

공심형 및 철심형 동기기의 특성해석

장석명, 조성국, 윤인기, 이성호
충남대학교

Analysis on the flux density in Air-Cored and Iron-Cored type Synchronous Machine

S.M. Jang, S.K. Cho, I.K. Yoon, S.H. Lee
Chungnam National University.

Abstract - Air-cored machines have a higher efficiency with high frequency, speed than iron-cored machine because of the iron losses which may produce too much heat as well as the copper losses occurred in the rotor winding. But air-cored machine is lower flux than iron machine. The nature of the machine from 'iron-cored' to 'air-cored' is a progressive feature in the machines. A general analysis of the fields that is applicable to all configurations is presented. Slotless machines have been applied for no ripple induced voltage. In this paper, slotless machines equipped with internal 4-pole amature winding. This paper pay attention to analyze flux density of air-cored and iron-cored synchronous machine analytically and compare flux density of aired-cored machine to iron-cored machine.

1. 서 론

수 kHz이상의 고주파수 전원으로 구동되는 초고속 회전기는 히스테리시스손과 와전류손이 매우 크게 발생하여 과열되며, 또 이에 따른 냉각문제가 매우 심각하게 된다. 또한 고정자와 회전자 철심의 슬롯-치가 있게 되므로 특성이 불균일하게 되어 코깅토크가 발생하는등으로, 심각한 경우에는 초고속회전이 불가능하게 된다. 따라서 회전자의 재질을 비자성체로 하는 공심형으로 하기도 한다. 즉 공심형 회전기기는 비자성체인 플라스틱등으로 구성하기도 하므로 히스테리시스손이나 와전류손이 발생하지 않아서 초고속 회전기에 매우 적합하다. 또한 회전자에 슬롯이 없이 권선을 시행하는 슬롯리스형 기기 또한 슬롯-치가 존재하지 않아 자속의 분포가 원주상에서 균일하기 때문에 자속 및 토크리플이 없거나 매우 적어서 진동과 노이즈의 발생이 적게 되어 고른 출력값을 얻을 수가 있어서 초고속 운전이 가능하게 된다. 또한 공심형 슬롯리스형으로 하는 경우는 실린더 모양의 회전자 표면에 권선을 균일하게 퍼져서 위치하고 있으므로 회전자의 외부 표면과 고정자 내부표면 사이에 일정한 크기의 공극이 존재하게 되어 역시 출력분포가 균일하여 초고속에 매우 적합하게 된다. 그런데 공심형 회전기는 여러 가지 장점에도 불구하고 철심형에 비해서 발생자속의 크기가 작다는 것이 단점이다. 따라서 회전자의 재질 및 구조가 철심형, 공심형, 공심 슬롯리스형으로 구성하는 경우에 각각의 특성이 어느정도가 다른가를 설계자가 알아야 만 시스템에 적용여부를 결정할 수 있다.

따라서 본 논문에서는 Miller교수의 방법을 중심으로 각각에 대한 특성을 해석하는 예를 들어 그 결과를 비교 검토함으로써 초전도 시스템에의 구동응용에 참고가 되는 자료를 제시하고자 한다.

2. 특성방정식 및 해석

2.1 해석 모델의 구조

그림 1은 회전기기의 일반적인 모델이다. 이 모델은 슬롯이 없는 가장 간단한 구조로, 회전자는 비 투자율이 μ_r 인 철심으로 구성되고 그 표면에는 4극의 권선이 분포하고 있다. 고정자는 비투자율 μ_s 인 철심으로 구성되며 위치에 따라 자속밀도특성을 구하기 위하여 5영역으로 나누었다. 또 권선의 전류 i 는 정현적인 분포를 하며, 권선은 직렬로 T_{ph} 만큼 감겨져 있으며 권선계수는 k_w 이다. 또한 계자권선에의 전류는 정현파의 등가면전류라고 할 때 $A \sin p\theta$ 로 표현 할 수가 있다. 이때 A 는 식(1)과 같다.

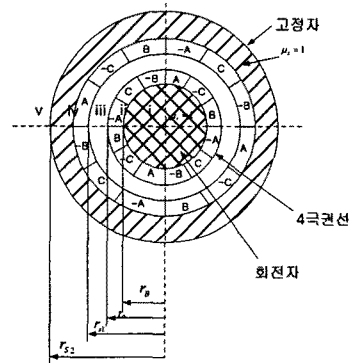


그림 1 일반적인 동기기의 구조

$$A = \left(\frac{2N k_w}{\pi r_0} \right) i \quad (A/m) \quad (1)$$

그런데 기기의 주성능을 발생시키는 것은 영역(ii)와 (iii)가 된다.

2.2 지배방정식과 자체특성식

그림 1에서 자기 벡터포텐셜은 ψ 는 축방향 성분인 ϕ 만 존재하며, 계자권선의 등가 여자전류는정현적인 분포를 하는 $A \sin p\theta$ 이로 가정하면 자기 벡터 포텐셜 ϕ 는 전류분포에 의하여 $\psi = \phi_0(r) \sin p\theta$ 라 할 수 있다. 이때 $\phi_0(r)$ 은 식(2)와 같은 지배방정식의 해이다.

$$\frac{d^2 \phi_0}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d\phi_0}{dr} - \frac{p^2}{r^2} \phi_0 = 0 \quad (2)$$

그림 1에서 각 영역의 해는

$$\psi = (a_j r^p + b_j r^{-p}) \sin p\theta \quad (j=1,2,\dots,5) \quad (3)$$

와 같은 형태를 갖으며, 그리고 방사 방향의 자속밀도와 회전방향 자속밀도 역시 식(3)으로부터 구할 수 있다. 이때 p 는 극수이다. 또한 벡터포텐셜 ψ 와 자속밀도 B_r, B_θ 는 정의에 의하여 식(4)의 관계가 있다.

$$B_r = \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial \theta}; \quad B_\theta = -\frac{\partial \psi}{\partial r} \quad (4)$$

또한 각 해석 모델에 대한 경계조건은 전자기특성에 의하여 식(5)와 같이 주어진다.

- $\psi = 0$, 경계 $r = 0$, $r = \infty$
 - H_θ 는 r_B, r_{SI}, r_{Σ} 에서 연속이므로
- $$H_{\theta+} - H_{\theta-} = A \sin p\theta$$
- B_r 는 r_B, r_0, r_{SI} 에서 연속 (5)

따라서 식(5)의 경계조건등식으로부터 식(3)의 미지수 a_j 와 b_j 를 구할 수가 있다. 이렇게 구해진 식들중에서 기기의 특성에 가장 커다란 영향을 미치는 영역인 (ii)와 (iii)영역에서의 자속밀도를 구하게 되고, 누설 자속과 권선의 끝단에서의 자속은 매우 작은 것으로 보아 고려하지 않기로 한다.

2.2.1 철심이 아닌 비자성체로 구성되는 경우의 자계분포

식(2)로의 일반해에서 식(5)의 경계조건을 만족하는 축방향 자기 벡터 포텐셜을 구하고 회전자와 고정자의 철심이 각각 공심형 ($\mu_R = 0$, $\mu_S = 0$)으로 주어지게 되면 자속 밀도는 각각 다음과 같다.

$r < r_0$ 의 영역에서

$$\begin{pmatrix} B_r \\ B_\theta \end{pmatrix} = \frac{\mu_0 A}{2} \left(\frac{r}{r_0}\right)^{p-1} \begin{pmatrix} \cos p\theta \\ -\sin p\theta \end{pmatrix} \quad (6)$$

$r > r_0$ 의 영역에서

$$\begin{pmatrix} B_r \\ B_\theta \end{pmatrix} = \frac{\mu_0 A}{2} \left(\frac{r}{r_0}\right)^{p+1} \begin{pmatrix} \cos p\theta \\ \sin p\theta \end{pmatrix} \quad (7)$$

식(6)과 식(7)로부터 권선외부의 자속밀도는 내부에서 보다 훨씬 급격하게 떨어지는 것을 확인할 수 있다. 그림1의 모델에 대해서 계자권선에 인가된 정현적인 전류 분포에 의해 4극 공심형 기기에 대한 자속 밀도는 계자 권선과 공극을 경계로 해서 가장 크게 계자 권선 내부로 갈수록 자속밀도는 $1/r^2$ 의 비율로 감소하고 권선 외부로 갈수록 $1/r^3$ 의 비율로 감소하게 된다.

2.2.2 회전자가 자성체 철심으로 구성되는 경우의 자속 밀도

비투자율이 μ_R 이고 회전자의 반경이 r_B 일 때 계자권선의 내부와 외부 공극영역에서 자속 밀도는 식(8)과 같다. 회전자에 철심이 존재할때의 자속 밀도는 회전자와 고정자가 모두 공심형 해석 모델과 식의 형태가 비슷하지만

회전자 철심계수를 나타내는 $\left[1 + \lambda_R \left(\frac{r_B}{r_0}\right)^{2p}\right]$ 항이 더 곱

해지는데 이는 그림(3)에서 확인할 수가 있다. 이와 같은 철심계수는 회전자 반경과 계자 권선반경의 비율과 회전자 철심의 투자율과도 관계한다는 것을 보여준다.

$$\begin{pmatrix} B_r \\ B_\theta \end{pmatrix} = \frac{\mu_0 A}{2} \left(\frac{r}{r_0}\right)^{p-1} \left[1 \pm \lambda_R \left(\frac{r_B}{r_0}\right)^{2p}\right] \begin{pmatrix} \cos p\theta \\ -\sin p\theta \end{pmatrix} \quad (8)$$

$r_0 < r$ 인 영역에서

$$\begin{pmatrix} B_r \\ B_\theta \end{pmatrix} = \frac{\mu_0 A}{2} \left(\frac{r_0}{r}\right)^{p+1} \left[1 + \lambda_R \left(\frac{r_B}{r_0}\right)^{2p}\right] \begin{pmatrix} \cos p\theta \\ \sin p\theta \end{pmatrix} \quad (9)$$

여기에서

$$\lambda_R = (\mu_R - 1) / (\mu_R + 1)$$

이며 λ_R 은 그림2와 같이 투자율과 관계된다. 그림2에서 철심의 투자율이 무한히 클때 λ_R 은 거의 1이 되고 회전자가 자속을 관통시키지 못할때는 거의 -1이 됨을 알 수

있다. 그러므로 회전자 철심계수는 투자율이 무한히 클 때 최대값을 갖는 것을 알 수 있다. 예를 들어 $\lambda_R = 1$ 이고 $r_0/r_B = 1$ 일때, 계자 권선 밖의 자계는 공심형 기기에 비하여 정확히 2배가 된다. 식(10)을 식(9)에 대입하면 접선 방향의 자속이 감소하고 있는 동안 권선과 회전자 표면사이의 영역에서 철심과 권선사이를 직접적으로 관통할 수 있도록 철심의 방향에 영향을 미치면서 방사 방향의 자속밀도는 증가한다.

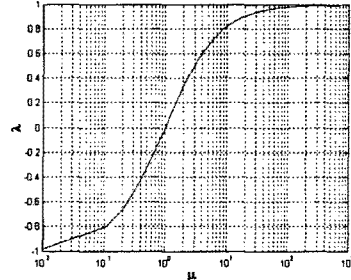


그림2 비투자율에 대한 투자율 계수

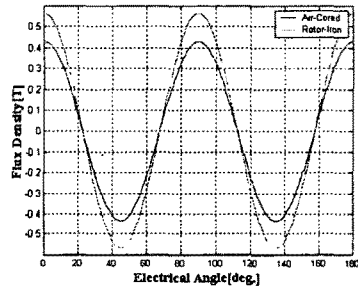


그림3 공극에서 공심형과 회전자 철심형 자속밀도의 비교

2.2.3 고정자의 영향

고정자의 비투자율이 λ_S 이고 고정자 내 반경이 r_{SI} , 회전자의 철심은 고려하지 않을 때 고정자의 영향을 고려한 자속밀도는 식(10), (11)과 같이 나타난다. 이들 식은 회전자 철심의 영향을 나타낸 식(8), (9)와 비슷하지만 식(10)과 (11)에서와 같이 고정자 철심 계수

$\left[1 + \eta \lambda_S \left(\frac{r_0}{r_{SI}}\right)^{2p}\right]$ 항이 더 곱하여 진다. 고정자 철심계수 역시 고정자 철심과 계자 권선의 상대적인 위치에 영향을 받는다.

$r < r_0$ 의 영역에서

$$\begin{pmatrix} B_r \\ B_\theta \end{pmatrix} = \frac{\mu_0 A}{2} \left(\frac{r}{r_0}\right)^{p-1} \left[1 + \eta \lambda_S \left(\frac{r_0}{r_{SI}}\right)^{2p}\right] \begin{pmatrix} \cos p\theta \\ -\sin p\theta \end{pmatrix} \quad (10)$$

$r_0 < r < r_{SI}$ 의 영역에서

$$\begin{pmatrix} B_r \\ B_\theta \end{pmatrix} = \frac{\mu_0 A}{2} \left(\frac{r_0}{r}\right)^{p+1} \left[1 \pm \eta \lambda_S \left(\frac{r_0}{r_{SI}}\right)^{2p}\right] \begin{pmatrix} \cos p\theta \\ \sin p\theta \end{pmatrix} \quad (11)$$

여기서

$$\lambda_S = (\mu_S - 1) / (\mu_S + 1) \quad (12)$$

이고

$$\eta = \left[1 - \left(\frac{r_{SI}}{r_{\Sigma}}\right)^{2p}\right] / \left[1 - \lambda_S^2 \left(\frac{r_{SI}}{r_{\Sigma}}\right)^{2p}\right] \quad (13)$$

식(13)에서 η 는 철심의 투자율이 무한한 값을 가지게 되면 λ_S 가 1이 되기 때문에 1이 된다.

식(10)으로부터 (13)까지에서 투자율이 커지게 되면 η

항이 거의 최대값을 갖기 때문에 식(10)과 (11)에서 자속 밀도는 증가한다. 계자권선 주위에 무한히 커다란 투자율로 둘러싸게 되면 계내에서 자속이 크게 증가하게 된다. 즉 투자율이 무한대이고 $r_0 = r_{S1}$ 일 때 고정자 철심에 의한 자속밀도는 최대값을 갖는다.

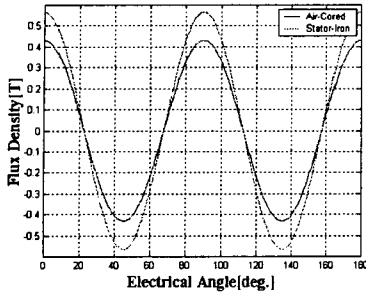


그림4 공극에서 공심형과 고정자 철심형 자속밀도의 비교

2.2.3 회전자, 고정자가 모두 철심으로 구성된 경우
이 경우는 일반적인 슬롯리스 형태의 동기 발전기와 같은 구조를 지닌 모델과 같은 형태이다. 회전자와 고정자 모두 철심일 때 권선 내부와 외부에서의 자속 밀도는 각각 다음과 같다.

$r_B < r < r_0$ 의 영역에서

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} B_r \\ B_\theta \end{pmatrix} &= \frac{\mu_0 A}{2} \left(\frac{r}{r_0} \right)^{p-1} \frac{\left[1 \pm \lambda_R \left(\frac{r_B}{r_0} \right)^{2p} \right]}{\left[1 - \eta \lambda_S \left(\frac{r_B}{r_{S1}} \right)^{2p} \right]} \\ &\times \begin{pmatrix} 1 + \eta \lambda_S \left(\frac{r}{r_{S1}} \right)^{2p} \cos p\theta \\ - \sin p\theta \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (14)$$

$r_0 < r < r_{S1}$ 의 영역에서

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} B_r \\ B_\theta \end{pmatrix} &= \frac{\mu_0 A}{2} \left(\frac{r_0}{r} \right)^{p+1} \frac{\left[1 + \lambda_R \left(\frac{r_B}{r_0} \right)^{2p} \right]}{\left[1 - \eta \lambda_S \left(\frac{r_B}{r_{S1}} \right)^{2p} \right]} \\ &\times \begin{pmatrix} 1 \pm \eta \lambda_S \left(\frac{r}{r_{S1}} \right)^{2p} \cos p\theta \\ \sin p\theta \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (15)$$

식(14), (15)의 분자의 각항은 각각 회전자와 고정자의 철심에 의한 영향을 나타낸다. 즉 그림5에서와 같이 회전자와 고정자가 모두 철심인 경우는 공심형일때의 자속 밀도 보다 약 4배가 커짐을 알 수 있다.

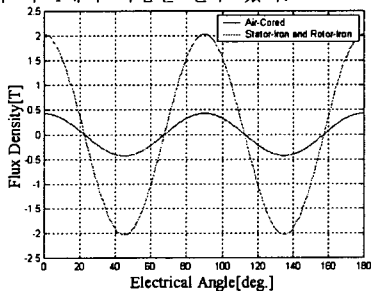


그림 5 공심형 일때와 고정자와 회전자 모두 철심일때의 자속밀도 비교

또 공극의 크기에 따른 자속밀도 변화는 그림.6과 같다. 계자 권선 반경과 회전자 반경이, 또 전기자 권선 반경과 고정자 내경의 크기가 같다고 하고, 투자율이 매우 높다고 하면 $\lambda_R, \lambda_S, \eta$ 는 근사적으로 1이 된다. 이때 회

전자 외경과 고정자 내경의 비율, 즉 공극의 크기를 변화시킬 때 공심형과 철심형의 자속밀도 비율은 공극이 거의 같을때는 거의 4배정도 차이 나고 공극의 비율이 커짐에 따라서 매우 더욱 커짐을 알 수 있다. $r_0 = r_B, r_a = r_{S1}$ 이고 투자율이 매우 클 때 철심형에 대한 공심형 자속밀도의 비율은 식(16)과 같이 된다.

$$\frac{B_{r \text{ iron}}}{B_{r \text{ air}}} = \frac{4}{1 - (r_B/r_{S1})^{2p}} \quad (16)$$

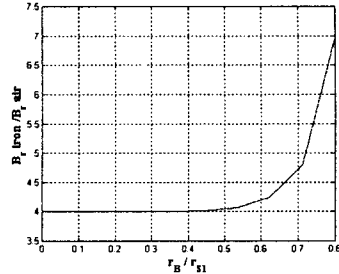


그림6 공극 비율에 대한 공심형, 철심형 자속밀도의 비율

3. 결 론

본 논문에서는 슬롯리스 형태를 갖는 내전형 4극 3상 동기 발전기에 대한 자속 밀도 분포를 Miller 교수의 방법을 중심으로 해석적인 특성 해석을 하였다. 즉 공심형, 회전자만 자성체, 고정자만 자성체인 경우 각각에 대해 공극에서의 자속 밀도를 구하고 비교 검토 하였다. 공심형 기기와 회전자 또는 고정자가 자성체로 구성되는 경우의 자속 밀도 특성의 비를 해석적인 방법에 의해 수식 모델링을 하여 정량적으로 구할 수 있음을 보였다. 공심형, 슬롯리스형에 대한 특성 해석법을 검토하므로써, 이를 바탕으로 초고속회전기의 철손과 코깅토크를 저감시키는 방법에 대한 기본 자료를 제시할 수 있게 되었다.

[참 고 문 헌]

- [1] A. Hughes, B.Sc., Ph.D. and T.J.E Miller, A.F.I.M.A., Mem. I.E.E.E., C.Eng., M.I.E.E., "An Field and inductances in air-cored and iron-synchronous machines", PROC. IEEE, Vol. 124 FEBRUARY 1977
- [2] T.J.E., Miller, B.Sc., A.F.I.M.A. Mem. I.E.E.E. M.I.E.E., and A. Hughes, B.Sc., Ph.D., "Comparative and performance analysis of air-cored and iron-synchronous machines", PROC. IEE, vol. 124, No. 2, FEB 1977
- [3] S.M. Jang, S.S. Jeong, D.W. Ryu, I.K. Yoon, S.K. Ch and Analysis of High Speed Slotless PM Machine Halbach Array", Spring Annual Conference, B-51, 200
- [4] Stephen J. Chapman, "Electric machinery funda Third Edition, McGRAW-Hill Korea 2001
- [5] Theodore Wil, di "Electric machines, Drives, and systems", second Edition, Prentice Hall 1991
- [6] J.R. Hendershot Jr, T.J.E Miller, "Design of B Permanent-Magnet Motors", Oxford Magna Physics 1
- [7] Dennis G. Zill, Michael R. Cullen, "Advanced Eng Mathematics", International Thomson Publishing 199
- [8] Guru, Hiziroglu, "Electromagnetic Field Theory Fund", PWS Publishing Company 1997