

# 고밀도 토크를 가지는 5상 영구자석형 전동기의 약계자 제어

金男堯†

## Field Weakening Operation of a High Torque Density Five Phase Permanent Magnet Motor Drive

Nam-Hun Kim

### 요 약

본 논문에서는 영구자석형 5상 전동기(Five-phase permanent magnet motor)의 약계자 제어에 대한 연구를 수행한다. 제안된 전동기는 집중권 방식의 권선분포를 가지고 있고 사다리꼴 형태의 역기전력을 나타내고 있으며, 사다리꼴 형태의 전류를 인가하기 위하여 사인파의 기본파 성분과 3고조파 성분을 첨가하였다. 따라서 BLDC 전동기(Brushless dc motor)와 등가적으로 같은 평균토크를 발생시키면서 BLDC 전동기의 단점을 극복할 수 있었다. 전동기 전류의 토크성분과 자속성분은 다중 레퍼런스 프레임을 이용하여 분리할 수 있었으며, 결과적으로 쉽게 벡터제어가 이루어질 수 있었다. 사용된 전동기는 고속영역에서부터 저속영역까지 BLDC 전동기와 같이 높은 토크 밀도를 가지며, 약계자 영역이나 고속영역에서 영구자석형 전동기와 같이 제어의 용이함을 가진다는 장점을 가지고 있으며 실험결과를 통하여 제안된 전동기와 알고리즘을 검증하였다.

### ABSTRACT

This paper investigates the field weakening operation of a five-phase permanent magnet motor. The proposed motor has concentrated windings such that the produced back-EMF is almost trapezoidal and is supplied with the combined sinusoidal plus third harmonic of currents to produce trapezoidal current. Therefore this motor, while generating the same average torque as an equivalent permanent magnet brushless dc motor, overcomes its disadvantages. It is shown that torque producing and flux producing components of current for this motor can be decoupled by using multiple reference frame transformation. Therefore, Vector control is easily applicable to the motor. This motor has benefits such as high torque density of a BLDC motor below the rated speed and controllability of PMSM above the rated speed and during the field weakening region and simulation and experimental results are provided to prove the validity of the superior performance of this drive.

**Key Words** : Five-phase motor, Field weakening, Multiple reference frame, Permanent magnet motor

### 1. 서 론

다상 전동기(Multi-phase motor)는 일반적인 단상 전

동기(Single-phase motor)에 비해서 추가적인 자유도를 가진다는 장점을 가지고 있으며, 일반적으로 산업 분야에서 가장 많이 사용되고 있는 삼상 전동기(three-phase motor)에 비해서 아래와 같은 장점을 가진다<sup>[4-6]</sup>.

- 상당(per phase) 전압의 변화없이 상당 전류의 크기가 감소.
- 토크의 맥동주파수를 증가시킴으로써 토크 리플

†교신저자 : 정희원, 청주대 전자정보공학부 전임강사

E-mail : nhkim@cju.ac.kr

접수일자 : 2007. 4. 17

2차 심사 : 2007. 7. 13

1차 심사 : 2007. 5. 17

심사완료 : 2007. 7. 16

- 감소.
- 전동기의 파워의 변화없이 상당 토크 크기 감소.
- 시스템의 신뢰성 증가.
- 자유도가 증가되고 이를 통해 고조파 전류의 투입이 가능.

지금까지 다상 전동기의 용도는 특수한 영역에 제한되어서 사용되고 있다. 예를 들면 높은 신뢰성이 요구되는 전기자동차나 하이브리드 자동차 영역, 항공산업, 선박 추진시스템 등에 부분적으로 사용되고 있고 있다. 또한 일반적으로 사용되는 삼상 전력변환 시스템보다 많은 스위칭 소자를 사용해야 되고 시스템을 새로 구성해야 한다는 단점이 있다. 그렇지만 고전력 응용(high power application) 같은 드라이브 시스템은 인버터단에 하나의 레그를 구성하기 위해서 여러 개의 스위칭 디바이스를 사용하기 때문에 다상 시스템을 위한 드라이브 시스템의 구성은 그리 어렵지 않은 실정이다.

영구 자석형(Permanent magnet) 전동기는 PMAC(Permanent magnet AC)전동기와 BLDC(Brushless DC)전동기로 나눌 수 있다. PMAC 전동기의 고정자 권선은 역기전력을 사인형태로 만들기 위해서 감겨져 있으며, BLDC 전동기의 고정자 권선은 역기전력을 사다리꼴 형태로 만들기 위해서 감겨져 있다. 그러므로 PMAC 전동기와 BLDC 전동기에는 각각 일정한 토크를 발생시키기 위해서 사인형태의 전류와 사다리꼴 형태의 전류가 인가된다<sup>1, 2, 3</sup>.

BLDC 전동기의 장점은 PMAC전동기에 비해서 높은 토크 밀도를 가진다는 장점이 있으며, 정격속도 영역 이상에서의 운전에서는 진상각 제어방법(advance angle control technique)을 써서 운전이 가능하다<sup>10,11</sup>. 그러나 진상각 제어방법은 임의의 속도와 토크를 얻기 위해서 정확한 진상각을 찾는 것이 어려우며, 정격속도 이상에서 정확한 토크제어와 속도제어가 어렵고, 진상각으로 인해 다른 상에 전류를 야기시켜 토크를 감소시킨다는 단점이 있다. 따라서 PMAC 전동기의 약계자 제어에 비해서 정밀한 제어 특성을 얻지 못한다.

사인형태의 역기전력을 가지는 PMAC 전동기는 좌표 변환을 이용해서 토크성분의 전류와 자속성분의 전류를 구분할 수 있으며, FOC(Field oriented control)나 직접토크제어(Direct torque control) 같은 제어 기법을 통해서 좀 더 정확한 토크제어나 속도 제어가 가능하다<sup>8</sup>.

이러한 관점에서 5상 BPM(Five-phase brushless

permanent magnet) 전동기가 사용되었다. 사용된 전동기의 고정자의 권선은 역기전력이 사다리꼴을 가지는 가지를 감겨졌으며, 그림 1에서와 같이 토크를 만들기 위해서 사인형태의 기본파성분과 3고조파 성분의 전류를 결합하여 사다리꼴형태의 전류를 만들었다<sup>7</sup>. 사용된 5상 BPM 전동기의 수학적 모델과 약계자 영역에 대한 수식 전개는 다음장에 언급되어 있다. 그리고 드라이브 구성을 위해 Texas Instruments사에서 전동기 제어 전용으로 개발된 TMS320F2812 DSP 보드를 사용하여 최소한의 하드웨어를 이용하여 디지털적으로 구성하였으며, SEMIKRON의 IGBT인버터를 이용하여 전력 변환부를 구성하였다. 또한 5상 IPM(Interior permanent magnet) 전동기를 이용한 약계자 제어에 대한 특성을 실험적으로 살펴보았다.

## 2. Five-phase Permanent magnet motor

5상 IPM 전동기를 등가화 하기 위해서 좌표변환이 사용되었으며 좌표변환에는 기본파 성분과 3고조파 성분이 고려되었다. 기본파 성분은 동기속도로 회전하는 성분이며 3고조파 성분은 동기속도에 비해 3배의 속도로 회전하는 성분이다. 그림2의 등가회로에서 볼 수 있듯이 5상 전동기는 A, B, C, D, E의 고정 좌표계의 값들과  $de1, qe1, de3, qe3$ 과 같은 회전좌표계로 나타낼 수 있다<sup>11,15,19</sup>.

5상전동기 모델의 간략화를 위하여 좌표변환을 사용하고, 좌표변환에서는 기본파 성분과 3고조파 성분만을 고려하며, 기본파 성분은 동기속도로 회전하는 좌표계이고 3고조파 성분은 동기속도에 3배로 회전하는 좌표계이다.

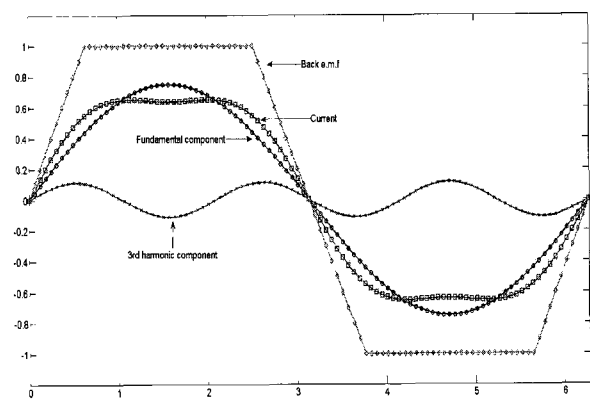


그림 1 5상 BPM의 역기전압 과 전류파형  
Fig. 1 Back e.m.f and current waveforms

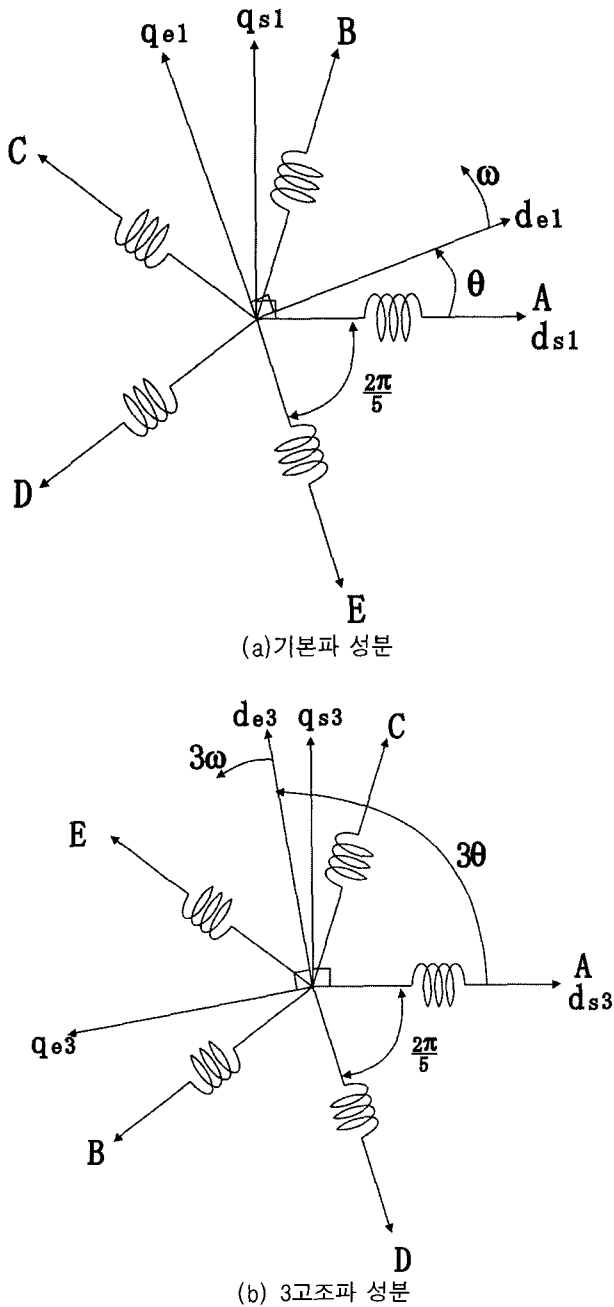


그림 2 5상 전동기의 벡터 다이어그램  
Fig. 2 The vector diagram of five phase motor

고정자 전압 방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_s = R_s I_s + \frac{d\Psi_s}{dt} \quad (1)$$

여기서  $R_s$ ,  $I_s$  그리고  $\Psi_s$ 는 고정자 저항, 회전자 전

류 그리고 쇄교자속 매트릭스를 각각 나타내고 있다. 공극 쇄교 자속은 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\Psi_s = \Psi_{ss} + \Psi_m \quad (2)$$

식(3)은 5상 성분은 기본파 성분과 3고조파 성분을 변환하는 매트릭스를 보여주고 있다. 식(5)-(8)는 5상 IPMSM의 동기좌표계에서의 전압방정식을 나타내고 있다<sup>[2]</sup>.

$$f_{dq1dq3} = T(\theta) f_{abde} \quad (3)$$

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

여기서,  $f_{dq1dq3}$ 은 회전좌표계에서 본 기본파성분과, 3고조파 성분이고,  $f_{abde}$ 는 고정좌표계에서 본 성분을 나타낸다.

$$V_{de1} = R_s I_{de1} - \omega \Psi_{qe1} + \frac{d\Psi_{de1}}{dt} \quad (5)$$

$$V_{qe1} = R_s I_{qe1} + \omega \Psi_{de1} + \frac{d\Psi_{qe1}}{dt} \quad (6)$$

$$V_{de3} = R_s I_{de3} - 3\omega \Psi_{qe3} + \frac{d\Psi_{de3}}{dt} \quad (7)$$

$$V_{qe3} = R_s I_{qe3} + 3\omega \Psi_{de3} + \frac{d\Psi_{qe3}}{dt} \quad (8)$$

전동기의 토크는 아래와 같이 결정된다.

$$T_e = \frac{\partial W_{co}}{\partial \theta} \quad (9)$$



성분이 최대 전압과 같다고 하고, 고정자 저항을 무시하면 다음과 같이  $I_{de1}$  를 구할 수 있다.

$$I_{de} = \frac{\sqrt{L_{dl}^2 \Psi_{m1}^2 - (L_{dl}^2 - L_{ql}^2)(\Psi_{m1}^2 + L_{ql}^2 I_{rate}^2 - \frac{V_{rate}^2}{\omega})}}{(L_{dl}^2 - L_{ql}^2)} - \frac{L_{dl} \Psi_{m1}}{L_{dl}^2 - L_{ql}^2} \quad (17)$$

여기서

$$I_{qe1} = \sqrt{I_{rate}^2 - I_{de1}^2} \quad (18)$$

$$I_{de3} = K \sqrt{I_{de1}^2 + I_{qe1}^2} \sin(3(\tan^{-1}(\frac{I_{de1}}{I_{qe1}}))) \quad (19)$$

$$I_{qe3} = K \sqrt{I_{de1}^2 + I_{qe1}^2} \cos(3(\tan^{-1}(\frac{I_{de1}}{I_{qe1}}))) \quad (20)$$

여기서,  $K=0.15$ 이다.

#### 4. 시스템 구성

그림3은 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.

정밀한 속도 제어를 위하여 PI 제어기를 사용하고 있으며, 기본과 성분 전류를 제어하기 위해서 2개의 PI 제어기를 사용하고, 3고조파 전류 성분을 제어하기 위해서 2개의 PI 제어기를 사용하였다. 전동기에 인가되는 전압을 만들어 주기 위해서 Sine PWM(Pulse width modulation)을 사용하고 있으며, 전동기의 전류 정보를 얻기 위해서 4개의 전류센서를 사용 하였다. 속도측정과 위치 판단정보를 위해서 Incremental Encoder를 사용하고 있고, 엔코더 신호가 노이즈나 시스템의 오동작으로부터의 정확한 전동기의 위치를 측정하기 위해서 엔코더의 index pulse를 이용하여 위치를 보정하고 있다. 그림 4는 실제 실험에 적용된 프로토타입으로 제작된 전동기를 보여주고 있다.

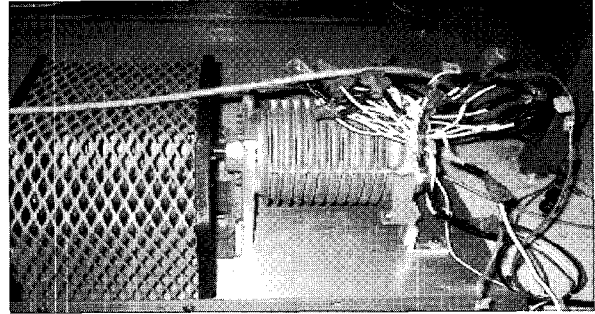


그림 4 사용된 IPM 전동기  
Fig. 4 Proposed IPM Synchronous Motor

#### 5. 실험 결과

그림 5는 기준속도를 2700[rpm]으로 주었을 경우 실제 속도와 기준속도를 보여주고 있으며, 그림 6은 각각의 전류 파형을 보여주고 있다. 최대토크를 얻기 위해서 역기전력과 같은 사다리꼴의 전류를 만들어주기 위해서 기본과 성분과 기본과성분의 15% 3고조파 전류성분을 주입하고 있으며, 2000[rpm]정도부터 약계자 제어가 실행되고 있고, 잘 추종하고 있음을 보여주고 있다.

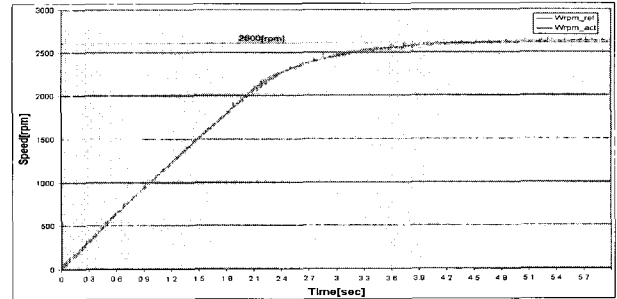


그림 5 기준속도와 실제 속도  
Fig. 5 Reference speed and actual speed

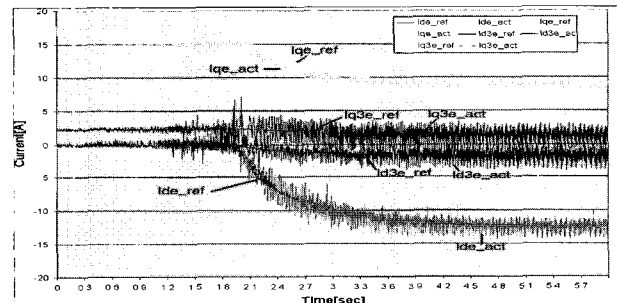


그림 6 전류 파형  
Fig. 6 Currents waveform

## 6. 결 과

본 논문에서는 사다리꼴의 역기전력을 가지는 Five-phase IPM 동기전동기의 약계자 영역에 대해서 제안하였다. 수학적인 모델을 기본으로 하여, 기본파 성분과 3고조파 성분을 제어함으로써 약계자 제어를 구현하였으며, 실험을 통하여 제안된 알고리즘을 검증하였다. 이를 통하여 고속 운전과 높은 안정성을 요구하는 항공 분야나 전기자동차나 선박같은 운송수단에 들어가는 추진 장치에 많이 사용될 것으로 기대된다.

## 참 고 문 헌

- [1] P. Pillay and R. Krishnan, " Modeling, simulation, and analysis of permanent-magnet motor drives. I. The permanent-magnet synchronous motor drive," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 25, pp. 265 - 273, Mar./Apr. 1989.
- [2] P. Pillay, and R. Krishnan, "Modeling, simulation, and analysis of permanent-magnet motor drives, II-The brushless DC motor drive," IEEE Transactions on Industry Applications, Volume: 25-2 , March-April 1989 , pp. 274 -279.
- [3] T.M Jahns, "Motion control with permanent-magnet AC machines" Proceedings of the IEEE, Volume: 82 Issue:8, Aug. 1994 , PP. 1241-1252.
- [4] P.J. McCleer, J.M. Bailey, J. S. Lawler, and B. Banerjee, "Five Phase Trapezoidal Back EMF PM Synchronous Machines and Drives," Proceedings of the European Conference on Power Electronics and Applications, September 1991, pp. 128-133.
- [5] C.C. Chan, et al, "A Novel High Power Density Permanent Magnet Variable-Speed Motor," IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol 8, No. 2, June 1993, pp. 297-303.
- [6] F. Caricchi, et al., "Innovative Inverter topology for Concentrated Winding PM Motor Drives," Proceedings of IEEE Industry Applications, 1992, pp. 964-972.
- [7] L. Parsa and H. Toliyat, "Five-Phase Permanent Magnet Motor Drives," IEEE Transactions on Industry Applications, Volume 41, Jan.-Feb. 2005 pp. 30 - 37.
- [8] 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.
- [9] Hyung-Min Ryu, Jang-Hwan Kim, and Seung-Ki Sul, "Analysis of multiphase space vector pulse-width

modulation based on multiple d-q spaces concept," IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 20, Issue 6, Nov. 2005, pp. 1364-1371.

- [10] S.K. Safi., P.P. Acarnley and A.G. Jack, "'Analysis and simulation of the high-speed torque performance of brushless DC motor drives,'" IEE Proceedings-Electric Power Applications. vol. 142, issue 3, pp. 191-200, May 1995.
- [11] Sung-In Park, Tae-Sung Kim, Sung-Chan Ahn, and Dong-Seok Hyun, "An improved current control method for torque improvement of high-speed BLDC motor," APEC '03. vol. 1, Feb. 2003 pp. 294 - 299.

## 저 자 소 개



### 김남훈(金男燻)

1973년 6월 12일생. 1998년 삼척대 제어계측공학과 졸업. 2000년 영남대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2003년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 2004년~2007년 Texas A&M Univ.(Post Doc.). 2007년~현재 청주대 전자정보공학부 전임강사.