

# 비대칭 6상 영구자석 동기전동기의 상호 간섭을 고려한 전류 제어 방법

임규철, 한용수, 하정익  
서울대학교

## Decoupling Current Control Method of Asymmetric Six-Phase Permanent Magnet Synchronous Machine

Gyu Cheol Lim, Yongsu Han, Jung-Ik Ha

Department of Electrical Engineering, Seoul National University, Seoul, Korea

### ABSTRACT

6상 전동기는 높은 신뢰성과 토크 리플의 저감 등의 성능 이점으로 인해 다양한 산업 분야에서 고려되고 있다. 6상 전동기는 일반적으로 두 3상 권선의 형태로 모델링할 수 있으며, 독립된 두 개의 전류 제어기를 사용하는 경우, 두 3상 권선 간의 상호 간섭 인덕턴스의 영향으로 인하여 불안정해지는 특성이 있다. 안정적인 전동기 구동을 위하여, 비대칭 6상 전동기의 상호 간섭 영향을 최소화하는 전류 제어가 필요하다. 이를 위해, 본 연구에서는 이산 영역에서의 6상 전동기의 전류 제어 페루프 응답 특성을 분석하고 비간섭 (Decoupling) 전류 제어기 구조를 제시한다.

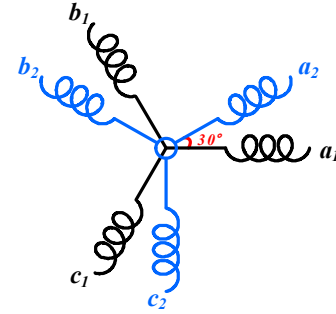


그림1 비대칭 6상 전동기의 권선 구조

Fig.1 Winding Structure of Asymmetric 6 Phase Machine

### 1. 서론

다상 전동기가 가지는 높은 신뢰성, 토크 맥동 저감등의 유리한 장점으로 인하여 고장 대응이 요구되는 시스템 또는 산업 분야에서 다상 전동기의 사용이 고려되고 있다. 다상 전동기 중 대표적 전동기인 6상 전동기 (6 Phase Machine)는 두개의 3상 권선으로 이루어져 있어 이중 3상 전동기 (Dual 3 Phase Machine)라고도 불린다. 6상 전동기는 두 3상 권선 간의 틀어진 각도에 따라서 구분된다. 두 3상 권선 간의 각도가 0°또는 60°의 경우 대칭 (Symmetric)이라고 하며, 각도가 30°틀어져 있는 경우 비대칭 (Asymmetric)이라고 한다.<sup>[1]</sup> 본 논문에서는 그림1과 같이 중성단이 분리된 두 개의 3상 권선이 30°틀어져 있는 비대칭 6상 전동기를 다룬다.

비대칭 6상 전동기의 경우, 두 권선 간의 위상 차로 인하여 6고조파로 맥동하는 토크 성분이 반대 위상을 가지며 상쇄될 수 있다.<sup>[1]</sup> 또한 6상 전동기는 3상 인버터를 두개 사용하여 전동기 구동 시스템을 구성할 수 있어 기존의 3상 전동기 시스템에서의 확장성이 용이하다. 이러한 6상 전동기를 제어하기 위해서 제어 및 모델링에서 많은 연구가 진행되어 왔다.<sup>[2]</sup> 그 중에서도 6상 전동기를 하나의 전동기로 모델링하여 제어하는 Vector Space Decomposition (VSD) 제어 방법과<sup>[3]</sup> 두 개의 3상 권선으로 모델링하는 독립적 제어 (Two-

Individual Control)방법이 가장 많이 사용되어 왔다.

독립적 제어 방식은 기존의 3상 전동기 제어 방식을 그대로 응용할 수 있어 VSD 제어 방법에 비해 구현이 간편하나 상호 간섭 상호 간섭 성분을 제대로 반영하지 못할 경우 제어의 안정도가 떨어지는 문제점이 있다.<sup>[4]</sup>

본 논문에서는 두 개의 3상 권선 모델에서 상호 간섭 성분을 반영하기 위한 비간섭 제어를 제안한다. 제어기를 구성하기 위해 전동기의 모델링을 보이고 시스템의 페루프 응답 특성을 고려하여 제어기 설계 방법을 제시한다.

### 2. 본론

#### 2.1 6상 영구자석 동기전동기의 모델링

6상 영구자석 동기전동기의 해석과 제어의 편의를 위해 변수들은 double dq synchronous frame을 통해 변환할 수 있다. 두 쌍의 3상 권선에 대하여 기존의 동기 좌표계 변환을 따르며 30°의 차이를 가지는 다른 하나의 3상 권선에 유의하여 좌표계 변환을 할 수 있다. 이를 통한 6상 영구자석 동기전동기의 전압 방정식은 식(1)과 같이 d-q 축 전류에 대한 함수로 표현이 가능하다. 이때, 회전자 좌표계로 모델링 된 6상 전동기의 등가회로는 그림2와 같이 표현된다.<sup>[5]</sup>

$$\begin{aligned}
 V_{ds1}^r &= R_s i_{ds1}^r + \frac{d}{dt} (i_{ds1}^r (L_{md} + L_{lm} + L_{l1}) + i_{ds2}^r (L_{md} + L_{lm}) + i_{qs2}^r L_{ldq}) - \omega_r (i_{qs1}^r (L_{mq} + L_{lm} + L_{l1}) + i_{qs2}^r (L_{mq} + L_{lm}) - i_{ds2}^r L_{ldq}) \\
 V_{ds2}^r &= R_s i_{ds2}^r + \frac{d}{dt} (i_{ds2}^r (L_{md} + L_{lm} + L_{l2}) + i_{ds1}^r (L_{md} + L_{lm}) - i_{qs1}^r L_{ldq}) - \omega_r (i_{qs2}^r (L_{mq} + L_{lm} + L_{l2}) + i_{qs1}^r (L_{mq} + L_{lm}) + i_{ds1}^r L_{ldq}) \\
 V_{qs1}^r &= R_s i_{qs1}^r + \frac{d}{dt} (i_{qs1}^r (L_{mq} + L_{lm} + L_{l1}) + i_{qs2}^r (L_{mq} + L_{lm}) - i_{ds2}^r L_{ldq}) + \omega_r (L_{md} I_f + i_{ds1}^r (L_{md} + L_{lm} + L_{l1}) + i_{ds2}^r (L_{md} + L_{lm}) + i_{qs2}^r L_{ldq}) \\
 V_{qs2}^r &= R_s i_{qs2}^r + \frac{d}{dt} (i_{qs2}^r (L_{mq} + L_{lm} + L_{l2}) + i_{qs1}^r (L_{mq} + L_{lm}) + i_{ds1}^r L_{ldq}) + \omega_r (L_{md} I_f + i_{ds2}^r (L_{md} + L_{lm} + L_{l2}) + i_{ds1}^r (L_{md} + L_{lm}) - i_{qs1}^r L_{ldq})
 \end{aligned} \tag{1}$$

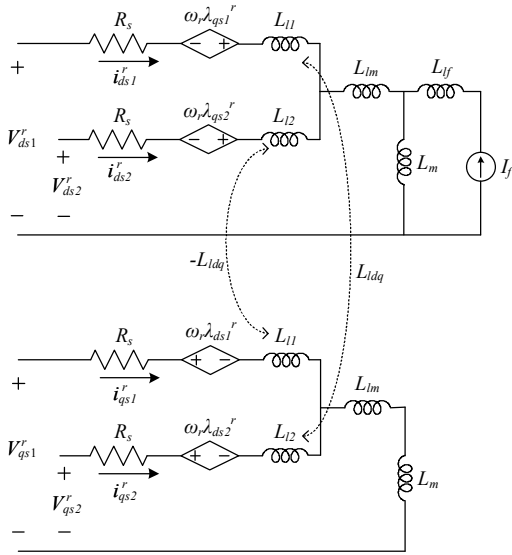


그림2 6상 영구자석 동기전동기의 등가회로  
Fig.2 Equivalent Circuit of a Six Phase PMSM

## 2.2 6상 영구자석 동기전동기의 전류 제어

그림3은 제안하는 전류제어기의 블록도를 나타낸다. 제어기는 비례적분 (PI) 제어기와 비간섭 (Decoupling) 제어기 그리고 전향 보상 전압으로 구성 된다.

### 2.2.1 제어 대상 (Plant)

제어 대상 (plant)인 6상 전동기를 살펴보면 식(2)과 같다.

$$\begin{bmatrix} V_{ds1} \\ V_{ds2} \\ V_{qs1} \\ V_{qs2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + s(L_{md} + L_{lm} + L_{l1}) & s(L_{md} + L_{lm}) + \omega L_{ldq} & -\omega(L_{mq} + L_{lm} + L_{l1}) & s(L_{mq} - \omega(L_{mq} + L_{lm})) \\ s(L_{md} + L_{lm}) - \omega L_{ldq} & R_s + s(L_{md} + L_{lm} + L_{l2}) & -sL_{ldq} - \omega(L_{mq} + L_{lm}) & -\omega(L_{mq} + L_{lm} + L_{l2}) \\ \omega(L_{md} + L_{lm} + L_{l1}) & -sL_{ldq} + \omega(L_{md} + L_{lm}) & R_s + s(L_{mq} + L_{lm} + L_{l1}) & s(L_{mq} + L_{lm}) + \omega L_{ldq} \\ sL_{ldq} + \omega(L_{md} + L_{lm}) & \omega(L_{md} + L_{lm} + L_{l2}) & s(L_{mq} + L_{lm}) - \omega L_{ldq} & R_s + s(L_{mq} + L_{lm} + L_{l2}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds1}^r \\ i_{ds2}^r \\ i_{qs1}^r \\ i_{qs2}^r \end{bmatrix} \quad (2)$$

제어 대상의 입력은 두 3상 권선의  $d$ - $q$ 축의 전류이며 출력은 두 3상 권선의  $d$ - $q$ 축 전압이다. 식(3)을 보면  $d_1$ ,  $d_2$ ,  $q_1$ ,  $q_2$  간의 여러가지 상호 간섭 성분이 존재함을 알 수 있다. 인버터와 디지털 제어기의 지연 특성을 고려한 시스템의 안정도 분석을 위해서 제어 대상 및 제어기를  $s$ -domain에서  $z$ -domain으로 변환하여 해석하였다.

### 2.2.2 전류 제어 폐루프 시스템 설계

그림3의 제어기 블록도에서 볼 수 있듯이 제어기는 비례적분 제어기와 비간섭 제어기로 구성된다. 비간섭 제어기의 목표는 다른 좌표축 성분의 영향을 최소화 하는 것으로 간섭 성분의 전류 제어 이득을 최소화 시킨다. 전류 제어기의 구성은 식(3)과 같이 설정된다.

$$[C] = \begin{bmatrix} \frac{sK_{pd1} + K_{id1}}{s} & K_{d1d2} & 0 & 0 \\ K_{d2d1} & \frac{sK_{pd2} + K_{id2}}{s} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{sK_{pq1} + K_{iq1}}{s} & K_{q1q2} \\ 0 & 0 & K_{q2q1} & \frac{sK_{pq2} + K_{iq2}}{s} \end{bmatrix} \quad (3)$$

여기서  $K_{pd1} = K_{pd2} = (L_{md} + L_{lm} + L_{l1})\omega_{cc}$ ,  $K_{id1} = K_{id2} = R_s\omega_{cc}$

$K_{pq1} = K_{pq2} = (L_{mq} + L_{lm} + L_{l1})\omega_{cc}$ ,  $K_{iq1} = K_{iq2} = R_s\omega_{cc}$

$K_{d1d2} = K_{d2d1} = (L_{md} + L_{lm})\omega_{cc}$ ,  $K_{q1q2} = K_{q2q1} = (L_{mq} + L_{lm})\omega_{cc}$

일반적으로  $d$ - $q$ 간의 누설 상호 인덕턴스( $L_{ldq}$ )에 의한 간섭

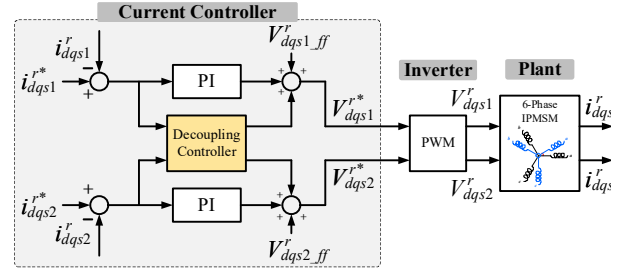


그림3 6상 전동기의 비간섭 전류 제어기 블록도  
Fig.3 Block Diagram of Decoupling Current Controller

성분은 다른 상호 간섭 성분에 비해 충분히 작으므로 제어기 설계에 반영하지 않았다.<sup>[5]</sup> 속도 기전력에 의한 성분은 식(4)와 같이 전류 제어기의 출력에 전향 보상을 하였다. 식(3)의 전류 제어기에서 행렬의 대각 요소는 각 축의 전류 성분이 각각에 미치는 제어를 나타내며, 대각 이외의 요소가 상호 간섭을 억제하는 비간섭 제어기를 의미한다.

$$[F] = \begin{bmatrix} 0 & \omega L_{ldq} & -\omega(L_{mq} + L_{lm} + L_{l1}) & \omega(L_{mq} + L_{lm}) \\ -\omega L_{ldq} & 0 & -\omega(L_{mq} + L_{lm}) & -\omega(L_{mq} + L_{lm} + L_{l2}) \\ \omega(L_{md} + L_{lm} + L_{l1}) & \omega(L_{md} + L_{lm}) & 0 & \omega L_{ldq} \\ \omega(L_{md} + L_{lm}) & \omega(L_{md} + L_{lm} + L_{l2}) & -\omega L_{ldq} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds1}^r \\ i_{ds2}^r \\ i_{qs1}^r \\ i_{qs2}^r \end{bmatrix} \quad (4)$$

제어 대상으로 하는 전동기의 임피던스 행렬  $P$ 는 앞 절에서 언급한 제어 대상인 식(2)와 같다. 전체 폐루프 시스템은 아래의 식(6)과 같이 표현 된다.

$$\begin{bmatrix} i_{ds1}^r \\ i_{ds2}^r \\ i_{qs1}^r \\ i_{qs2}^r \end{bmatrix} = [P + C]^{-1} [C - F] \begin{bmatrix} i_{ds1}^r \\ i_{ds2}^r \\ i_{qs1}^r \\ i_{qs2}^r \end{bmatrix} \quad (5)$$

그림4는 비간섭 제어기가 사용되지 않았을 때의 시스템 극점의 위치를 나타낸다. 두 개의 기존 비례적분 제어기만을 사용하여 제어를 수행하는 경우, 앞서 언급된 상호 간섭 영향으로 인하여 시스템이 불안정함을 알 수 있다. 그림5는 비간섭 제어기가 추가된 시스템의 극점 위치를 나타낸다. 비간섭 제어기가 포함됨으로써 상호 간섭으로 인한 제어기 이득이 감소하며 시스템의 극점이 단위 원(unit circle) 안으로 이동했음을 볼 수 있다.

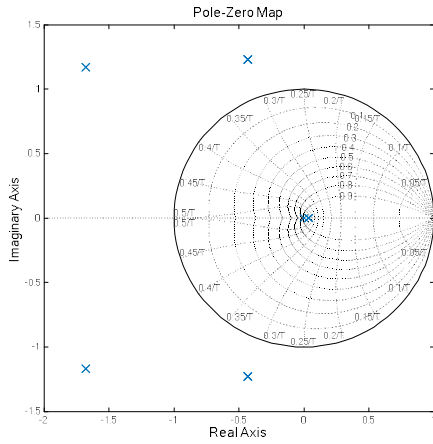
## 2.3 시뮬레이션

제안된 제어기의 성능 검증을 위해 PLECS를 통해 6상 영구자석 동기전동기의 전류 제어 모의 실험을 수행하였다.

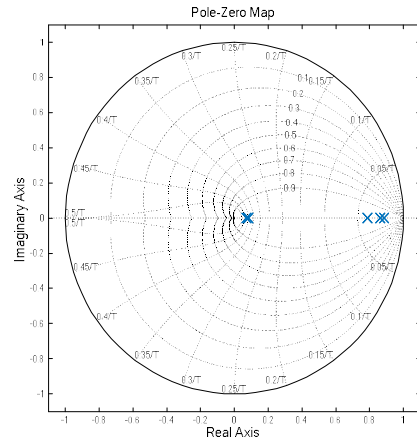
그림6은 3000r/m에 100Nm의 조건에서 비간섭 제어기의 유무에 따른  $dq$  전류 파형이다. 그림6에서 볼 수 있듯이 비간섭 제어기를 사용하는 경우,  $d_1$ ,  $d_2$  그리고  $q_1$ ,  $q_2$ 의 전류를 각각 원하는 지령으로 제어가 되는 것을 확인하였다. 그러나 0.5초를 기준으로 비간섭 제어기를 제외 하였을 때 앞선 안정도 분석과 같이 시스템이 불안정해지는 것을 확인하였다.

## 3. 결론

본 논문에서는 6상 영구자석 동기전동기의 상호 간섭 영향을 최소화할 수 있는 비간섭 전류 제어기를 제안하였다. 6상 전동기의 제어 폐루프 시스템을 이산 영역에서 분석한 뒤 비간섭 제어기를 구성하여 모의 실험을 통해 시스템이 안정함을 확인하였다.



(a)



(b)

그림4 비간섭 제어가 포함되지 않은 시스템(a)과 포함된 시스템(b)의 근 위치  
 Fig.4 System Poles without(a)/with(b) Decoupling Controller

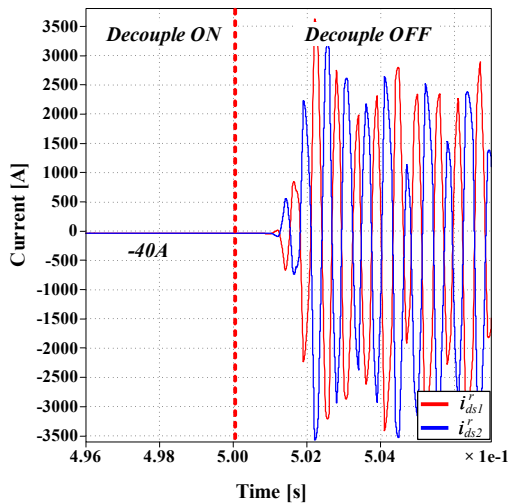
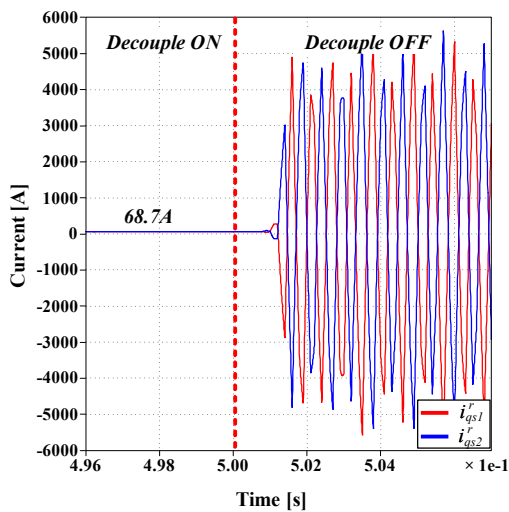
(a)  $d_1, d_2$ 축 전류(b)  $q_1, q_2$ 축 전류

그림6 비간섭 제어기의 유무에 따른 dq 전류 파형  
 Fig.6 dq current waveforms with/without Decoupling Controller

본 연구는 서울대학교 전력연구소의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다.

### 참고 문헌

- [1] Y. Hu, Z. Q. Zhu and M. Odavic, "Comparison of Two-Individual Current Control and Vector Space Decomposition Control for Dual Three-Phase PMSM," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 53, no. 5, pp. 4483-4492, Sept.-Oct. 2017.
- [2] S. Kallio, M. Andriollo, A. Tortella and J. Karttunen, "Decoupled d-q Model of Double-Star Interior-Permanent-Magnet Synchronous Machines," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 60, no. 6, pp. 2486-2494, June 2013.
- [3] Yifan Zhao and T. A. Lipo, "Space vector PWM control of dual three-phase induction machine using vector space decomposition," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 31, no. 5, pp. 1100-1109, Sep/Oct 1995.
- [4] J. Karttunen, S. Kallio, P. Peltoniemi, P. Silventoinen and O. Pyrhönen, "Decoupled Vector Control Scheme for Dual Three-Phase Permanent Magnet Synchronous Machines," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 61, no. 5, pp. 2185-2196, May 2014.
- [5] R. F. Schiferl and C. M. Ong, "Six Phase Synchronous Machine with AC and DC Stator Connections, Part I: Equivalent Circuit Representation and Steady-State Analysis," in *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-102, no. 8, pp. 2685-2693, Aug. 1983.