

유도전동기의 슬롯 모양에 따른 공극 퍼미언스 분포 해석

정종호^o, 이은용^o, 조현길^o
 충남대^o, 충남대^o, LG산업^o

Analysis of the Airgap Permeance Distribution for Slot Type of the Induction Motor

Jong-Ho Jeong^o, Eun-Woong Lee^o, Hyun-Kil Cho^o
 ChungNam National University^o, LG Industrial Systems Co^o

Abstract - In terms of induction motor analysis, magnetic energy conversion takes place into mechanical energy in air gap. Therefore, flux distribution in air gap has to be analyzed in detail more than other place of induction motor.

In this paper, the air gap permeance of induction motor, which was effected by means of skewed angle and fringing, was analyzed

1. 서 론

전기기기해석에 사용되는 유한요소법은 전기기기의 해석 영역을 작은 요소로 분할하여 자기회로를 모델링하고 이 영역에 적용되는 지배 방정식을 이산화하여 수치해석으로 시뮬레이션하여 자속, 자속밀도, 자기포텐셜, 기자력, 와전류, 토크 등을 구한다.

유한요소법은 전기기기의 형상을 새롭게 구성하여 설계하고자 할 때 형상에 대한 유연성이 뛰어난 장점이 있으나, 정확성을 높이기 위해서는 요소를 매우 작게 분할해야 하기 때문에 계산시간이 길어지는 단점이 있다.^[1]

반면에, 원주방향과 반경방향으로 제한하는 자속류브 개념을 적용하여는 자기등가회로법은 자속의 방향에 제한을 두지 않는 유한요소법에 비해 계산시간을 단축시킬 수 있다. 그리고, 자기등가회로법은 고정자와 회전자의 슬롯 수와 형상, 철심의 포화상태, 권선의 결선형태 등과 같은 공간적인 값과 비선형 정수의 영향을 고려하여 해석할 수 있는 이점을 가지고 있다.

유한요소법에 비해 해석시간이 짧아지기 때문에 자기등가회로법을 이용하면 정상상태 뿐만 아니라 과도상태 해석이 가능하다. 에너지 변환이 일어나는 공극에서의 토크 발생은 공극 기자력과 회전자 각에 따른 공극 퍼미언스로 표현된다.^[2]

본 논문에서는 고정자와 회전자의 슬롯 모양에 따른 공극 퍼미언스 분포의 영향을 해석하기 위해 해석 모델에 적용하여 슬롯사구와 플랜징이 주는 영향을 분석하였다.

2. 공극 퍼미언스

준 정지 상태의 전계나 자계를 포함하는 공간을 자속류브로 구성하면 모든 자속선은 매질의 단면적에 수직이고 자속선은 서로 교차하지 않는다.

전류와 자속이 없는 자속류브 양단에서의 포텐셜 차이는 식(1)과 같이 자속류브의 형상과 매질의 투자율 함수이다.

$$R = \int_0^l \frac{dx}{\mu(x)A(x)} \quad (1)$$

여기서, l : 자속류브길이, A : 단면적,
 μ : 매질의 투자율

자기등가회로는 기자력원과 식(1)의 역수인 퍼미언스로 구성된다. 퍼미언스는 자속이 존재하는 공간의 자기적 특성을 설명해주는 것으로서, 자성체에서 퍼미언스는 자속과 함께 변하므로 비선형 특성을 지니고 비자성체에서는 일정하다.

유도전동기의 공극에서는 고정자에 대해 회전자가 회전하면서 각 변위를 일으키므로 고정자나 회전자의 슬롯과 사구 등에 의해 면적이 가변하여 주기적으로 가변하는 비선형 퍼미언스로 된다.

그림1과 같이 등자위면 u_1 에서 u_2 로 흐르는 자속 Φ 는 두 자위면이 겹치는 부분의 면적에 비례한다. 유도전동기의 공극에서 등자위면은 고정자 치와 회전자 치가 마주하여 겹치는 부분에서 형성된다.^[2]

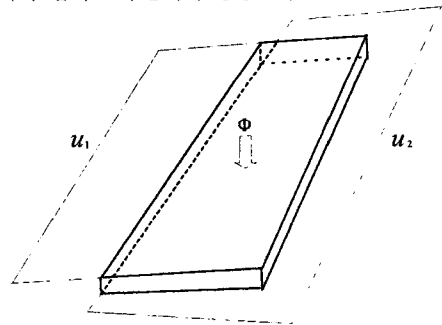


그림 1 공극 자속류브

그림1의 자속류브 개념을 유도전동기의 고정자와 회전자 사이의 공극에 적용하여 i 번째 고정자 치와 j 번째 회전자 치 사이의 공극 퍼미언스를 $G_{i,j}$, $i-1$ 번째 고정자 치와 j 번째 회전자 치 사이의 공극 퍼미언스를 $G_{i-1,j}$, $i-1$ 번째 고정자 치와 $j-1$ 번째 회전자 치 사이의 공극 퍼미언스를 $G_{i-1,j-1}$ 이라고 하면, 그림2와 같다.

고정자와 회전자의 슬롯수가 같고 치폭이 같으면 고정자와 회전자가 정확히 일치하는 한 점에서만 퍼미언스가 생긴다. 이때 H.Buchholz씨가 제시한 회전자 각 γ 에 따른 고정자와 회전자가 겹치는 면의 변화 계수 $b(\gamma)$ 를 사용하면, 퍼미언스 $G_{i,j}(\gamma)$ 는 식(2)로 변한다.^[3]

$$G_{i,j}(\gamma) = G_{max} b(\gamma) \quad (2)$$

G_{max} : 최대퍼미언스,

$b(\gamma)$: 단면적 변화 계수

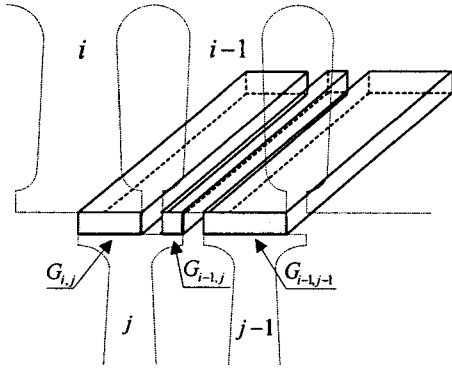


그림 2 유도전동기의 공극 자속류분

고정자와 회전자 치 폭이 같은 경우 최대 퍼미언스는 식(3)과 같이 임의의 한 치폭을 적용하여 구할 수 있다.

$$G_{\max} = \mu_0 \frac{l w_t}{\delta} \quad (3)$$

l : 유도전동기의 활성축 길이, w_t : 치 폭
 δ : 공극길이

고정자와 회전자 치 폭과 슬롯수가 다르고 고정자의 치 폭이 회전자 치 폭에 비해 큰 경우 최대 퍼미언스는 식(4)와 같다.

$$G_{\max} = \mu_0 \frac{l w_{rt}}{\delta} \quad (4)$$

w_{rt} : 회전자 치 폭

고정자와 회전자 치 폭이 다른 경우, 퍼미언스가 최대인 구간 γ_i' 은 식(5)와 같다.

$$\gamma_i' = \frac{w_{st} - w_{rt}}{D_{ag}} \quad (5)$$

D_{ag} : 고정자 내경과 회전자 외경의 평균값

w_{st} : 고정자 치 폭

고정자와 회전자가 겹치지 않는 각 γ_i 는 식(6)과 같다.

$$\gamma_i = \frac{w_{st} + w_{rt} + O_{ss} + O_{sr}}{D_{ag}} \quad (6)$$

O_{ss} : 고정자의 슬롯 개구 길이

O_{sr} : 회전자의 슬롯 개구 길이

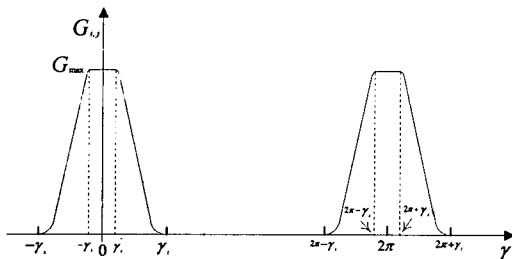


그림 3 공극 퍼미언스의 변화

그림3은 고정자와 회전자 치 폭이 다른 경우 회전자의 회전에 따른 퍼미언스의 변화를 나타낸 것이다. 그림3에 대한 회전자 이동에 따른 각 구간에서의 퍼미언스는 식(7)과 같다.

$$G_{i,j} = \begin{cases} G_{\max} & \text{for } 0 \leq \gamma \leq \gamma_i \text{ and } 2\pi - \gamma_i \leq \gamma \leq 2\pi \\ G_{\max} \frac{1 + \cos \pi \frac{\gamma - \gamma_i}{\gamma_i - \gamma_i}}{2} & \text{for } \gamma_i \leq \gamma \leq \gamma_i \\ G_{\max} \frac{1 + \cos \pi \frac{\gamma - 2\pi + \gamma_i}{\gamma_i - \gamma_i}}{2} & \text{for } 2\pi - \gamma_i \leq \gamma \leq 2\pi - \gamma_i \\ 0 & \text{for } \gamma_i \leq \gamma \leq 2\pi - \gamma_i \end{cases} \quad (7)$$

3. 슬롯 사구에 의한 영향

유도전동기의 회전자는 고조파 회전자계에 의해 기동시에 이상 토크가 발생하기도 하며 운전시에는 진동과 소음이 발생하기도 한다. 이러한 고조파의 영향을 없애기 위해 슬롯 사구를 한다. 슬롯이 사구되어 있는 경우 공극의 자속류분의 기본 형상이 변형되므로 고정자와 회전자의 겹쳐지는 치 면이 앞에서와 같이 직사각형이 되지 않는다.⁽⁴⁾

사구된 슬롯의 경우 고정자와 회전자가 겹치는 부분을 나타내는 γ_i 는 식(8)과 같다.

$$\gamma_i = \frac{w_{st} + w_{rt} + O_{ss} + O_{sr} + l \tan \beta}{D_{ag}} \quad (8)$$

β : 사구 각

그림 4는 사구가 없는 고정자 치와 사구가 있는 회전자 치 폭 조합으로 고정자의 치폭이 회전자의 치 폭에 비해 넓은 경우를 나타낸 것이다. 그림4에서 면적A는 치 폭이 겹치는 부분이다.

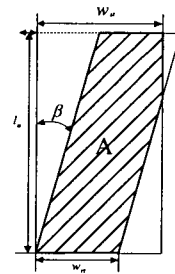


그림 4 사구된 치폭의 조합

그림4에 대한 치면이 겹치는 구간별 면적의 변화는 식(9)와 같다.

$$A = \begin{cases} \frac{x^2}{2 \tan \beta} & \text{for } 0 \leq x \leq l_o \tan \beta \\ (x - l_o \tan \beta) l_o + \frac{l_o^2 \tan \beta}{2} & \text{for } l_o \tan \beta \leq x \leq w_n \\ (w_n - l_o \tan \beta) l_o + \frac{l_o^2 \tan \beta}{2} + l_o (x - w_n) - \frac{(x - w_n)^2}{2 \tan \beta} & \text{for } w_n \leq x \leq w_n + l_o \tan \beta \end{cases} \quad (9)$$

스퀘어에 따른 최대 퍼미언스는 식(10)과 같으며, 그림5는 표1의 농형유도전동기에 대해 사구각을 $[0.1^\circ \sim 25^\circ]$ 변화시켰을 때의 최대 퍼미언스의 변화이다.

$$G_{\max} = \frac{\mu_0}{\delta} \left[l \frac{W_{st} + W_{rt}}{2} - \frac{l_o^2 \tan \beta}{4} - \frac{(W_{st} - W_{rt})^2}{4 \tan \beta} \right] \quad (10)$$

G_{\max} : 최대 퍼미언스

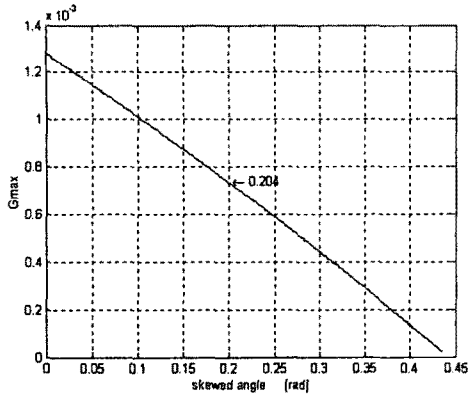


그림 5 사구각에 따른 최대 퍼미언스의 변화

사구각이 증가함에 따라 그림5와 같이 최대 퍼미언스는 감소 한다. 회전자 이동각에 따른 공극 퍼미언스의 변화는 각 요소에 대한 기자력 강하의 계산을 곱하여 토크를 산출한다. 따라서, 사구된 치는 사구가 없는 치보다 같은 공극 기자력에 대해 작은 토크를 발생시킨다.

표 1 해석 모델 사양

정 격	3φ, 4-극, 220V, Δ결선, 이층권 2.3A, 60Hz, 0.4kW	
공극의 길이 (δ)	0.3[mm]	
활성축의 길이 (l _a)	55[mm]	
스택계수(stack factor)	0.96	
고 정 자	슬롯수 (N _s)	24
	외경(□)	128[mm]
	외경(○)	139[mm]
	내경	70[mm]
	슬롯 깊이	14.4[mm]
	슬롯 입구 폭(o _{ss})	2.3 [mm]
	슬롯 바닥 폭	9.152[mm]
	슬롯 머리 폭	5.382[mm]
회 전 자	슬롯수 (N _r)	34
	외경	69.4[mm]
	내경	20[mm]
	슬롯 깊이	7.85[mm]

4. 공극 플랜징에 의한 영향

치 폭에 비해 슬롯 개구의 크기를 무시할 수 없을 때, 공극에서 플랜징(fringing)이 발생한다. 플랜징을 무시할 수 없을 경우 자속튜브를 사다리꼴로 근사화하면 퍼미언스는 식(11)과 같다.

$$G_f = \frac{\mu_0}{\delta} \frac{l}{\ln \frac{(w_{st} + O_{ss})}{w_{st}}} \quad (11)$$

G_f : 플랜징 퍼미언스, μ_0 : 공기 중 투자율

플랜징을 무시할 때 직사각형 모양의 자속튜브에 의한 공극 퍼미언스와 플랜징에 의해 사다리꼴 모양의 자속튜브 일때의 공극 퍼미언스의 비 k_f 는 식(12)와 같다.

$$k_f = \frac{G_f}{G} = \frac{O_{ss}}{w_{st} \ln(1 + \frac{O_{ss}}{w_{st}})} \quad (12)$$

그림6은 고정자 치폭과 슬롯 개구비에 대한 공극 퍼미언스 비 k_f 를 나타낸 것이다. 플랜징에 의한 공극 퍼미언스는 고정자 치 폭과 슬롯 개구 비가 작은 구간에서 공극 퍼미언스가 증가한다는 것을 보여준다.

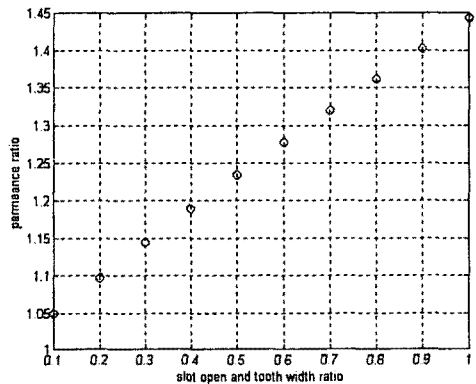


그림 6 슬롯개구-치폭 비에 대한 퍼미언스 계수의 변화

5. 결 론

본 논문에서는 고정자와 회전자 치의 위치변화와 슬롯 형태에 따른 공극퍼미언스를 연구하였다. 사구슬롯과 플랜징이 공극 퍼미언스에 미치는 영향을 분석하여 다음 사실을 확인하였다.

- 1) 사구각을 변화시키에 따라 최대 퍼미언스가 감소하여 같은 공극기자력 강하에 대해 발생토크가 감소한다.
- 2) 공극 플랜징에 대한 공극 퍼미언스를 플랜징이 없을 때와 비교하여 계수화 함으로써 플랜징을 고려할 수 있다.

[참 고 문 헌]

- [1] Vlado Ostovic, M. Miller, Vijay K.Garg, Roy D.Schultz, Shaultz H. Swales, "A Magnetic Equivalent Circuit Based Performance Computation of a Lundell Alternator", IEEE Trans. IA-35, NO.4, JULY/AUGUST, 1999
- [2] V.Ostovic, "Application of Magnetic Equivalent Circuits in Transient and Steady state Machine Analysis", WEMPEC Research Report 84-13, University of Wisconsin, Madison, 1984
- [3] H.Buchhltz, "Elektrische und magnetische Potentialfelder", Springer-Verlag, Berlin, Goettingen, Heidelberg, 1957
- [4] V.Ostovic, "Dynamics of saturated machines", Springer-Verlag, 1989.