

횡자속 전동기의 고출력화

■ 강도현 / 한국전기연구원

서론

에너지 변환기기인 전동기는 고출력화(전동기 출력/전동기 무게)를 위해서 계속적으로 발전해오고 있는데, 그 예로 1930년대의 NEMA 445 Frame이 50 Hp의 출력이었던 반면에 지금은 200 Hp의 출력을 내고 있다. 이러한 전동기 고출력화 기술 발전은 설계기술, 재료기술, 제작기술, 전력변환기술 등 전동기 관련 요소 기술의 진보에 기인하고 있다. 특히 근래에 새로운 전기기기 관련 재료(초전도체, 희토류 영구자석, 분말 자성재료 등)가 발전함에 따라 전동기 기술이 비약적으로 발전되고 있다[1].

고출력 전동기는 전동기 중량이 적게 요구되는 전기 자동차, 철도관련 차량, 자기부상 열차와 같은 교통수단의 추진장치로 매우 적합하므로 차량의 경량화, 지구구조의 경량화할 수 있다[2], [3].

본 고에서는 고출력 전동기인 횡자속 전동기를 소개하고, 자기 차폐에 의한 고출력화, 영구자석 여자에 의한 고출력화를 소개하고자한다.

횡축형 전동기 기본모델

횡자속 전동기의 원리는 기본적으로 릴럭턴스 전동기와 같다. 그림 1에서 권선 전류에 의한 기자력이 θ_a [AT]일 때, 자속 ϕ_a 가 발생하여 자기저항이 최소화되는 방향으로, 즉 고정자와 회전자자의 치가 일치할 때까지 힘을 발생시키게 된다. 이때, 자속 ϕ_a 의 진행방향

과 전동기의 이동 방향 x 는 횡방향(전류의 방향과 전동기의 진행방향이 같음)이 된다.

이와 같이 횡자속 전동기의 장점은 자기회로와 전기회로가 분리되어 있기 때문에 단위 체적당 높은 출력과 높은 효율이 가능하다는 점이다.

그림 2는 기본형 횡자속 전동기 모델에 대해 전류(θ_a)와 발생 추력(F_x)의 관계를 회전자 위치를 따라 나타내고 있다. $0 \sim \tau_p$ 구간에서는 한쪽 방향으로 힘을

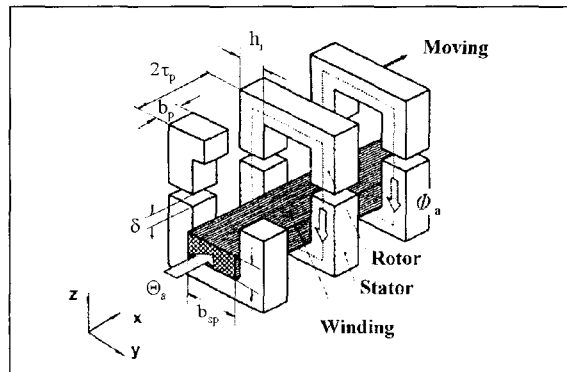


그림 1 횡자속 전동기의 기본 형상

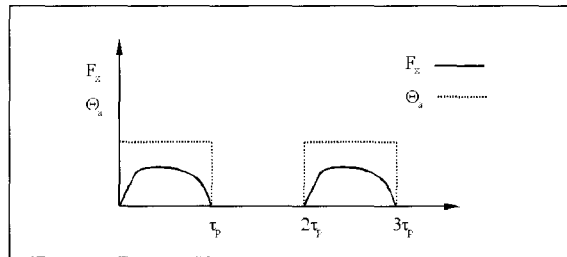


그림 2 횡자속 기본모델의 회전자 위치에 따른 기자력(θ_a)-발생추력(F_x)

발생시키고 $\tau_p \sim 2\tau_p$ 구간에서는 다른 방향으로 힘을 발생시키므로 일정한 방향의 힘을 얻기 위해서 $\tau_p \sim 2\tau_p$ 구간에서는 전류를 흘리지 않는다.

그림 1의 기본형상에서 발생 가능한 단위 면적당 추력 F_{xd} 는 다음 식 (1)과 같다⁴⁾.

$$F_{xd} = \frac{\mu_0}{32\delta} \tau_p \theta_a^2 \quad (1)$$

여기서, μ_0 는 공기의 투자율, θ_a 는 기자력, δ 는 공극, τ_p 는 극간격이다. 이상의 식 (1)는 횡자속 전동기 힘발생 밀도로 전동기 설계시 기본식으로 이용하고 있다.

발생 힘 밀도 F_{xd} 는 공극과 극간격에 반비례하고 기자력의 자성에 비례함을 알 수 있다. 고효율 전동기를 설계시 공극은 기계적인 구조 때문에 한정되어 있고 기자력은 자기회로의 포화와 권선의 온도상승 때문에 제한을 받고 있다. 따라서, 주어진 회전자의 크기에서 극간격을 적게 설계하면 발생 힘 밀도를 증가시킬 수 있는 가능성을 가지고 있다. 식 1에서 $\theta_a=2000$ [AT], $\delta=1.0$ [mm], $\tau_p=10$ [mm] 일 경우 발생 가능한 힘 밀도는 15.7[kN/m²]이다.

자기차폐에 의한 고효율화

그림 1에서 자속 ϕ_a 가 자기저항이 최소화되는 방향으로, 즉 고정자와 회전자의 치를 일치하려고 힘을 발생시키지만 그림 3 자속의 일부는 진행방향에 대해서 반대방향 즉 제동력을 발생시킨다. 이러한 제동력을 발생시키는 자속을 자기차폐(Magnetic Screen)로 제거할 수 있다⁴⁾.

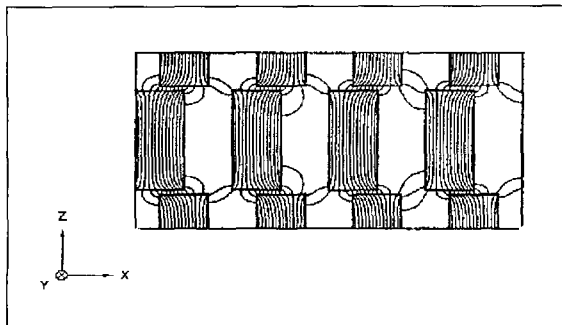


그림 3 횡자속 전동기 기본 모델 자속분포

자기차폐는 그림 4와 같이 투자율이 영인 초전도체를 slot에 삽입하거나, 그림 5와 같이 주 자속 ϕ_a 의 흐름에 반대방향인 영구자석을 slot에 삽입하여 제동력을 발생시키는 자속 성분을 감소시킬 수 있다. 투자율이 영인 초전도체를 slot에 삽입한다는 것은 현재의 기술로는 실현 불가능 하나, 그림 6과 같이 높은 에너지를 가진 영구자석(희토류영구자석)을 slot에 삽입하는 것은 가능하다. 물론 경우에 따라서 한쪽(stator 혹은 rotor)에 영구자석을 삽입하는 경우도 가능하다. 그림 7은 투자율이 영인 초전도체를 slot에 삽입한 그림 4와 그림 1의 기본 모델에서의 추력을 나타내고 있는데, 투자율이 영인 초전도체를 slot에 삽입한 초전도체에 의한 자기차폐(Magnetic Screen)의 경우 약 1.25배의 큰 추력을 발생시킨다.

자기차폐(Magnetic Screen)에 의해서 얻는 추력은 식 (1)에서 얻는 값보다 적다.

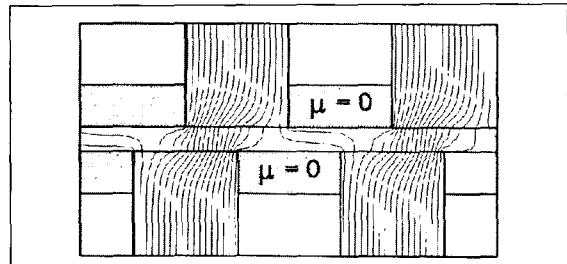


그림 4 초전도체에 의한 자기차폐(Magnetic Screen)

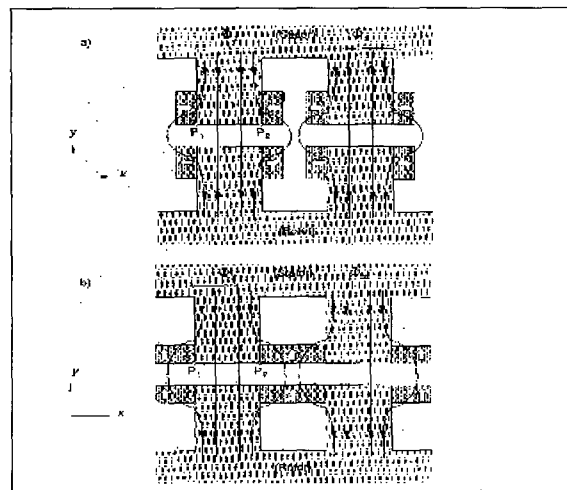


그림 5 영구자석에 의한 자기차폐(Magnetic Screen) 원리

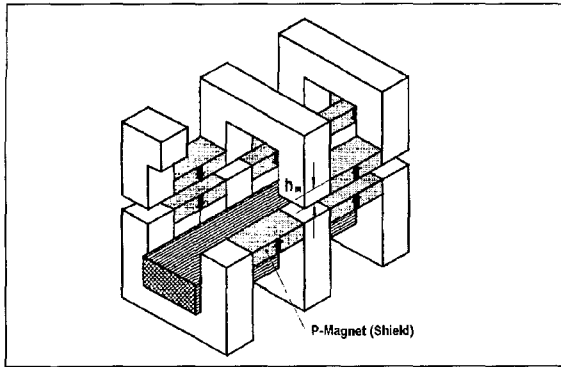


그림 6 영구자석 자기차폐(Magnetic Screen)이용 횡자속 전동기

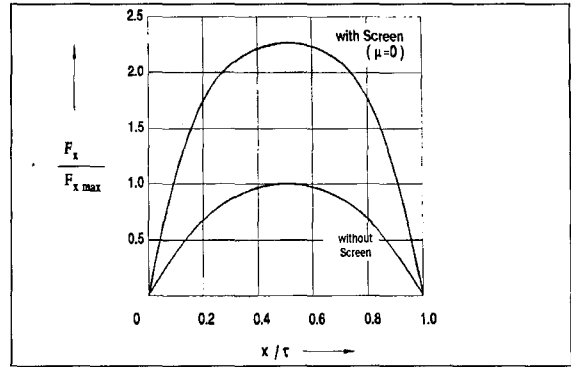


그림 7 초전도체 자기차폐(Magnetic Screen)에 의한 추력

영구자석여자에 의한 고효율화

횡자속 전동기의 다른 형태로 회전자에 영구자석을 삽입하여 출력밀도를 증가시킨 영구자석 여자 횡자속 전동기가 있다. 구조적으로 그림 8과 같이 영구자석에서 발생하는 자계가 공극에서의 자계를 집중시키므로 높은 공극 자속 밀도를 얻을 수 있다.

그림 8의 형상에서 회전자의 영구자석은 자속을 일

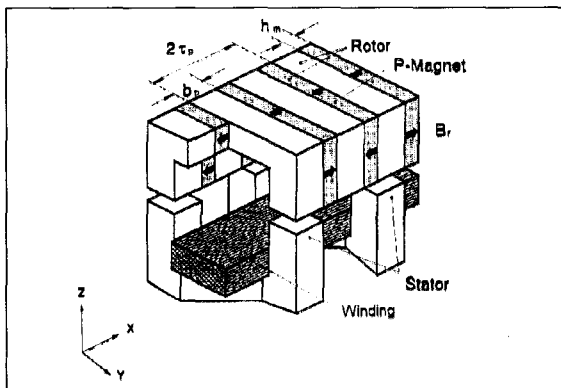


그림 8 영구자석 여자 횡자속 전동기 형상

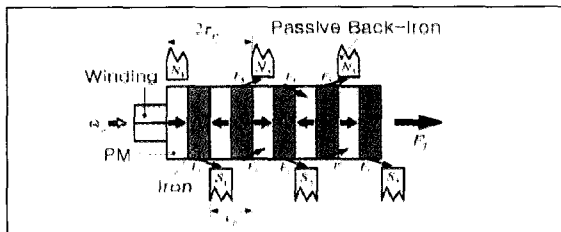


그림 9 영구자석 여자 횡자속 전동기 힘 발생원리

정한 방향으로 발생시키도록 교대로 설치되며, 일정한 방향으로 추진력을 얻기 위해 권선이 있는 고정자 철심은 양측 극면에서 τ_p 만큼 엇갈리게 설계되었다. 물론 권선을 회전자에 설치하여도 무방하다^{[5],[6]}.

그림 9에 도시한 바와 같이 고정자 권선에 a 방향의 전류를 흘리면 암페어의 주회법칙에 의하여 고정자 철심의 위쪽 자극에는 N극, 아래쪽 자극에는 S극의 자속이 발생한다. 따라서, 고정자의 자극과 이동자의 자극 상호 작용에 의하여 자극의 방향이 같으면 반발력, 자극의 방향이 다르면 흡인력이 발생하여 그림 9에서와 같이 힘 F1, F2, F3, F4가 생겨 우측 방향의 합성된 힘 FT가 발생한다.

회전자 위치에 따른 기자력-발생추력은 그림 10과 같다. 일정한 방향으로 힘을 발생시키기 위해 $0 \leq x \leq \tau_p$ 구간에서는 고정자의 자속이 영구자석의 자속방향과 같은 방향이 되도록 전류를 인가하고, $\tau_p \leq x \leq 2\tau_p$ 구간에서는 반대방향의 전류를 흘려야 된다.

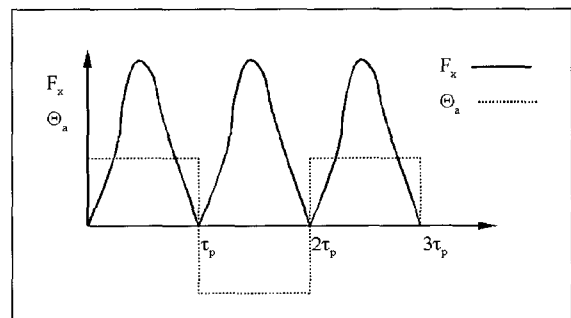


그림 10 회전자 위치에 따른 기자력(θ_a)-발생 추력(F_x)

영구자석 여자 횡자속 전동기의 발생 가능한 힘밀도 F_{xd} 를 구하면 식 (2)로 된다⁵⁾⁶⁾.

$$F_{xd} = B_o \frac{\theta_a}{2\tau_p} \quad (2)$$

영구자석 여자 횡자속 전동기에서 철심의 포화와 누설을 무시하고, 무부하 공극자속밀도 $B_o = 1[T]$, 기자력 $\theta_a = 2,000[AT]$, 극간격 $\tau_p = 10[mm]$ 인 경우 발생 가능한 힘밀도를 계산하면 $F_{xd} = 100 [kN/m^2]$ 로 된다. 이 값은 횡축형 기본모델 그림 1에서 발생하는 힘보다 약 6배로 많이 됨을 알 수 있다.

횡자속 전동기의 자속 및 추력비교

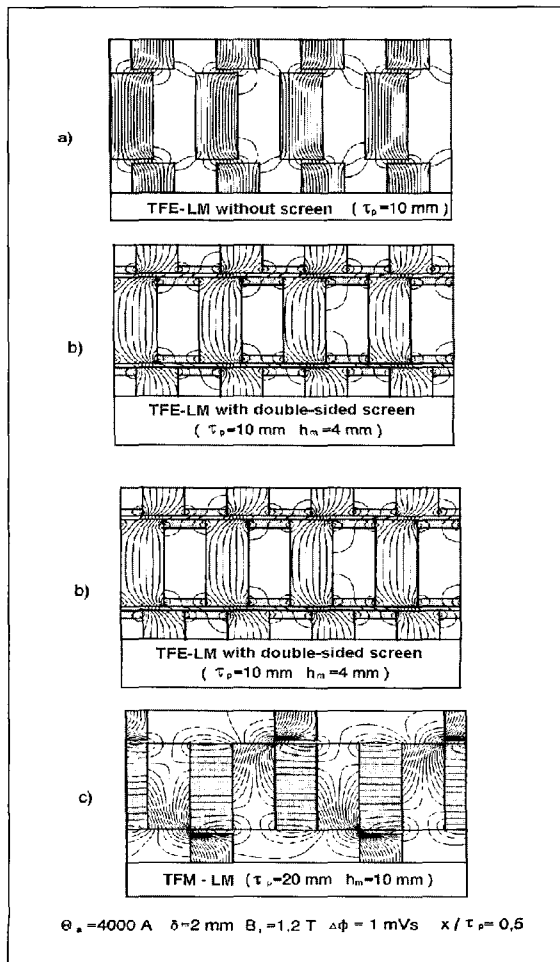


그림 11 횡자속 전동기의 자속분포 비교

한편 그림 11은 각각의 3가지 해석모델에서 회전자와 이동자 사이 공극의 자속분포를 나타내고 있다. 그림 11(a)의 경우 그림 1의 횡자속형 전동기 기본 모델의 자속 형상을 나타내고 있고, 그림 11(b)의 경우 그림 6 영구자석 자기차폐(Magnetic Screen)이용 횡자속 전동기의 자속 형상을 나타내고 있고, 그림 11(c)의 경우 그림 8 영구자석 여자 횡자속 전동기의 자속 형상을 나타내고 있다. 그림 11(b)에서 영구자석 자기차폐(Magnetic Screen)를 이용한 경우 제동력을 발생시키는 자속이 현저히 저감됨을 알 수 있고, 그림 11(c)의 경우 영구자석과 전기자 전류에 의한 자속 때문에 이동자의 이동에 따라 많은 자기에너지가 변화됨을 예상할 수 있다.

그림 12는 횡자속 전동기의 이동자 위치에 따른 추력으로 그림 1의 횡자속형 전동기 기본 모델 (TFE-LM), 그림 6의 영구자석 자기차폐(Magnetic Screen)이용 횡자속 전동기 (TFE-LM with screen), 그림 8의 영구자석 여자 횡자속 전동기 (TFM-LM)의 이동자 위치에 따른 추력을 나타내고 있다. 영구자석 자기차폐(Magnetic Screen)와 영구자석 여자에 의해 추력이 증가됨을 알 수 있다.

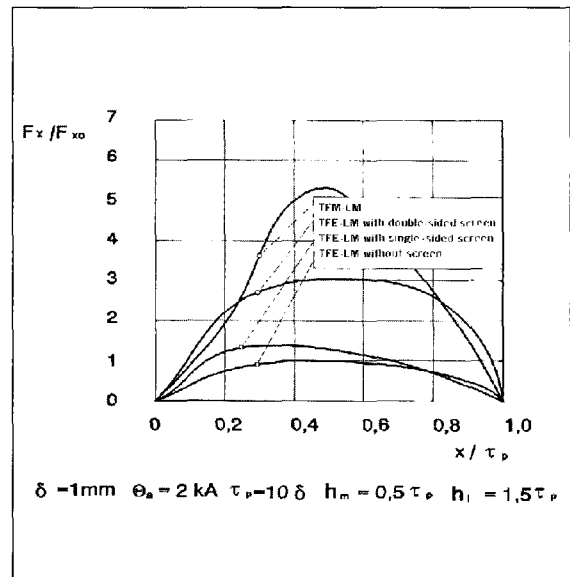


그림 12 횡자속 전동기의 추력

Technical trend

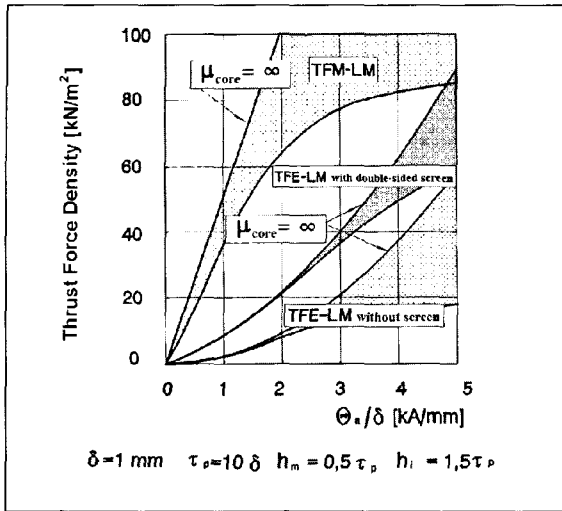


그림 13 횡자속 전동기의 추력밀도

그림 13은 3차원 유한요소법에 의한 횡자속 전동기의 추력밀도로 철심의 포화가 적은 낮은 전류 값에서 식 (1)과 식 (2)의

$$F_{xd} \sim \Theta_a^2 \quad : \text{TFE-LM} \quad (3)$$

$$F_{xd} \sim \Theta_a \quad : \text{TFM-LM} \quad (4)$$

관계가 성립됨을 알 수 있고, 기자력 $\Theta_a = 2[kT]$ 에서 추력밀도는 각각 다음과 같다.

- 64.1 kN/m² : TFM-LM
- 21.3 kN/m² : TFE-LM with double-sided screen
- 8.1 kN/m² : TFE-LM without screen

이 결과는 영구자석 여자 횡자속 전동기의 추력밀도가 현저히 높음을 알 수 있다.

결론

전동기 고출력화 기술은 설계기술, 재료기술, 제작 기술, 전력변환기술 등 전동기 관련 요소기술의 진보에 기인하고 있는데, 본 고에서는 고출력 전동기인 횡자속 전동기를 소개하고, 자기 차폐에 의한 고출력화,

영구자석 여자에 의한 고출력화를 소개하였다. 고출력화 하기 위한 원리와 같은 조건에서 자속 형상을 비교함으로써 고출력화 가능성을 정성적으로 비교 검토하였고, 기자력 $\Theta_a = 2[kA]$ 에서 횡자속형 전동기 기본 모델, 영구자석 자기차폐(Magnetic Screen)이용 횡자속 전동기와 영구자석 여자 횡자속 전동기의 추력밀도 값은 각각 8.1 kN/m², 21.3 kN/m², 64.1 kN/m²로 영구자석 자기차폐(Magnetic Screen)와 영구자석 여자에 의해 추력이 현저하게 증가됨을 나타내었다.

[참 고 문 헌]

- [1] Weh, H. : Permanentmagneterregte Synchronmaschinen hoher Kraftdichte nach dem Transversalflu konzept. etzArchiv Bd. 10 (1988), H.5, S.143-149
- [2] Weh, H : Linear Electromagnetic Drives in Traffic Systems and Industry. The First International Symposium on Linear Drive for Industry Applications, Nagasaki(Japan), 1995
- [3] Shoyama, Y., Ando, M, and Namikawa, H. : LIM driven subway railcar with small sectional area. International Conference on Maglev Transport '85, Yokohama, 1985
- [4] Z. Jajtic. : Vortriebskraftoptimierung bei der elektrisch erregten Transversalflu maschine. Dissertation, TU Braunschweig 1993.
- [5] D.H. Kang, Y. H.Chun,H. Weh: "Analysis and optimal design of transverse flux linear motor with PM excitation for railway traction", IEEProc. Electr. Power Appl. Vol. 150, No. 4, July 2003
- [6] D. H. Kang: "Transversalflussmaschinen mit permanenter Erregung als Linearantriebe im schienengebundenen Verkehr", Dissertation, TU Braunschweig, 1996