



# 2015 한국자동차공학회 학술대회 및 전시회

## KSAE 2015 Annual Conference and Exhibition

기간: 2015. 11. 18(수)~21(토)

장소: **HICO** 경주화백컨벤션센터  
GYEONGJU Hwabaek International Convention Center

후원:  **KOFST**  
한국과학기술단체총연합회

 **Gride**  
Gyeongbuk

 **Gyeongju**  
CVB

 **Gyeongju**  
CVB



Km/h



**한국자동차공학회**  
The Korean Society of Automotive Engineers

- 1185 소형 하이브리드 전기 자동차 제어 시스템 개발을 위한 BenchTop Test Simulator 제작  
김익환\*(국민대학교), 김정용(국민대학교), 최웅철(국민대학교)
- 
- 1186 공기공급장치 변경에 따른 상압형 자동차용 연료전지시스템의 효율 분석  
김일중\*(서울과학기술대학교), 이정재(서울과학기술대학교), 김한상(서울과학기술대학교)
- 
- 1189 양전자교환막 연료전지 기체 확산층 두께에 따른 단일 유로 채널에서의 물방울 특성 횡단면 가시화 연구  
김한상\*(서울과학기술대학교)
- 
- 1192 태양전지 파노라마 루프의 글라스 구동에 따른 접촉스위치의 최적화  
라명수\*(베바스토동희홀딩스), 최수윤(베바스토동희홀딩스), 전병윤(베바스토동희홀딩스), 정전기(베바스토동희홀딩스)
- 
- 1197 EV용 WFSM의 최대효율 제어를 통한 효율 개선  
박진철\*(한양대학교), 차경수(한양대학교), 채승희(한양대학교), 홍정표(한양대학교)
- 
- 1202 마그파인 자석의 불가역 감자 특성을 고려한 전기 자동차 구동용 전동기 설계  
박호용\*(한양대학교), 이수경(한양대학교), 정영훈(한양대학교), 정경태(한양대학교), 홍정표(한양대학교)
- 
- 1206 전기차 에어컨용 베인 압축기의 열유동 해석을 통한 성능 설계  
배석정\*(자동차부품연구원), 허형석(자동차부품연구원), 이준용(자동차부품연구원)
- 
- 1214 EPS용 IPMSM의 토크리플 저감 최적설계  
손형수\*(한양대학교), 홍정표(한양대학교), 김두영(한양대학교)
- 
- 1218 고조파 전류 인가 방법을 이용한 Electric Power Steering용 매입형 영구자석 동기 전동기의 토크리플 저감  
신창욱\*(한양대학교), 김두영(한양대학교), 홍정표(한양대학교)
- 
- 1223 Kalman Filter와 Least Squares Method를 이용한 전방 타깃의 위치 추정 시스템  
유동연\*(성균관대학교), 박찬호(성균관대학교), 황성호(성균관대학교)
- 
- 1225 PMP 기반 병렬형 플러그인하이브리드 차량의 동력분배 제어  
이성화\*(한양대학교), 이형철(한양대학교)
- 
- 1227 연료전지 시스템 운전 시 수소 크로스오버 발생량에 대한 고찰  
정애리\*(서울대학교), 김민수(서울대학교)
- 
- 1228 ISG 시스템의 테스트 벤치 기반 성능시험 환경 구축  
정연수\*(한양대학교), 김영준(한양대학교), 박태호(한양대학교), 이형철(한양대학교)
- 
- 1230 HEV LDC의 성능 평가를 위한 실차 환경 모사 시스템 개발  
조재동\*(신영), 임정식(신영), 남재두(신영), 서종덕(신영), 김대근(신영)
- 
- 1232 1.5 kW급 HEV LDC의 실차 시험을 통한 동작 성능 검증  
조재동\*(신영), 임정식(신영), 남재두(신영), 서종덕(신영), 김대근(신영)
-

# EV 구동용 WFSM의 최대 효율 제어를 통한 효율 개선

박진철 · 차경수 · 채승희 · 홍정표\*

## Efficiency Improvement through Maximum Efficiency Control in WFSM for EV

Jin-Cheol Park · Kyung-Soo Cha · Seung-Hee Chai · Jung-Pyo Hong\*

*Department of Automotive Engineering, Hanyang University, 222, Wangsimni-ro, Seongdong-gu, Seoul 133-791, Korea*

**Abstract** : This paper presents a control method in the main drive section to improve efficiency of Wound Field Synchronous Motor (WFSM) for electric vehicle (EV) traction. However EV is the environmentally-friendly and innovative, short mileage of the EV is a big problem. To overcome this weakness, the development for improving the efficiency of traction motor is in progress. The efficiency of motors can be enhanced using two methods, optimal shape design method and control method. Although optimal shape design method can improve the efficiency of traction motor, there is a limit in shape change of motor due to its restricted space. For this reason, it is essential to improve efficiency using the control method. This paper compares two methods for advanced efficiency, Maximum Torque Per Ampere (MTPA) control and maximum efficiency control method using efficiency map. As a result, maximum efficiency control method promotes the better efficiency of EV traction motor than MTPA control method, while satisfying the rated output of WFSM for EV traction in the main drive section. This paper especially shows enhancement of efficiency in low speed range.

**Key words** : Electric vehicle (전기자동차), Wound field synchronous motor (권선계자형 동기전동기), Efficiency (효율), Maximum Torque Per Ampere Control (최대토크/최소전류), Maximum efficiency control (최대 효율 제어)

### Nomenclature

$T$  : torque, Nm  
 $P_n$  : pole pair  
 $\psi_o$  : linkage flux by field current, Wb  
 $L$  : inductance, H  
 $I$  : current, A  
 $i$  : current, A  
 $i_o$  : induced current, A  
 $V_o, v_o$  : induced voltage, V  
 $R$  : resistance,  $\Omega$

$V$  : voltage, V  
 $v$  : voltage, V  
 $\omega$  : electrical angular velocity, rad/s  
 $P_{copper}$  : copper loss, W  
 $P_{iron}$  : iron loss, W

### Subscripts

$d$  : direct axis  
 $q$  : quadratic axis  
 $f$  : field  
 $a$  : armature  
 $c$  : iron

\* 박진철, E-mail: skensk1990@hanyang.ac.kr

## 1. 서론

최근 선진국중심으로 환경규제가 심화됨에 따라 세계자동차개발시장의 흐름은 탄소배출량과 환경오염물질 배출을 줄이려는 친환경적인 형태로 바뀌어가고 있다. 이러한 세계적인 흐름에 맞추어 전기자동차의 개발이 진행되고 있다.<sup>1,2)</sup>

전기자동차의 상용화를 위해 고효율 고효율의 구동용 모터 개발의 필요성이 대두되고 있고, 특히 출력이 높아 질수록 고효율의 요구는 높아진다. 이러한 고효율 개선을 위해 전동기형상의 최적 설계 뿐만 아니라 전동기 고효율 제어는 필수적이다. 또한 우리나라 자동차 일 평균 운전 거리는 50km 미만으로 고속 운전보다는 저속 운전을 주로 한다. 따라서 주 운전구간을 고려한 고효율제어를 통해 전동기의 효율 개선이 필요 되고 있다.

본 논문에서는 권선 계자형 동기 전동기 (Wound Field Synchronous Motor, WFSM)의 d-q축 등가회로에서 전압방정식과 토크식으로부터 WFSM의 특성을 설명하고 최대토크/최소전류(Maximum Torque per Ampere, MTPA)제어와 최대효율제어의 원리를 소개한다. 이어서 WFSM의 d-q축 등가회로를 이용한 특성해석을 통해서 두 제어에 따른 효율맵을 도출해내고 주 운전구간에서의 효율을 비교, 분석 한다.

## 2. 해석 모델 형상 및 사양

본 논문에서 적용된 EV Traction용 WFSM은 그림 1로 표 1에 제시된 설계 사양을 토대로 만든 모델이다. 최대 토크 250[Nm] 이상, 최대 속도 10000[rpm] 이상, 최대 출력 100 [kw] 이상 에서 Nonlinear FEM(Finite Elements Method)을 통해 해석 하였다.

항목	내용
극/슬롯	8/48
최대 토크	250 [Nm] 이상
최대 출력/ 정격 출력	100/50 [kw] 이상
기저 속도/최대 속도	4000/10000 [rpm] 이상

Table 1 WFSM for Electric Vehicle Design Specification

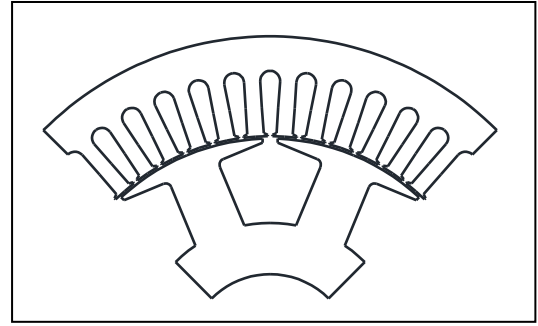


Fig. 1. WFSM for Electric Vehicle

## 3. d-q 모델에서 WFSM의 기본 특성식

WFSM의 특성해석 및 제어알고리즘에는 d-q축 모델을 사용한다. d-q축 모델을 사용 함으로써 정확도와 연산시간을 효과적으로 제공하기 때문에 모터의 출력 성능을 분석하기 위해 사용이 된다.

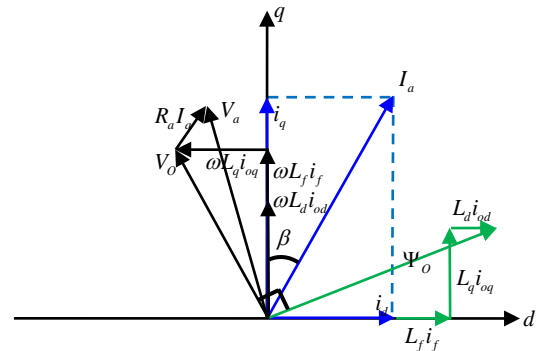


Fig. 2. Vector diagram of WFSM

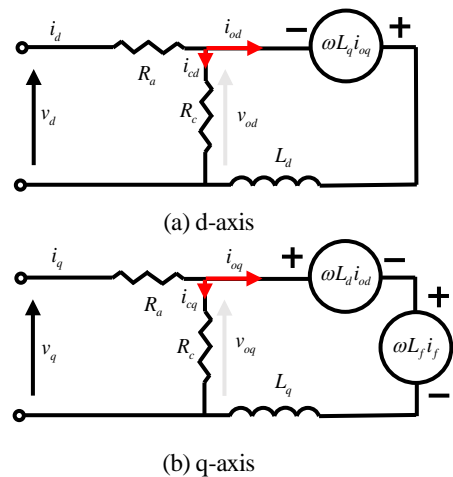


Fig. 3. d-q axis equivalent circuit of WFSM



그림 2는 WFSM의 벡터도이다. WFSM의 운전점은 IPMSM (Interior Permanent Magnet Synchronous Motor)과 달리 d축 인덕턴스가 q축 인덕턴스보다 큰 전형적인 돌극성을 갖고 있다. 따라서 최대 토크를 내기 위한 운전점은 1사분면에 발생한다. 하지만 포화도에 따라 2사분면 운전도 발생하기 때문에 그에 따른 전류위상각도 고려해야 한다.

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = R_c \begin{bmatrix} i_{od} \\ i_{oq} \end{bmatrix} + \left(1 + \frac{R_a}{R_c}\right) \begin{bmatrix} v_{od} \\ v_{oq} \end{bmatrix} + p \begin{bmatrix} L_d & 0 \\ 0 & L_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{od} \\ i_{oq} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} v_{od} \\ v_{oq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\omega L_q \\ \omega L_d & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{od} \\ i_{oq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega L_f i_f \end{bmatrix}$$

식 (1)은 그림 2의 철손을 포함한 d-q축 등가회로 모델에서 WFSM 전압 방정식이다.

WFSM의 전압방정식은 IPMSM의 전압방정식과 같다. 다만 영구자석에 의한 자속이 계자전류와 계자 인덕턴스의 곱으로 표현이 된다는 점이 다르다.

$$\begin{aligned} T &= P_n (\Psi_o \times I_a) = P_n \{ L_f i_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q \} \\ &= P_n L_f i_f I_a \cos \beta + \frac{P_n}{2} (L_d - L_q) I_a^2 \sin 2\beta \end{aligned} \quad (2)$$

식 (2)는 WFSM의 토크식으로 계자전류에 의한 마그네틱 토크와 d-q축 인덕턴스의 차이로 발생하는 릴럭턴스 토크로 나눌 수 있다. 마그네틱 토크는 계자 전류를 직접 제어가 가능하여 자속의 양을 조절하므로써 넓은 운전 영역을 가능하게 한다. 또한 WFSM은 큰 돌극성을 가지고 있기 때문에 릴럭턴스 토크를 크게 활용할 수가 있다.

$$P_{copper} = R_a (i_d^2 + i_q^2) + R_f i_f = R_a i_a^2 + R_f i_f \quad (3)$$

식 (3)은 WFSM의 동손을 나타낸 식이다. 전기자권선뿐만 아니라 계자 권선에서 발생하는 동손까지 포함이 된다.

$$P_{iron} = \frac{V_o^2}{R_c} = \frac{(\omega \Psi_o)^2}{R_c} \quad (4)$$

식 (4)는 철손으로 철손 손실 저항을 이용하여 모델링이 된다. 철손은 주파수와 쇠교자속의 제곱에 비례한다.<sup>3)</sup>

## 4. MPTA제어와 최대효율제어

### 4.1 MPTA제어

그림 4는 d축 전류와 q축 전류에 대해 평면상에 MPTA곡선을 그린 것이다. 따라서 MPTA는 정토크 곡선과 정 전류원이 만나는 점으로 MPTA제어는 단위 전류당 최대토크를 발생시키는 제어이다.

MPTA제어는 식 (2)에서 계자 전류를 최대로 하여 계자에 의한 자속을 일정하게 고정시키고 토크가 최대가 되도록 하는 최소 전기자전류를 찾게 된다. 또한 동일 전류에 대하여 최대토크를 발생하기 위한 전류위상각이 존재하며 전류위상각은 식 (5)로 표현이 된다.<sup>4)</sup>

$$\beta = \sin^{-1} \left( \frac{-L_f i_f + \sqrt{(L_f i_f)^2 + 8(L_q - L_d)^2 I_a^2}}{4(L_q - L_d) I_a} \right) \quad (5)$$

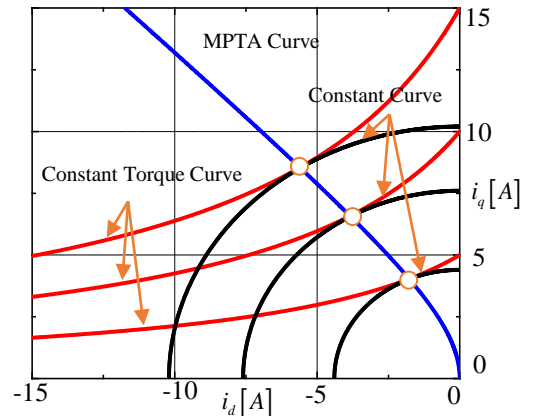


Fig. 4. Maximum Torque Per Ampere Curve

#### 4.2 최대효율제어

전동기의 손실은 동손과 철손의 합으로 표현이 된다. 식 (3)과 식 (4)으로 전체 손실은 식 (6)와 같다.

$$P_{loss} = P_{copper} + P_{iron} = R_a i_a^2 + R_f i_f^2 + \frac{(\omega \Psi_o)^2}{R_c} \quad (6)$$

최대효율제어는 전동기손실이 최소가 되도록 하는 제어이다. 식 (6)에서 전동기손실은 전기자전류, 계자전류, 전류위상각이 변수가 된다.

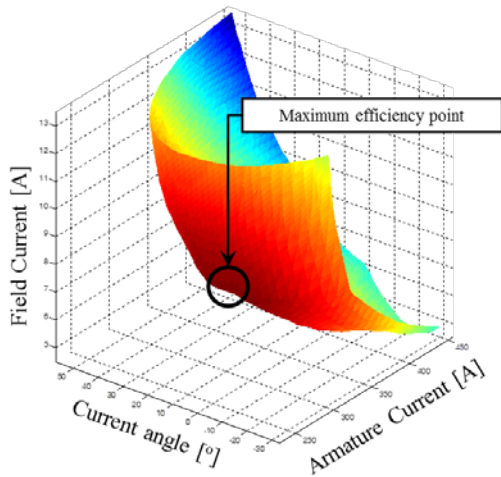


Fig. 4. Concept of maximum efficiency control

그림 4는 전기자전류, 계자 전류, 전류위상각 값에 변화에 따른 효율이 최대가 되는 최대 효율점을 표현한 그림이다. 따라서 특정 속도와 토크에서 손실이 최소가 되는 점으로부터 전기자 전류, 계자 전류, 전류위상각 조합을 찾고 이를 통해 최대효율맵을 그릴 수 있다.<sup>1)</sup>

#### 5. 최대토크제어와 최대효율제어 효율 분석

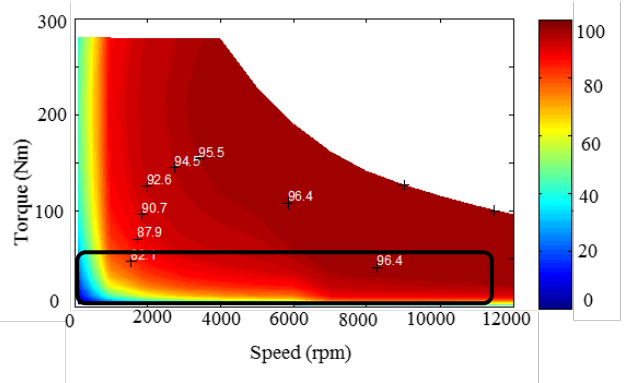


Fig.5. Efficiency map from MTPA control

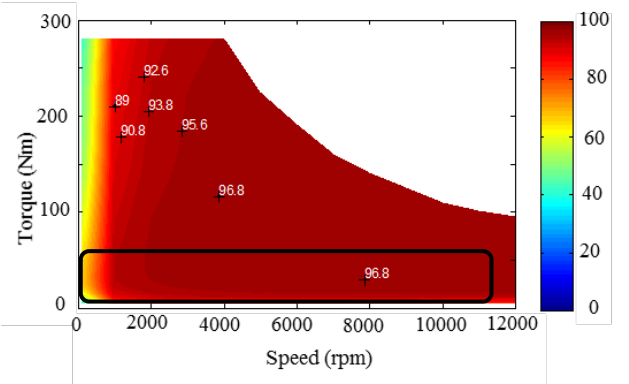


Fig. 6. Efficiency map from maximum efficiency control

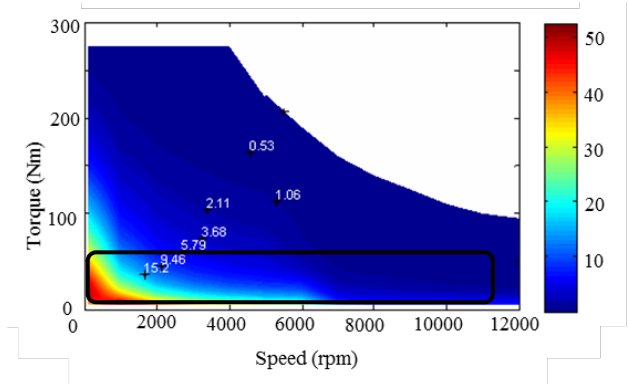


Fig. 7. Different of efficiency according to control method

최대 토크 250[Nm] 이상, 최대 속도 10000 [rpm] 이상, 최대 출력 120 이상 [kw] 동일조건내에서 그림 5 는 MTPA제어의 효율맵, 그림 6은 최대효율제어의 효율맵이다. 주 운전구간은 효율맵에서 검은색 선 영역이다.

MTPA제어를 하였을 때 고토크-고속영역에서 90% 이상, 주 운전구간에서 86.9%의 효율을 보였다. 최대효율제어시에는 고토크-고속영역에서 90% 이상 주 운전구간에서는 93.9%의 효율이 계산되었다.

그림 6은 제어방법에 따른 효율차이를 보여주는 효율맵이다. 고토크-고속 영역에서는 두 제어의 효율이 비슷하다. 하지만 주 운전영역에서는 MTPA제어보다 최대효율제어가 7%정도 효율이 개선되는 효과를 볼 수 있었고 특히 저속영역으로 갈수록 효율차이가 커지는 것을 확인 할 수가 있다.

## 5. 결 론

우리 나라 대부분 운전은 시내 운전으로 주 운전 구간은 저속 영역이다. 따라서 주 운전구간에서 효율 개선은 고효율 전기자동차에서는 필수적이다. 이러한 상황을 고려하여 EV Traction용 WFSM에서 MPTA제어와 최대효율제어를 적용해보고 효율 향상을 비교, 분석 하였다.

결과적으로 동일 전동기 모델과 정격 출력내에서 두 제어의 효율맵을 비교하였을 때 주 운전구간에서 효율이 MTPA제어보다 최대효율제어가 효율 개선이 되었다. 따라서 제어 방법의 변화로 효율 개선 효과를 확인하였다.

## References

- 1) B.H.Lee, "Design and Maximum Efficiency Control of Wound Rotor Synchronous Machine for EV", Department of Automotive Engineering, Hanyang university school, 2013
- 2) S.H.Do, B.H.Lee, S.H.Chai, J.P.Hong, "Torque ripple reduction of wound rotor synchronous motor", The Korea Society Of Automotive Engineers, pp.1654-1658, 2012
- 3) M.S.Lim, S.H.Chai, J.P.Hong, "Design and iron loss analysis of sensorless-controlled interior permanent magnet synchronous motors with concentrated winding", IET Electric Power Applications, pp.349-356,

2014

- 4) K.W.Lee "Maximum Torque per Ampere Operation Point Tracking Control for Permanent Magnet Synchronous Motor", The Korean institute of power electronics, pp.291-299, 2007