

Five-Phase IPM Motor의 약계자 제어

김남훈*, 김민희**, 백원식***, 환돈하****, 김 동희***
 Texas A&M Univ.*, 영남이공대학교**, 영남대학교***, 한국 전기연구원****

Field Weakening Control for Five-Phase IPM Motor

Nam-Hun Kim*, Min-Huei KIM**, Won-Sik BAIK***. Don-Hwa Hwang****, Dong-Hee KIM***
 *Texas A&M Univ., **Yeungnam College of Science & Technology, ***Yeungnam University, ****KERI

Abstract

This paper investigates the field weakening operation of a five-phase IPMSM(inner permanent magnet synchronous motor). The five-phase motor can supply sinusoidal voltage and third harmonic voltage because of more freedom of control. This paper present field weakening algorithm and experimental results for five-phase IPMSM which has trapzoidal back-EMF and concentrate winding to prove the validity of the proposed algorithm.

Keywords : Field weakening control, Five-phase motor, IPM.

1. 서 론

최근, 전력전자의 발전과 전동기 신뢰성 문제에 대한 관심이 고조되면서 다상 전동기(Multi-phase motors)에 대해 많이 연구가 이루어지고 있으며, 특히 5상 기기(Five-phase machines)가 현재 많이 사용되고 있는 3상 기기(Three-phase machines)에 대한 대안으로 제시되어지고 있다. 5상 전동기는 같은 정격의 3상 전동기에 비해 상당 적은 정격전류를 가짐으로써 더 간단하면서 더 신뢰성 있는 등가회로를 구성 할 수 있고, 큰 토크밀도를 가지며, 높은 효율, 토크 맥동의 감소, fault tolerance 그리고 노이즈 특성 개선 효과를 가진다는 장점을 가진다^[6].

PM(Permanent Magnet) Motor는 크게 사인파의 역기전력을 가지는 PMAC 전동기와 구형파형태의 역기전력을 가지는 BLDC 전동기로 구분된다. BLDC 전동기의 경우는 PMAC전동기에 비해서 정격 속도 이하에서 높은 토크밀도를 가진다는 이점을 가지고 있다. 그러나 정격 이상의 속도영역에서는 Advance angle technic을 사용한 약계자 제어를 사용하기 때문에 정확하면서 정밀한 제어를 하기가 어렵다는 단점을 가지고 있고 advance angle제어로 인해 다른 상의 전류를 야기해서 토크를 감소시킨다는 문제점을 가지고 있다. 사인형태의 역기전력을 가지는 PMAC 전동기의 경우는 좌표변환을 이용하여 자속성분과 토크성분으로 구분할 수 있으며, 벡터제어나 기타 advanced control을 이용하여, 좀 더 안정적이고 정밀한 약계자 영역 제어가 가능하다는 장점을 가진다.

따라서 본 논문에서는 5상 매입형 영구자석 전동기의 약계자 제어를 위해서 프로토타입으로 제작된 IPM전동기를 사용하였다. 그리고 드라이브 구성을 위해 TI사에서 전동기 제어 전용으로 개발된 TMS320F2812 DSP보드를 사용하여 최소한의 하드웨어를 이용하여 디지털적으로 구성하였으며, SEMIKRON의 IGBT인버터를 이용하여 전력 변환부를 구성하였다. 또한 5상 매입형 영구자석 전동기를 이용한 약계자 제어에 대한 특성을 실험적으로 살펴보았다.

2. 5상 IPM전동기

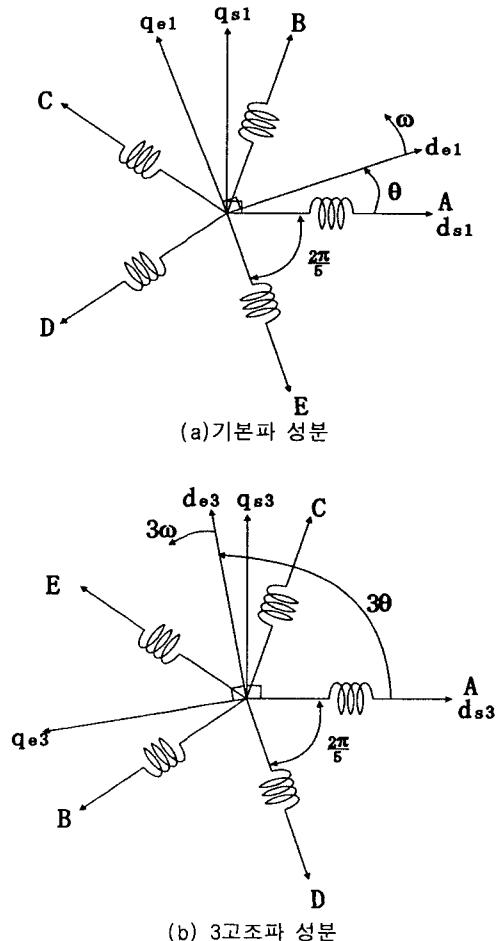


Fig. 1 5상전동기 벡터 다이어그램

5상 매입형 영구자석 전동기를 등가화 하기 위해서 좌표 변환이 사용되었다. 좌표변환에는 기본과 성분과 3고조파 성분을 고려하였으며, 기본과 성분은 동기속도로 회전하는 성분이며 3고조파 성분은 동기속도에 비해 3배의 속도로 회전하는 성분이다. 5상 전동기는 a, b, c, d 그리고 e 의 고정자 축이 그림 1과 같은 등가적으로 나타낼 수 있다 [1,5].

5상전동기 모델의 간략화를 위하여 좌표변환을 사용하고, 좌표변환에서는 기본과 성분과 3고조파 성분만을 고려하며, 기본과 성분은 동기속도로 회전하는 좌표계이고 3고조파 성분은 동기속도에 3배로 회전하는 좌표계이다. 식(1)은 5상 성분은 기본과 성분과 3고조파 성분을 변환하는 매트릭스를 보여주고 있다. 식(2)-(5)는 5상 IPMSM의 동기좌표계에서의 전압방정식을 나타내고 있으며, 식(6)은 토오크 방정식을 나타내고 있다[2].

$$f_{dqe1dq3} = T(\theta)f_{abcde} \quad (1)$$

$$T(\theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{5}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{5}) & \cos(\theta + \frac{4\pi}{5}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{5}) \\ \sin\theta & \sin(\theta - \frac{2\pi}{5}) & \sin(\theta - \frac{4\pi}{5}) & \sin(\theta + \frac{4\pi}{5}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{5}) \\ \frac{2}{5} \cos 3\theta & \frac{2}{5} \cos 3(\theta - \frac{2\pi}{5}) & \frac{2}{5} \cos 3(\theta - \frac{4\pi}{5}) & \frac{2}{5} \cos 3(\theta + \frac{4\pi}{5}) & \frac{2}{5} \cos 3(\theta + \frac{2\pi}{5}) \\ \frac{2}{5} \sin 3\theta & \frac{2}{5} \sin 3(\theta - \frac{2\pi}{5}) & \frac{2}{5} \sin 3(\theta - \frac{4\pi}{5}) & \frac{2}{5} \sin 3(\theta + \frac{4\pi}{5}) & \frac{2}{5} \sin 3(\theta + \frac{2\pi}{5}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$$

여기서, $f_{dqe1dq3}$ 은 회전좌표계에서 본 기본과성분과, 3고조파 성분이고, f_{abcde} 는 5상 성분을 나타낸다.

$$V_{de1} = R_s I_{de1} - \Psi_{qe1} \omega + \frac{d\Psi_{de1}}{dt} \quad (2)$$

$$V_{qe1} = R_s I_{qe1} + \omega \Psi_{de1} + \frac{d\Psi_{qe1}}{dt} \quad (3)$$

$$V_{de3} = R_s I_{de3} - 3\omega \Psi_{qe3} + \frac{d\Psi_{de3}}{dt} \quad (4)$$

$$V_{qe3} = R_s I_{qe3} + 3\omega \Psi_{de3} + \frac{d\Psi_{qe3}}{dt} \quad (5)$$

$$T_e = \frac{5}{2} \frac{P}{2} (\Psi_{de1} I_{qe1} - \Psi_{qe1} I_{de1} + 3\Psi_{de3} I_{qe3} - 3\Psi_{qe3} I_{de3}) \quad (6)$$

여기서, $I_{de1}, I_{qe1}, I_{de3}, I_{qe1}$ 은 회전좌표계로 변환된 전류이다. $\Psi_{de1}, \Psi_{qe1}, \Psi_{de3}, \Psi_{qe3}$ 은 회전좌표계로 변환된 회전자 쇄교자속을 나타낸다.

3. 약계자 제어

인버터를 통해서 전동기에 인가될 수 있는 최대 전압은 DC링크 전압에 의해서 제한되고, 최대 전류 역시 인버터 전류 정격에 의해서 제한되며, 이러한 관계는 아래와 같은 수식으로 나타낼 수 있다[3].

$$I_{rate} \geq \sqrt{I_{de}^2 + I_{qe}^2} \quad (7)$$

$$V_{rate} \geq \sqrt{V_{de}^2 + V_{qe}^2} \quad (8)$$

$$\text{여기서, } I_{de} = \sqrt{I_{de1}^2 + I_{de3}^2}, \quad I_{qe} = \sqrt{I_{qe1}^2 + I_{qe3}^2}, \quad (9)$$

$$V_{de} = \sqrt{V_{de1}^2 + V_{de3}^2}, \quad V_{qe} = \sqrt{V_{qe1}^2 + V_{qe3}^2} \quad (10)$$

전압과 전류는 약계자 영역에 있어서 전동기에 공급할 수 있는 토크를 결정한다. 그러므로 부하의 상태와 기기의 파라미터에 따라서 적절한 전압과 전류를 공급해주는 것이 매우 중요하다. 전동기 전압방정식, (2)-(5) 과 (7)-(10)를 이용하면 다음과 같은 수식을 유도할 수 있다.

$$\omega_{base} = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad (11)$$

여기서,

$$a = (L_{q1}^2 I_{qe1}^2 + L_{d1}^2 I_{de1}^2 + 9L_{q3}^2 I_{qe3}^2 + \Psi_{m1}^2 + 9\Psi_{m3}^2 + 2\Psi_{m1} I_{de1} L_{d1} + 18\Psi_{m3} I_{de3} L_{d3})$$

$$b = -2R_s I_{de1} L_{q1} I_{qe1} + 2R_s I_{qe1} L_{d1} I_{de1} + 2R_s I_{qe1} \Psi_{m1}$$

$$-6R_s I_{de3} L_{q1} I_{qe3} + 6R_s I_{qe3} L_{d3} I_{de3} + 6R_s I_{qe3} \Psi_{m3}$$

$$c = R_s^2 (I_{qe1}^2 + I_{de1}^2 + I_{qe3}^2 + I_{de3}^2) - V_{rate}^2$$

고속 영역에서, 전동기의 속도는 회전자에 있는 자속성

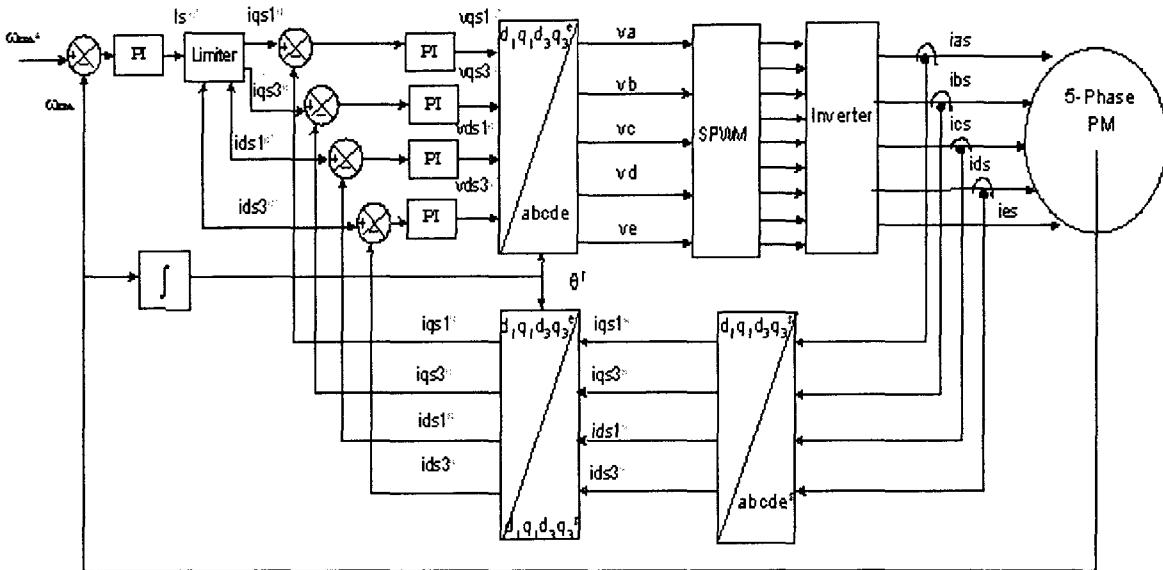


그림 2 시스템 구성도

분 그리고 d축과 q축의 인덕턴스에 성분에 의해서 영향을 받는다. 그러므로 약계자 제어를 위해서는 d축의 자속 성분의 전류를 속도에 따라서 조정하면 쉽게 구현할 수 있다. 만약 약계자 제어동안 기본파 전압 성분이 최대 전압과 같다고 하고, 고정자 저항을 무시하면 다음과 같이 I_{de} 를 구할 수 있다.

$$I_{de} = \frac{\sqrt{4L_{dl}^2 \psi_{ml}^2 - 4(L_{dl}^2 - L_{ql}^2)(\psi_M^2 + L_{ql}^2 I_{rate}^2 - \frac{V_{rate}^2}{\omega})}}{2(L_{dl}^2 - L_{ql}^2)} + \frac{-2L_{dl} \psi_{ml}}{2(L_{dl}^2 - L_{ql}^2)} \quad (12)$$

여기서

$$I_{qe1} = \sqrt{I_{rate}^2 - I_{del}^2} \quad (13)$$

$$I_{de3} = KV \sqrt{I_{del}^2 + I_{qs1}^2} \sin(3(\tan^{-1}(\frac{I_{del}}{I_{qe1}}))) \quad (14)$$

$$I_{qe3} = KV \sqrt{I_{del}^2 + I_{qe}^2} \cos(3(\tan^{-1}(\frac{I_{del}}{I_{qe1}}))) \quad (15)$$

여기서, $K=0.15$ 이다.

4. 시스템 구성

그림2는 실험에 적용된 5상 IPMSM의 전체 실험 시스템을 보여주고 있다. 5상 약계자 제어 드라이브를 위해서 Texas Instruments 사에서 전동기 구동 전용으로 제작된 TMS320F2812 DSP를 사용하였으며, 5상 인버터를 구성하기 위해 Semikron의 SKHI22와 SKM50GB를 이용하여 5상 VSI(Voltage source inverter)를 제작하였다. 하나의 PI 속도 제어를 사용하고 있으며, 기본파 성분과 3고조파 전류 성분을 각각 제어하기 위해서 4개의 전류제어기로 구성되어 있다. PWM 방식은 Sine PWM을 사용하고 있으며, 4개의 전류센서와 속도측정과 위치 판단정보를 위해서 Incremental Encoder를 사용하고 있다. 그림 3은 실제 실험에 적용된 프로토타입으로 제작된 전동기를 보여주고 있다.

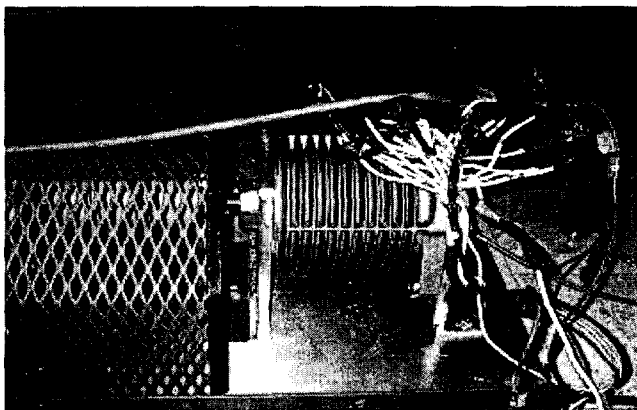


그림 3 실험에 사용된 IPM 동기전동기

5. 실험 결과

그림 4는 기준속도를 2700[rpm]으로 주었을 경우 실제 속도와 기준속도를 보여주고 있으며, 그림 5는 각각의 전류 파형을 보여주고 있다. 2000[rpm]정도부터 약계자 제어가 실행되고 있으며, 잘 추종하고 있음을 보여주고 있다.

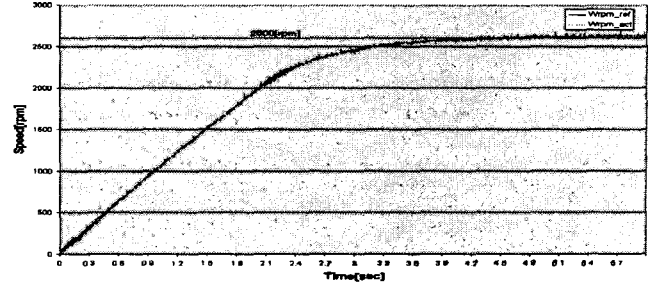


그림 4 기준속도와 실제 속도

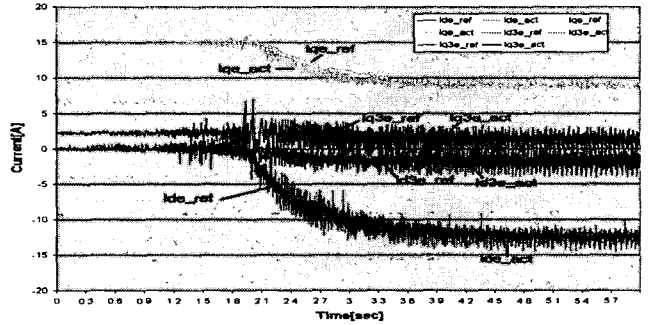


그림 5 전류 파형

6. 결 과

본 논문에서는 구형파의 역기전력을 가지는 Five-phase IPM의 약계자 영역에 대해서 제안하였다. 수학적 모델을 기본으로 하여, 기본파 성분과 3고조파 성분을 제어함으로써 약계자 제어를 구현하였다. 실험을 통하여 제안된 알고리즘을 검증하였다.

참 고 문 헌

- [1] Leila P. and Hamid A. Toliyat, "Five-phase permanent-magnet motor drives", IEEE Trans. on IA, Vol. 41, pp 30-37, Jan./Feb. 2005.
- [2] R. Shi, Hamid A. Toliyat, and A. El-Antably, "A dsp-based direct torque control of five-phase synchronous reluctance motor drive", APEC 2001, Vol. 2, pp. 1077-1082, March 2001.
- [3] W. L. Soong, and T.J.E Miller "Field-weakening performance of brushless synchronous AC motor drives" IEE Proceedings Electric Power Applications, Volume 141, Nov. 1994 pp. 331 - 340.
- [4] H. Xu, Hamid A. Toliyat, and Lynn J. Pertersen, "Five-phase induction motor drives with dsp-based control system", IEEE Trans. on PE, Vol 17, pp 524-533, July 2002.
- [5] Hamid A. Toliyat, S. Waikar, and T.A. Lipo, "dq modeling of five phase synchronous reluctance machines including third harmonic of air-gap MMF", in Proc. Conf. Rec. IEEE-IAS Ann. Meeting, pp. 231-237, Oct. 1991.
- [6] Hamid A. Toliyat, Shailesh P. Waikar, and T.A. Lipo, "Analysis and simulation of five-phase synchronous reluctance machines including third harmonic of airgap mmf", IEEE Trans. on IA, Vol. 34, pp. 332-339, March/April 1998.