

고속 운전용 영구자석형 동기 전동기(PMSM)의 설계

장석명, 조한욱, 최장영, 최상호*, 최상규**
 충남대학교, 경주전장주식회사*, KIMM**

Design of Permanent Magnet Synchronous Motor for High-Speed Drive

Seok-Myeong Jang, Han-Wook Cho, Jang-Young Choi, Sang-Ho Choi*, Sang-Kyu Choi**
 Chungnam Nat'l Univ., KAES*, KIMM**

Abstract - A permanent magnet synchronous motor for high-speed drive was developed based on an analytical method. Especially, rated speed and torque according to switching scheme are offered. A prototype machine was also fabricated and tested to confirm the design. Preliminarily obtained experimental data using the prototype machine shows the validity of the design.

1. 서 론

최근 고성능의 생산시스템을 구축하기 위하여 전기기기의 고정밀화와 더불어 고속화가 필수적이다. 특히 전기기기의 고속운전 기술은 최근 연구가 매우 활발하고, 비약적 기술의 발전이 진행되고 있다.

고속 운전을 위한 영구자석형 동기전동기로 먼저 제시된 기기는 매입형 영구자석 동기 전동기(IPMSM, Interior Permanent-Magnet Synchronous Motor)이다. IPM은 회전자 내부에 영구자석이 견고하게 매입되어 있어 기계적으로 매우 안정적이며, 유효 공극이 작으므로 공극의 자속을 제어하기가 용이하여 고속 운전에서의 적용이 적합하기 때문이다[1]. 그러나, IPM의 경우 토오크 발생 축과 자속 발생 축 사이의 인덕턴스가 다름으로 인하여 릴럭턴스(Reluctanc)토오크가 발생하므로 제어가 어렵다는 단점을 가지며, 영구자석을 포함하는 자로를 형성하는 회전자 철심의 구조가 복잡하여 기계적 가공이나, 착자등의 여러 가지 어려움점을 갖는다.

이에 반해 표면 부착형 영구자석 전동기(SPMSM, Surface Mounted Permanent-Magnet Synchronous Motor)의 경우 IPMSM에 비하여 제작이 용이하고, 상용으로 쓰이는 대다수의 PMSM이 이에 해당한다. SPMSM의 경우 비투자율의 거의 1에 가까운 영구자석을 가지므로, 유효공극이 커지는 효과를 갖는다. 따라서, 공극에서의 자속을 제어할 수 있는 능력이 IPMSM에 비하여 현저히 떨어져 일반적으로 약제자 제어의 가능성이 매우 작다는 단점을 갖지만, 고속 운전을 목적으로 하는 전동기의 설계에 있어 릴럭턴스 토크가 없고 및 영구자석을 포함하는 회전자 자기회로가 단순하여 고속 운전용의 전동기로 매우 적합한 것으로 알려져 있다.

2. 전자기적 조건을 고려한 고속 영구자석형 동기전동기의 설계

영구자석을 갖는 전기기기의 전자기적 특성 해석 및 설계를 위하여 본 저자들은 해석 영역의 지배방정식으로 부터 자기 벡터포텐셜을 해석 해로 하는 공간고조파법(다중층 해석법 및 전달관계 해석기법)을 적용하였다 [2]-[4]. 해석적 방법은 지배방정식을 풀기위하여 많은 가정을 수반하거나, 정밀 해를 구하기 위하여 많은 수고로움이 요구되지만, 초기 설계시 설계 변수에 따른 기기의 특성을 분석·과약 하는데 매우 빠르고 정확하게 적용될 수 있다는 장점을 갖는다.

3. 운전 조건을 고려한 고속 영구자석형 동기전동기의 설계

2.1 영구자석형 동기전동기의 전압방정식

영구자석형 동기 전동기를 동기 회전 좌표계에서의 전압방정식을 이용하여 표현하면 식(1)로 표현된다.

$$\begin{bmatrix} V_{ds}^e \\ V_{qs}^e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + pL_s & -\omega_r L_s \\ \omega_r L_s & R_s + pL_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds}^e \\ i_{qs}^e \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_r \lambda_f \end{bmatrix} \quad (1)$$

- L_s : 고정자 상 인덕턴스
- R_s : 고정자 권선 저항
- p : 미분 연산자 ($\frac{d}{dt}$)
- ω_r : 회전 각속도
- λ_f : 쇠교자속

2.2 전류 및 전압 제한

인버터가 인가 할 수 있는 최대 고정자 전류(I_{max})는 인버터의 전류 정격과 전동기의 열정격에 의하여 결정된다. 식(2)는 전류 제한 조건식을 나타낸다.

$$i_{ds}^{e*2} + i_{qs}^{e*2} \leq I_{smax}^2 \quad (2)$$

인버터가 인가 할 수 있는 최대 고정자 전압(V_{max})는 직류 링크 전압(V_{dc})과 사용된 PWM 기법에 따라 크게 달라지며, 전압의 제한 조건식은 식(5)와 같다.

$$v_{ds}^{e*2} + v_{qs}^{e*2} \leq V_{max}^2 \quad (3)$$

그런데, 식(1)에 제시된 영구자석형 동기전동기의 전압 방정식에서 정상상태의 전압, 전류의 변화율을 무시하고 전개하면 식(4)와 같이 된다.

$$\begin{aligned} v_d &= R_s i_{ds} - \omega_r L_s i_{qs} \\ v_q &= R_s i_{qs} + \omega_r L_s i_{ds} + \lambda_f \omega_r \end{aligned} \quad (4)$$

식(4)에서 v_d , v_q 를 각각 제곱하여 식(4)에 대입하면, 식(5)를 얻을 수 있다.

$$\left(i_{ds} + \frac{\omega_r^2 L_s \lambda_f}{Z_s^2} \right)^2 + \left(i_{qs} + \frac{R_s \omega_r \lambda_f}{Z_s^2} \right)^2 = \left(\frac{V_{smax}}{Z_s} \right)^2 \quad (5)$$

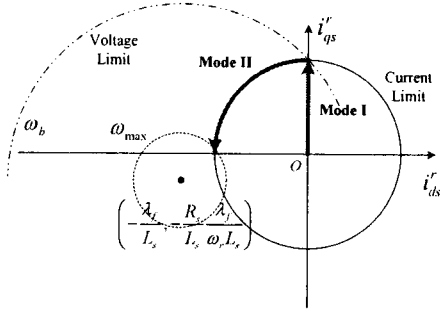


그림 1. 전류 제한원 및 전압 제한원

여기서, 임피던스는 $Z_s = \sqrt{R_s^2 + (\omega \cdot L_s)^2}$ 이다. 그런데, 전동기의 속도가 점차 올라가게 되어 고속으로 운전되면 전동기의 리액턴스 성분 ωL_s 가 점차 커져, 약계자 운전 영역에 가까이 갔을 때에는 ωL_s 가 임피던스의 대부분을 차지하게 되므로, $\omega L_s \gg R_s$ 가 된다.

따라서, Z_s 에서 저항 R_s 를 0이라 하고 식(6)대입하면, 식(7)과 같은 전압 제한원의 방정식을 얻을 수 있다.

$$\left(i'_{ds} + \frac{\lambda_f}{L_s}\right)^2 + \left(i'_{qs} + \frac{\lambda_f}{L_s} \frac{R_s}{\omega L_s}\right)^2 = \left(\frac{V_{\max}}{Z_s}\right)^2 \quad (6)$$

식(6)의 결과를 d - q 축 전류 평면에 도시하면 그림 1과 같이 나타낼 수 있다. 그림 1에서 전류 제한원은 중심이 (0, 0)이고, 경계는 반경이 인버터 및 전동기의 열정격에 의해 결정되는 최대 허용전류, I_{\max} 이다. 그리고, 전압 제한원은 중심의 좌표가 $\left(-\frac{\lambda_f}{L_s}, -\frac{R_s}{L_s} \frac{\lambda_f}{\omega L_s}\right)$ 이고, 경계는 $\frac{V_{\max}}{\omega L_s}$ 이다.

특히, 그림 1은 영구자석에 의한 자속이 비교적 큰 경우에 전압제한 타원의 중심이 전류 제한 원 바깥쪽에 위치하는 경우를 나타낸다. 그림에서 보여지는 바와 같이 ω_b 까지는 속도의 증가에 따라 일정 토크제어가 되지만, 속도가 ω_{\max} 이상이 되면 전류 제한원과 전류 제한 원을 모두 만족시키는 영역이 존재하지 않으므로 더 이상 운전이 불가능하게 된다.

2.3 정격 속도 및 토크

그림 2는 영구자석형 동기 전동기가 벡터제어로 운전되고 있을 때, 전동기의 속도-토크 능력을 나타낸다. 그림 1에서 보여지는 바와 같이, 그림 2의 일정 토크 영역(Mode I)에서는 전압의 제한 조건은 없고 전류 제한 조건만 고려된다. 이처럼 전류 제한 조건이 출력을 결정하는 영역에서는 전압 제한 타원이 충분히 크므로 이는 고려하지 않아도 된다. 이 구간에서는 일반적으로 토크가 일정하게 제어되는 토크 제어 영역이다. 약계자 영역(Mode II)에서는 d 축 전류를 음(-)으로 하고, q 축 전류를 조정함으로써 전동기의 가속 운전이 가능하다.

그림 3은 벡터제어시 영구자석형 동기전동기의 속도-출력 특성을 나타낸다. 그림에서, 정격속도(기저속도) ω_b 와 전동기가 얻을 수 있는 최대속도 ω_{\max} 는 각각 식(6)-(9)에 의하여 구할 수 있다.

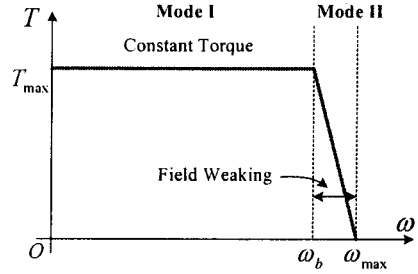


그림 2. 속도-토크 특성

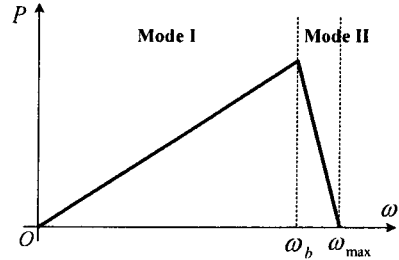


그림 3. 속도-출력 특성

식(4)에서 고속에서의 저항 R_s 를 0이라 가정하면, 식(7)과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} v_{ds}^{e*} &\approx -\omega L_s i_{ds}^{e*} \\ v_{qs}^{e*} &\approx \omega L_s i_{qs}^{e*} + \lambda_f \omega \end{aligned} \quad (7)$$

식(3)에서 $V_{\max} = \sqrt{v_{ds}^{e*2} + v_{qs}^{e*2}}$ 이므로, 식(7)을 대입하면 식(8)과 같다.

$$V_{\max} = \omega_s \sqrt{(L_s i_{qs}^{e*})^2 + (\lambda_f + L_s i_{ds}^{e*})^2} \quad (8)$$

그런데, 벡터제어에 있어서 전류제어의 목적은 제한된 전압 계획안에서 최대토크를 내는 것-단위 전류 당 최대 토크 제어(Maximu, Torque per Ampere : MPTA)-으로 하므로, 다음과 같은 전류 제어 지령을 쓴다.

$$i_{ds}^{e*} = 0 \quad (9)$$

그러므로, 영구자석 동기 전동기의 정격속도 ω_b 는 식(10)과 같이 구할 수 있다.

$$\omega_b = \frac{V_{\max}}{\sqrt{\lambda_f^2 + (L_s I_{\max})^2}} \quad (10)$$

그리고, 최대속도 ω_{\max} 는 식(11)과 같다.

$$\omega_{\max} = \frac{V_{\max}}{\lambda_f} \quad (11)$$

여기서, V_{\max} 는 공간벡터 PWM을 사용하는 인버터에서 $V_{dc}/\sqrt{3}$ 이다.

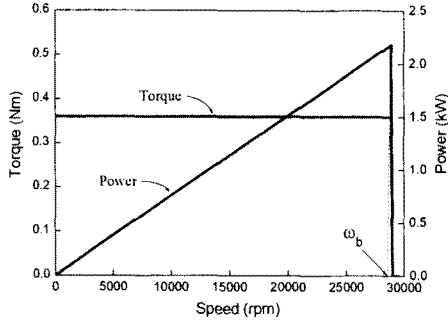


그림 4. 속도-토크, 속도-출력 특성

그리고, 주어진 전류 제한 조건과 기기의 자기회로 특성에 의하여 전동기가 낼 수 있는 최대 토크는 식(12)와 같다.

$$T_{\max} = \frac{3}{2} \lambda_f \frac{\sqrt{V_{\max}^2 - \lambda_f^2 \omega^2}}{\omega L_s} \quad (12)$$

3. 해석 및 실험

그림 4는 고속 운전에 적용을 위해 설계된 영구자석형 동기 전동기의 속도-토크 및 속도-출력 특성을 나타낸다. 식(10)-(12)에 의해 정격속도, 최대운전속도 및 정격 토크가 결정 되었다.

그림 5는 설계된 전동기의 등자속선 분포와 철심에서의 자속밀도 분포를 각각 나타낸다. 해석 모델은 4극의 영구자석 회전자를 가지며, 고속 회전시 영구자석의 비산이나 이탈을 방지하고, 스트레스에 견디도록 Inconel-718 캔을 갖는다. 고정자 철심은 포화 자속밀도가 약 1.52 T 인 Arnon7 Si-Steel을 사용했으며, 최대 자속시 고정자 치에서 약 1.5 T를 갖는다.

그림 6은 실 제작된 전동기를 보여준다. 고정자 코어의 외경인 $\phi 65$ mm, 고속에서 엔코더에 의한 회전자 위치 및 속도의 검출이 불가능하므로, 홀센서 3개를 설치하여 위치 및 속도의 검출을 피하였다.

그림 7과 그림 8은 각각 설계된 전동기의 역기전력 해석 결과 및 제작된 전동기의 역기전력 실험결과를 각각 나타낸다. 먼저, 설계의 검증에 위하여 저속 운전 영역에서 얻어진 역기전력 실험과 실험에서 얻어진 속도를 적용한 유한요소 해석을 수행하였다. 그림에서 보여지는 바와 같이 해석 결과와 실험결과 모두 약 1053 rpm에서 약 5.2 V_{peak} 전압이 나오므로써, 설계의 타당성을 검증하였다.

4. 결 론

본 논문에서는 산업현장이나 특수 목적으로 고용량 소형 시스템에의 적용 특성이 매우 우수한 고속 영구자석형 동기 전동기의 설계 및 제작 시험을 수행하였다. 특히, 자기회로의 설계와 동시에 이뤄지는 인버터와 운전 영역, 제어특성을 고려한 설계에 있어서, 정격속도, 최대속도, 정격 토크와 같은 기기의 성능을 나타내는 물리량들을 예측하여 설계 조건에 만족하는지의 여부를 판단 할 수 있었다. 향후 설계, 제작된 영구자석형 동기 전동기의 백터제어를 이용한 고속 운전 실험이 진행 될 것이다.

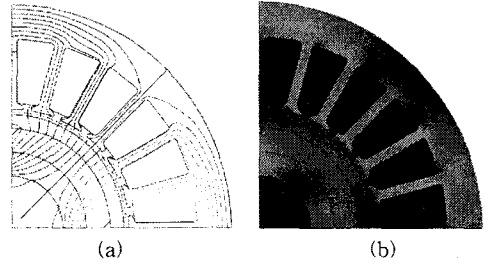


그림 5. (a)등자속선 분포 및 (b)철심의 자속밀도 분포

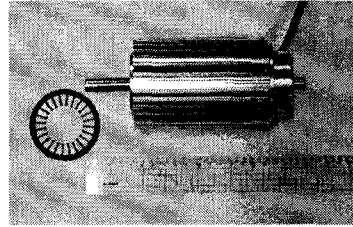


그림 6. 제작된 전동기 사진

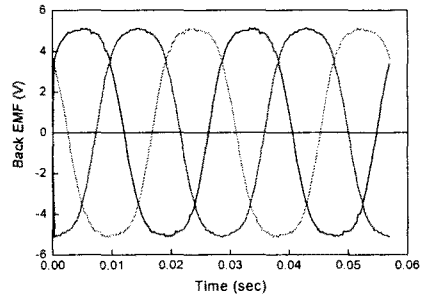


그림 7. 역기전력 해석결과 (1053 rpm)

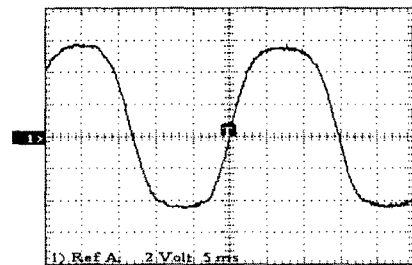


그림 8. 역기전력 실험결과 (2V/div., 5msec/div.) @ 1053 rpm

[참 고 문 헌]

- [1] S.A. Nasar, I.Boldea, L.E.Unnewehr, "Permanent Magnet Reluctance, and Self-Synchrouous Motors," CRC Press, 1993. [2] 이성호, "자기회로 구성 조건에 따른 직선형 전자기 에너지 변환기의 정특성 해석," 박사학위논문, 충남대학교, 2003년.
- [3] 장석명, 조한욱, 최장영, 유대준, 이성호, "전자기 전달관계 해석기법을 이용한 슬롯리스형 BLDC 전동기의 정특성 해석," 대한전기학회 하계학술대회 B, 2005, pp.1297-1299.
- [4] 장석명, 최장영, 양현섭, 조한욱, "슬롯팅을 고려한 직경방향 착자된 영구자석을 갖는 초고속 기기의 특성해석," 대한전기학회 하계학술대회 B, 2004, pp.1064-1066.