

영구자석 동기 서보 전동기의 제어에 관한 연구

0

김종구, 최옥돈, 정명길, 이현상, 김명찬
현대중전기(주) 기술연구소

A study on Permanent Magnet Synchronous Servo Motor Control

KIM J.K, CHOI U.D, JUNG M.K, LEE H.S, KIM M.C

HYUNDAI ELECTRICAL ENGINEERING CO.,LTD. R&D CENTER

Abstract - This paper illustrates maximum torque per ampere ratio operation and efficiency operation, which are prevalently applied to the control of permanent magnet synchronous motor (PMSM). Maximum torque per ampere ratio operation minimizes the copper loss of PMSM and maximum efficiency operation minimizes the total loss of PMSM. To verify the difference of these method, simulation and experiment results applied to IPMSM (Interior type PMSM) and SPMSM (Surface mounted PMSM) are presented.

1. 서 론

공장자동화의 핵심이라고 할 수 있는 교류서보 시스템은 영구자석형 동기 서보 전동기가 주류를 이루고 있다. 영구자석 교류서보 전동기는 고정자의 역기 전력 파형에 따라 크게 SINUSOIDAL 서보전동기(PMSM: PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR)와 TRAPEZOIDAL 서보전동기(BDCM: BRUSHLESS DC MOTOR)로 구분되는데 일반적으로 BDCM은 저속에서의 맥동 토크가 심하기 때문에 정도가 낮은 위치제어 응용분야 및 속도제어에 주로 사용되고 고정도, 고분해능이 요구되는 서보 시스템에는 PMSM이 주로 사용되고 있다.

이 PMSM은 회전자 자석 취부방법에 따라 다시 SPMSM(SURFACE PMSM)과 IPMSM(INTERIOR PMSM)으로 분류되는데, 자석을 회전자 내부에 삽입하는 구조를 갖는 IPMSM은 자석을 회전자 표면에 부착하는 구조를 갖는 SPMSM에 비하여 운전범위가 넓고 기계적 내구성이 크며 공극이 작고 감자내력이 크다. 따라서 동일 출력에서 SPMSM보다 부피가 적으며 경제적으로 설계하는 것이 가능하며 TORQUE/INERTIA 비를 크게 할 수 있다. PMSM의 운전방법으로는 전류당 최대 토크비 운전, 최대효율 운전, 일정해고 자속운전, 역률 = 1 ($\cos\phi = 1$) 운전, 약계자 운전등이 있는데, 전류당 최대 토크비 운전과 최대 효율운전은 PMSM을 최소 손실

로 운전하기 위한 제어방식이고 역률=1 운전은 PMSM을 구동하는 전원회로의 용량을 최소로 하기위한 제어방식이다. 또한 일정 해고자속 운전은 부하변동에 관계없이 공극자속을 일정하게 유지시켜 부하전류와 발생 토크의 비를 거의 선형적으로 유지하기 위한 제어 방법이며, 약계자 운전은 d축 전류를 이용하여 고속 운전영역에서 정출력특성을 갖도록 제어하는 방식이다. 여기에서는 PMSM의 모델링과 제어방식 비교 및 당사에서 개발 완료된 SPMSM의 전류당 최대 토크비 운전에 관하여 SIMULATION 및 실험결과를 나타냈으며 IPMSM에 대해서도 시뮬레이션 및 실험결과를 제시하였다.

2. 기계적 구조에 따른 PMSM의 분류

2.1 SPMSM (SURFACE PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR)

회전자 표면에 영구자석을 취부한 형태로 d,q축 인덕턴스가 동일한 특성을 갖는다. 보통 환봉에 마그네트의 BONDING 작업후 비도전성 재료로 BANDING하는 작업을 거치며 IPMSM보다는 기계적 구조가 약하다고 볼 수 있다.

2.2 IPMSM(INTERIOR PMSM)

영구자석을 회전자 내부에 삽입한 것으로 q축 인덕턴스가 d축 인덕턴스에 비해 2-3배 정도 큰 특성을 갖는다. 자석을 회전자 내부에 삽입하므로써 회전자 표면을 매끄럽게 가공할 수 있어서 공극의 크기를 작게할 수가 있다. 이런 이유로 IPMSM은 SPMSM에 비하여 동일출력에서 작게 설계하는 것이 가능하고 자석 사용량이 줄어들어 경제적으로 유리하다. 또한 강한 기계구조를 가지므로 SPMSM에 비하여 고속운전이 가능하다.

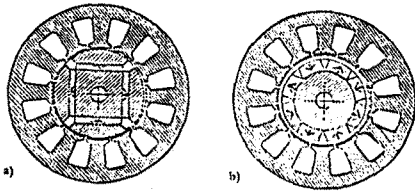


그림 1. SPMSM과 IPMSM의 단면도

3. PMSM의 모델링

자기회로가 비포화되어 선형적으로 동작하고 역기 전력이 정현적이라고 가정할때 PMSM의 모델을 다음과 같이 정의할 수 있다.

3.1 철손을 무시한 모델

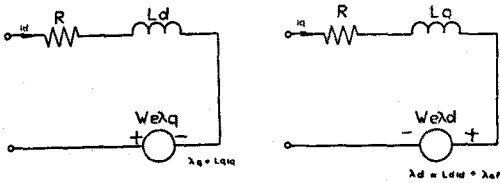


그림 2. 동손만을 고려한 PMSM의 dq축 모델

PMSM의 모델을 그림 2와 같이 정할때 정상상태 (STEADY-STATE)에서의 전압 방정식과 토크식은 아래와 같다.

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & -\omega_e L_q \\ \omega_e L_d & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_e \lambda_{af} \end{bmatrix} \quad \text{식(1)}$$

$$\text{Torque} = 3/2 \cdot P_{ol} \omega_e / 2 \cdot \{ \lambda_{af} i_q + (L_d - L_q) i_d i_q \} \quad \text{식(2)}$$

3.2 철손을 고려한 모델

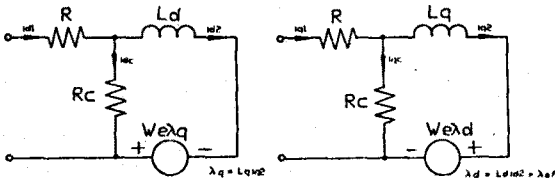


그림 3. 철손을 고려한 PMSM의 dq축 모델

철손을 나타내는 Rc를 포함한 PMSM의 등가회로는 그림3과 같이 나타낼수 있다. d축과 q축의 철손 저항 Rc는 같다고 가정하였다. 이때 정상상태에서의 전압 방정식과 토크식 손실 그리고 각 전류 성분간의 관계 식을 식(3)에서 식(6)으로 표현하였다.

$$\begin{bmatrix} V_d \\ 0 \\ V_q \\ -\omega_e \lambda_{af} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R+R_c & -R_c & 0 & 0 \\ -R_c & R_c & 0 & -\omega_e L_q \\ 0 & 0 & R+R_c & -R_c \\ 0 & \omega_e L_d & -R_c & R_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{d1} \\ i_{d2} \\ i_{q1} \\ i_{q2} \end{bmatrix} \quad \text{식(3)}$$

$$\text{Torque} = 3/2 \cdot P_{ol} \omega_e / 2 \cdot \{ \lambda_{af} i_{q2} + (L_d - L_q) i_{d2} i_{q2} \} \quad \text{식(4)}$$

$$\begin{aligned} \text{손실} &= \text{동손} \cdot \text{철손} = R i_{11}^2 + 1/R_c \cdot |V_d|^2 \\ &= \omega_e^2 / R \{ L_q^2 i_{q2}^2 + (L_d i_{d2} + \lambda_{af})^2 \} + \\ &R \{ (-\omega_e L_q i_{d2} / R_c + i_{d2})^2 + ((\omega_e L_d i_{d2} + \omega_e \lambda_{af}) / R_c + i_{q2})^2 \} \end{aligned} \quad \text{식(5)}$$

$$\begin{aligned} i_{d1} &= i_{d0} + i_{d2} = -\omega_e L_q i_{q2} / R_c + i_{d2} \\ i_{q1} &= i_{q0} + i_{q2} = \omega_e (L_d i_{d2} + \lambda_{af}) / R_c + i_{q2} \\ i_1 &= i_{d1} + j i_{q1} \\ V_x &= V_{x0} + j V_{x1} = -\omega_e L_q i_{q2} + j \omega_e (L_d i_{d2} + \lambda_{af}) \end{aligned} \quad \text{식(6)}$$

4. PMSM의 운전

4.1 SPMSM의 운전

4.1.1. 전류당 최대 토크비 운전

SPMSM은 Id와 Iq가 같기 때문에 식(4)에서 알 수 있듯이 id2 성분은 토크에 기여하지 못한다. 따라서 id2를 ZERO로 하여 운전할때 최대토크비 운전이 가능하다. 또한 지령 토크가 결정되면 iq2는 식(7)으로 얻어질 수 있다.

$$i_{q2} = \text{Torque} / \sqrt{3/2 \cdot P_{ol} \omega_e / 2 \cdot \lambda_{af}} \quad \text{식(7)}$$

이 방식은 SPMSM 운전시에 적용되는 가장 일반적인 방법으로 일정속도 도모크에서 동손을 가장 적게하는 운전특성을 갖는다고 할 수 있다.

4.1.2. 최대 효율 운전

일정상태에서 토크 지령이 입력되면 이에 해당하는 iq2는 식(9)로 표현되는데, 이때 id2는 철손과 동손을 결정하는 요소로 작용한다. 따라서 식(5)

로 표현되는 손실식을 i_{d2} 로 미분하여 이식을 ZERO로 하는 i_{d2} 를 구하면 이 i_{d2} , i_{q2} 가 일정속도 토오크 운전 상태에서 최대효율 운전이 되는 점이다. 식(8)에 이 i_{d2} 를 나타냈다. 이와같은 운전방식은 철철손과 동손의 합을 최소로하는 운전특성을 갖는다고 할 수 있다.

$$i_{d2} = - \frac{ \{ 2R\omega_e i_{q2} / R_e \cdot (L_d - L_q) + 2\omega_e^2 L_d \lambda_{af} / R_e \} + R / R_e }{ 2\omega_e^2 L_d^2 / R_e + 2R + 2R\omega_e^2 L_d^2 / R_e^2 }$$

식(8)

$$i_{q2} = \text{Torque} / (3/2 \cdot \text{pole} / p \cdot \lambda_{af})$$

식(9)

4.2 IPMSM의 운전

4.2.1 전류당 최대 토오크비 운전

SPMSM과는 달리 IPMSM에서는 L_d 와 L_q 가 서로 다른값을 가지고 있어 i_{d2} 성분도 토오크에 기여하게 된다. 그러므로 주어진 토오크에 따라서 i_{q2} 가 어떤 일정한 값을 갖지않게 되므로 주어진 토오크를 만족시키는 (i_{d2}, i_{q2})의 쌍은 다수개가 존재하게 된다. 따라서 전류당 토오크비를 최대로하는 운전점을 찾기 위해서는 주어진 토오크를 만족하는 (i_{d2}, i_{q2}) 쌍들 중에서 전류당 토오크비를 최대로하는 (i_{d2}, i_{q2}) 쌍을 찾는 것이다.

4.2.2 최대 효율운전

주어진 속도 토오크에서 최대 효율을 갖는 i_{d2}, i_{q2} 값을 찾을 수 있으며 또한 이 전류 값에 부하 전류를 더해 줌으로서 최대 효율을 갖는 (i_{d1}, i_{q1}) 쌍을 구할 수 있다. 그림 4는 300rpm과 정격속도인 2500rpm에서 부하증가에 따라 최대 효율을 갖는 부하전류 궤적의 변화를 보인 것이며, 그림 5,6,7,8은 최대 토크비 운전과 최대효율 운전을 비교한 것으로 정격부하 상태에서 속도의 변화에 따라 전류당 토오크비, 동손, 철손, 총손실의 변화를 보인 것이다. 최대 토오크비 운전시에 동손 최소운전이, 최대효율 운전시에 총손실 최소 운전이 됨을 알 수 있다.

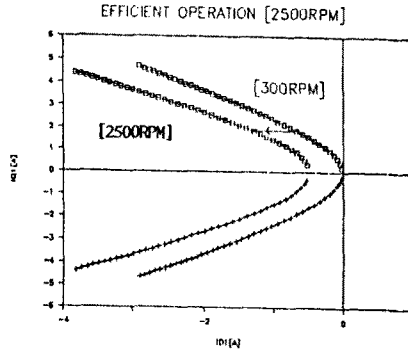


그림 4. 일정속도에서 부하변화에 따른 부하전류 궤적의 변화

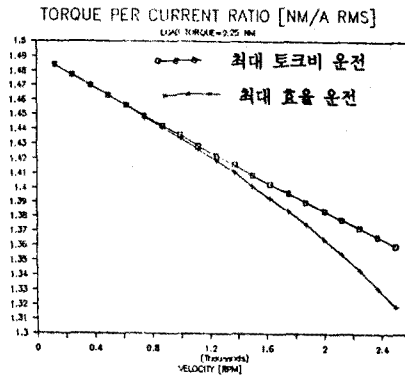


그림 5. 정격부하 상태에서 속도변화에 따른 전류당 토크비의 변화

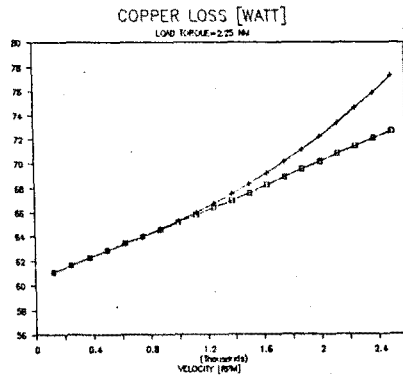


그림 6. 정격부하 상태에서 속도변화에 따른 동손의 변화

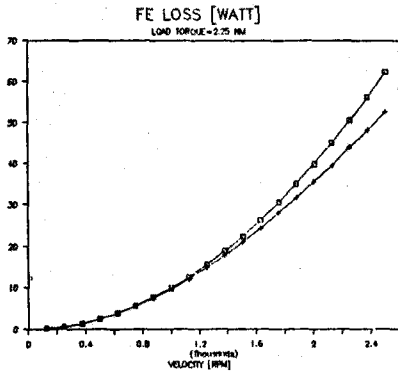


그림 7. 정격부하 상태에서 속도변화에 따른 철손의 변화

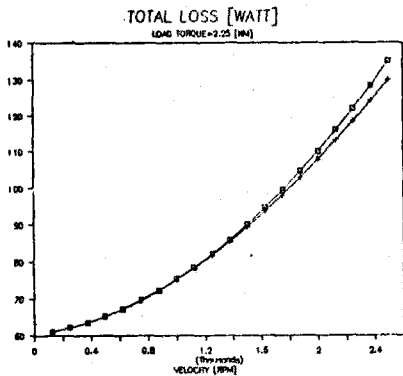


그림 8. 정격부하 상태에서 속도변화에 따른 총손실의 변화

5. 서보 시스템 구성

5.1 시스템 구성

PMSM이 전류당 최대토크비 운전궤적이거나 최대 효율 운전궤적을 정확히 추종하기 위하여는 정확한 전류제어기와 시스템 구성에 사용된 MICRO PROCESSOR와 같은 HARDWARE의 빠른 동작특성이 요구된다.

- 전류제어기

* HISTERESIS 전류제어기

- 전류 추종성이 좋다.
- 운전주파수가 낮으면 스위칭 주파수 상승
- 스위칭 주파수를 낮추면 토크 맥동과 전자소음이 증가

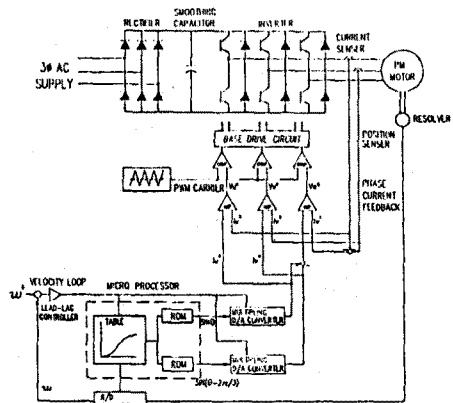
* 삼각파 전류제어기

- 운전주파수 상승에 따라 지령전류와 부하전류간에 크기와 위상의 오차 발생
- 인버터의 스위칭 주파수 제한

* 공간 전압 벡터 제어기

- 동일 인버터 스위칭 주파수에서 전류리플이 작으면서도 빠른 전류응답
- 고가의 연산처리장치(DSP) 소요

전류제어기의 종류로는 상기 기술된 바와 같이 상호 장단점이 있으나, 본 개발품에서는 삼각파 비교 PWM 제어방식을 적용하고 PI보상기를 부가하였다.



개발된 드라이브 구성도.

5.2 실험결과

당사 개발품인 SPMSM과 IPMSM 건본품을 대상으로 전류당 최대 토크비 운전을 실시한 결과를 제시하였다.

그림 9의 a는 철손이 없을 경우의 전류당 토크비를 나타내고 b와 c는 각각 SIMULATION과 실험에 의하여 구한 토크비를 보이고 있으며 d는 구성된 SYSTEM의 HARDWARE에 의한 위상지연을 보상하지 않았을 경우의 토크 비를 나타내고 있다.

그림 10은 IPMSM의 전류당 토크비를 보이고 있는 것으로 a가 SIMULATION한 것이고 b가 실험에 의하여 구한 것이다. 그림 11과 12는 IPMSM의 역기전력 모양과 속도응답을 보이고 있다.

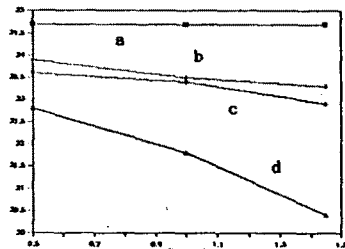


그림 9. SPMSM의 속도변화에 따른 전류당 토크비의 변화

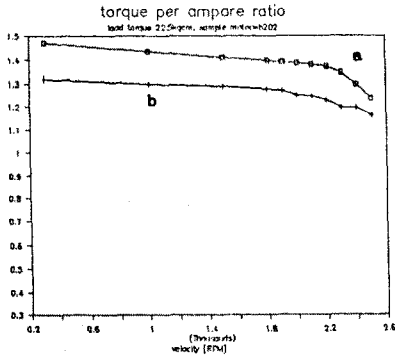


그림 10. IPMSM의 속도변화에 따른 전류당 토오크비의 변화

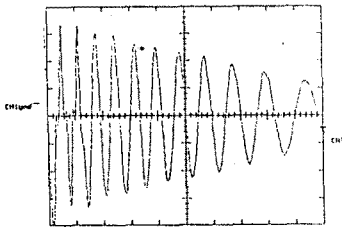


그림 11. IPMSM의 역기전력 파형

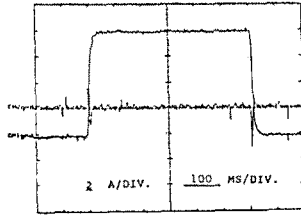


그림 12. IPMSM의 속도응답

6. 결 문

PMSM을 최소 손실로 운전하기 위한 방식으로 전류당 최대 토크비 운전과 최대 효율운전이 있는데, 최대 효율운전이 총손실(동손+철손)을 최소로 하는 운전으로 볼 수 있다. 제어시스템 구성에 있어서, 최대효율운전이 전류당 최대 토크비 운전에 비하여 복잡할 뿐 아니라, 보다 신속한 운전계획의 선택을 요하게 되므로 당 개발품에 대하여는 전류당 최대 토크비 운전방식을 채택하였다. 향후, 보다 정밀하고 효율좋은 제어기의 개발을 위해서는 고속연산 처리장치등을 사용하여 전류제어기의 공간 벡터방식 채용 및 최대 효율 운전 방식도 고려되어져야 할 것이다.

참 고 문 헌

- (1) R.S.Colby and D.W.Novotny, "Efficient operation of surface mounted PM synchronous motors," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. IA-23, PP. 1048-1054, Nov./Dec. 1987
- (2) T.M.Jahns, G.B.Kliman, T.W.Neuemann, "Interior Permanent Magnet Synchronous Motors for Adjustable Speed Drives," IEEE-IAS Ann.Mtg.Cong.Rec 1985, pp 814-823
- (3) S.Morimoto, Y. Takeda, T.Hirasa, "Current Phase Control Methods for Permanent Magnet Synchronous Motors" IEEE TRANSACTION ON POWER ELECTRONICS vol5.no.2 APRIL 1990.

표1. 전동기 사양

	단 위	SPMSM	IPMSM
출력	KW	3.58	0.6
정격속도(N.rtd)	rpm	1,450	2,500
최대속도(N.max)	rpm	1,850	2,500
연속토크오크(Stall)	Tc(N·M)	31.2	2.25
ROTOR INERTIA	kg·m	0.0126	0.0000996
역기전력 상수(Ke)	V/krpm	129	79.5
토크상수(Kt)	N·M/Arms	2.13	1.315