

포화계수를 고려한 단상 유도전동기의 해석에 관한 연구

조수연\*, 김광수\*\*, 임종빈\*, 유광현\*, 오세영\*, 안한웅\*, 이 주\*  
 한양대학교 전기공학과\*, 삼성전자\*\*

Study on Analysis of Single Phase Induction Motor Considering Saturation Factor

Su-Yeon Cho\*, Kwang-Soo Kim\*, Jong-Bin Im\*, Gwang-Hyeon Ryu\*, Se-Young Oh\*, Han-Woong Ahn\*, Ju Lee\*\*  
 Hanyang University\*, Samsung Electronics\*\*

**Abstract** - This paper presents the study on analysis of single phase induction motor characteristics by equivalent circuit. For high efficiency of single phase induction motor, the motor parameters used for equivalent circuit analysis is important. The accuracy of equivalent circuit analysis of motor depends on the circuit parameters like saturation factor. Therefore this paper proposed the analysis method considering saturation factor. The saturation factor was calculated by iteration routine and numerical method. this proposed method was verified by FEM analysis results and dynamo test results of the prototype model.

1. 서 론

고효율 단상 유도전동기의 설계를 위해서는 출력계수와 같은 경험치를 배제한 등가회로를 통한 특성 해석이 매우 중요하다. 등가회로를 통한 특성해석의 정확도는 전동기 파라미터의 정확도에 의존한다. 특히 자화 리액턴스의 경우, 전동기 철심의 포화정도에 따라 변동폭이 크므로 포화정도를 나타내는 포화계수에 대한 정확한 예측이 요구된다. 이러한 포화계수는 일반적으로 경험적인 상수로 가정하였으나 이 경우, 등가회로를 통한 특성해석 결과에 큰 오차가 발생하게 된다. 이러한 특성해석 결과의 오차는 단상 유도전동기의 설계사양보다 실제 효율이 낮게 나오는 결과를 가져오게 된다. 따라서 본 논문에서는 정확한 포화계수를 계산하는 방법에 대해 제안하였으며 이러한 포화계수를 고려한 단상 유도전동기의 등가회로 해석법을 제안하였다.

2. 본 론

2.1 단상 유도전동기의 등가회로

단상 유도전동기는 주권선과 보조권선이 서로 상이하므로 일종의 불평형 2상 전동기로 가정된다[5]. 이러한 불평형 조건하에서의 전동기 특성을 해석하기 위해서는 대칭 2상 전동기 등가회로를 이용한다[1][5]. 그림 1은 주권선부로 보조권선부를 환원시킨 단상 유도전동기의 등가회로를 나타낸다[2].

등가회로 상의 파라미터들은 전동기의 외형 사양과 재질정보, 그리고 전기적인 사양을 통해 계산이 가능하다. 그러나 자화 리액턴스의 경우 아래의 식(1)과 같이 포화계수에 영향을 받게 된다.

$$X_{mm} = 2\pi f_1 \frac{4\mu_0 W_m^2 K_{wm}^2}{\pi^2} \frac{I_{stk} K_{Fe} \tau_p}{p_1 g K_c K_s} \quad (1)$$

$K_s$  : 포화계수

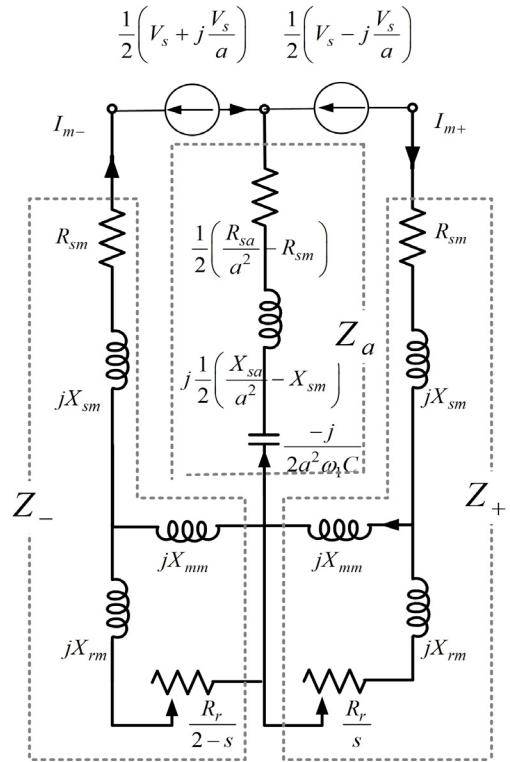
자화 리액턴스는 등가회로 해석을 위한 주요한 파라미터이므로 결국 포화계수를 정확히 아는 것은 정확한 등가회로 해석을 위해 반드시 요구된다.

2.2 포화 계수

포화 계수는 다음 식(2)와 같이 정의된다.

$$K_s = 1 + \frac{2(F_{teeth,s} + F_{teeth,r}) + (F_{core,s} + F_{core,r})}{2F_g} \quad (2)$$

포화계수를 계산하기 위해서는 전동기 구조의 각 부분에서의 기자력의 크기를 알아야한다. 따라서 기자력의 크기를 계산하기 위해 자기등가회로를 이용한다. 전동기의 총 기자력은 식(3)에 의해 계산할 수 있다. 전동기 구조의 각 부분에서의 기자력들을 계산하는 데에는 공극 자속밀도가 이용된다. 3상 유도전동기와는 다르게 단상 유도전동기에서는 주권



<그림 1> 단상 유도전동기 등가회로

$$F_{1m} = \frac{m_1}{2} \frac{2W_1 I_0 \sqrt{2} K_{w1}}{\pi p_1} \quad (3)$$

$I_0$  : 무부하 시 최대 전류

선 전류와 보조권선 전류가 서로 다르기 때문에 공극 자속밀도의 계산에 있어 위상차를 고려한 계산이 필요하다[4]. 이러한 주권선 전류와 보조권선 전류 간의 위상차를 고려한 공극 자속밀도의 계산식은 식(4)와 같다.

$$B_{g,1ph} = \frac{\mu_0}{g K_c K_s} F_{m1} \cos \omega_1 t \cos \theta_{es} \quad (4)$$

$$+ \frac{\mu_0}{g K_c K_s} F_{a1} \cos(\omega_1 t + \gamma) \cos(\theta_{es} + \pi/2)$$

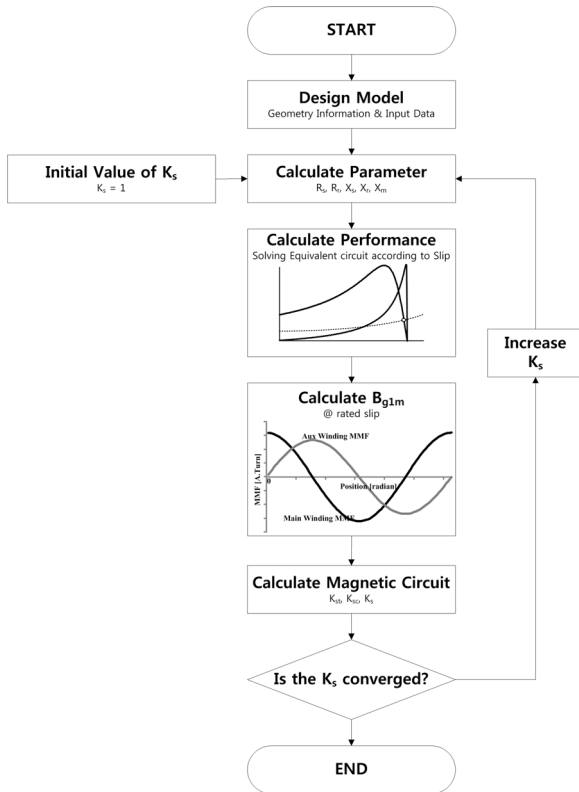
주권선 전류와 보조권선 전류 간의 위상차는 등가회로를 통해서 계산할 수 있으나[3], 포화계수에 대한 고려가 재차 요구된다. 따라서 포화계수를 구하는 데 있어 위상차가 요구되고 위상차를 계산하기 위하여 포화계수가 이용되는 순환구조를 갖게 된다. 따라서 포화계수의 계산에 있어 이러한 순환구조를 고려하기 위해 반복적인 계산방법과 수치해석기법이 이용되었다.

2.3 반복계산법과 수치해석기법

그림 2는 정확한 포화계수를 계산하기 위한 반복계산 루틴을 보여준다. 기본 설계된 전동기에 대해서 포화계수에 대한 초기값을 가지고 반복 계산 루틴이 시작된다. 증가회로를 통한 특성해석을 수행한 뒤에 주 권선 전류와 보조권선 전류, 그리고 두 전류성분 사이의 위상차를 고려하여 공극 자속밀도를 재계산한다. 재계산된 공극 자속밀도를 통해 포화계수의 N+1단계값을 반복계산한다. N+1단계값과 N단계값 간의 오차가 기준값 이하로 낮아져 수렴될 때까지 반복 계산 루틴은 계속적으로 계산을 수행하게 된다.

또한 전동기 구조의 각 부분에서의 자속밀도로부터 기자력을 구해내기 위해 가우시안 4차 피팅함수와 같은 수치해석기법이 이용되었다. 이러한 수치해석기법은 좀 더 정확하게 전동기의 중요한 재질정보인 B-H Curve 특성을 반영할 수 있게 해준다.

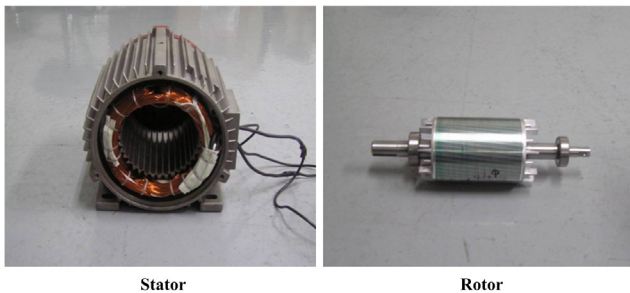
위의 반복계산 루틴은 큰 반복순환 계산과정 내에 작은 반복순환 계산과정이 포함되어 있는 형태이므로 계산시간이 매우 오래 걸릴 수 있다. 따라서 계산시간의 단축과 빠른 수렴속도를 위해 수치해석기법인 구간법이 사용되었다.



〈그림 2〉 포화계수에 대한 반복 계산 루틴

#### 2.4 제안된 증가회로 해석법의 타당성 검증

제안된 증가회로 해석법을 통한 해석결과와 FEM 해석결과를 비교하였으며 표 1에 나타내었다. 증가회로 해석결과와 FEM 해석결과는 회전자 동손을 제외하곤 상당히 근접한 결과를 보여준다.



〈그림 3〉 시제작된 단상 유도전동기

제안된 증가회로 해석법의 타당성 검증을 위한 시작품에 대한 다이내모 테스트를 수행하였으며 본 단상 유도전동기 시작품은 알루미늄 다이캐스팅 구조의 회전자를 갖도록 제작되었다. 그림 3은 시제작된 단상 유도전동기를 보여준다.

단상 유도전동기의 손실분리 시험법에 대해서는 표준화된 방법이 존재하지 않기 때문에 정격 부하에 대한 구동 온도를 고려하여 다이내모 시스템과 전력분석기를 이용한 다이내모 테스트를 통해 입력전력과 출력전력, 그리고 효율을 측정하였다. 제안된 증가회로 해석법을 통한 해석결과와 시작품의 다이내모 테스트 결과를 표 2에 나타내었다.

제안된 방법과 실제 측정결과는 효율에 대해 약 5.8%의 오차를 보이고 있다. 이것은 기계손 및 표류부하손, 그리고 제작 시의 공차 등에 따른 요인으로 예상된다.

이와 같은 요인들은 증가회로 해석법을 통해 고려하기 힘든 부분이며 측정결과와 제안된 증가회로 해석법을 통한 결과에 대해서 회전속도와 발생토크가 상당히 근접하다는 점을 통해 제안된 방법은 충분히 타당하다고 볼 수 있다.

〈표 1〉 제안된 방법과 FEM 해석결과와의 비교

	Proposed Method	FEM	Unit
Torque	6.06	6.28	Nm
Speed	1766	1760	RPM
Output Power	1120.6	1128.2	W
Stator Copper Loss	64.23	69.53	W
Rotor Al Loss	23.0	47.3	W
Iron Loss	30.0	29.73	W
Efficiency	89.9	88.5	%

〈표 2〉 제안된 방법과 시작품 다이내모 테스트 측정치와의 비교

	Proposed Method	Dynamo Test of Prototype Model	Unit
Torque	6.06	6.05	Nm
Speed	1766	1735	W
Input Power	1246.5	1320	W
Output Power	1120.6	1110	W
Efficiency	89.9	84.14	%

### 3. 결 론

본 논문에서는 포화계수를 구하는 방법과 그러한 포화계수를 고려하여 좀 더 정확한 단상 유도전동기의 특성을 해석하기 위한 증가회로 해석법을 제안하였다. 포화계수에 대한 계산을 위해서는 반복계산법과 수치해석적인 기법들이 이용되었다. 본 논문에서 제안한 증가회로 해석법은 FEM 해석결과 및 시작품 제작을 통한 다이내모 테스트 측정결과와의 비교를 통해 타당성이 검증되었다. 제안된 단상 유도전동기의 증가회로 해석법은 좀 더 정확한 전동기 특성해석 결과를 미리 예측할 수 있게 해주므로 고효율 단상 유도전동기의 기본설계 및 최적설계 시 도움이 될 것이라 예상된다.

### 4. 감사 의 글

본 논문은 에너지관리공단에서 시행한 에너지 자원기술개발 사업에 의해 수행되었음.

### [참 고 문 헌]

- [1] C. Fortescue, "Method of symmetrical coordinates applied to the solution of polyphase networks", American Institute of Electrical Engineers, vol.37, pp.1027-1140, 2009
- [2] A. Fitzgerald, et al., Electric Machinery, Tata McGraw-Hill, 2002
- [3] Stephen D. Umans, "Steady-State, Lumped-Parameter Model for Capacitor-Run, Single-Phase Induction Motors," IEEE Trans. on Magnetics, vol.32, no.1, pp.169-179, 1996
- [4] L. T. Ergene, S. J. Salon, "Determining the Equivalent Circuit Parameters of Canned Solid-Rotor Motors", IEEE Trans. on Magnetics, vol.42, no.4, pp.903-906, 2006
- [5] 이주, 한양대학교 에너지변환연구실, 전기기기, 홍릉출판사, 2011