1800rpm이후부터는 d축에 (-)전류를 입력하는 약계자 제어를 통해 속도가 증가되고 이때부터 토크는 감소하는 것을 확인할 수 있다.

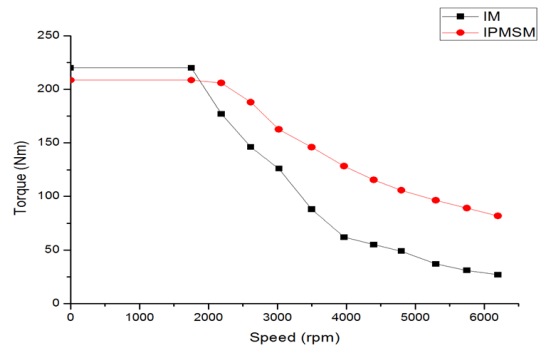


〈그림 5〉 IPMSM 속도-토크 곡선

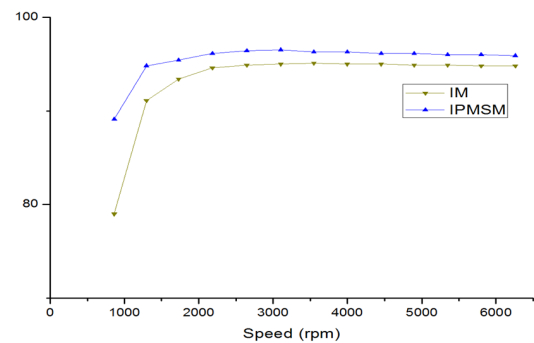
〈그림 6〉은 유도전동기와 IPMSM의 속도-토크를 비교한 것이다. 유도전동기는 기동에서부터 정격속도까지는 IPMSM보다 토크가 높게 나오지만 정격속도 영역을 지나면서 토크의 감소폭이 IPMSM에 비해 큰

것을 확인할 수 있다.

〈그림 7〉과 〈표 3〉은 속도-효율을 비교한 것으로 유도전동기는 79~95 %의 효율을 나타내고, IPMSM은 89.1~96.5%의 효율을 나타낸다. 유도전동기와 IPMSM은 3000rpm에서 최대 효율이 나타나는 것을 볼 수 있다.



〈그림 6〉 속도-토크 곡선



〈그림 7〉 속도-효율 곡선

〈표 3〉 유도전동기와 IPMSM의 효율비교

		속도[rpm]	1000	2000	3000	4000	5000	6000
효율 [%]	유도전동기	79	93.4	95	95	94.9	94.8	
	IPMSM	89.1	95.4	96.5	96.3	96.1	96	

3. 결 론

본 논문에서는 EV 구동용 전동기를 위한 유도전동기와 IPMSM의 운전특성과 효율을 비교하기 위하여 40kW급 모델을 설계하였고 이를 유한요소 해석을 이용하여 해석하였다. 유도전동기와 IPMSM의 속도-토크-효율의 비교를 통해 IPMSM은 유도전동기에 비해 효율이 뛰어나고, 유도전동기는 IPMSM에 비해 기동토크가 높은 것을 확인하였다. 또한 EV 구동용 전동기로서 유도전동기와 IPMSM 둘 다 EV 구동용으로 적합한 전동기임을 확인할 수 있다.

본 연구는 2011년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP) (No. 2009H100100164)과 한국전기연구원(KERI)의 지원을 받아 기본 연구 사업으로 수행한 연구결과입니다.

[참 고 문 헌]

[1] 전기자동차핸드북편집위원회, "전기자동차핸드북", 대광서림, 2003.
 [2] Ion Boldea, Syed A. Nasar " The Induction Machines Design Handbook, Second Edition " 2nd Edition, CRC Press, 2009.
 [3] C.Mi, M.Filippa, W.Liu, RMa, "Analytical method for predicting the air-gap flux of interior-type permanent magnet machines," IEEE Trans. Magn. vol.40, pp.50-57 Jan. 2004
 [4] 전경원, 한성진, "반응표면법과 유한요소법을 이용한 3상 유도전동기의 최적설계", 대한전기학회 하계 학술대회, 2010.
 [5] 전경원, 한성진, "반응표면법을 이용한 EV 구동용 유도전동기의 최적설계", 대한전기학회 전기기기 및 에너지변환시스템 부문회 추계학술대회, 2010.