

## 영구자석 동기전동기의 약계자제어에 의한 고속 운전

\*윤 병 도, \*김 운 호, \*\*김 춘 삼, \*이 병 송, \*김 수 열  
\*중앙대학교, \*\*삼척 산업대학교

### Field Weakening Control of IPMSM for High Speed Operation

\*Byung-Do Yoon, \*Yoon-Ho Kim, \*\*Choon-Sam Kim, \*Byung-Song Lee, \*Soo-Yeol Kim  
\*Dept. of Electrical Eng., Chung-Ang Univ.,  
\*\*Dept. of Control & Instrumentation Eng., Sam-Chuk polytec. Univ.

**Abstract**

This paper describes current controlled PWM technique of IPM synchronous motors for a wide variety of speed control applications. The IPM synchronous motors have a saliency, in which the q-axis inductance is larger than the d-axis inductance. As a consequence, there exists a reluctance torque component. Thus when this component is added to the torque component produced by the stator currents and the air-gap flux, IPM motor drives are readily applicable where full torque is required up to full or base speed. They are however limited in their ability to operate in the power limited regime where the available torque is reduced as the speed is increased above its base value. This paper reviews the operation of the IPMSM drives when they are constrained to be within the permissible envelope of maximum inverter voltage and current to produce the rated power and to provide this with the highest attainable rotor speed.

The wide variety of speed control strategy is analyzed and the performance is investigated by the computer simulation using actual parameters of a drive system. Simulation results are given and discussed.

**1. 서 언**

현대 산업분야에서 교류 서어보 시스템의 PWM 인버터로 구동되는 영구자석 동기전동기(IPMSM)에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 현재 개발된 영구자석 동기전동기는 회전자에 영구자석이 설치된 위치에 따라 내심형 영구자석 동기전동기(Interior Permanent Magnet Synchronous Motor: IPMSM)와 표면 자석형 영구자석 동기전동기(Surface Permanent Magnet Synchronous Motor: SPMSM)로 분류할 수 있다.

본 논문에서 적용한 교류 서어보 전동기는 내심형 영구자석 동기전동기(IPMSM)로서 회전자가 영구자석으로 구성되어 관성이 작고 냉각이 용이하며 효율면에서 유도전동기보다 유리하다. [1][2] IPMSM은 기계적으로 강인하므로 고속운전의 적용에 유리하며, 유효공극이 작아 전기자 반작용의 효과에 중요한 특성을 가지고 있다. 이러한 점은 일정 토오크영역에서 뿐만 아니라, 정격속도이상의 약계자 영역(일정 출력)에서의 제어도 가능하게 한다. [5][6] 또한 IPMSM은 q축 인덕턴스가 d축 인덕턴스보다 상당히 크다. 이러한 특성은 토오크의 발생과 IPMSM의 계자자속에 직접적인 영향을 미치고, SPMSM과는 대조적으로 다음과 같은 잇점이 있다. 첫째로, 고속운전이 가능하며 둘째로, d, q축의 자화 인덕턴스의 차에 의한 리플턴스 토오크를 이용하는 잇점을 가지고 있다. [2][4] 반면, 빈번한 기동, 정지 및 가변속 운전을 연속적으로 시행하는 서보 시스템의 특징에 따르는 과도한 전기자 전류에 의한 BH 특성곡선상에서의 동작점의 변화와 온도의 상승에 따라 BH 특성을 일정하게 유지할 수 없게 되어 잠자현상을 초래할 수 있다. [3] 그러나, 제어기 출력에 대하여 최대전류 제한기를 적용함으로써 IPMSM의 기계적인 특성을 고려한 일정 토오크 동작모드에서의 운전 및 약계자영역에서 정격속도이상의 최대속도-토오크 특성에 대한 운전기법을 시뮬레이션을 통하여 고찰하였다.

**2. 영구자석 동기전동기의 수학적 모델링**

영구자석 동기전동기는 계자가 직류 전원에 의하여 여자되는 권선 계자형 동기전동기의 구조와 유사하며, 동기 각속도  $\omega_e$  로 회전하는 d-q 좌표계에 의한 전압 방정식으로 표현하면 식(1)과 같다.

$$V_{qds} = r_s i_{qds} + \omega_e \lambda_{ds} + p \lambda_{qds} \quad (1)$$

여기서,

$$\lambda_{ds} = [\lambda_{ds} - \lambda_{qs}]^T$$

식(1)을 d-q 성분별로 나타내면,

$$V_{qs} = r_s i_{qs} + \omega_e \lambda_{ds} + p \lambda_{qs}$$

$$V_{ds} = r_s i_{ds} - \omega_e \lambda_{qs} + p \lambda_{ds} \quad (2)$$

여기서,

$$\lambda_{qs} = L_q i_{qs}$$

$$\lambda_{ds} = L_d i_{ds} + \lambda_m \quad (3)$$

식(3)에서  $\lambda_m$ 은 영구자석에 의한 쇄고자속 벡터이며,  $L_d, L_q$ 는 d-q 축 자기인덕턴스이다.

영구자석 동기전동기의 발생토오크  $T_e$ 는

$$T_e = (P/2) [\lambda_{ds} i_{qs} - \lambda_{qs} i_{ds}] \quad (4)$$

이다. 식(3)의 관계를 고려하면 토오크  $T_e$ 는 식(5)와 같이 표현될 수 있다.

$$T_e = (P/2) [\lambda_m i_{qs} + (L_d - L_q) i_{ds} i_{qs}] \quad (5)$$

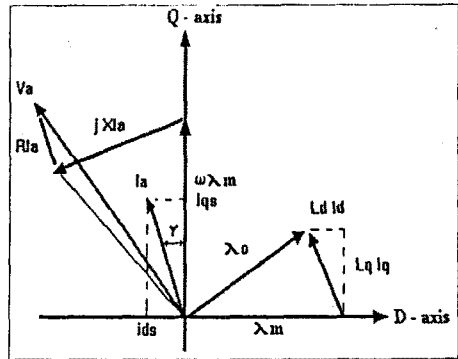


그림 1. IPMSM의 벡터圖  
Fig. 1. Vector diagram of IPMSM.

IPMSM의 벡터圖는 그림1.과 같다. 일정 토오크 동작모드 및 정격속도 이상의 고속운전에의 적용을 위한 전류위상각  $\gamma$ 를 제어하기 위한 벡터도를 나타낸다. 그림1.에서 전류위상각  $\gamma$ 를 고려한 전기자 전류  $i_{ds}, i_{qs}$ 는 식(6)과 같다.

$$i_{ds} = -I_a \sin \gamma, \quad i_{qs} = I_a \cos \gamma \quad (6)$$

전류  $I_a$ 와 위상각  $\gamma$ 를 이용하여 토오크  $T_e$ 를 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$T_e = \left(\frac{P}{2}\right) \left[ \lambda_m I_a \cos \gamma + \frac{1}{2} (L_q - L_d) I_a^2 \sin 2\gamma \right] \quad (7)$$

식(7)의 첫째항은 여자(Excitation)토크이며, 둘째항은 리터턴스 토크이다.

### 3. 일정 토크 및 약계자 동작모드의 전류제어

일정 토크에서는 전류 위상각  $\gamma$ 를 제어함으로써 정격속도 명령에 대하여 리터턴스 토크를 이용한 최대토크 운전이 가능하고, 그 이상의 속도명령에 대하여는 약계자 운전을 하므로써 고속운전을 할 수 있다. 전류명령  $I_a$ 와  $\gamma$ 의 관계에서 전류당 최대토크를 얻기위한 위상각  $\gamma$ 는 발생 토크 식(7)에서  $dT/d\gamma = 0$ 와  $d^2T/d\gamma^2 < 0$ 의 관계에서 식(8)과 같이 구할 수 있다.

$$\gamma = \sin^{-1} \frac{-\lambda_m \sqrt{\lambda_m^2 + 8(L_q - L_d)^2 I_a^2}}{4(L_q - L_d) I_a} \quad (8)$$

최대 토크운전에서 위상각  $\gamma$ 는 부하변동에 따른  $I_a$ 의 관계에 따라 제어된다. 따라서 최대 토크 제어에서 식(8)은  $I_a$ 의 함수이고, 전류 위상각  $\gamma$ 를 제어하므로써 리터턴스 성분을 효과적으로 이용하여 최대 전류 제한 범위를 고려한 최적의 토크 운전이 가능하고, 일정 토크 영역 및 약계자 영역에서의 운전에도 적용할 수 있다. 일정 토크 영역에서의 최대토크 제어 및 약계자 제어에서는 토크 명령의 크기에 따라 전류위상각이 변화하고, 전류 위상각 변화에 따른 영구자석의 동작점은 BH 곡선의 선형적인 구간내에서 운전되어야 하며, d축 자속채우수의 제한값  $\lambda_{dmin}$ 을 갖도록 하여야 한다. 이때 전류  $I_a$ 에 대한 전류 위상각  $\gamma$ 의 제어식은 식(9)와 같다.

$$\lambda_{dmin} = \mu_{rec} L_d I_a \sin \gamma + \lambda_m \quad (9)$$

여기서  $\mu_{rec}$ : 비투자율,

$\lambda_m$ : 영구자석의 채우자속.

영구자석 동기전동기의 인버터 용량을 고려한 전기자 전류 및 단자전압의 제한에 대한 원선도는 그림2와 같다.

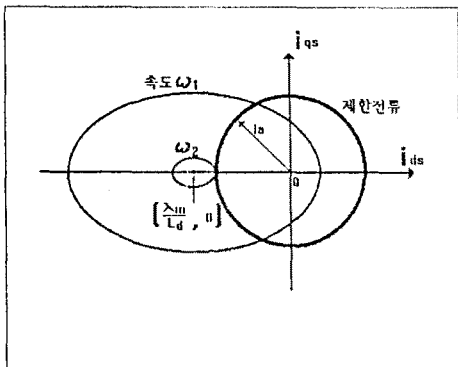


그림 2. 전기자 전류 및 단자전압의 원선도

Fig. 2. Current limit and voltage limit circle for IPMSM.

그림2.의 제한범위에서 시스템은 일정 토크 및 약계자 영역으로 운전되므로 영구자석의 감자현상은 발생하지 않게된다. 또한, 일정 토크영역에서 전압제한에따른 전동기의 운전 궤적은  $\omega_1$ 이 되고, 정격속도보다 큰속도명령이 가해지면 약계자 영역으로 동작하게되어 운전속도  $\omega_1$ 과  $\omega_2$ 사이의 궤적에서 운전되도록 위상각에 따른 전류명령이 인가된다. 약계자 영역 제어의 정상상태에서 저항을 무시한 전압방정식은 식(2)로부터 식(10)과 같이 유도될 수 있다.

$$V_a = \sqrt{(\omega_e \lambda_m + \omega_r L_d i_{ds})^2 + (\omega_e L_q i_{qs})^2} \quad (10)$$

또한, 식(6)의 관계에서 식(11)과 같이 나타낼 수 있고,

$$i_{qs} = \sqrt{i_a^2 - i_{ds}^2} \quad (11)$$

식(11)를 식(10)에 대입하여 정리하면 식(12)와 같다.

$$V_a = \omega_e \sqrt{(L_d^2 - L_q^2) i_{ds}^2 + 2 \lambda_m L_d i_{ds} + \lambda_m^2 + L_q^2 i_a^2} \quad (12)$$

또한, 인버터 포화전압을  $V_{lim}$ , 전동기의 정격전류를  $i_{lim}$ 라하면, 식(12)는 속도와 자속채우 전류만으로 나타내어질 수 있고, 이를 다시 d축 전류명령에 대한 식으로 나타내면 식(13)과 같다.

$$i_{ds} = \frac{-\lambda_m L_d + \sqrt{\lambda_m^2 L_d^2 - (L_d^2 - L_q^2)(\lambda_m^2 + L_q^2 i_{lim}^2 - (V/\omega_e)^2)}}{L_d - L_q} \quad (13)$$

식(13)의 관계에서 약계자 제어시의 토크 명령  $T_e^*$ 는 식(14)와 같다.

$$T_e^* = \frac{P}{2} (\lambda_m \sqrt{i_a^2 - i_{ds}^2} + (L_d - L_q) i_{ds} \sqrt{i_a^2 - i_{ds}^2}) \quad (14)$$

### 4. 일정 토크 및 약계자 제어 알고리즘의 구현

본 논문에서는 전류 위상각  $\gamma$ 의 변화에 따른 일정 토크 영역과 고속 운전을위한 약계자 영역에서의 동특성을 시뮬레이션을 통하여 고찰하였으며, 전체 제어 시스템의 구동을 위한 블록도는 그림 3.과 같다.

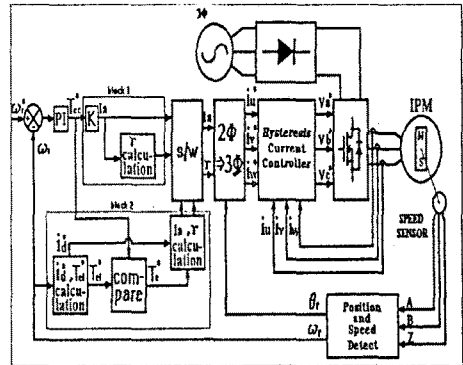


그림 3. IPMSM의 구동 시스템

Fig. 3. Scheme of drive system for IPMSM.

그림3.의 전체 속도제어 블록도에서 토크 명령은 속도명령  $\omega_r^*$ 과 실제 전동기속도  $\omega_r$ 의 속도오차를 입력으로 하는 PI 제어기에 의해서 발생하고, 일정 토크 동작모드와 약계자 동작모드에따라 소블럭 1,2로 구성된다. 여기서, 소블럭1.은 일정 토크 동작모드로서 최대 전류제한값의 정보를 가져야하며, 회전자의 속도  $\omega_r$  및 위치 정보  $\theta_r$  과함께 토크 명령에 따르는 고정자 전류의 기준명령과 전류위상각  $\gamma$ 를 연산한다. 또한, 소블럭2.는 약계자 동작모드로서 PI제어기의 토크 명령  $T_e^*$ 와 회전자 속도정보  $\omega_r$ , 그리고 최대 전류제한값의 정보를 가지고 약계자 영역에서의 고정자 전류 기준명령과 전류위상각  $\gamma$ 를 연산하여, 각각의 동작모드에따라 소블럭1,2.의 출력값은 2상 -> 3상 변환 블록을 통하여 상전류의 기준명령으로 인가된다.

제어블럭도에서  $T_e^*$ 는  $T_{ec}^*$ 와 비교되고,  $T_{ec}^*$ 가  $T_e^*$ 보다 클 경우에는  $T_{ec}^*$ 가 토크명령치  $T_e^*$ 가 되며,  $T_{ec}^*$ 가  $T_e^*$ 보다 작을 경우에는  $T_{ec}^*$ 가 토크명령치  $T_e^*$ 가 되어 식(15)와같은 토크 명령에따라 속도오차를 보상하여 추종하도록 한다.

$$T_e^* = \frac{P}{2} (\lambda_m i_q^* + (L_d - L_q) i_{ds}^* i_q^*) \quad (15)$$

이에 따른 q축 전류분류는 식(16)과 같이 표현된다.

$$i_q^* = \frac{T_e^*}{\frac{P}{2} (\lambda_m + (L_d - L_q) i_{ds}^*)} \quad (16)$$

그리고, 시스템 제어블럭도에 따른 전류명령의 입력은 식(17)과 같고, 위상각은 식(18)과 같다.

$$i_{ds}^* = \sqrt{i_a^{*2} - i_q^{*2}} \quad (17)$$

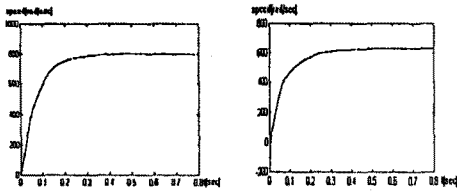
$$\gamma = \tan^{-1} \left( \frac{i_q^*}{i_{ds}^*} \right) \quad (18)$$

또한, 시스템에 인가되는 일정 토크 및 약계자 영역의 최종적인 상전류 명령은 식(19)와 같다.

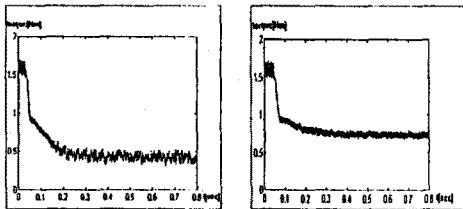
$$\begin{aligned} i_a^* &= I_a \sin(\theta_r + \gamma) \\ i_b^* &= I_a \sin(\theta_r + \gamma - 2\pi/3) \\ i_c^* &= I_a \sin(\theta_r + \gamma + 2\pi/3) \end{aligned} \quad (19)$$

## 5. 시뮬레이션 결과 및 검토

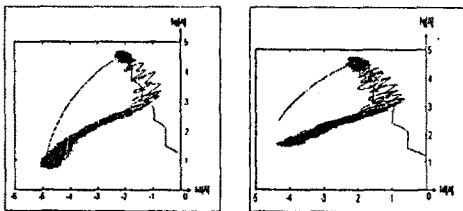
시뮬레이션 결과로 일정토크영역에서는 리퍼턴스토크를 이용한 최대토크로 운전하였고, 속도명령을 정격속도의 2배값으로 입력하였다. 실제 전동기는 정격속도의 2배를 다소 초과하는 속도까지 운전이 가능하다. 그림4. (a)는 무부하에서의 속도명령 800[rad/sec]에 대한 속도파형이고, 그림4. (b)는 부하 0.4[Nm]에 대한 속도응답 파형이다. 부하가 인가시에는 전동기의 속도가 입력을 따라가지 못함을 보여주는 데 이는 약계자 영역에서 속도제어 범위가 감소한다는 것을 알 수 있으나 일정토크로 제어할 때보다는 속도제어 범위가 크다. 그림5.는 이에 따른 토크 특성을 나타내고, 약계자 운전영역에서는 토크오류가 점차 감소함을 알 수 있다. 약계자 영역에서 전동기 속도가 증가함에 따라 위상각이 점차 증가하게되고, 이에 따르는 d축과 q축의 전류파형을 동기속도로 회전하는 d-q좌표계로 나타내면 그림6. (a)(b)와 같다. 기동시 정격속도의 2배로 입력이 가해지면 전동기는 일정토크영역으로 운전되고, 최대전류 5[A]와 위상각 24.5[deg]에서 약계자 영역으로 전환하게 된다. 이 약계자 영역에서는 속도명령에 따라 전류위상각이 연산되어 시스템의 제어입력으로 인가되고, 전동기는 전류제한값으로 운전될 전류 원선도 그림6.으로써 알 수 있다. 그림6. (a)와 (b)의 비교에서 알 수 있듯이 부하 인가시에는 q축 전류의 값이 무부하시보다 더 크게되므로 전동기 속도제어범위가 감소함을 알 수 있다. 그림7.은 상전류 파형으로써 속도가 증가함에 따라 전류파형의 주파수가 빨라짐을 볼 수 있다.



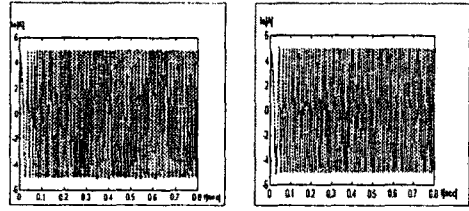
(a)속도(TI=0) (b)속도(TI=0.4)  
그림 4. 속도 파형  
Fig. 4. Speed waveform.



(a)토크(TI=0) (b)토크(TI=0.4)  
그림 5. 토크 파형  
Fig. 5. torque waveform.



(a)전류원선도(TI=0) (b)전류 원선도(TI=0.4)  
그림 6. 전류 원선도 파형  
Fig. 6. current circle waveform.



(a)상전류(TI=0) (b)상전류(TI=0.4)  
그림 7. 상전류 파형  
Fig. 7. phase current waveform.

## 6. 결론

본 논문에서는 서보 시스템의 동특성을 향상하기 위하여 일정토크 영역에서는 최대토크를 발생하도록 전류 위상각을 제어하고, 인버터의 용량을 고려한 최대 전류와 전압의 제한 범위에서 약계자 제어이론을 IPMSM에 적용하여 약계자 영역에서 최대속도-토크 특성을 고찰하였다.

IPMSM의 기계적 특성은 SPMSM에 비하여 기계적으로 강인하여 고속운전의 적용에 적합하고, 회전자 속도의 변화에 따라 전기자 전류의 d축 및 q축성분을 제어하므로서 약계자 제어이론을 적용하여 운전영역을 정격속도 이상으로 확장할 수 있다. 시뮬레이션의 실행 과정에서 과도상태의 특성항상을 위해 일정토크 영역과 약계자 영역의 제어 불럭을 동작 모드에 따라 구분지어 제어하므로서 제어알고리즘이 간단하고, 실제실험에 적용할 경우 구현이 용이할것으로 사료된다.

### 參考 文獻.

- [1] Peter Vas " Vector Control of AC Machines. " pp.87 - 97, 1990.
- [2] P.Pillay and Krishnan " Application Characteristics of Permanent Magnet Synchronous and Brushless DC Motors for Servo Drives " IAS Annual Meeting, pp.380 - 390, 1987.
- [3] T.J.E. Miller "Brushless Permanent- Magnet and Reluctance Motor Drives " pp.34 - 50, pp.88 - 117, 1989.
- [4] Yoji Takeda & Takao Hirasu. " Current Phase Control Method for Magnet Synchronous Motors considering Saliency. " PESC '88 RECORD, pp.409 - 414, April 1988.
- [5] Shigeo Morimoto, Keita Hatanaka, Yi Tong, Yoji Takeda & Takao Hirasu. " Servo Drive System and Control Characteristics of Salient Pole PMSM " IEEE Trans. on Industrial Applications, pp.338 - 343, March/April 1993.
- [6] Shigeo Morimoto, Yoji Takeda, Takao Hirasu & Katsunori Taniguchi. "Expansion of Operating Limits for Permanent Magnet Motor by Current Vector Control considering Inverter Capacity" IEEE Trans. on Industrial Applications, pp.866 - 871, Sept./Oct.1990.