

자기등가회로법에 의한 유도전동기의 공극자속밀도 분포해석

정중호⁰, 이은용*, 손흥관**, 구태만***, 임수생*, 김준호*
 서초전자고⁰, 충남대*, 한국전기연구소**, 울산대***

Analysis of Distributed Airgap Magnetic Density for Induction Motor
 using Magnetic Equivalent Circuit

J.H. Jeong⁰, E.W. Lee*, H.K. Sohn**, T.M. Koo***, S.S. Lim*, J.H. Kim*
 Seocho Electronic High School⁰, ChungNam Uni*, KERI**, Ulsan Uni.***

Abstract - In general, the results of finite element method(FEM) on the analysis of the electrical machines has known as high accuracy, but required very long time to calculate the field distribution. Magnetic equivalent circuit(MEC) method can be computing times less than the finite element method and also it provides steady state and transient state simulation. In this paper, describes matrix representation of the winding magneto motive force(MMF) and carry out the distributed the airgap magnetic density takes into account the influence on the stator slots.

는 원주방향의 자속을, 치에서는 반경방향의 자속 만을 고려한다. 그림1은 고정자와 회전자 치, 공극에서의 자기등가회로 구성을 나타낸 것이다.

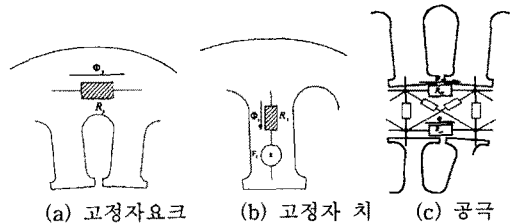


그림1 전기기기의 자기등가회로 구성

1. 서 론

전기기기해석에 사용되는 유한요소법은 전기기기의 구성 요소의 해석영역을 작은 요소로 분할한 매쉬로 자기회로를 모델링하고 이 영역에 적용되는 지배 방정식을 이산화하여 수치해석으로 시뮬레이션하여 자기포텐셜, 자속, 자속밀도, 기자력, 와전류, 토크등의 정확한 값이나 분포를 구할 수 있다. 그래서, 유한요소법은 전기기기의 형상을 새롭게 구성하여 설계하고자 할 때 뛰어난 유연성을 가지는 장점을 가지고 있으나, 정확성을 높이기 위해서는 요소를 작게 분할해야 하기 때문에 시뮬레이션 시간이 길어지는 단점이 있다.^[1]

고정자와 회전자의 계철에서는 비선형 자기저항성분만으로 자기등가회로가 구성되고, 고정자와 회전자의 치에서는 자기저항성분과 권선에 의한 기자력원이 존재한다. 공극에서의 자기저항은 요크와 치에서 비선형 성질을 가지는 것과는 달리 고정자와 회전자 사이 각에는 의존적이지만 자속에는 독립인 자기저항을 가진다. 고정자와 회전자의 치 정렬 상태에 따른 퍼미언스 변화는 치가 정렬되어 있을 때 퍼미언스는 최대가 되어 두 치 사이에 자속도 최대로 흐르고, 정렬되어 있던 치가 점점 멀어져 고정자와 회전자 치가 대면하는 부분이 없게 되면 치 사이의 자속은 더 이상 존재하지 않으므로 퍼미언스는 '0'로 된다.

이에 반해, 1980년대 초에 Valdo Ostovic은 유한요소법의 계산시간을 단축시키기 위해서 자속튜브 개념을 제안하였다. 자속의 방향을 두 방향만으로 제한하는 자속튜브개념을 자기등가회로에 적용하여 해석하는 방법은 유한요소법에서 수치해에 의해 모든 자속선을 구하는 방법에 비해 계산시간을 훨씬 단축시켜준다.^{[2],[3]}

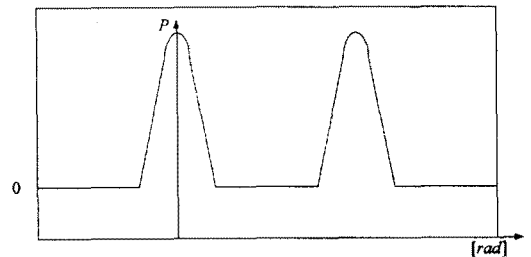


그림 2 고정자와 회전자의 정렬에 따른 퍼미언스변화

자기등가회로법은 고정자와 회전자 슬롯의 수와 형상, 포화상태, 권선의 결선형태와 같은 공간적인 값에 의한 영향을 고려하여 해석할 수 있을 뿐만아니라 정상상태 및 과도상태해석에도 적용할 수 있다.

본 논문에서는 자기등가회로법에 의한 자기등가회로를 구성하고 유효공극과 고정자 기자력에 의한 공극밀도 해석이론을 정립하고, 해석모델에 적용하므로써 공극 자속 밀도를 구하고자 한다.

2. 등가회로의 퍼미언스

2.1 자기등가회로

자기등가회로는 전기기기의 구성요소를 기자력원, 자속원, 퍼미언스등으로 고정자와 회전자의 형상 및 슬롯수, 자기포화, 권선의 결선등을 고려하여 구성한다. 자속튜브개념을 적용한 자기등가회로는 기기의 계철에서

3. 자속밀도 분포해석

자기등가회로법은 권선 파라미터와 전류의 함수로서 치기자력 분포를 계산할 수 있다. 자속튜브를 이용한 치기자력은 권선에 대해 치의 원주방향에 대해서는 기자력이 변하지 않고 반경방향만을 고려하여 계산한다. 반경방향의 i번째 치에 작용하는 기자력을 F_i 라하고, i

번째 슬롯의 총암페어도체수를 $(Iz)_i$, N 을 총 슬롯 수 라하면 식(1)과 같은 $i+1$ 번째 기자력 F_{i+1} 을 나타낼 수 있다.

$$F_{i+1} = F_i + (Iz)_i ; i = 1, 2, 3, \dots, N \quad (1)$$

F_i 는 반경방향의 i 번째 치에 작용하는 기자력이며, $(Iz)_i$ 는 i 번째 슬롯의 전체 암페어도체이고, N 은 치(슬롯)의 총수이다. 권선의 배치에 따른 기자력행렬은 식(2)와 같다.

$$F = M_{\text{mmf}}^{-1} z I \quad (2)$$

식(2)에서 F 는 기자력이고, M_{mmf} 는 치기자력행렬, z 의 행은 슬롯수이고, 열은 상수(相數)의 2배이며, 각 요소는 슬롯 도체수이다.

3.1 공극 자속밀도 해석을 위한 기하학적 수식

자계에 대한 적분경로는 같은 방향의 전류가 흐르는 도체의 중심에 두고 암페어의 주회적분법칙을 적용하면 기자력은 식(3)과 같이 된다.⁽³⁾

$$F_{x0} = \oint H dl = H_{x0} \delta_{x0} \quad (3)$$

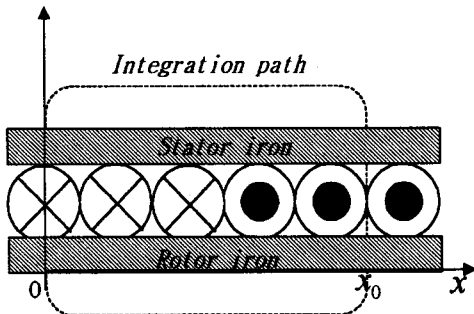


그림 3 공극내 도체의 암페어 주회적분경로

식(3)에서 H_{x0} 는 $x0$ 점에서 자계의 세기이고, δ_{x0} 는 $x0$ 점에서 공극의 크기이다. 공극의 $x0$ 점에서 자계의 세기와 자속밀도의 관계는 식(4)와 같다.

$$B_{x0} = \mu_0 H_{x0} = \mu_0 \frac{F_{x0}}{\delta_{x0}} \quad (4)$$

그러나, 실제 공극은 슬롯과 치에 인접해 있기 때문에 치가 있는 곳 보다 슬롯 부근에서는 공극이 더 커진다. 슬롯의 영향으로 자속은 치의 밑단을 통해 흐르지 않고 치의 측면을 통해서도 분포하게 된다.

그림4에서 공극최대 자속밀도와 슬롯에 의한 공극자속밀도 강하의 비 β 와 공극과 고정자 슬롯 개구 크기의 비의 합수 γ 는 각각 식(5)와 식(6)으로 정의할 수 있다.

$$\beta = \frac{B_0}{B_{\max}} = \frac{(1-u)^2}{2(1+u^2)} \quad (5)$$

여기서, $u = \frac{o}{2\delta} + \sqrt{1 + \left(\frac{o}{2\delta}\right)^2}$ 이다.

$$\gamma = \frac{4}{\pi} \left[\frac{o}{2\delta} \tan^{-1} \left(\frac{o}{2\delta} \right) - \ln \sqrt{1 + \left(\frac{o}{2\delta} \right)^2} \right] \quad (6)$$

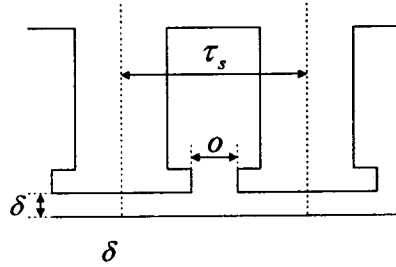


그림 4 고정자 슬롯과 공극의 구조

그림4에서, τ_s : 고정자의 슬롯피치, o : 슬롯의 개구 크기, δ : 공극의 크기

유효슬롯 개구 o' 는 그림5처럼 실제 슬롯개구 o 에 비해 넓다. 유효슬롯 개구 크기는 식(7)로 정의된다.

$$o' = \frac{\gamma}{\beta} o \quad (7)$$

유효 슬롯개구에서의 공극자속밀도의 변화는 식(8)와 같이 상수항과 기본고조파항으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} B(x) &= B_{\max} - B_0 \left(1 - \cos \frac{2\pi}{o'} x \right) \\ &= B_{\max} \left[1 - \beta \left(\frac{1 - 2\pi}{o'} x \right) \right] \end{aligned} \quad (8)$$

식(8)에서, B_0 는 공극에 의한 자속밀도강하, B_{\max} 는 최대자속밀도를 나타낸다.

슬롯개구 o' 에 대한 유효공극 δ_{eff} 은 식(9)과 같다.

$$\delta_{\text{eff}} = \frac{\delta}{1 - \beta \left(1 - \cos \frac{2\pi}{o'} x \right)} \quad (9)$$

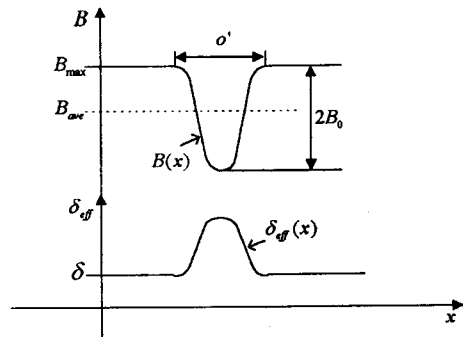


그림 5 공극자속밀도와 유효공극

슬롯의 영향으로 슬롯피치 내에서 카터계수(k_c)는 공극 최대자속밀도 B_{\max} 에서 평균자속밀도 B_{ave} 로 감소함을 구할 수 있고 이 카터계수는 유효슬롯개구가 슬롯피치보다 작으면 식(10), 유효슬롯개구가 슬롯 피치 보다 크면 식(11)로 정의된다.^{(3),(4)}

$$k_c = \frac{\tau_s}{\tau_s - \gamma \delta} \quad (10)$$

$$k_c = \frac{1}{1 - \beta} \quad (11)$$

해석모델은 이중권, 매상매극당 권선수 3, 코일피치가 7이고 슬롯피치가 9, 코일당 턴수 35인 전폐슬롯 회전자를 가지는 3상 4극 농형유도전동기로 표1과 같다.

표 1. 해석모델의 사양

정 격	3phase, 4-pole, 220V 6.6A, 60Hz, 0.75kW	
공극의 길이 (D_{ag})	0.275(mm)	
고정자	외경 (D_{so})	145(mm)
	내경 (D_{si})	90(mm)
	슬롯수	36
	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
	슬롯의 깊이 (D_{rh})	10.25(mm)

4 해석결과

4.1 고정자 기자력 분포

해석 모델로 선정된 표1의 3상 농형 유도전동기에 식(1)과 식(2)의 관계식을 이용하여 행렬을 구성하고 고정자 치에서의 기자력 분포를 구하면 그림6와 같이 된다.

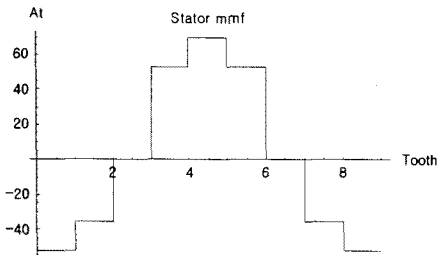


그림 6 고정자 치에서의 기자력 분포 곡선

4.2 카터계수

슬롯개구와 공극의 비 ($\frac{a}{\delta}$)의 함수와 슬롯피치와 공극의 비 ($\frac{\tau_s}{\delta}$)의 함수에 대한 카터계수 (k_c)의 변화는 그림 7과 같다.

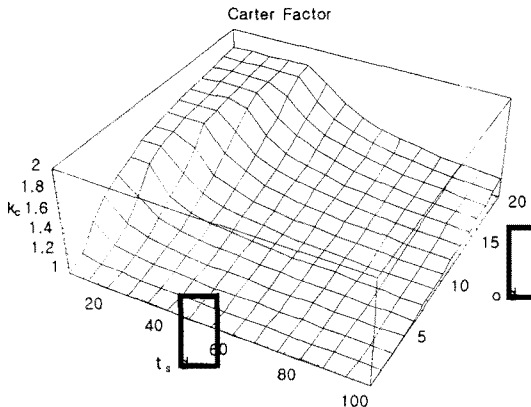


그림 7 a/δ 와 τ_s/δ 의 함수에 대한 카터계수

4.3 유효공극과 공극자속밀도

식(10)의 관계에서 고정자의 슬롯에 의한 유효공극의 변화를 계산하고 그림8에 나타내었다. 식(4)의 자속밀도와 기자력의 관계에서 구해진 자속밀도를 식(8)로 계산하여 그림9에 나타내었다.

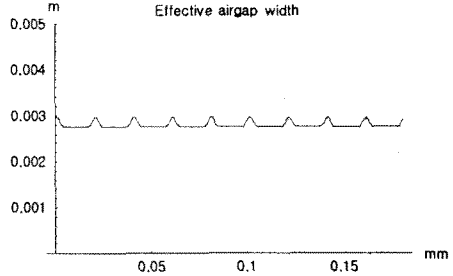


그림 8 고정자 슬롯에 대한 유효공극

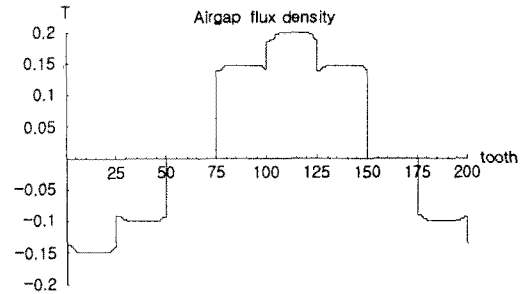


그림 9 유효공극과 기자력분포에 의한 공극자속밀도

3. 결 론

본 논문에서는 유도전동기의 기하학적 수치로 정리되는 자기등가회로법으로 권선 기자력 및 공극 기자력, 공극 자속밀도를 유도하고 해석모델에 적용하여 고정자의 기자력 분포를 구하였다. 그리고, 공극과 고정자 슬롯 개구의 비와 공극과 고정자 슬롯피치의 비에 대한 카터계수를 계산하여 고정자슬롯에 의한 유효공극을 계산하였다. 최종적으로 고정자 치에서의 기자력 분포와 유효공극을 이용하여 공극 자속밀도 분포를 해석하였다.

(참 고 문 헌)

- [1] C.B.Rasmussen, E.Ritchie, "A magnetic equivalent circuit approach for predicting PM motor performance", IEEE IAS Annual Meeting, 10-17, 1997
- [2] V.Ostovic "Dynamics of saturated electric machines, Springer Verlag, New York, 1989
- [3] V.Ostovic, "Computer-aided analysis of electric machines, Prentice Hall, New York, 1994
- [4] Bedrich Heller, Vaclav Hamata, "Harmonic field effects in induction machines, Elsevier scientific publishing company, New York, 1977