

세탁기용 외전형 단상 유도전동기 설계

김 도완, 홍 선기, 정 현교
서울대학교 전기역학 연구실

Optimal design of a outer rotor type single phase motor for washing machines

Do-wan Kim, Sun-ki Hong, Hyun-kyo Jung
Electromechanics Lab

Abstract - Outer rotor type motors used in washing machines has some merits compared with ordinary rotor type motors. For example, the washing machines' length can be shortened and stator coil length can be shortened.

1. 서론

현재 단상 유도전동기는 가전분야에서 다양한 용도로 사용되고 있다. 세탁기용 단상유도기도 그 중 하나인데 특히 이 경우는 세탁기의 부피를 줄이기 위해서 같은 용량이라면 축 방향 길이가 짧은 전동기가 유리하다. 본 논문에서는 이를 위해 현재 상용중인 내전형 전동기를 바탕으로 하여 외전형 전동기 설계하였는데 외전형 유도전동기는 세탁기에 사용될 경우 베어링이 고정자 축에 삽입될 수 있으며 전동기의 축 방향 길이가 감소될 수 있다. 외전형 단상 유도전동기를 설계하기 위해 장하부분배법을 사용하였다. 장하부분배법이란 유도전동기의 특성을 결정짓는 두 가지 요소 즉 전기장하와 자기장하를 결정한 후에 이를 기본으로 나머지 사양을 설계하는 방식이다. 그리고 최적 설계를 위해서 유전알고리즘을 이용하였는데 이는 생명체의 자연 진화 법칙을 일관 최적화 문제에 적용한 방법으로 설계 영역에 다수의 설계점을 분포시켜 목적 함수 값과 제약 조건의 위반 정도에 따라 각 설계점에 적합성(Fitness)을 부여하고 교배와 변종의 과정을 통해서 계산이 진행 될수록 전체 설계점들은 좋은 방향으로 탐색이 진행되게 하는 최적화 방법중 하나이다. 또한 전동기의 국부적인 자체특성이나 시간에 따른 전류의 고조파 특성들을 보다 정확하게 해석하기 위해서 시간차분법을 이용하여 해석하였다.

2. 본론

2.1 단상유도전동기 설계

외전형 유도전동기를 해석 및 설계하기 위해서는 이를 수행할 수 있는 프로그램이 필요하다. 본 연구에서는 장하부분배법을 이용한 설계프로그램을 개발하였다. 장하부분배법을 간단히 설명하면 다음과 같다. 전동기의 총 용량을 식 (2.1) 과 같이 전압과 전류의 곱으로 나타낼 수 있다. 이는 또한 극수 P 와 암페어 턴 AT 와 자속 ϕ 와 주파수 f 의 곱으로 나타낼 수 있다. 여기서 K_0 는 비례상수이다.

$$kVA = K_0 P AT \phi f \times 10^3 \quad (2.1)$$

윗 식의 양변을 주파수와 극수의 곱으로 나누면 식 (2.2)와

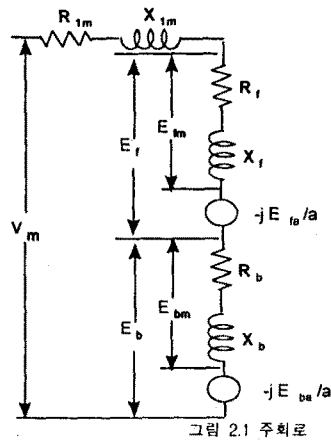
같다. [1]

$$\frac{kVA}{Pf \times 10^{-2}} = K_0 [AT \times 10^3] [\phi \times 10^{-2}] \quad (2.2)$$

즉, 식 (2.2)는 유도전동기의 극당 용량이 암페어턴, 즉 전기장하와 자속밀도, 즉 자기장하의 곱으로 표현되므로 같은 용량의 유도전동기라도 장하를 어떻게 분배하느냐에 따라서 여러 가지 사양으로 설계될 수 있는 가능성을 보여준다. 본 연구에서는 다양한 경험에 의한 통계자료를 바탕으로 장하분배를 하였다. 그 다음 권선수를 결정하여야 한다. 권선수가 결정되면 차례로 고정자 코어의 형상과 회전자 코어의 형상을 정해야 한다. 코어의 형상을 결정할 때는 슬롯모양의 선정에 유의 하여야 하는데 이는 코어의 자속 분포를 좌우하기 때문이다. 즉 자기포화가 생기지 않는 범위내에서 코어를 설계하여야 하며 슬롯모양도 누설이 적도록 설계하여야 한다. 여기까지 대부분의 주요 사양이 결정 되었으므로 나머지 세밀한 부분들은 이미 알려진 설계식을 따라 설계하면 된다.

2.2 단상유도전동기의 등가회로

2.1절의 장하분배법에 의해 유도전동기가 설계되면 이를 전기등가회로를 이용하여 해석한 후 그 결과를 설계사 가정한 특성들과 비교해서 검증해야 한다. 전기등가회로란 유도전동기를 전기회로의 기본인 저항, 인덕턴스 그리고 커패시턴스로 모델링하여 그 특성을 계산하는 방법이다. 단상 컨덴서론 유도전동기의 경우 주회로와 보조회로의 두 가지로 구성되는데 슬립 s 로 운전하는 경우 각 등가회로는 그림 (2.1)과 (2.2)와 같다.



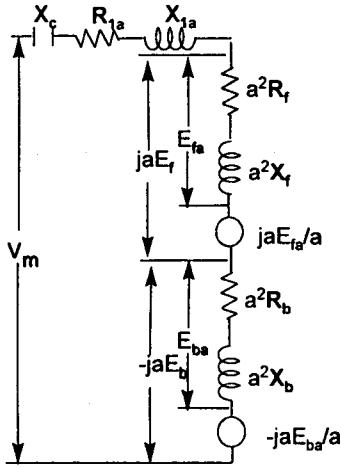


그림 2.2 보조회로

그림(2.1)과 (2.2)의 등가회로를 이용하여 전동기를 해석하기 위한 수식은 다음과 같다.

먼저 주권선의 전압원 회로방정식은 식

$$(2.3) \text{과 같다. } V_m = I_m(Z_{1m} + Z_f + Z_b) - j\frac{E_{fa}}{a} + j\frac{E_{ba}}{a} \quad (2.3)$$

또한 보조권선 회로를 이용하여 전압원 회로방정식을 세우면 식 (2.4)와 같다.

$$V_a = I_a(Z_c + Z_{1a} + a^2Z_f + a^2Z_b) + jaE_{fa} - jaE_{ba} \quad (2.4)$$

여기서 임피던스 Z 들은 저항과 리액턴스로 구성되며 유도전동기의 슬롯형상 및 여러 가지 사양을 이용하여 계산할 수 있고 a 는 권선비이므로 본 유도전동기에서는 1이다. 그리고 유기기전력 E 들은 전류로써 나타낼 수 있고 전압 V 들은 사양에 나타나 있으므로 위 방정식을 연립하여 풀면 전류를 계산할 수 있다. 이렇게 전류가 계산되면 정방향 입력력 P_{gf} , 역방향 입력력 P_{gb} 를 식 (2.5)와 (2.6)에 의해 계산할 수 있다.

$$P_{gf} = \text{Re}(E_f I_m^* + jaE_f I_a^*) \quad (2.5)$$

$$P_{gb} = \text{Re}(E_b I_m^* + jaE_b I_a^*) \quad (2.6)$$

마지막으로 식 (2.5)와 식(2.6)을 이용하면 최종출력인 토크가 식 (2.7)과 같이 계산된다.

$$T = T_f - T_b = \frac{P_{gf} - P_{gb}}{\omega_{syn}} \quad (2.7)$$

2.3 FEM해석

본 연구에서는 유한요소법을 이용하여 전동기의 특성을 해석하는 알고리즘을 개발하였다. 유한요소 해석이란 전자장의 지배방정식인 맥스웰방정식을 적용하여 유도전동기 내에서의 자장분포를 계산한 후 이를 이용하여 유도전동기의 여러 특성을 해석하는 방법이다. 이는 유도전동기의 실제 형상 및 재질특성이 적절히 반영되고 자장의 분포를 구할 수 있으므로 정확한 해석이 가능하다. 또한 시간차분법을 이용한 유한요소해석은 시간의 흐름에 따른 전류분포를 해석할 수 있으므로 고조파 성분이 포함된 단상유도전동기의 전류를 보다 정확히 해석할 수 있다. 전자기 현상을 이용한 모든 기기는 맥스웰방정식으로부터 유도된다. 와전류

문제에 필요한 맥스웰방정식은 식 (2.8)과 같다.

$$\nabla \times \nu(\nabla \times \vec{A}) = \vec{j}_s - \sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \sigma \nabla \phi \quad (2.8)$$

위 식에서 시간에 대한 미분항인 $\frac{\partial \vec{A}}{\partial t}$ 를 어떻게 처리하는

냐에 따라서 iw 법과 시간차분법으로 나뉜다. 본 연구에서는 시간차분법을 사용하였으므로 이 항을 식 (2.9)와 같이 처리한다.

$$\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \Big|_{t+1} = \frac{A_{t+1} - A_t}{\Delta t} \quad (2.9)$$

식 (2.8)에 고정자회로방정식과 회전자 회로방정식을 결합시켜 최종적인 방정식을 행렬식의 형태로 나타내면 식 (2.10)과 같다.

$$\begin{bmatrix} K+T & E & -S \\ E^T & P & 0 \\ S^T & 0 & Z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A \\ \nabla \phi \\ I \end{bmatrix} \Big|_{t+1} = \begin{bmatrix} T & 0 & 0 \\ E^T & 0 & 0 \\ S^T & 0 & Z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A \\ \nabla \phi \\ I \end{bmatrix} \Big|_t - \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ V \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

마지막으로 철심의 비선형성을 고려하기 위해 Newton-Raphson 법을 적용하여 계산하면 각 절점에서의 벡터포텐셜과 고정자 전류 시간별로 구할 수 있다. [2][3]

2.4 유전알고리즘

자연 진화의 법칙에 따르면 일정한 환경에 무리를 지어 살고 있는 생명체들은 그 환경에 적합한 형질을 가진 개체가 생존할 확률을 크게 가지며 교배(Crossover)와 변종(Mutation)의 과정을 통해 보다 좋은 방향으로 진화해 나가고 부적합한 형질의 개체들은 진화의 과정에서 점차 도태되어 간다. 유전 알고리즘은 이러한 생명체의 자연 진화 법칙을 일반 최적화 문제에 적용하여 우수한 특성을 가진 설계점이 다음 단계에서 보다 많이 형성되어 계산이 진행될수록 전체 설계점들은 우수한 특성을 가지도록 설계가 진행되게 하는 방법이다. [4]

5. 사례 적용

본 연구에서는 이상의 설계 알고리즘을 적용하여 외전형 단상 유도전동기를 설계하였다. 목적함수는 전동기의 부피 최소화로 선정하였으며 설계변수는 상당 턴수, 축 방향 길이, 고정자 처폭, 고정자 슬롯깊이 그리고 회전자 처폭의 다섯가지로 선정하였다. 최적화 방법은 유전알고리즘을 이용하였으며 전동기가 만족시켜야 하는 여러 가지 특성을 제약조건으로 처리하였다. 즉 기동토크 25[N·m]이상, 최대토크 35[N·m]이상, 정적효율 40[%]이상 그리고 코어 각부의 자속밀도가 포화되지 않을 정도로 설계하였다. 이상의 최적화 과정을 거쳐 최종 설계된 전동기의 사양 및 특성은 다음과 같다.

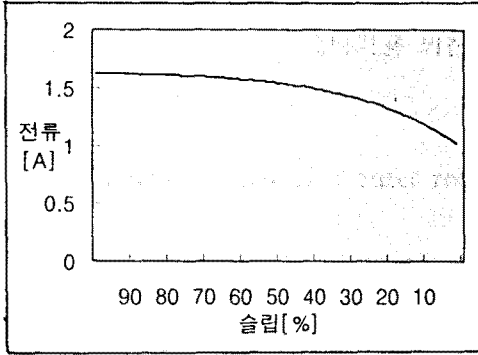


그림 2.3 고정자 전류

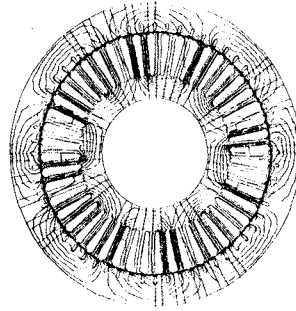


그림 2.5 단상전동기의 벡터포텐셜도

그림 (2.4)는 고정자 전압이 정현파일 때의 전류분포를 나타낸다. 전류는 위상이 앞서 있으며 약간의 고조파 성분을 포함하고 있다.

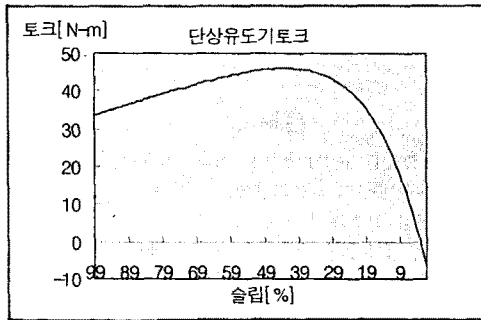


그림 2.4 슬립-토크 곡선

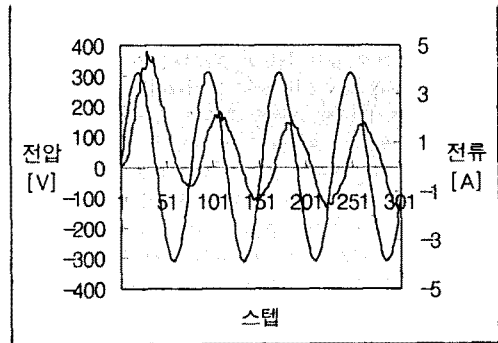


그림 2.6 단상유도기 고정자전류

표 2.1 설계된 유도전동기 사양

형 식	단상농형	극 수	8극
정격출력	200 W	정격전압	220 V
정격주파수	50 Hz	정격토크	25 Nm
고정자 외경	115 mm	내 경	53 mm
코아길이	45 mm	슬롯수	48
철심종류	S18		
회 전 자 외 경	145 mm	내 경	117.5 mm
코아길이	45 mm	공 극	0.35 mm
슬롯수	60		

그 다음은 유한요소법으로 계산한 결과이다. 먼저 전 영역에서의 등가벡터포텐셜은 그림 (2.3)에 제시되어 있다.

3. 결론

본 연구에서는 세탁기용 단상유도기를 설계하였다. 설계 목적은 부피최소화이며 유도기의 전기자기적 특성에 영향을 큰 다섯가지의 설계변수를 선정하여 만족해야 하는 조건 즉 기동토크나 효율들을 제약조건으로 잡아서 유전알고리즘을 이용하여 설계하였다. 또한 설계된 전동기의 국부적인 특성을 보다 정확하게 해석하기 위해 시간차분법을 사용하였으며 그 결과 등가회로법과 잘 맞는 것을 알 수 있었다.

4. References

- [1] 박민호, 유도기기, 동명사, 2판, 1986
- [2] Nakada, T. and Takahashi, N., "Direct Finite Element Analysis of Flux and Current Distributions under Specified Condition," IEEE Transaction on Magnetics MAG-18, No. 2, pp. 325-330, 1982
- [3] Konrad A., "Integro-differential Finite Element Formulation of Two dimensional Steady-state Skin Effect Problems," IEEE Transaction on Magnetics MAG-18, No. 1, pp. 284-292, 1982
- [4] D.E. Goldberg, Genetic Algorithms: in Search, Optimization & Machine Learning, Addison-Wesley Pub, 1989