



# 2011 한국자동차공학회 부문종합 학술대회

기간 \_ 2011. 5. 19(목) ~ 21(토)

장소 \_ 라마다프라자 제주호텔



- 엔진 부문
- 배기 및 환경 부문
- 새시 및 차량동역학 부문
- 전기 & 전자시스템 · ITS 부문
- 차체 및 안전 부문
- 생산 및 재료 부문
- 전기 동력 자동차 부문
- 자동차 기술교육 및 스포츠 부문
- 철도차량 연구회
- 이륜차 연구회
- 표준화 위원회



**2217 차량용 PEMFC 동특성 모델링**

한재영\*(충남대학교), 윤진원(충남대학교), 임석연(충남대학교), 김성수(충남대학교), 유상석(충남대학교)

**2224 EMB가 적용된 연료전지 차량에 대한 회생제동 시스템의 천이구간의 특성해석**

조배균\*(성균관대학교), 최정훈(성균관대학교), 전광기(자동차부품연구원), 황현수(자동차부품연구원), 최성진(자동차부품연구원), 황성호(성균관대학교)

**2231 연료전지 하이브리드 자동차의 전략과 연비 평가**

정춘화\*(서울대학교), 김모성(서울대학교), 김형균(서울대학교), 박영일(서울과학기술대학교), 차석원(서울대학교)

**2234 시뮬레이션을 통한, 교류발전기의 충전제어가 FTP-75 모드 연비에 미치는 영향 확인**

강혜현\*(아주대학교), 박진일(아주대학교), 이종화(아주대학교)

**2237 전류 벡터 제어 및 정현파 전류 입력을 고려한 Traction motor의 인덕턴스 측정 오차 저감 연구**

이재민\*(한양대학교), 김해중(한양대학교), 홍정표(한양대학교)

**2241 직렬형 하이브리드 버스의 동력분배 제어전략에 관한 연구**

김민재\*(서울대학교), 정대봉(서울대학교), 민경덕(서울대학교)

**2245 유도모터의 회로정수 산정을 이용한 도체바 형상최적설계**

이겨레\*(한양대학교), 민승재(한양대학교), 홍정표(한양대학교)

**2248 가상 하이브리드 차량 모델을 위한 구동계 핵심부품 모델링**

김진성\*(국민대학교), 이재훈(국민대학교), 박기홍(국민대학교), 허승진(국민대학교)

**2254 감속비를 고려한 In-Wheel type 구동 전동기의 중량 저감 설계**

이병화\*(한양대학교), 채승희(한양대학교), 권순오(한양대학교), 홍정표(한양대학교), 이정중(전자부품연구원)

**2259 전기자동차용 인휠 구동 시스템 개발**

김재구\*(만도), 김일용(만도), 이충성(만도), 박승영(만도), 박기태(만도), 조인혜(만도), 박규식(만도), 문형태(만도)

**2264 저속에서의미끄럼조향세바퀴전기자동차의요율**

유재석\*(한국과학기술원), 박영진(한국과학기술원), 박윤식(한국과학기술원)

**2267 고주파 신호주입을 이용한 센서리스 구동용 고출력밀도 매입형 영구자석 동기전동기의 설계**

채승희\*(한양대학교), 이병화(한양대학교), 홍정표(한양대학교), 설승기(서울대학교), 이근호(국민대학교)

**2273 저속전자동차의 외기온도에 따른 에너지소비효율 평가**

이정화\*(자동차성능연구소), 박형원(자동차성능연구소), 임종순(자동차성능연구소), 우영한(자동차성능연구소), 허민도(자동차성능연구소)

**2278 Development and Prospect of High Capacity Li/S Rechargeable Battery**

류호석\*(경상대학교), 김기원(경상대학교), 안주현(경상대학교), 안효준(경상대학교)

# 유도모터의 회로정수 산정을 이용한 도체바 형상최적설계

이겨레<sup>\*1)</sup>·민승재<sup>\*\*2)</sup>·홍정표<sup>2)</sup>

한양대학교 대학원 자동차공학과<sup>1)</sup>·한양대학교 미래자동차공학과<sup>2)</sup>

## Shape Optimization of Rotor Slot in Induction Motor Using Circuit Parameter Calculation

Gyeorye Lee<sup>\*1)</sup> · Seungjae Min<sup>\*\*2)</sup> · Jung-Pyo Hong<sup>2)</sup>

<sup>\*1)</sup> Department of Automotive Engineering, Hanyang University, 17 Haengdang-dong, Seongdong-gu, Seoul 133-791, Korea

<sup>\*\*2)</sup> Department of Automotive Engineering, Hanyang University, 17 Haengdang-dong, Seongdong-gu, Seoul 133-791, Korea

**Abstract** : Induction motor is considered as an alternative to replace permanent magnet motors, due to ease of manufacturing and lack of rare earth material. However, since induction motor is relatively large in size and has low power density, previous studies have performed to increase the performance by changing the pre-defined parameters of rotor slot. In this paper, level set-based shape optimization is applied to design the optimal shape of rotor slot for torque maximization. Material boundaries represented by level set function are moved by the sensitivity of the objective function. To identify the rated current at each optimization process, the equivalent circuit parameters of induction motor are calculated using the finite element method. Based on the calculated current, time-harmonic magnetic analysis is performed and the rated torque and power are evaluated. The proposed method is applied to the reference design problem and validated to obtain the improved design.

**Key words** : Induction Motor(유도모터), Circuit Parameter(회로 정수), Shape Optimization(형상 최적화), Rotor slot(회전자 슬롯), Torque(토크)

## 1. 서론

영구자석형 모터는 크기가 작고 출력밀도가 높아 하이브리드 자동차 구동용 모터로 주로 사용되고 있지만, 최근 희토류 금속의 수급문제로 제조 원가 상승이 예상되어 비영구자석형 모터에 대한 요구가 증가하였다. 그 중에서도 유도모터는 제작이 용이하고 구조적으로 튼튼하여 영구자석형 모터를 대체할 대안으로 제시되고 있다.

그러나 유도모터는 영구자석형 모터에 비해 크기가 크고 출력밀도가 낮아 이를 극복하기 위해 다양한 연구<sup>1,2)</sup>가 진행되었지만, 그 중에서도 회전

자 도체바의 형상 설계<sup>3,4)</sup>가 모터의 전체적인 성능 변화에 가장 큰 영향을 미쳐 이와 관련된 연구가 주로 이루어졌다. 하지만 앞선 연구들은 매개변수를 이용하여 형상을 정의하여 최적화를 수행한 결과 초기형상과 최적형상이 크게 다르지 않았다.

따라서 본 논문에서는 레벨셋 함수를 이용한 형상최적화 방법<sup>5)</sup>을 도체바에 적용하였으며, 유한요소법을 이용하여 유도전동기의 등가회로 정수를 산정하였고 최적화 과정에서 변화하는 도체바 형상에 따른 정격 전류를 계산하였다. 그리고 이를 이용하여 토크를 최대화하는 도체바 형상을 도출하였다.

## 2. 문제 정식화

### 2.1 레벨셋 모델

회전자 내의 도체바( $Al$ )와 강자성체( $Fe$ )의 경

\* 발표자: [grlee@hanyang.ac.kr](mailto:grlee@hanyang.ac.kr)

\*\* 교신저자: [seungjae@hanyang.ac.kr](mailto:seungjae@hanyang.ac.kr)

계를 표현하기 위해 레벨셋 함수( $\phi$ )를 도입하여 영역을 구분하였으며, 두가지 재료의 표현을 위해 비투자율은 재료비선형을 고려하여 자속밀도( $\mathbf{B}$ )의 함수로 히비사이드 함수(H)를 이용하여 다음과 같이 표현한다.

$$\begin{cases} \phi(\mathbf{x}) > 0 & \mathbf{x} \in \Omega_{Al} \\ \phi(\mathbf{x}) = 0 & \mathbf{x} \in \partial\Omega \\ \phi(\mathbf{x}) < 0 & \mathbf{x} \in \Omega_{Fe} \end{cases} \quad (1)$$

$$\mu(\phi, \mathbf{B}) = \mu_{Al} H(\phi) + \mu_{Fe}(\mathbf{B})(1 - H(\phi)) \quad (2)$$

여기서  $\mu_{Al}$ 과  $\mu_{Fe}$ 는 각각 알루미늄과 강자성체의 비투자율이다.

## 2.2 최적설계 문제

전자기를 구성하는 맥스웰 방정식과 보조방정식을 이용하여 시정현계(Time-harmonic)에 대한 지배방정식을 유도하면 다음과 같다.

$$\nabla \times \left( \frac{1}{\mu} \nabla \times \mathbf{A} \right) = \mathbf{J}_s + \sigma(-j\omega \mathbf{A} + \mathbf{v} \times (\nabla \times \mathbf{A})) \quad (3)$$

여기서  $\mu$ 는 비투자율,  $\mathbf{A}$ 는 벡터 포텐셜,  $\mathbf{J}_s$ 는 고정자 표면 전류밀도,  $\omega$ 는 전류원의 주파수에 따른 각속도이고 마지막으로  $\sigma$ 는 회전자 도체의 도전율이다.

또한 회전기의 경우 와류항은 슬립( $s$ )을 이용하여 간단하게 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\nabla \times \left( \frac{1}{\mu} \nabla \times \mathbf{A} \right) = \mathbf{J}_s - js\omega \sigma \mathbf{A} \quad (4)$$

구동시의 토크( $T$ )를 최대화하는 목적함수와 도체바의 재료 사용량을 설계영역에 대한 비율(VF)을 제한하는 최적화 문제를 다음과 같이 정식화하였다.

$$\begin{aligned} & \text{Find } \{ \mathbf{x}(t) \mid \phi(\mathbf{x}(t), t) = 0 \} \text{ to} \\ & \text{maximize}_{\phi(\mathbf{x})} f = T \\ & \text{subject to } g = \frac{\int_{\Omega} H(\phi(\mathbf{x})) d\Omega}{\int_{\Omega} d\Omega} \leq VF \end{aligned} \quad (5)$$

## 2.3 등가회로 정수 산정

유도전동기의 등가회로는 Fig.1과 같이, 등가회

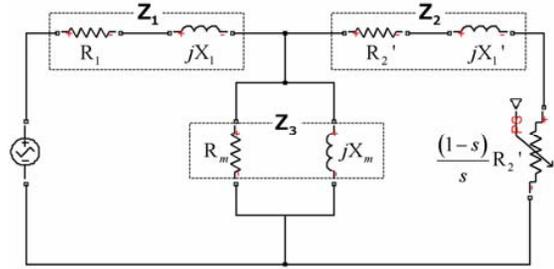


Fig. 1 Equivalent circuit of induction motor

로 정수를 산정하기 위해서는 고정자 실험, 무부하 실험 마지막으로 회전자 구속 실험을 모사한 유한요소해석이 필요하다<sup>6)</sup>.

고정자 실험을 모사한 유한요소해석을 통해 1차측 저항( $R_1$ )과 리액턴스( $jX_1$ )을 산정하고, 무부하 실험을 모사한 유한요소해석을 통해 철손저항( $R_m$ )과 자화리액턴스( $jX_m$ )를 산정한다. 마지막으로 회전자 구속 실험을 모사한 유한요소해석을 통해 철손저항, 자화리액턴스, 2차측 저항( $R_2'$ )과 인덕턴스( $jX_2'$ )로 구성된 등가 임피던스를 구하고, 이를 토대로 2차측 저항과 리액턴스를 산정한다.

위의 유한요소해석을 통해 얻은 등가회로 정수들을 토대로 바뀐 도체바 형상에서의 정격 전류를 찾고 이를 다시 입력하여 최적화를 진행한다.

## 3. 적용 예제

제안한 설계 방법을 7.5kW급 2극 24슬롯 3상 유도전동기<sup>7)</sup>의 도체바 형상최적설계에 적용하였다. 해석시에 회전자 도체바의 도전율은 엔드링의 저항을 고려하여 산정하였다.

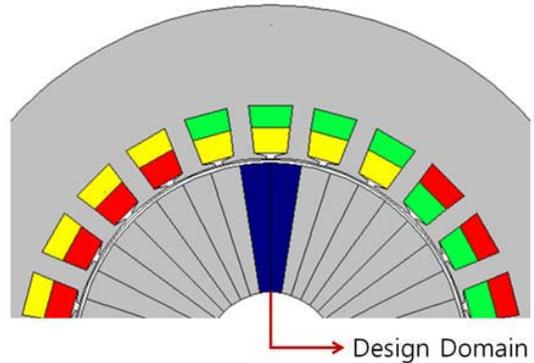


Fig. 2 Design domain of rotor in induction motor

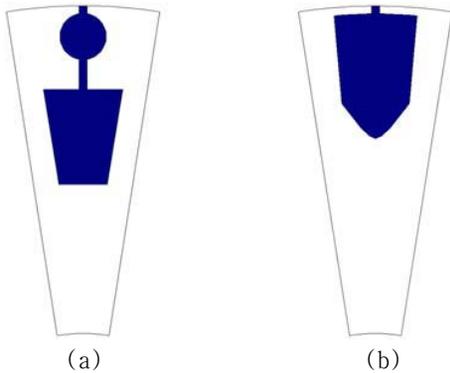


Fig. 3 Shape of rotor slot : (a) reference (b) optimal

정격에서의 출력을 증가시키기 위해 슬립은 0.034로 설정한 후 설계영역은 Fig.2와 같이 도체바 한 군대를 설정하여 주기 경계조건을 적용하였고, 기존 설계대비 동일한 양의 재료를 사용하였다.

최적설계 결과 Fig.3과 같이 기존형상에 비해 상대적으로 위쪽이 두껍고 아래쪽으로 갈수록 얇아지는 역삼각형 모양의 도체바 형상을 얻을 수 있었다.

도체바가 위쪽에 분포하면서 회전자 아래쪽에 자속이 포화되는 정도가 줄어드는 반면 2차측에서 누설되는 리액턴스가 줄어들게 되어, 공극에서의 자속밀도가 증가하게 되고 토크가 증가하였으며 효율역시 증가하였다. 또한 역삼각형의 형상은 도체바와 도체바 사이에 일정한 공간을 유지하여 1차측에서 생성된 자속이 2차측까지 내려와 회전자 내부에서 잘 흐를 수 있도록 하였다.

기존 형상과 최적 형상에 따른 성능비교 결과는 table 1에 정리하였다.

Table 1 Comparison of results

	Torque [Nm]	Efficiency [%]
Reference Design	24.60	87.00
Optimal Design	28.25	89.87

#### 4. 결론

레벨셋 함수를 이용하여 유도모터의 토크 성능

을 증가시키는 도체바의 형상 최적설계를 수행하였고 최적화 과정에서 변화하는 도체바 형상에 대한 정격 전류를 재산정하여 성능 계산을 통한 최적화 과정의 타당성을 향상시켰다. 그 결과 슬립이 0.034인 경우 최적화된 모델이 기존 모델에 비해 토크가 14.84% 증가하여 출력이 7.5kW에서 8.6kW로 증가하였으며 효율 역시 2.87% 더 높아졌다.

#### References

- 1) S.-M. Wang, J.-N. Kang, and J.-C. Noh, "Topology optimization of a single-phase induction motor for rotary compressor," IEEE Trans. Magn., vol. 40, no. 3, pp. 1591-1596, 2004.
- 2) D.-H. Cho, H.-K. Jung, and C.-G Lee, "Induction motor design for electric vehicle using a niching genetic algorithm," IEEE Trans. Industry Applications, vol. 37, no. 4, pp. 994-999, 2001.
- 3) S. Williamson and C. I. McClay, "Optimization of the Geometry of Closed Rotor Slots for Cage Induction Motors", IEEE Transactions on Industry Applications, vol.32, no.3,pp.560-568, 1996
- 4) T.-B. Kim and B.-I. Kim, "Shape Optimization of Cage Rotor Slot for Inverter-Fed 2-Phase Induction Motor", The Transaction of the Korean Institute of Electrical Engineers B, 50B(11), pp.539-545, 2001
- 5) J.H. Kwack, S. Min and J.-P. Hong, "Optimal Stator Design of Interior Permanent Magnet Motor to Reduce Torque Ripple Using the Level Set Method", Magnetics, IEEE Transactions on, vol.46, no.6, pp.2109-2111, 2010
- 6) S.-J. Lee, J.-J. Lee, S.-I. Kim and J.-P. Hong, "Calculation of the Parameter according to the Slip in Squirrel-Cage Induction Motor", The Proceeding of the Korean Institute of Electrical Engineers, pp.738-739, 2009
- 7) R. Escarela-Perez, E. Melgoza and J. Alvarez-Ramirez, "Coupling Circuit Systems and Finite Element Models: A 2-D Time-Harmonic Modified Nodal Analysis Framework," IEEE Trans. Magn., vol. 45, no. 2, pp.707-715, 2009.