

교류 서보 전동기의 누설 리액턴스 보정에 관한 연구

*임 정필, 천 장성, 정 현교 **윤 중석

*서울대학교 공과대학 전기공학부 전기역학연구소

**LG 산전 주식회사 제어 기기 그룹 연구소

A study on the Correction of Leakage Reactances of AC servo motor

*Jeong-Pil Lim, Jang-Sung Chun, Hyun-Kyo Jung and **Joong-Suk Yoon

* School of Electrical Engineering Seoul National University, Seoul 151-742

** LG Industrial Systems Co.,Ltd., LGIS R&D Center, Anyang-shi 430-080

Abstract - 본 논문에서는 유한요소 해석을 통한 리액턴스 보정 방법을 제안한다. 동기 리액턴스는 대상 전동기의 유한요소 해석을 통하여 자체 분포를 계산하여 구할 수 있고 엔드 누설 리액턴스는 3차원 유한요소 해석의 결과로부터 계산하여 보정한다. 제안된 보정 과정을 추가한 자기 등가회로법으로 교류 서보 전동기를 해석한 결과와 실험치를 비교하여 본 논문의 해석 방법의 타당성을 확인한다.

이러한 연구를 통해서 교류 서보 전동기 뿐 아니라 일반 전동기를 해석함에 있어서 리액턴스를 보다 정확히 고려할 수 있고 고정밀의 전동기를 설계하는 데에도 유용하게 사용될 수 있을 것이다.

1. 서 론

최근의 눈부신 공업 기술의 첨단화는 시스템의 고성능화를 주도하고 있는 서보 전동기의 발전에 기인하는 것으로 전류 대 토크의 선형성에 의한 제어의 편의성으로 인해 지금까지는 주로 직류 서보 전동기가 이 역할을 담당해왔다. 그러나, 오늘날 영구 자석 재료의 발전, 제어 성능의 향상, 가공 기술의 진보와 더불어 기존에 비해 우수한 성능으로 제어가 가능하게 되어 고도의 서보 성능을 요구하는 시스템에는 교류 서보 전동기가 많이 사용되고 있다. 그러나, 서보 전동기는 메카트로닉스 및 로봇 시스템 등의 고정밀도를 요하는 곳에 주로 사용되기 때문에 전동기의 정확한 해석을 바탕으로 한 설계가 그 무엇보다 중요하다.

기존의 전동기 설계는 많은 실험 결과를 바탕으로 한 경험적인 가정과 설계식을 쉽게 유도하기 위한 전동기 형상의 근사화에 근거한 자기 등가회로법에 의해 이루어졌다.

이 설계 방식은 전동기의 특성값들이 전동기 설

계 치수들의 함수로 표현되기 때문에 정식화가 간단하고 치수 변화에 따른 전동기 성능의 추이를 쉽게 확인할 수 있다는 장점이 있으나, 다수의 경험계수 및 실험식의 사용은 다소 부정확한 결과를 초래할 뿐만 아니라, 국부적인 물리적 해석은 불가능한 단점을 가지고 있었다.

교류 서보 전동기는 기본적으로 무정류자 직류 전동기의 해석 원리와 동일한데, 전동기의 운전 성능을 결정하는 각종 리액턴스는 매우 중요한 파라미터이다. 그러나, 위에서 설명한 것처럼 기존의 자기 등가 회로법만으로 특성 해석을 하는 경우에는 전동기 내부의 물리적 현상에 바탕을 둔 정확한 자장 해석에 근거한 것이 아니므로 전동기의 치수 및 형상을 제대로 반영하지 않은 파라미터로 전동기의 성능이 계산된 결과를 초래하게 된다. 이러한 자기 등가회로법의 문제점은 유한요소법을 사용한 정확한 전자기 해석에 의해 보완될 수 있는데 본 논문에서는 전동기의 형상이 고려된 유한요소 해석을 통하여 얻어진 결과로써 동기 리액턴스와 엔드 누설 리액턴스를 보정하는 해석 방법을 사용하였다.

따라서 본 논문에서는 다음과 같이 교류 서보 전동기를 해석한다. 전동기의 물리적 현상을 설명하는 지배 방정식과 경계 조건 및 이산화된 전동기의 형상에 근거한 정확한 자장 해석의 결과에 의해 자기적 회로 정수들을 보정하여 설계를 함으로써 보다 정확한 결과를 얻을 수 있다.

마지막으로 본 논문에서는 유한 요소 해석에 의한 정확한 자장 해석의 결과로부터 동기 누설 리액턴스와 엔드 누설 리액턴스를 보정하여 교류 서보 전동기의 특성을 해석하고 이 결과를 실험치 및 기존의 식들로부터 얻어진 결과와 비교하여 본 해석 방법의 타당성을 확인하였다.[6,7]

2. 교류 서보 전동기의 누설 리액턴스의 보정

2.1 동기 리액턴스의 보정

기존의 자기 등가회로법을 이용한 전동기의 해석 방법은 주로 정량적인 해석 결과만을 제공하는 방법이었다. 그러나, 구조적인 또는 자기적인 가정들로 인하여 정성적인 계산을 하고자 하는 경우에는 많은 오차를 발생하였다. 그래서, 본 논문에서는 전동기의 전체적인 특성 해석을 위해서 자기 등가회로법을 사용하고, 유한 요소해석법을 이용하여 전동기의 자기적 파라미터인 동기 리액턴스를 보정하였다. 기존의 자기 등가회로법에서 사용되는 동기 리액턴스는 식 (1)과 같다.[1]

$$X = \frac{3\pi\mu_0 N_s^2 l r \omega}{8p^2 g} \quad (1)$$

유한 요소 해석으로 동기 리액턴스를 보정하기 위한 동기 리액턴스의 정의 및 계산 과정은 다음과 같다. 즉, 실제 전동기의 운전도 그리하지만 먼저 고정자에 3상 평형 교류 전원이 인가되어 공간적으로 정현적인 분포의 기자력을 가정한다. 이러한 기자력의 존재로 고정자 권선의 모든 상에는 전압이 유기되는데 이 전압은 인가된 전류 I 에 비례하고 그 가상의 비례 상수를 동기 리액턴스 X , 라 한다.

이 동기 리액턴스를 유한 요소법의 해석 결과로 보정하기 위해서는 먼저 전동기의 실제적인 2차원 형상과 실제의 입력 전류를 가정한다. 본 논문에서는 그림 1의 시점 A를 선택하여 입력 전류로 하였다.

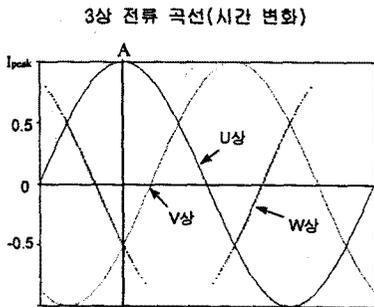


그림 1. 시간 변화에 따른 입력 전류 곡선

전동기의 실제 형상을 가정하므로 이 유한 요소 해석에는 권선 엔드부의 누설을 제외한 모든 누설이 포함되어 해석된다. 따라서 권선 엔드부의 누설은 다음절에서 설명하는 3차원 유한 요소 해석으로 보정하여야 한다.

위의 여러 해석 입력들로 유한요소 해석을 하면 그림 2와 같은 자속 분포가 나타나는데 이러한 해석 결과에 의한 동기 리액턴스는 그림 3의 A선을 통과하는 자속을 U상의 입력 전류로 나눈 값이 된다.

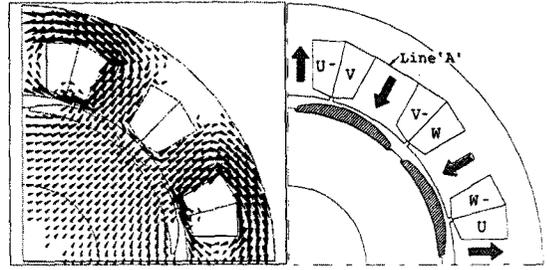


그림 2. 교류 서보 전동기의 자속 분포도

그림 3. 교류 서보 전동기의 1/4 단면도

이러한 해석 과정을 거쳐 전동기의 형상 및 자기적 상황이 정확히 고려된 동기 리액턴스를 구할 수 있다.[7]

2.2 엔드 누설 리액턴스의 보정

일반적으로 전동기의 누설 리액턴스는 유도 전동기로부터 유래된 누설 리액턴스식을 따르고 있다. 학자들에 따라 다소간의 차이는 있지만 약 4~6개 정도의 리액턴스로 분류하여 전동기를 해석하고 있다. 이러한 누설 리액턴스들은 물리적인 엄밀성보다는 전동기의 해석 결과로부터 검증되는 정량적인 리액턴스의 총합에만 기초를 두고 있기 때문에 매우 부정확할 수밖에 없다.

그 중에서도 엔드 누설 리액턴스는 권선의 종류, 형상 등에 좌우되는 것으로, 자기 등가회로법에서는 많은 가정에 의하여 계산된 여러 종류의 계산식을 다양하게 사용하고 있다.[2-5] 그러나, 엔드 누설 리액턴스를 정확히 계산하기 위해서는 권선 엔드부의 형상을 3차원으로 모델링하여 정확하게 자장 해석한 결과에 의해서만 가능하다.

기존의 자기 등가회로법에서 사용하는 엔드 누설 리액턴스의 계산식은 그림 4와 같은 일반적인 전동기의 엔드 권선의 형상으로부터 출발한다. 즉, 고정자 엔드부로부터 l_2 만큼의 직선부와 l_1 만큼의 꺾어진 직선부를 가정하여 계산한다. 이렇게 가정된 형상에 의하여 계산된 계산식은 식 (2)와 같다.[2]

$$x_{e1} = X \cdot \lambda_{e1} \quad (2)$$

$$X = 4fL_c m_1 P (n_1 \frac{n_s}{c} K_{d1} K_{d1}) \times 10^{-9} \quad (3)$$

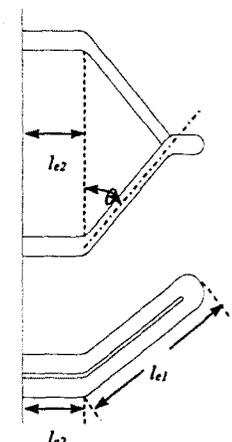


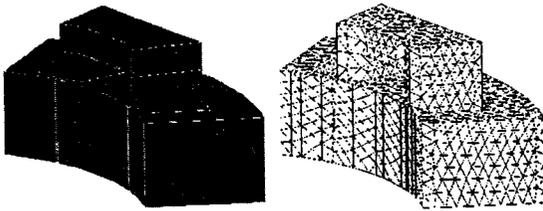
그림 4. 코일 엔드부의 형상

- 여기서, L_c : 덕트를 포함한 철심 길이
 m_1 : 고정자 상수
 n_1 : 고정자 극당상당 슬롯수
 n_s : 고정자 슬롯당 도체수
 c : 병렬 회로수
 K_{pl} : 고정자 단절권 계수
 K_d : 고정자 분포 계수

이때 λ_e 는 코일 엔드 퍼미언스로서 식 (4)와 같이 계산된다.

$$\lambda_e = \frac{4}{L_c} (2l_d + l_{e1}) \quad (4)$$

본 논문에서는 엔드 누설 리액턴스를 정확한 값으로 보정하기 위하여 3차원 유한요소 해석을 하였다. 본 논문에서 해석한 교류 서보 전동기의 코일 피치는 1로써, 그림 5 (a) 및 (b)는 3차원 해석 모델 및 이산화 모델을 각각 나타내고 있다.



(a) 3차원 해석 모델 (b) 이산화 모델
 그림 5. 권선 엔드부의 유한 요소 모델

리액턴스를 구하기 위한 계산 방법으로서는 에너지 방법을 사용하였다. 즉, 권선 엔드부에 저장되어 있는 에너지를 계산하고 이 값을 입력 전류로 나누어 누설 인덕턴스를 계산하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

본 논문에서는 제안한 방법의 타당성을 검증하기 위하여 850[W] 교류 서보 전동기를 대상으로 하여 기존의 자기 등가회로법에 의한 결과와 유한요소법으로 보정한 결과를 비교하였다. 표 1은 유한요소법으로 보정된 동기 리액턴스와 엔드 누설 리액턴스값들을 보정하고 있다. 보정된 리액턴스 값이 실험치와 비교적 잘 일치하고 있다.

표 1. 리액턴스값의 비교 단위 : [mH]

구분	실험값	보정값	자기 등가회로
동기 리액턴스	3.25	3.1033	1.5378
엔드 누설 리액턴스		0.0684	0.0013

표 2는 교류 서보 전동기의 특성 해석 결과의 비

교를 나타내고 있다. 유한 요소법으로 보정된 파라미터로 계산된 특성 결과가 실험결과와 비교적 잘 일치함을 알 수 있다. 특히 입출력 및 효율은 매우 근사한 결과를 나타내고 있다.

표 2. 특성 결과의 비교

항 목	실험값	보정값
L_{phase} [mH]	3.25	3.172
I_{rated} [A]	7.2	6.673
P_{input} [W]	953.0	944.4
P_{output} [W]	850.0	846.2
eff. [%]	89.2	89.6
N_{rated} [rpm]	1500	1493
$I_{no-load}$ [A]	0.233	0.28
K_e [V/krpm]	48.2	29.36
K_t [kg-cm/A]	7.67	8.571621

4. 결 론

본 논문에서는 교류 서보 전동기를 정확히 해석하기 위하여 2차원 및 3차원 유한 요소 해석방법을 이용하여 동기 리액턴스와 엔드 누설 리액턴스를 보정하는 해석법을 제안하였다. 기존의 자기 등가회로법이 갖고 있던 단점을 보완한 정확한 해석법으로써 다양한 전동기 해석법에 적용될 수 있을 것이다.

[참 고 문 헌]

- [1] J. R. Hendershot, TJE Miller, *Design of Brushless Permanent-Magnet motors*, Magna Physics publishing, 1994.
- [2] 高橋 幸人, 電氣機器 設計, 共立 全書, 1956.
- [3] Paul L. Cochran, *Polyphase Induction motors*, Marcel Dekker, Inc., 1989.
- [4] Cyril G. Veinott, E.E., D.Eng., *Theory and Design of Small Induction Motors*, McGRAW-HILL, 1959.
- [5] Philip L. Alger, *The Nature of Induction machines*, GORDON AND BREACH, 1965
- [6] J.S. Chun, M.K. Kim, H.K. Jung, S.K. Hong, "Shape Optimization of Electromagnetic Devices Using Immune Algorithm", *IEEE Trans. Magn.*, vol. 33, no. 2, pp. 1876-1879, 1997.
- [7] J.S. Chun, H.K. Kim, H.K. Jung, J.S. Yoon, "Optimal Design of Surface Permanent Magnet Synchronous Motor with Parameter Correction using the Finite Element Method", *SMIC* pp.111-114, 1996.