

순시 정격을 고려한 유도기 경량화에 관한 연구

*박 정태 *이 철균 *김 중구 **정 현교 ***원 중수

*현대 중공업(주) 중전기 연구소 **서울대학교 공과대학 전기공학과

A study on lightening the weight of an induction motor
satisfying maximum power rating

*Jeong Tae Park, *Cheol-Gyun Lee, *Joung Koo Kim
**Hyun-Kyo Jung, **Jong-Soo Won

*Hyundai Heavy Industries Co., Ltd, Industrial & Power Systems R&D Center
**Department of Electrical Engineering, Seoul National University

Abstract

This paper presents the optimal design method of an induction motor for electric vehicle which minimizes the weight of motor and satisfies maximum power rating at the same time. Effects of motor parameters on the dimensions and weight of motor is investigated. Optimal routine which is used in this paper is simulated annealing technique.

1. 서론

전기 자동차용으로 사용되어질 유도기 설계에 있어서 연속 정격, 순시 정격을 동시에 만족하는 설계는 필수적이며 또한, 전기 자동차용으로 사용될 특성상 경량화가 절대 고려되어야 할 부분이다.

기존 유도기 설계 방법으로는 크게 다음과 같이 두가지 방법으로 나눌수 있는데 첫번째로, 먼저 연속 정격 상태를 만족하는 설계가 이루어진 다음 순시 정격 상태의 조건이 만족되는지를 확인하여야 하나 만약 만족되지 않을 시 시행착오기법으로 적절한 설계 조건을 찾아야 하기 때문에 이 방법은 다소 많은 시간을 필요로 하게 된다.

두번째로는, 연속 정격 및 순시 정격에 대한 수식을 전개, 최적 알고리즘을 적용하여 설계하는 방법[2]은 복잡한 수식 전개로 인한 어려움이 있다.

본 논문에서는 복잡한 수식을 사용하지 않고 연속 정격, 순시 정격을 만족하는 간략화된 수식을 사용하여 최적 알고리즘을 구성, 무게 최소화에 중점을 두었다. 순시 정격에 대한 수식은 일반적인 유도기의 등가회로 파라미터를 사용하였다. 사용된 최적 알고리즘은 시뮬레이티드 어닐링(Simulated Annealing)기법이다.

2. 본론

2.1 접근 방법

연속 정격을 만족하는 간략화된 수식을 이용하여 유도기의 치수를 먼저 설계한 다음 이 설계 치수를 이용하여 일반화된 유도기 등가회로의 파라미터를 구성, 순시 정격을 만족하도록 제약조건을 구성하였다.

유도기의 주요 설계 변수로는 보통 모터 주요 치수와 자속 밀도, 전류밀도등을 고려하는 데 여기서는 슬롯폭과 자속 밀도, 전류밀도를 고정된 값으로 하여 최적 알고리즘을 적용, 치수 설계를 하였다. 또한 정격 주파수와 자속밀도, 전류밀도를 설계 기준 파라미터로 정하고 이 값들을 몇가지 값으로 변화시키면서 유도기의 무게에 어떻게 영향을 주는지는 알아보았다.

2.2 설계 변수 선정

이 논문에서는 다음과 같이 설계 변수를 정했다.

- x1 : 적층 길이
- x2 : 고정자 외경
- x3 : 고정자 내경
- x4 : 회전자 요크 길이
- x5 : 고정자 치 길이

2.3 유도기 특성식

1) 고정자 요크 체적

$$V_{y1} = \pi k_{fe} \left(\left(\frac{x_2}{2} \right)^2 - \left(\frac{x_3}{2} + x_5 \right)^2 \right) x_1$$

단, k_{fe} 는 적층 계수이다.

2) 회전자 요크 체적

$$V_{y2} = \pi k_{fe} \left(\left(x_4 + \frac{D_a}{2} \right)^2 - \left(\frac{D_a}{2} \right)^2 \right)$$

단, D_a 는 축 직경이다.

3) 고정자 치 체적

$$V_{t1} = \zeta \pi k_{fe} \left(\left(\frac{x_3}{2} + x_5 \right)^2 - \left(\frac{x_3}{2} \right)^2 \right) x_1$$

$$\zeta = \frac{\text{치 면적}}{\text{치 면적} + \text{슬롯 면적}}$$

4) 회전자 치 체적

$$V_{t2} = \zeta \pi k_{fe} \left(\left(\frac{x_3}{2} - g \right)^2 - \left(x_4 - \frac{D_a}{2} \right)^2 \right) x_1$$

단, g 는 공극 길이이다.

5) 고정자 동 체적

$$V_{wt1} = \pi k_s (1 - \zeta) \left(\left(\frac{x_3}{2} + x_5 \right)^2 - \left(\frac{x_3}{2} \right)^2 \right) (x_1 + \psi x_3)$$

단, k_s 는 슬롯 점철률이고
 ψ 는 엔드턴 길이계수이다.

6) 회전자 알루미늄 체적

$$V_{wt2} = \pi k_s (1 - \zeta) \left(\left(\frac{x_3}{2} - g \right)^2 - \left(x_4 - \frac{D_a}{2} \right)^2 \right) (x_1 + \psi x_3)$$

7) 고정자 요크 철손

$$P_{sy} = J \left(\left(\frac{x_2}{2} \right)^2 - \left(\frac{x_3}{2} + x_5 \right)^2 \right) x_1$$

단, J 는 다음과 같다.

$$J = p_s c B_{y1}^2 \sigma \sigma' \pi k_{fs}$$

p_s : 철심 밀도

c : 단위 체적당 철손

B_{y1} : 고정자 요크 자속 밀도

σ : 표면 및 자속 맥동 손실 계수

σ' : 철심 공정 계수

8) 고정자 치 철손

$$P_{\alpha} = I \left(\left(\frac{x_3}{2} + x_5 \right)^2 - \left(\frac{x_3}{2} \right)^2 \right) x_1$$

단, I 는 다음과 같다.

$$I = p_s c B_{t1}^2 \sigma \sigma' \zeta \pi k_{fs}$$

B_{t1} : 고정자 치 자속 밀도

9) 고정자 도체손

$$P_{\alpha} = F \pi k_s (1 - \zeta) \left(\left(\frac{x_3}{2} + x_5 \right)^2 - \left(\frac{x_3}{2} \right)^2 \right) (x_1 + \psi x_3)$$

단, F 는 다음과 같다.

$$F = \frac{G_1^2 \mu_1}{\gamma_{\alpha}}$$

G_1 : 고정자 전류 밀도

μ_1 : 고정자 표피효과 계수

γ_{α} : 동 도전율

10) 회전자 도체손

$$P_{\alpha} = H \pi k_s (1 - \zeta) \left(\left(\frac{x_3}{2} - g \right)^2 - \left(x_4 - \frac{D_a}{2} \right)^2 \right) (x_1 + \psi x_3)$$

단, H 는 다음과 같다.

$$H = \frac{G_2^2 \mu^2}{\gamma_{\alpha}}$$

G_2 : 회전자 전류 밀도

μ_2 : 회전자 표피효과 계수

γ_{α} : 알루미늄 도전율

11) 출력

$$P = R x_1 (x_3 - g)^2$$

단, R 는 다음과 같다.

$$R = \frac{\pi^2}{\sqrt{2}} \frac{n}{60} k_a B_g K \cos \phi$$

n : 동기속도 [rpm]

k_a : 권선 계수

$\cos \phi$: 정격 역률

12) 정격 토크

$$T = S \pi k_s (1 - \zeta) (x_1 + \psi x_3) \left(\left(\frac{x_3}{2} - g \right)^2 - \left(x_4 - \frac{D_a}{2} \right)^2 \right)$$

단, S 는 다음과 같다.

$$S = \frac{p}{\omega} \frac{1}{s \gamma_{\alpha}} G_2^2$$

p : 극짝수

ω : $2\pi f$

s : 정격 슬립

2.4 목적함수, 제약 조건 선정

전기 자동차의 특성에 적합하도록 무게가 최소가 되도록 다음과 같이 목적함수를 선정했다.

$$E = p_i (V_{y1} + V_{y2} + V_u + V_a) + p_{\omega} V_{\omega} + p_{a2} V_{a2}$$

p_i : 코어 밀도, p_{ω} : 동 밀도, p_{a2} : 알루미늄 밀도

전기 자동차용 유도기의 연속 정격, 순시 정격은 다음과 같이 선정했다.

정격 전압 200V, 정격 주파수 120Hz, 극수 4극

연속 정격 출력 15kw

순시 정격 출력 50kw

치수에 대한 제약조건은 다음과 같다. (단위:mm)

$$0 < x_1 < 230$$

$$0 < x_2 < 220$$

$$0 < x_3$$

$$0 < x_4$$

$$0 < x_5$$

전기 자동차용으로 사용될 것을 예상해서 모터의 적층길이와 고정자 외경을 위와 같이 정했다.

손실에 대한 제약 조건은 다음과 같다.

$$P_{\alpha} + P_{\beta} + P_{\gamma} + P_{\delta} < 700[W]$$

유도기의 정동토크에 대한 제약 조건은 정격 토크의 5배로 선정했다.

본 논문에서는 인버터 구동에 적합하도록 설계되어, 상용 전원의 전전압 시동의 부담이 없으므로 일반적으로 좀더 높은 효율을 가지게 되며 NEMA 설계 규격으로 본다면 A와B사이의 설계가 된다.

2.5 최적화 기법

시뮬레이티드 어닐링을 사용하였고 쿨링 스케줄에 따라 불뜨만 머신과 코시 머신으로 나뉘는데 먼 곳에 존재하는 해에 대해서도 쉽게 수렴할 수 있으며, 수렴속도가 빠르다는 장점이 있어 코시 머신을 사용하였다. 코시 머신을 사용한 시뮬레이티드 어닐링의 알고리즘이 그림 1에 보인다.

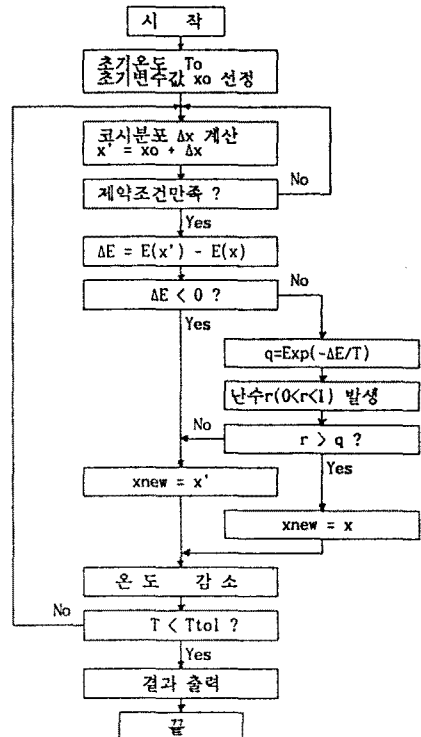


그림1. 시뮬레이티드 어닐링을 이용한 모터설계 흐름도

2.6 설계기준 파라메터 값 변화에 따른 특성 변화

각각의 설계 기준 파라메터 값들의 변화에 따른 무게의 변화를 그림 2. - 그림 4.에 보였다. 그림2는 정격 주파수에 따른 무게의 변화이다. 정격 출력이 일정할 때 정격 주파수가 증가할수록 모터의 무게 감소함을 알 수 있다. 그림3은 고정자 치 자속밀도와 요크 자속밀도와의 비 변화에 따른 무게의 변화이며 그림 4는 고정자 전류밀도의 변화에 따른 무게의 변화이다. 또한 그림 5는 자속밀도 변화에 따른 설계 변수의 변화이다.

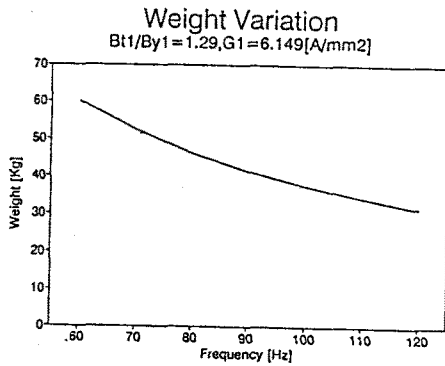


그림 2. 주파수 변화에 따른 무게의 변화

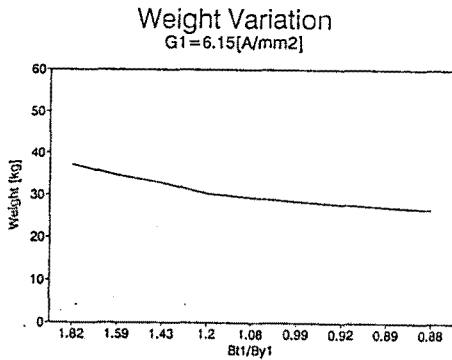


그림 3. 자속밀도 변화에 따른 무게의 변화

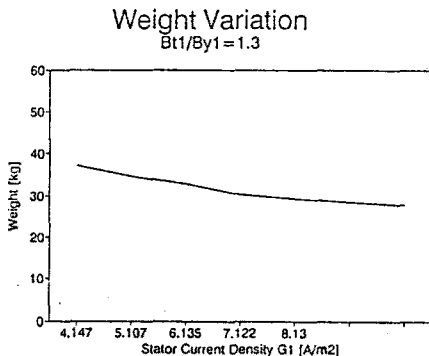


그림 4. 전류밀도 변화에 따른 무게의 변화

Dimension Variation G1 = 6.15 [A/mm²]

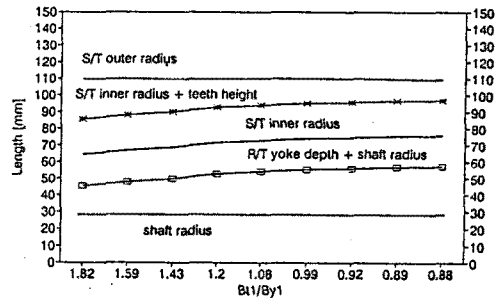


그림 5. 자속밀도 변화에 따른 설계 변수의 변화

3. 결론

전기 자동차용으로 적합하도록 유도기의 경량화에 대해 연구하였다. 연속 정격과 순시정격을 모두 고려한 무게 최소화 설계를 하였고, 정격 주파수와 자속밀도, 전류밀도의 변화에 따른 무게 변화를 고찰하였다. 사용된 최적 알고리즘은 시뮬레이티드 어닐링 기법이며, 이 논문에서 제시한 방법이 모터 설계에 있어 또 하나의 판단 기준이 될 수 있을 것이다.

Reference

- [1] R. Ramarathnam, B.G. Desai, "Optimization of polypahse induction motor design : a nonlinear programming approach," IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-90, No-2, March/April, pp572-578, 1971
- [2] N. H. Fetih, H. M. El-Shewy, "Induction motor optimum design, including active power loss effect," IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. EC-1, No3, September, pp155-162, 1986
- [3] C. G. Veinott, "Theory and design of small induction motors," McGRAW-HILL, 1959.
- [4] P. Pillay, et al, "Performance and design of permanent magnet ac motor drive," sponsored by IEEE Ind. Drives Committee of the IAS, 1989.
- [5] P. D. Wasserman, "Neural Computing-Theory and Practice," Von Nostrand Reinhold, New York, 1989.
- [6] 大木 創, 田中 國昭, "電氣機器論", 實教出版(株), 1984.