

반응표면법을 이용한 전기자동차 구동용 유도전동기의 회전자 슬롯형상 최적설계

(Optimal Design of Induction Motor Rotor Slot Shape for Electric Vehicle
by Response Surface Method)

전경원* · 한성진**

(Kyung-Won Jeon · Sung-Chin Hahn)

Abstract

In this paper, the starting torque and efficiency characteristics of the induction motor (IM) for the electric vehicle (EV) are improved by changing the slot shapes of squirrel cage. The initial model of the induction motor is designed by the loading distribution method (LDM), and then the rotor with squirrel cage of NEMA class A is selected to optimize the slot shape by response surface method(RSM). The design variables of rotor slot shape are obtained by the RSM. Starting torque and efficiency were calculated by the equivalent circuit method. As a result, starting torque and efficiency of the optimized model shows good performance through whole-speed range.

Key Words : EV, Induction Motor, Loading Distribution Method, Equivalent Circuit, RSM

1. 서 론

최근 지구온난화, 기상이변, 오존층 파괴 등 환경문 제와 석유 에너지 자원의 고갈위기에 따라 신재생에 너지, 친환경 차량, 고효율 전기기기 등의 개발을 위한 노력이 계속되고 있다. 특히 전동기의 고효율화, 대용 량화, 소형화, 경량화, 신뢰성 향상 등으로 친환경 차 량에 적용되는 전동기의 개발이 활발히 진행되고 있

다. 현재 전기자동차의 구동용 전동기로서 에너지밀 도가 높고 효율이 높은 영구자석형 동기전동기의 연 구가 진행되고 있다. 표 1은 전기자동차 구동용 전동 기의 종류와 특징을 대표적인 특징을 비교한 표인데, 효율면에서는 영구자석형 동기전동기, 견고성과 신뢰 성 측면에서는 유도전동기가 뛰어난을 볼 수 있다[1].

전기자동차 구동용 전동기의 가장 중요한 핵심요소 는 고신뢰성, 고출력밀도, 고효율특성이며, 이러한 특 성을 만족하기 위해 구동용 전동기의 경우 영구자석 을 사용한 전동기를 적용하여 고전압화, 고속운전 사 양의 선정을 통해 요구조건을 만족시키기 위해 노력 하고 있다. 하지만 최근 영구자석의 주재료인 희토류 를 독점적으로 공급하는 중국의 수출억제 정책으로 희토류의 사용을 줄이거나 희토류를 사용하지 않는

* 주저자 : 동아대 대학원 전기공학과 석사과정

** 교신저자 : 동아대 전기공학과 교수

Tel : 051-200-7737, Fax : 051-200-6947

E-mail : schahn@dau.ac.kr

접수일자 : 2011년 8월 9일, 1차심사 : 2011년 8월 12일

2차심사 : 2011년 9월 16일, 3차심사 : 2011년 10월 21일

심사완료 : 2011년 10월 25일

전동기의 적용이 동시에 이루어지고 있는 실정이다. 유도전동기는 생산성이 좋고, 유지보수가 쉬운 장점을 가지고 있는 반면에 제어가 쉽지 않다는 단점을 가지고 있다. 그러나 전력소자의 발달과 제어 기술이 급격하게 발전함에 따라 직류기 및 영구자석형 전동기에 동등한 속도제어가 가능하게 되었다. 한편 유도전동기는 BLDC와 영구자석형 전동기에 비해 효율이 다소 낮으나, 고효율화가 되면 수명, 견고성, 신뢰성, 내진동성과 같이 많은 장점들이 부각 될 것으로 사료된다. 따라서 최근 전기자동차용 전동기의 업계에서는 표 2와 같이 전기자동차용 유도전동기의 개발에 관심을 가지고 있다[2].

표 1. 전기자동차 구동용 전동기의 특징비교
Table 1. Specification of EV motor

항목 \ 종류	DCM	PMSM	IM	SRM
효율 [%]	85~89	95~97	92~95	90미만
최대속도 ×1000[rpm]	4~6	4~10	9~15	15이상
비용/출력	10	10~15	8~12	6~10
제어장치비용	1	2.5	3.5	4.5
견고성	○	○	◎	◎
신뢰성	△	○	◎	○

◎ : 최상, ○ : 상, △ : 중

DCM : DC Motor

PMSM : Permanent Magnet Synchronous Motor,

IM : Induction Motor

SRM : Switched Reluctance Motor

표 2. 전기자동차 제조회사별 모터 사양
Table 2. Specification of EV motor

구분 회사	차종	모터종류	최대출력 [kW]	최고속도 [km/h]
현대	Blue On	유도전동기	61	130
Toyota	RAV4LV	동기전동기	50	125
Nissan	R'nessa	동기전동기	62	120
Honda	EV Plus	동기전동기	49	130
GM	EV 1	유도전동기	102	129
Ford	Ranger	유도전동기	66	120
Chrysler	Epic	유도전동기	74	129

전기자동차용 전동기는 높은 토크와 효율이 요구된다. 그러나 유도전동기는 회전자 동손의 발생 때문에 효율향상에 어려움이 있다. 그러므로 유도전동기의 고효율화를 위한 다목적 최적설계법이 필요하다.

회전자 형상에 관한 최적화 연구들은 유도전동기의 특성 중 기동토크, 효율 등을 목적함수로 두고 최적화시키기 위해서 설계변수와 출력에 대한 관측 자료로부터 해석적인 모델을 만듦으로써 실질적인 목적함수를 쉽게 만들 수 있는 반응표면법을 적용하였다.

본 논문에서는 전기자동차용 유도전동기를 장하분배법에 의해 정격속도 영역에서 초기설계를 하고, 기동토크와 효율 향상을 목적함수로 두고 반응표면법을 이용하여 회전자 슬롯형상을 최적설계하였다.

2. 본 론

2.1 전기자동차 구동용 전동기의 동작특성

자동차는 정지부터 고속주행, 후진 등 다양한 운전상태에서 주행이 가능해야 하며, 각각의 속도로서 가속이나 등판이 가능하게 하는 구동력을 요구한다. 전기자동차에 사용되는 전동기는 자동차의 출력특성을 만족함과 동시에 다음과 같은 특징을 요구한다[3].

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

그림 1은 자동차의 구동특성을 나타내는 것으로 높은 기동토크가 필요하다는 것을 보여주고 있다[4].

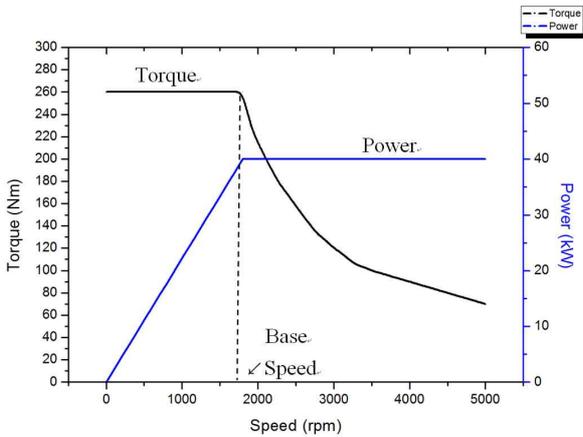


그림 1. EV구동용 전동기의 특성
Fig. 1. Typical performance characteristics of electric motors for traction

2.2 유도전동기의 특성

유도전동기는 변압기 원리와 같이 1차측의 전기에너지를 자기에너지로 변환하여 공극을 매개로 2차측으로 에너지를 전달한다. 다만 변압기의 출력은 전력인데 비하여 전동기의 출력은 기계적인 동력이다. 이러한 물리적인 현상을 집중정수의 등가회로로 취급하면 현상의 수치 계산을 쉽게 할 수 있다.

2.2.1 유도전동기의 등가회로 해석

그림 2는 1상에 대한 유도전동기의 등가회로로서 2차측(회전자)을 1차측(고정자)으로 환산한 것이며, 그림에서 보는 바와 같이 유도전동기의 2차측 주파수는 slip에 따라 달라진다.

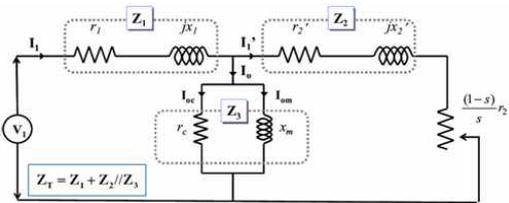


그림 2. 유도전동기의 등가회로
Fig. 2. Equivalent circuit of Induction motor

유도전동기의 동기속도와 회전 각 속도의 관계식은 식 (1)과 같이 주어진다.

$$N_s = \frac{120f}{P} [\text{rpm}]$$

$$\omega_s = \frac{2\pi N_s}{60} [\text{r/rad}] \quad (1)$$

여기서 f 는 전원 주파수 [Hz], P 는 극수를 나타낸다. 고정자로 환산한 회전자의 임피던스는 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$Z_2 = \frac{r_2'}{s} + jx_2' [\Omega] \quad (2)$$

여기서 r_2' 은 1차측으로 환산한 회전자 저항을 나타내고, x_2' 은 1차측으로 환산한 누설 리액턴스를 나타낸다. 2차측 임피던스(Z_2)와 여자회로를 합성한 임피던스는 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{1}{Z_g} = \frac{1}{r_c} + \frac{1}{jx_m} + \frac{1}{Z_2} [\Omega] \quad (3)$$

여기서 x_m 은 여자 리액턴스를 나타내고, r_c 는 철손 저항을 나타낸다. 따라서, 전원 측에서 바라본 회로 전체의 임피던스 Z_T 는 식 (4)와 같다.

$$Z_T = r_1 + jx_1 + Z_g [\Omega] \quad (4)$$

전원전압과 1차측(고정자)의 입력전류 I_1 의 관계식은 식 (5)와 같다.

$$I_1 = \frac{V_1}{Z_T} [\text{A}] \quad (5)$$

1차측 입력 P_{in} 은 식 (6)과 같이 계산된다.

$$P_{in} = m_1 V_1 I_1 \cos\theta [\text{W}] \quad (6)$$

여기서 θ 는 1차측 입력전압과 전류의 위상차를 말하며 $\cos\theta$ 는 역률을 나타낸다. m_1 은 상(phase) 수로서 본 논문에서 다루고 있는 전동기는 3상 이므로 $m_1 = 3$ 이 된다.

2차측에 흐르는 부하 전류를 I_2' 으로 간주하면 전동

기에서 발생하는 토크는 식 (7), (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_2 = m_1 I_1'^2 \frac{(1-s)r_2'}{s} \text{ [W]} \quad (7)$$

$$T = \frac{60}{2\pi} P_2 \frac{1}{(1-s)N_s} \text{ [Nm]} \quad (8)$$

1차측 동손($P_{1copper\ loss}$)와 철손($P_{core\ loss}$), 2차측 동손($P_{2copper\ loss}$)은 각각 다음과 같이 표현된다.

$$P_{1copper\ loss} = m_1 I_1'^2 r_1 \text{ [W]} \quad (9)$$

$$P_{core\ loss} = m_1 I_{oc}^2 r_c \text{ [W]} \quad (10)$$

$$P_{2copper\ loss} = m_1 I_1'^2 r_2' \text{ [W]} \quad (11)$$

여기서 I_{oc} 는 철손분 전류를 나타낸다. 회전자 회전하는 동안 기계적인 마찰, 풍손, 냉각팬 등에 의한 손실이 나타나게 되며, 이것을 모두 합하여 기계적인 손실을 P_{mech} 라 한다.

따라서 최종 출력 P_{out} 은 입력과 총 손실의 합으로 식 (12)와 같이 나타낼 수 있고, 효율을 식 (13)에 나타내었다[5].

$$P_{out} = P_{in} + P_{1copper\ loss} + P_{core\ loss} + P_{2copper\ loss} + P_{mech} \quad (12)$$

$$\eta = \frac{P_{in}}{P_{out}} \times 100 [\%] \quad (13)$$

2.3 장하분배법을 이용한 유도전동기 설계

장하분배법은 변압기와 직류기를 비롯한 모든 전기 기기의 설계에서 많이 사용되는 방법으로, 전동기의 용량을 전기장하와 자기장하의 곱으로 표현하여 미중가 비례법에 의한 적절한 배분을 통해 설계하는 방법이다.

그림 3은 장하분배법의 흐름도를 나타낸다. 설계방법은 용량, 목표효율, 목표역률, 전압, 주파수, 극수를

선정하고 분배정수[γ]를 결정한 후 전기장하와 자기장하를 분리한다. 이 후 고정자의 전류를 계산하고 고정자 턴수를 산정한 후 전기비장하를 이용하여 공극의 길이를 선정하고 자기비장하를 이용하여 적층길이를 결정한다. 고정자의 적층길이가 결정되면 전선의 전류밀도와 자속밀도를 산정하고 고정자 외경과 슬롯치수를 결정한다. 마지막으로 회전자 바의 전류밀도와 자속밀도를 구하면 최종적으로 회전자의 슬롯치수까지 결정할 수 있다[6].

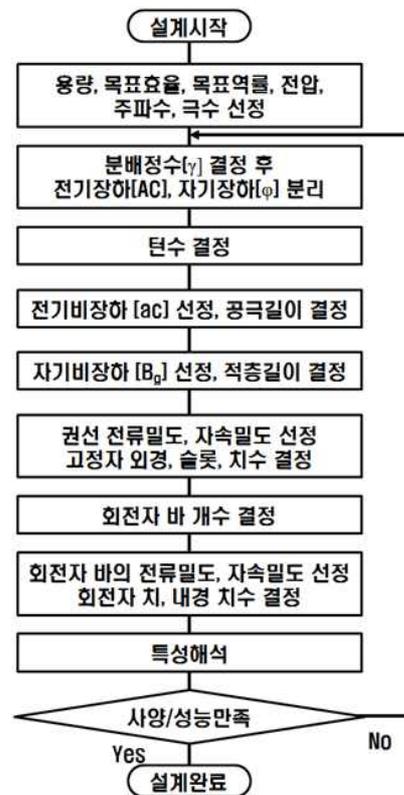


그림 3. 장하분배법을 이용한 유도전동기의 설계 흐름도
Fig. 3. Design flow diagram of induction motor using loading distribution method

2.3.1 유도전동기의 기초설계

본 연구를 위한 전기자동차용 유도전동기의 설계 사양은 표 3에 나타내었다. 전기자동차의 정격 시 전압은 380[V]이고 4극, Y결선으로 진행하였다. 가변속 전동기 설계이므로 최대속도와 정격속도를 설계사양으로 정했다[7].

표 3. 유도전동기의 설계사양

Table 3. Design specifications of induction motor

정격출력 [kW]	극수	전압 [V]	정격속도 [rpm]	최대속도 [rpm]
40	4	380	1800	6300

유도전동기 초기모델 설계는 2.3절의 장하분배법을 이용하여 목표효율을 95[%], 목표역률을 0.9로 설계하였으며, 설계된 유도전동기의 치수를 표 4에 나타내었다.

표 4. 초기모델의 치수

Table 4. Dimensions of initial model

고정자 치수 [mm]			공극 [mm]	축방향길이 [mm]
외경	내경	슬롯수		
240	160	36	0.7	190

설계된 초기모델의 회전자 슬롯 치수는 그림 4와 표 5에 나타내었다.

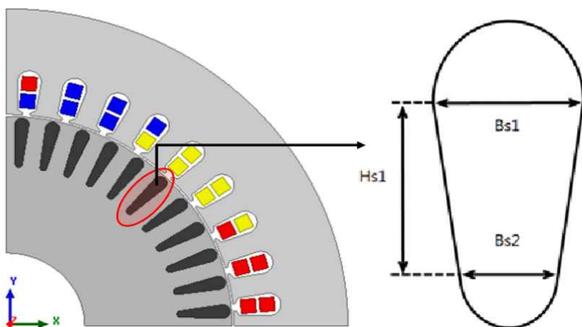


그림 4. 유도전동기의 구조

Fig. 4. Structure of induction motor

표 5에서 보는 바와 같이 회전자의 슬롯수는 44개로 슬롯 높이 $Hs1 = 14[mm]$ 슬롯 폭 $Bs1 = 4[mm]$, $Bs2 = 3[mm]$ 로 설계하였다.

표 5. 회전자 슬롯의 치수

Table 5. Dimensions of rotor slot

슬롯수	$Hs1[mm]$	$Bs1[mm]$	$Bs2[mm]$
44	14	4	3

장하분배법을 이용하여 기초 설계된 유도전동기의 해석결과는 표 6에 나타내었다.

표 6. 기초설계 모델의 해석결과

Table 6. Analysis result of Initial Model

	기초모델
0rpm@토크 [Nm]	236.74
효율 [%]	94.52

표 6에서 보는바와 같이 기초 설계된 모델의 0[rpm]에서의 토크는 236.74[Nm], 효율은 94.52[%]의 결과를 확인하였다.

2.4 반응표면법(RSM)

반응표면법은 설계변수(design variables)와 반응변수(response variables)의 실험적 관계를 수학적식으로 표현하기 위해 실험이나 시뮬레이션으로부터 얻은 치수 값들로부터 근사적 반응표면모델을 만들어내는 통계적 기법들을 말한다. 많은 공학문제에서 설계변수와 반응변수간의 수학적 함수 관계를 찾아낸다는 것은 매우 어려우며 비록 반응함수가 부분적으로 알려져 있다 하더라도 복잡한 형태를 취하는 경우가 대부분이어서 실용성이 낮다. 따라서 반응표면법은 함수 관계가 밝혀져 있지 않거나 복잡한 형태를 갖는 최적화 문제를 해결할 경우 매우 유용한 최적화 방법이라 할 수 있다. 반응표면법에 의해 추정된 물리적 근사 반응식을 회귀모델(regression model) 또는 회귀함수(regression funtion)라고 하며 적합도 높은 회귀모델을 구현하고자 하는 것이 반응표면법의 주요 관심사항이다. 추출점(sampling data)이 많을수록 정확한 근사함수를 얻을 수 있지만, 수치계산의 효율성을 위해 가능한 적은 계산시간이 필요하도록 최소의 추출점으로 가장 효율적인 근사함수를 구해야 한다. 이를 구현하기 위해서는 통계적인 경험설계기법(experimental design)과 회귀모델(regression model) 생성기법 그리고 일반적인 최적화기법 등이 요구된다. 여기서 회귀모델 생성을 위한 통계적 분석 방법을 회귀분석(regression analysis)이라 한다[8].

2.4.1 최적설계

전기자동차 구동용 유도전동기의 초기모델로부터 기동토크와 효율을 최대로 높이기 위해 회전자 슬롯의 형상을 반응표면법을 이용하여 최적설계를 하였다. 반응표면을 구성하기 위한 적절한 형상 파라미터의 값이 구해지면, 표본 데이터로부터 반응 표면이 구성되고, 즉 설계변수 공간에서 목적 함수의 분포가 보간되고, 보간된 목적 함수의 분포로부터 최적화 기법을 이용하여 목적함수를 최소로 하는 설계변수를 찾을 수 있다[9].

표본점이 정의되면, 유한요소법을 이용하여 각각의 표본점에 해당하는 목적함수를 계산하여 표본 데이터를 구성하고, 적절한 형상파라미터를 이용하여 반응표면을 구성한다.

2.4.2 최적화 전략

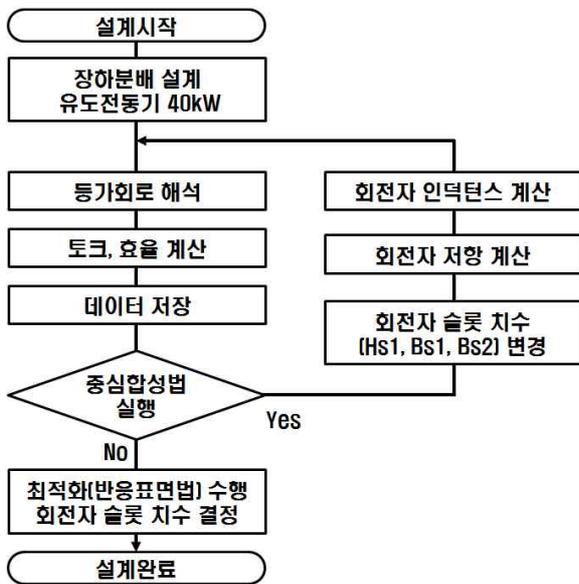


그림 5. 반응표면법을 이용한 최적화 흐름도
Fig. 5. Flow Diagram of Optimization using RSM

그림 5는 반응표면법을 이용한 최적화 흐름도를 나타낸 그림이다. 최적화의 순서는 장하분배법을 이용하여 40[kW]급 유도전동기를 설계 하고 등가회로 해석을 통하여 토크와 효율을 계산한 후 중심합성법을 이용하여 설계변수 값을 산정한다. 이때 설계변수로

는 회전자 슬롯형상의 치수로 결정하고, 이후 회전자 슬롯형상의 변화에 따른 회전자 저항과 인덕턴스를 계산 한 뒤 토크와 효율을 계산하여 수행 결과를 저장한다. 이후 반응표면법을 이용하여 최적의 회전자 슬롯치수를 결정한다.

2.4.3 최적화 모델

본 논문에서는 회전자 슬롯의 형상 변화에 따른 유도전동기의 기동토크와 효율특성을 향상시키고자 한다. 따라서 목적함수를 0[rpm]에서의 토크와 1,800[rpm]에서의 효율로 두고 다목적 최절설계를 수행한다. 설계된 초기모델로부터 설계변수는 그림 4과 같이 회전자 슬롯의 높이(Hs1), 폭(Bs1, Bs2)으로 선정하였다. 최적의 설계변수를 찾기 위하여 목적함수와 설계변수의 범위를 표 7과 같이 정의하였다.

표 7. 목적함수와 설계변수 범위
Table 7. Object function and design variable region

목적 함수	0rpm@토크	최 대
	1800rpm@효율	최 대
설계 변수	$13 \leq Hs1 [mm] \leq 15$	
	$3 \leq Bs1 [mm] \leq 5$	
	$2 \leq Hs2 [mm] \leq 4$	

2.5 결과 및 검토

중심합성계획법을 이용한 2³요인배치실험을 수행한 결과를 그림 6과 표 8에서 나타내고 있다. 실험 9-14는 축점에서의 실험결과이고 실험 15는 중심점에서의 실험 결과이다.

그림 6은 각 변수가 토크와 효율에 미치는 영향을 나타내었다.

그림 6에서 보는 것과 같이 슬롯의 높이(Hs1)와 슬롯의 폭(Bs1, Bs2)이 커질수록 토크는 높아지는 것을 확인 할 수 있다. 또한 효율은 슬롯의 높이와 슬롯의 폭의 조합에 따라 최적의 값을 얻을 수 있음을 확인하였다.

Optimal D 0.69722	Hi Cur Lo	Hs1 15.6818 [15.6818] 12.3182	Bs1 5.6818 [5.6559] 2.3182	Bs2 4.6818 [4.6818] 1.3182
Efficien Maximum y = 95.4329 d = 0.54329				
36rpm@To Maximum y = 242.6328 d = 0.89475				

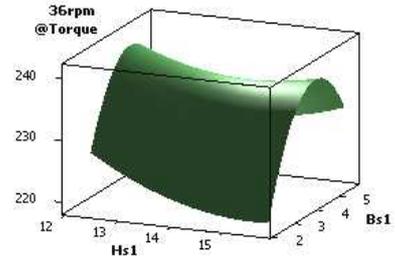
그림 6. 반응표면법을 이용한 최적화 결과
Fig. 6. Result of Response Surface Method

표 8. 중심합성계획법을 이용한 23요인배치실험 결과
Table 8. 2³factorial design results using the Central Composite Design

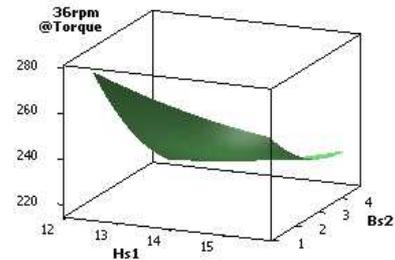
실험 횟수	설계변수			결과	
	Hs1	Bs1	Bs2	효율	0rpm@토크
1	10(-1)	3(-1)	2(-1)	91.71	298.47
2	18(1)	3(-1)	2(-1)	93.85	249.46
3	10(-1)	5(1)	2(-1)	93.87	277.66
4	18(1)	5(1)	2(-1)	95.13	240.27
5	10(-1)	3(-1)	4(1)	93.60	229.35
6	18(1)	3(-1)	4(1)	94.90	224.25
7	10(-1)	5(1)	4(1)	94.71	235.45
8	18(1)	5(1)	4(1)	95.63	250.15
9	7.3(-1)	4(0)	3(0)	92.70	313.92
10	20.7(1)	4(0)	3(0)	95.25	254.37
11	14(0)	2.3(-1)	3(0)	93.19	218.96
12	14(0)	5.7(1)	3(0)	95.25	230.25
13	14(0)	4(0)	1.3(-1)	93.61	265.72
14	14(0)	4(0)	4.7(1)	95.14	221.48
15	14(0)	4(0)	3(0)	94.52	236.7

그림 7은 각 변수가 토크와 효율에 미치는 영향을 나타내었다.

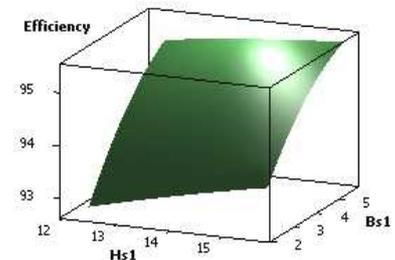
그림 7에서 보는 바와 같이 토크와 효율은 슬롯의 높이(Hs1)와 슬롯의 폭(Bs1, Bs2)에 영향을 많이 받음



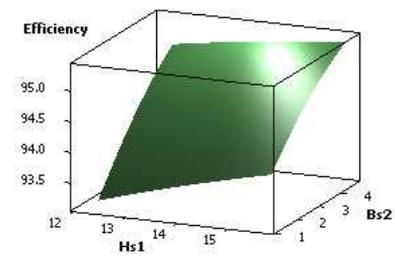
(a) Torque to Bs1 and Hs1



(b) Torque to Bs2 and Hs1



(c) Efficiency to Bs1 and Hs1



(d) Efficiency to Bs2 and Hs1

그림 7. 토크와 효율의 관계
Fig. 7. Relation of torque and efficiency

을 확인할 수 있다.

그림 8은 설계변수를 고려한 목적함수의 최적화에 따른 반응표면법을 적용한 회전자의 최적형상을 보여 주고 있다.

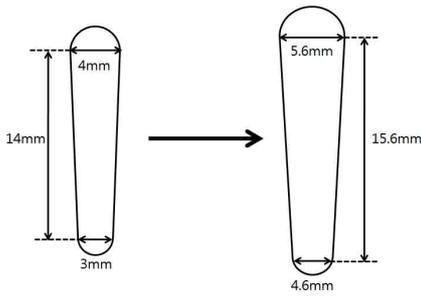


그림 8. 최적화된 회전자 슬롯형상
Fig. 8. Rotor slot shape of Optimization

그림 8에서 보는 바와 같이 최적모델의 슬롯형상이 초기모델에 비해 폭과 길이가 커진 것을 확인할 수 있다. 슬롯의 폭과 길이가 달라짐에 따라 회전자의 회로정수가 달라진다. 초기모델과 최적모델의 회로정수를 표 9에 나타내었다.

표 9. 초기모델과 최적모델의 회로정수 비교
Table 9. Circuit parameter compared to initial model and optimal model

[Ω]		초기모델	최적모델
고정자	저항	0.0466	0.0466
	리액턴스	0.4148	0.3777
회전자	저항	0.0883	0.0536
	리액턴스	0.5751	0.5049

최적모델의 회전자 저항은 초기모델보다 0.0347[Ω]이 줄어 든 것을 확인하였다. 이를 2.21%의 등가회로 해석을 통하여 계산하여 토크와 효율을 계산할 수 있다. 표 10은 초기모델과 최적모델의 기동토크와 효율을 비교하여 나타내었다. 이때 기동토크는 기동중간의 고조파토크에 따른 crawling 현상이 줄어들어 기동토크가 향상됨을 확인하였다.

표 10. 기초모델과 최적모델의 비교
Table 10. Comparison Initial model with Optimal model

	기초모델	최적모델
0rpm@토크 [Nm]	236.74	252.33
효율 [%]	94.52	95.72

표 9에서 보는 것과 같이 최적모델이 초기모델보다 효율은 1.27[%], 기동토크는 6.59[%]가 증가한 것을 확인할 수 있다. 그림 10은 정격상태에서의 초기모델과 최적모델의 토크 특성을 보여준다.

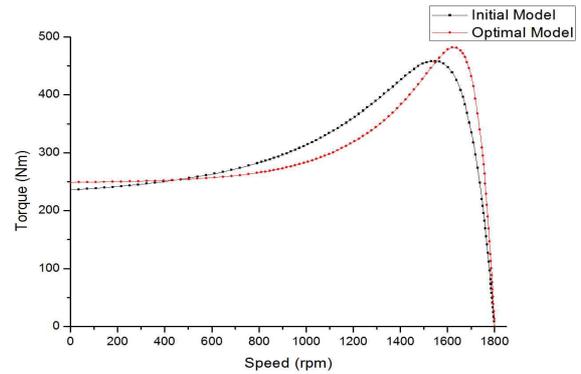


그림 9. 기초모델과 최적모델의 정격상태 토크특성 비교
Fig. 9. Compare with initial model and optimal model for rated torque-speed curve

그림 9에서 보는 바와 같이 회전자 슬롯의 높이(Hs1)와 슬롯 폭(Bs1, Bs2)을 늘림으로써 기동토크를 높일 수 있음을 확인하였다.

전기자동차 구동용 전동기는 가변속 운전영역에 대한 해석을 해야 하므로 본 논문에서는 V/f 제어를 이용하여 전운전영역에서의 토크특성을 해석하였다. 그림 10은 최적모델의 V/f 제어를 통한 가변상태에서의 토크를 보여준다.

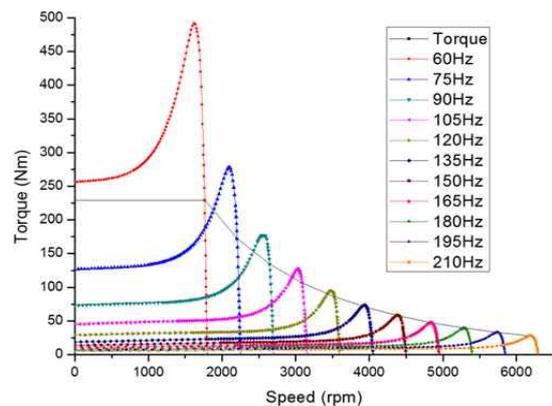


그림 10. 최적모델의 전운전영역 토크
Fig. 10. Torque curve of Optimization model for wide speed range

그림 10에서 보는 것과 같이 전동기가 가변속 운전 이 될 때, 정토크 영역에서 최대 토크는 252.3[Nm]이 고, 최대 주파수 운전영역에서 최적모델의 토크는 28.5[Nm]임을 확인하였다.

3. 결 론

본 논문에서는 유도전동기의 회전자 슬롯의 형상 변화에 의한 효율, 토크특성을 향상시키고자 한다. 유도 전동기의 회전자 슬롯의 형상에 따라 발생하는 토크와 효율을 를 최대화하기 위해, 본 논문에서는 다 특성 목적을 위한 최적화 문제 해결을 표면반응법(RSM)을 활용하였으며 조건에 따른 관계를 예측하기 위해 필요한 실험 데이터는 등가회로법을 이용하였다. 동일한 조건에서 RSM적용결과 회전자 슬롯의 높이 Hs1 [mm], 슬롯 폭 Bs1 [mm], Bs2 [mm] 에 따라 초기모델과 비교하여 최적모델(슬롯 높이 Hs1 = 15.6[mm], 슬롯 폭 Bs1 = 5.6[mm], Bs2 = 4.6[mm])이 효율은 1.27[%], 기동토크는 6.59[%]가 증가하였다.

설계변수와 출력에 대한 관측 자료로부터 해석모델을 만들고, 실질적인 목적함수를 쉽게 만들 수 있는 RSM을 적용한 최적설계를 함으로써 보다 빠르고 정확하게 최적점을 찾을 수 있었다.

본 연구는 2011년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP) (No. 20114030200030)과 한국 전기연구원(KERI)의 지원을 받아 기본연구사업으로 수행한 결과입니다.

References

- [1] 전기자동차핸드북편집위원회, “전기자동차핸드북”, 대광서림, 2003
- [2] 이상택, 조주희, 김대경, “전기자동차 구동 시스템의 개발 동향”, 전력전자학회지, vol. 16, no. 2, pp. 32~37, 2011.
- [3] Abdelhakim Haddoun, Mohamed El Hachemi Benbouzid, “A Loss-Minimization DTC Scheme for EV Induction Motors”, IEEE Trans. on Vehicular technology, vol. 56, no. 1, Jan. 2007.
- [4] Mehardad Ehsani, Yimin Gao, Sebastien E. Gay, Ali Emadi, “Morden Electric, Hybried Electric, and Fuel Cell Vehicles”, CRC Press, Sep. 2009.
- [5] 이수진, “Slip에 따른 파라미터 변화를 고려한 농형 유도 전동기의 특성해석에 관한 연구”, 한양대학교, 석사학위 논문, 2009.
- [6] 이원용, 김병택, “전기자동차 구동용 3상 유도전동기의 설계 및 특성 해석”, 군산대학교, 대한전기학회 전기기기 및 에너지변환시스템 부문회 추계학술대회, 2010.
- [7] 전경원, 최길선, 한성진 “반응표면법과 유한요소법을 이용한 3상 유도전동기의 최적설계”, 대한전기학회 하계학술대회, 2010.
- [8] Box, G. and Wilson, K., “On The Experimental Attainment of Optimum Condition.”, Journal of Royal Statical Society, Ser. B, Vol. 13, pp.1-45, 1951.
- [9] 김성일, 홍정표, “반응표면법에 의한 최적설계”, 창원대학교, 전기의세계, vol. 56. no. 9, pp. 24~28, 2005.

◇ 저자소개 ◇



전경원 (田瓊元)

1983년 8월 10일생. 2010년 동아대 공대 전기공학과 졸업. 2010년~현재 동 대학원 전기공학과 석사과정.
Tel : (051)200-6946
Fax : (051)200-6947
E-mail : kwjeon@donga.ac.kr



한성진 (韓聲鎭)

1955년 6월 27일생. 1979년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1981년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1992년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1983년 3월~현재 동아대 전기공학과 교수.
Tel : (051)200-7737
Fax : (051)200-6947
E-mail : schahn@dau.ac.kr