

최적설계기법을 이용한 전기자동차용 유도전동기 설계

\*김영관\*, 임강민\*, 염국남\*, 배상호\*, 유영석\*, 유우현\*\*

\* 이천전기공업(주), \*\* 국립기술품질원

Design of Induction Motor for Electric Vehicles using Optimization Technique

\*Y. K. Kim\*, K. M. Lim\*, K. N. Yeom\*, S. H. Bae\*, Y. S. Yoo\*, W. H. Yoo\*\*

\* Leechun Electric MFG., \*\* National Institute Technology and Quality

ABSTRACT

Induction Motors are preferred because of their ability to achieve higher power density, efficiency and reliability than permanent DC Motors for Electric Vehicle Drives. This paper describes induction motor design procedure to achieve high power density for EV using nonlinear optimization technique. Objective functions are considered to improve power density and a set of eight design variables is identified. As a numerical example, an induction motor of 15kW, 3 phase and 4 pole is designed.

1. 서 론

전기자동차는 배기가스가 없고 소음이 적어 청정한 환경을 조성할 수 있고, 에너지 효율이 가솔린 자동차에 비하여 우수하며 2차 에너지인 전기에너지를 이용하므로써 에너지 자원을 다양화 시킬 수 있는 등 여러 가지 장점으로 인하여 지구환경 보전과 에너지 절약 측면에서 이의 개발, 보급의 필요성이 증대되고 있다. 특히 1998년부터 미국의 캘리포니아주에서는 대기보전법이 발효되어 무공해차의 일정비율 (1998년 2%) 판매를 의무화하고 있으며 점차 그 비율을 증가시킬 계획으로 (2000년 5%) 있고 21세기에는 전기자동차가 중요한 육상 교통수단으로 사용될 것으로 전망되어 자동차 수출확대와 새로운 시장개척을 위해서는 국내 기술에 의한 개발이 시급하게 되었다.

전기자동차 구동용 전동기로서 기존의 직류전동기에 비하여 보수성, 신뢰성 뿐만아니라 소형 경량화의 측면에서 우수한 성능을 지니고 있기 때문에 인버터에 의하여 운전되는 유도전동기가 주목을 받고 있다. 전기자동차용 유도전동기는 배터리의 한정된 에너지를 이용하므로 고효율, 고역률의 특성을 갖추어야 하며 제한된 공간에 장착되므로 소형·경량화를 통한 고효율밀도(kW/Kg) 등의 특성이 요구된다.

본 연구에서는 전기자동차용 유도전동기의 설계시 고효율밀도를 달성하기 위하여 비선형 프로그래밍 기법을 적용하였다. 목적함수로서 전동기 중량을 선정하였으며 제약조건으로는 전동기 특성(최대토크, 효율, 역률 등)과 슬롯 점적률등의 기계적 사양을 선정하였다. 최적설계의 과정에서 전동기의 특성은 등가회로법에 의하여 계산되며 계산과정은 비선형 프로그래밍에 삽입되었다. 적용사례로 정격 출력 15kW (최대 50kW), 효율 90%, 출력밀도 0.92kW/Kg 의 3상 농형 유도전동기에 대한 설계 및 특성에 대하여는 하고자 한다.

2. 최적화 문제의 정식화

일반적으로 유도전동기의 성능 및 특성에 관한 함수는 복잡한 특성을 지니고 있기 때문에 최적화 문제는 비선형의 최소화 문제로 다음과 같이 표현된다.

$g_j(X) \leq 0$  ( $j=1,2,\dots,m$ )의 제약조건을 만족시키면서 목적함수  $F(X)$ 를 최소화 시키는 설계변수  $X=(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 을 구한다. 본 연구에서는 최적화 문제의 목적함수와 제약조건이 각각의 식으로 정식화된 것을 Penalty함수를 이용하여 단일식으로 표현되는 형태의 수식으로 변환시켜 일련의 비제약 최소화 문제를 풀어내는 순차 비제약 최소화기법(SUMT법)을 이용하였다.

한편, 전기자동차용 전동기는 차량의 제한된 공간내에 설치되며 경량화가 요구되는 특성이 있기 때문에 비선형 프로그래밍으로 최적해를 구하는 과정에서 최소화 시키고자 하는 목적함수로서 식(2.1)과 같이 전동기 재료의 중량을 선정하였다.

$$F = \text{철심중량} + \text{동중량} + \text{알루미늄중량} \\ = C_i + C_w + C_a \quad (2.1)$$

$$C_i = K_1 x_2 \left[ \frac{\pi}{4} ((x_1 + 2(x_3 + x_5))^2 + (x_1 - 2x_5)^2 - x_1^2 - D)^2 \right. \\ \left. - (SS \cdot x_3 \cdot x_4 + SR \cdot x_6 \cdot x_7) \right]$$

$$C_{\infty} = K_2 (x_2 + K_3 (x_1 + x_3) + K_4) \quad (2.2)$$

$$C_{at} = K_5 x_6 x_7 x_2$$

SS = 고정자슬롯수, SS = 회전자슬롯수

DI = 회전자내경,  $K_1 \sim K_6 =$  계수

유도전동기의 설계변수는 기하학적인 치수 및 전기적, 자기적 물리량으로 분류되는데 이러한 설계변수의 선정이 무엇보다도 중요하다. 이러한 분류에 따른 설계변수는 독립변수로 선정되지만 전동기 상수, 극수, 매극매상당 슬롯수등과 같은 변수는 불연속적이며 고정자 슬롯개구폭, Tip 높이, Wedge 높이등과 같은 변수는 전동기 특성 및 목적함수인 중량에 대하여 크게 영향을 미치는 변수가 아니기 때문에 고정된 값으로 선정한다. 설계변수는 다음과 같이 8개로서 그림 1과 같이 선정하였다.

- 고정자 내경  $x_1$
- 철심 적층길이  $x_2$
- 고정자 슬롯깊이  $x_3$
- 고정자 슬롯폭  $x_4$
- 고정자 요크 깊이  $x_5$
- 회전자 슬롯깊이  $x_6$
- 회전자 슬롯폭  $x_7$
- 공극 길이  $x_8$

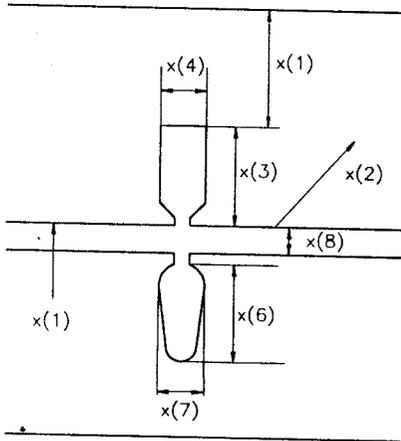


그림 1. 유도전동기 설계변수

또한, 설계시 주어지는 제약조건은 전동기 사양 혹은 재료특성에 따라 설정할 수 있는데 본 논문에서는 전동기 효율, 역률, 최대토크, 정격슬립, 철심 및 치부부의 자속밀도, 고정자 슬롯 점적률등으로 선정하였으며 다음과 같은 범위로 제한하였다.

- 고정자 치 자속밀도  $\leq 2.0$  [Tesla]
- 회전자 치 자속밀도  $\leq 2.0$  [Tesla]
- 공극자속밀도  $0.3 \sim 0.7$  [Tesla]
- 정격시 효율  $\geq 70$  [%]
- 정격시 역률  $\geq 70$  [%]
- 전부하 슬립  $\leq 0.05$
- 최대토크  $\geq 200$  [%]
- 고정자 슬롯 점적률  $\leq 65$  [%]

위와 같은 제약조건 이외에 전동기 특성을 계산하기 위한 수학적인 수식 및 재료특성에 따른 함수 등에 있어서는 상한과 하한치를 가지는 제약조건을 추가로 설정하였다.

### 3. 적용사례

본 논문에서는 다음과 같은 사양의 유도전동기에 대한 설계를 하였다.

표 1. 유도전동기 기본사양

정 격 출 력	15 kW
입 력 전 압	195 V
출 력 밀 도	0.92 kW/Kg
효 율	90 %
회 전 수	3,600 rpm

위와 같은 사양의 전동기에 대하여 전기자동차용 유도전동기의 특성을 고려한 초기설계의 결과를 표 2에 나타내었다.

표 2. 유도전동기의 초기설계 결과

항 목	설 계 결 과 (단위 : mm)
고 의 경	230
정 내 경	135
자 슬롯수	48
회 의 경	134
전 내 경	40
자 Slot수	40
공 극	0.5
적 층 길 이	125
사 용 도 계	$\phi 0.7 \times 5$
권 회 수	26
권 선 방 식	4 × DELTA
권 선 피 치	#1 ~ #11(83.3%)
점 적 륜	58.1 %
전 류 밀 도	4.85 A/mm <sup>2</sup>

앞에서 언급하였듯이 전기자동차용 유도전동기는 고출력의 특성이 요구되므로 정격출력시의 전동기 중량을 목적함수로 선정하여 설계를 하였다. 그림 2는 최적화 과정의 반

복계산 횟수에 따른 고정자 내경 및 적층길이의 변화를 나타낸 것이다. 최종 수렴시 고정자 내경은 초기 설계의 결과와 큰 차이는 없지만 철심 적층길이는 감소하였다. 이에 따른 목적함수(철심 중량 및 동 중량)의 수렴과정을 그림 3에 나타내었다. 전동기 중량의 대부분을 차지하는 철심과 동 중량의 변화 추이를 나타내었다. 초기설계시 철심중량 및 동 중량과 최종 수렴시의 값을 표 3에 비교하였다.

표 3. 전동기 중량

(단위 : Kg)		
항 목	초기 설계	최종 설계
철 심	34.683	32.131
동	5.454	5.202
알루미늄	2.664	1.918
재료중량	44.269	40.720

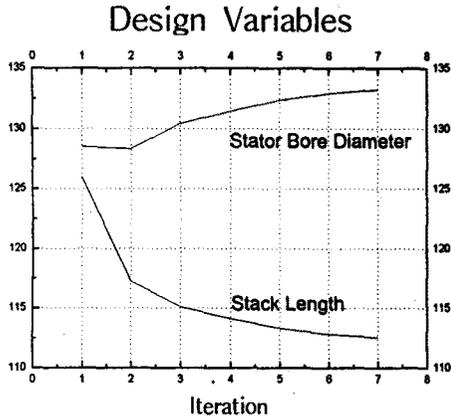


그림 2. 설계변수

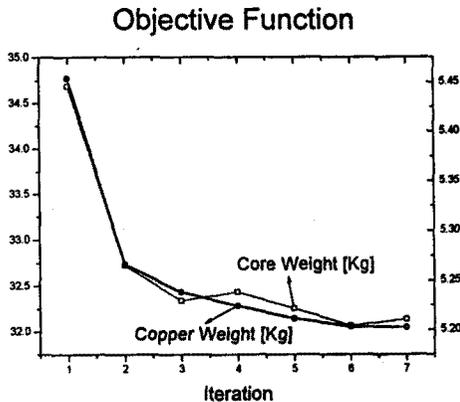


그림 3. 목적함수

한편, 고정자 슬롯폭, 높이, 회전자 슬롯폭, 높이 및 공극의 설계는 다음 표 4와 같다. 슬롯점적률을 제약조건으로 설정한 결과 고정자 슬롯의 높이는 약간 증가하였고 폭은 감

소하며 회전자 슬롯은 전체적으로 감소하는 경향을 나타내었다. 특성산정 결과 철심의 적층길이의 감소로 각부분의 압폐아턴이 증가하여 여자전류가 증가하였으며 이에 따라 역률이 현저하게 감소하게 되었다. 전동기 특성은 표 5에 나타내었다.

표 4. 설계 변수의 수렴

It.	X(3)	X(4)	X(6)	X(7)	X(8)
1	25.717	4.377	13.294	3.144	0.524
2	25.079	4.236	14.419	3.191	0.492
3	23.744	4.329	15.316	3.066	0.468
4	22.972	4.432	12.062	3.020	0.550
5	22.224	4.543	11.225	3.006	0.590
6	21.687	4.626	11.140	3.003	0.584
7	21.646	4.632	10.906	3.001	0.596

#### 4. 결론

전기자동차용 유도전동기의 설계시 목적함수를 전동기 중량으로 선정하여 비선형 최적화 기법을 이용한 설계를 실시하였다. 8개의 독립적인 설계변수를 선정하였다. 설계 결과, 전기자동차용 전동기에서 요구되는 출력밀도를 향상시키기 위하여 전동기 재료중량을 최소화 시키는 방향으로 설계가 이루어져 초기설계에 비하여 전동기 재료중량의 약 8% 경량화를 이루었다. 그러나 역률 등의 특성이 악화되는 것으로 나타났기 때문에 향후 이에 대한 보완이 이루어져야 한다.

이 연구는 통상산업부에서 지원한 G7과제로 수행한 연구 결과중의 일부입니다.

#### 참고문헌

1. "유도전동기의 최적화설계 프로그램 개발" 충남대학교 연구개발보고서, 1994. 11
2. "Experience in Design Optimization of Induction Motor using 'SUMT' Algorithm", IEEE Trans. Vol. PAS-102, October, 1983.
3. "Design Considerations for Induction Machines for Electric Vehicle Drives", IEE Conference Publication No.412, '1995
4. "Improved Design for Electric Vehicles Induction Motors using Optimization Procedure", IEE Conference Publication No.412, '1995