

자기등가회로법에 의한 유도전동기의 치기자력 분포해석

정종호⁰ 이은웅⁰ 임수생⁰ 김준호⁰
 서초전자고등학교⁰ 충남대⁰

Analysis of distributed MMF on tooth for induction motor using Magnetic Equivalent Circuit

Jeong Jong Ho⁰ Lee Eun Woong⁰ Lim Su Saeng⁰ Kim Jun Ho⁰
 Seocho Electronics High School⁰ Chung Nam National University

Abstract - In this paper, system equation of the magnetic equivalent circuit of the induction motor be consist of the magnetomotive force transformation matrix and the flux transformation matrix. The system equation is fed by three phase sinusoidal current and get to magnetomotive force on the teeth. This study confirmed the time and spatial distribution of the magnetomotive force on the teeth created by the winding.

1. 서 론

자기등가회로법은 1960년대 후반 E.R.Laithwaite와 C.J.Capenter에 의해 제안되었으나, 실제 기기에 적용하여 계산할 수 있는 연산자원의 부족으로 그에 따른 이론적 검증에는 이르지 못했다.

1980년대 초에 Valdo Ostovic은 유한요소법의 계산 시간을 단축시킬 수 있도록 자속튜브 개념을 제안하였다.⁽¹⁾

전기기기 해석에 자속튜브 개념을 도입하면 자속의 방향은 두 방향 만 허용되므로 유한요소법에서 수치해에 의해 모든 자속선을 구하는 방법에 비해 정밀도는 다소 떨어지지만, 그 계산량이 대폭 감소된다. 전기기기의 과도상태는 기동(starting), 역전(reversing), 부하변화(loading)등에 의해 발생되며 이때 전기기기는 정격전류 보다 몇배 큰 전류가 흐른다. 기기내의 자속도 정격치 보다 훨씬 크다. 정격치 이상의 자속과 전류는 기기의 온도를 높여 철손과 동손을 일으켜 효율을 저하시킬 뿐 아니라 과도동안 발생된 토크는 정격치 보다 훨씬 크므로 축과 커플링에 심한 기계적 변형을 일으킨다. 따라서, 전기기기 해석에서도 정상상태 뿐만 아니라 과도상태를 고려한 해석을 통해 원인을 정확히 규명해야 한다. 자기등가회로법과 유한요소법이 가지는 특징을 비교하면 표1과 같다.⁽²⁾

표1. 자기등가회로법과 유한요소법 비교

MEC법	FEM
· 자기회로와 전기회로의 유사성을 기반으로 함.	· Maxwell 방정식을 기반으로 함
· 기기의 3차원(3D)모델의 과도상태와 정상상태해석 가능.	· 정상상태 문제의 2D해석으로 제한됨.
· 공극퍼미언스의 연속적인 모델링은 tangential과 radial forces의 정확한 연산 가능	· Maxwell stress tensor를 정확히 사용하려면 공극 요소 모델링 경험이 요구됨.
· 해를 구하는 과정이 체계적이고 연산적으로 안정됨.	· 결과의 수렴과정을 분해할 수 없음

본 논문에서는 해석을 위한 모델을 정하여 자기등가회로법에 의해 자기회로를 구성하고 기자력 변환 행렬과 자속 변환 행렬을 이용하여 기기의 권선의 물리적 구성이 반영되는 치 기자력의 분포를 해석한다.

2. 본 론

2.1 자기등가회로의 구성

자기등가회로는 전기기기의 구성요소를 기자력원(magnetomotive source), 자속원(flux source), 퍼미언스 등으로 고정자와 회전자 의 형상, 슬롯수, 자기포화, 권선의 결선등을 고려하여 선형 또는 비선형 수치해석에 적합한 형태로 구성한다. 퍼미언스는 i) 고정자와 회전자 사이의 각과 자속에 독립적인 일정 퍼미언스, ii) 고정자와 회전자 사이의 각에 의존적이고 자속에 독립적인 공극 퍼미언스, iii) 고정자와 회전자 사이의 각에 독립적이고 철심 자속에 의존적인 비선형 퍼미언스로 분류할 수 있다. 특히, ii)의 회전자 각에 대한 의존성과 iii)의 자속에 대한 의존성에 따른 퍼미언스의 변화는 각각 그림1과 그림2와 같다.⁽³⁾

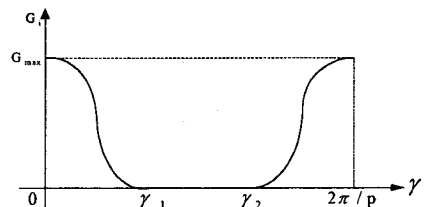


그림1. 퍼미언스의 회전자 각에 대한 의존성

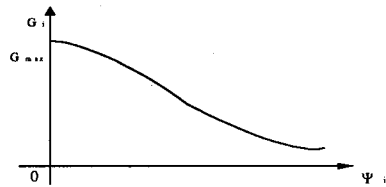


그림2. 퍼미언스의 자속에 대한 의존성

G_i : 치에 따른 퍼미언스, G_{max} : 퍼미언스 최대값
 $\gamma_1 = \gamma_2 = (w_{st} + w_{rt} + o_{ss} + o_{sp}) / D_{ag}$, Ψ_i : 자속,
 p : 극수

자기등가회로의 구성에서 자속튜브는 기기의 요크에서는 접선방향(tangential direction)자속만을, 치에서는 방사방향(radial direction) 자속만을 통하는 통로로이 다.⁽¹⁾⁽⁴⁾

이와같은 자기 튜브개념의 공극을 사이에 두고 고정자 치와 회전자 치, 이에 대한 슬롯과 요크로 구성되는 유도전동기의 자기회로는 그림3과 같다.

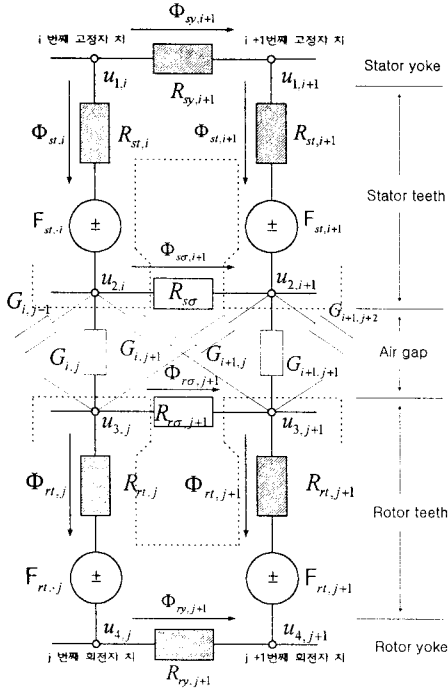


그림 3 유도전동기의 자기등가회로

그림3에서 사용된 기호는 u : 절점에서의 자기 스칼라 포텐셜, R : 자기저항, G : 퍼미언스, Φ : 자속, F : 기자력강하 이며, 기호의 첨자 i 는 고정자 슬롯, 첨자 j 는 회전자 슬롯, σ 는 누설성분을 나타낸다. 빗금이 쳐진 자기저항은 철심의 비선형성을 나타내며, 고정자와 회전자 치와 슬롯 모양을 점선으로 나타냈다.

2.2 기자력 변환행렬과 자속 변환 행렬

기자력 변환행렬은 입력 상전류와 치 기자력의 관계로 나타내며 유도전동기의 각종 물리적 구성요소를 반영한 자기 등가회로는 3상 전류를 인가했을 때 각 치에 기자력이 형성되는 자로를 알려준다. 그리고 기자력 변환행렬은 권선배치에 따라 달라진다.

상전류와 치 기자력의 관계는 식(1)과 같다.

$$F_t = w'' i \quad (1)$$

식(1)의 w'' 는 식(2)의 행렬에 의해 표현된다.

$$w'' = M_{tmmf}^{-1} I_{k,k} M_{sat} M_{tc} M_{cc} \quad (2)$$

여기서, M_{tmmf} : 치 기자력 행렬, $I_{k,k}$: 불완전 단위행렬, M_{sat} : 슬롯암페어 턴 행렬, M_{tc} : 코일 당 턴수 행렬, M_{cc} : 코일전류행렬.

치 자속과 코일 자속과의 관계는 식(3)과 같다.

$$\Phi = w' \Phi_t \quad (3)$$

식(3)에서 w' 는 식(4)와 같다.

$$w' = M_{tp}^{-1} M_{pt} M_{cf} \quad (4)$$

여기서, M_{tp} : 요소 상 당 턴수행렬, M_{pt} : 요소 상 자속행렬, M_{cf} : 코일 자속행렬.

2.3 해석 모델

본 논문에서 사용한 해석모델은 이층권, 매상매극당 권선수 3, 단질권계수가 7/9, 코일당 턴수가 35인 회전자가 전폐 슬롯인 3상 농형 유도전동기이다. 해석모델의 사양은 표2와 같다.

표 2. 해석모델의 고정자 및 회전자의 사양

정 격	3phase, 4-pole, 220V 6.6A, 60Hz, 0.75kW	
공극의 길이(D_{ag})	0.275[mm]	
철심의 길이(l)	52[mm]	
고정자	외경 (D_{so})	145[mm]
	내경 (D_{si})	90[mm]
	슬롯수	36
	치폭 (w_{st})	5.65[mm]
	슬롯의 깊이(D_{sh})	12.2[mm]
	슬롯의 개방폭(O_{ss})	2.2[mm]
회전자	외경 (D_{ro})	89.45[mm]
	내경 (D_{ri})	22[mm]
	슬롯수	44
	치폭 (w_{rt})	6.38[mm]
	슬롯의 깊이(D_{rh})	10.25[mm]

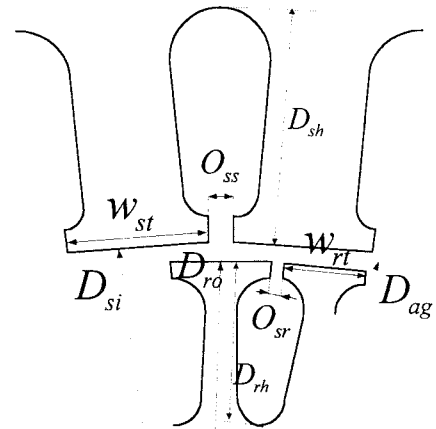


그림 4 해석모델의 슬롯과 공극의 치수

그림4에서, O_{ss} : 고정자 슬롯 개구부 폭, w_{st} : 고정자 치폭, O_{sr} : 회전자 슬롯 개구부 폭, w_{rt} : 회전자 치 폭, D_{si} : 고정자 내경, D_{ro} : 회전자 외경, D_{ag} : 공극의 평균 직경 D_{sh} : 고정자 슬롯깊이, D_{rh} : 회전자 슬롯깊이

각 치의 기자력 강하를 안다면, 치의 자속분포를 계산할 수 있다. 치의 절선방향에 대한 기자력은 변하지 않는다는 가정하에 권선 파라미터와 전류의 함수로 $i+1$ 의 고정자 치의 기자력 분포는 식(5)와 같다.

$$F_{i+1} = F_i + (Iw); \quad (5)$$

식(5)에서 F_i 는 i -번째 치의 방사방향으로 작용하는 기저력이고, $(Iw)_i$ 는 i -번째 슬롯의 총 암페어-도체이다.

식(2)의 기저력 변환행렬을 보다 간략히하여 권선의 배치에 대한 기저력 행렬식은 식(6)과 같이 된다.

$$F = M_{\text{mmf}}^{-1} w I \quad (6)$$

여기서, F 는 기저력이고 I 는 인가된 전류이며, w 의 행은 슬롯수이고, 열은 상수의 2배며 각 요소는 슬롯 도체수와 같다.

2.4 해석 및 결과분석

해석 모델로 선정된 표2 사양의 3상 농형 유도전동기 매상매극당 3개의 고정자 치 기저력 분포를 계산하여 각각 그림5와 그림6으로 나타냈다. 그림 5와 6의 가로 축은 전기각이고 세로축은 기저력의 크기이다.

그림5는 (a-b-c) 상순으로 정현파 전류를 인가했을 때의 고정자 치 기저력이다.

그림6은 (a-c-b) 상순으로 정현파 전류를 인가 했을 때의 고정자 치 기저력이다.

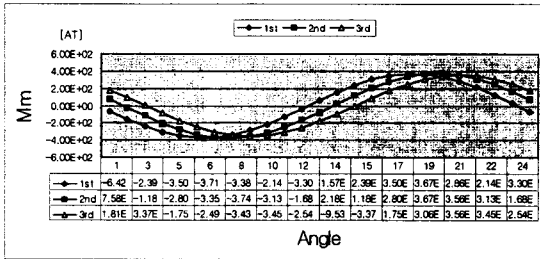


그림 5 대칭(a-b-c) 정현파 인가시 치 기저력

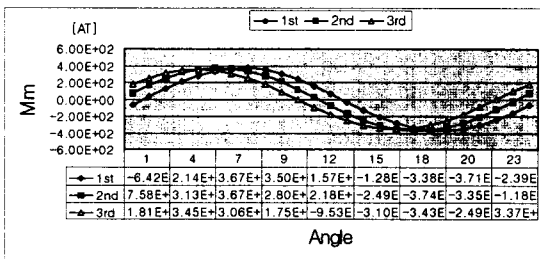


그림 6 대칭 (a-c-b)정현파 인가시 치 기저력

슬롯내의 권선의 물리적인 분포를 고려한 치 기저력 행렬 w 를 이용하여 고정자 권선의 치 기저력을 계산한 결과 인가 전원을 잘 반영하고 있음을 보여준다.

3. 결 론

본 논문에서는 자속튜브 개념을 고정자와 공극, 회전자에 적용하여 3상 유도전동기의 자기동가회로를 구성하였다.

고정자 슬롯 내의 권선의 배치를 반영하는 기저력 변환행렬에 의해 (a-b-c)상순을 가지는 대칭 3상 정현파 전류를 인가 했을 경우의 치 기저력과 (a-c-b)상순의 대칭 3상 정현파 전류를 인가했을 경우의 고정자 치 기저력이 시간적 공간적으로 분포하였고, 상순이 바뀌면 진행방향이 반대로 되는 것을 확인 할 수 있다.

전압형 인버터에 의한 전원 공급에서는 비대칭 권선이나 권선의 부적절한 결선, 인가된 전압의 불평형이나 고조파 함유 등에 의해 전류도 비대칭이 되어 각 상에 의해 발생하는 기저력의 크기나 위상이 비대칭이 된다. 전기기기의 모든 비대칭은 역상 기저력을 발생하여 전기기기의 성능을 저하시키므로 가능한 한 역상 기저력을 제거하거나 적게해야 한다. 따라서 앞으로 자기동가회로법을 사용하여 이와같은 비대칭현상의 해석을 정확하게 할 필요가 있다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구 (2000-1-30200-012-3)지원으로 수행되었음.

(참 고 문 헌)

- [1] Vlado Ostovic, "Dynamics of saturated electric machines", New York, Springer-Verlag, 1989
- [2] Valdo Ostovic, "Radial Air gap force a source of audible noise in a sinusoidally fed induction machine" IEEE IAS '95 conference record, Vol.1, 591-598, 1995
- [3] Valdo Ostovic, "A Simplified Approach to magnetic Equivalent-Circuit Modeling of Induction Machines" IEEE IA Vol.24, No.2, 1988
- [4] Vlado Ostovic, "Computer-aided analysis of Electric Machines", New York, Prentice Hall, 1994