

# 집중권 5상 유도 전동기의 고정자 자속 기준 직접 벡터제어

정건희, 이동춘  
영남대학교

## Stator-Flux-Oriented Vector Control of Five-Phase Induction Motors with Concentrated Windings

Geon Hui Jeong and Dong Choon Lee  
Yeungnam University

### ABSTRACT

집중권 5상 유도전동기에서 기본파  $d_1 - q_1$ 와 3고조파  $d_3 - q_3$  공간의 비동기화시 자속밀도의 파형이 왜곡되어 자속이 포화되고 철손이 증가한다. 이러한 현상을 방지하기 위해 두 좌표축의 동기화가 필요하다. 본 논문에서는 자속각의 동기화를 고려한 고정자 자속기준 벡터제어를 제안하고 시뮬레이션을 통하여 그 유효성을 입증한다.

### 1. 서론

다상 유도전동기는 고정자 권선의 구조에 따라 분포권과 집중권으로 분류할 수 있다. 분포권은 공극자속밀도의 파형이 정현파인데 입력 전압에서 기본파를 제외한 저차 고조파는 파형의 왜곡과 추가적인 동손을 유발한다. 반면 집중권의 자속밀도는 사다리꼴 형태로 일반적으로 3차 고조파를 주입하여 토크를 증가시킬 수 있다.<sup>[1]</sup> 본 논문에서는 집중권 5상 유도전동기의 기본파와 3차 고조파 자속각을 일치시킨 고정자 자속기준 벡터 제어 기법을 제시한다. 시뮬레이션을 통한 자속각 오차와 역기 전력 파형으로부터 두 좌표축의 동기화 제어를 입증한다.

### 2. 집중권 5상 유도전동기 고정자 자속기준 벡터제어

#### 2.1 5상 유도전동기 토크식

5상 유도전동기에는 기본파 속도로 회전하는  $d_1 - q_1$  공간과 3차 고조파 속도로 회전하는  $d_3 - q_3$  공간이 존재한다. 좌표변환 행렬식은 식(1)과 같다.<sup>[2][3]</sup>

$$T(\theta) = \frac{2}{5} \begin{bmatrix} \cos\theta_{e1} & \cos(\theta_{e1} - \alpha) & \cos(\theta_{e1} - 2\alpha) & \cos(\theta_{e1} + 2\alpha) & \cos(\theta_{e1} + \alpha) \\ \sin\theta_{e1} & \sin(\theta_{e1} - \alpha) & \sin(\theta_{e1} - 2\alpha) & \sin(\theta_{e1} + 2\alpha) & \sin(\theta_{e1} + \alpha) \\ \cos 3\theta_{e3} & \cos 3(\theta_{e3} - \alpha) & \cos 3(\theta_{e3} - 2\alpha) & \cos 3(\theta_{e3} + 2\alpha) & \cos 3(\theta_{e3} + \alpha) \\ \sin 3\theta_{e3} & \sin 3(\theta_{e3} - \alpha) & \sin 3(\theta_{e3} - 2\alpha) & \sin 3(\theta_{e3} + 2\alpha) & \sin 3(\theta_{e3} + \alpha) \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서  $\theta_{e1}$ ,  $\theta_{e3}$ 은 각각 기본파 및 3차 고조파 속도로 회전하는 좌표계의 위상각을 의미한다. 5상 유도전동기의 토크는 모델링으로부터 식(2)~(4)으로 나타낼 수 있다.<sup>[1][3]</sup>

$$T_{e1} = \frac{5}{2} \frac{P}{2} (\lambda_{ds}^{e1} i_{qs}^{e1} - \lambda_{qs}^{e1} i_{ds}^{e1}) \quad (2)$$

$$T_{e3} = 3 \frac{5}{2} \frac{P}{2} (\lambda_{ds}^{e3} i_{qs}^{e3} - \lambda_{qs}^{e3} i_{ds}^{e3}) \quad (3)$$

$$T_e = T_{e1} + T_{e3} \quad (4)$$

식(2)와 (3)은 각각 기본파와 3차 고조파의 토크이며, 식(4)는 5상 유도전동기의 출력 토크이다. 식(4)로부터 3차 고조파 성분이 기기의 출력 토크에 기여한다는 것을 알 수 있다.

#### 2.2 두 공간의 비동기 영향

식(2)~(3)으로부터 각각의 공간에서의 토크는 서로 다른 크기의 슬립을 발생하여 두 좌표계의 위상각  $\theta_{e1}$ ,  $\theta_{e3}$ 이 다르게 된다. 좌표계의 비동기화는 두 자속 각의 차이로 확인할 수 있다. 그림 1(a)는 자속각이 일치할 때의 자속밀도 파형이고 (b)는 자속각이 불일치 할 때 파형을 나타낸다. 자속각의 불일치로 인한 자속밀도 파형의 왜곡은 자속을 포화시키며 기기의 철손 증가 원인이 된다.<sup>[2][3]</sup>

#### 2.3 제안하는 고정자 자속기준 벡터제어

정상상태에서 두 성분의 슬립 자속도는 식(5)와 (6)과 같다. 여기서,  $\tau_{r1}$ 와  $\tau_{r3}$ 는 각 좌표계에서의 회전자 시정수를 의미한다.

$$w_{s11} = \frac{2}{5} \frac{2}{P} \frac{L_{s1}}{\tau_{r1}} \frac{1}{(\lambda_{ds}^{e1} - L_{s1} i_{ds}^{e1})} i_{qs}^{e1} = k_{s11} T_{e1} \quad (5)$$

$$w_{s33} = 9 \frac{2}{5} \frac{2}{P} \frac{L_{s3}}{\tau_{r3}} \frac{1}{(\lambda_{ds}^{e3} - L_{s3} i_{ds}^{e3})} i_{qs}^{e3} = k_{s33} T_{e3} \quad (6)$$

벡터제어에서 같은 크기의 슬립을 발생하는 전류로 제어할 경우 두 좌표계의 자속각을 일치시킬 수 있다. 따라서 식(5)와 (6)으로부터  $d_3 - q_3$  공간의 전류는 식(7)과 같다.

$$i_{qs}^{e3} = 9 \frac{L_{s1}}{\tau_{r1}} \frac{\tau_{r3}}{L_{s3}} \frac{(\lambda_{ds}^{e3} - L_{s3} i_{ds}^{e3})}{(\lambda_{ds}^{e1} - L_{s1} i_{ds}^{e1})} i_{qs}^{e1} = k_s T_{e1} \quad (7)$$

파라미터의 변동이나 기계적 부하로 인해 자속각은 조금씩 어긋나게 되지만 이러한 문제는 비례제어기로 해결할 수 있다.

$$T_{e3} = k_s T_{e1} + k_p (\theta_{e1} - \theta_{e3}) \quad (8)$$

#### 2.4 시뮬레이션 결과

본 연구에 사용된 5상 유도전동기의 파라미터가 표 1에 나타나 있다. 인버터의 스위칭 주파수는 5[kHz], 샘플링 주파수는 10[kHz]로 설정하였다. 시뮬레이션에서의 고정자 자속추정기는 전류모델과 전압모델을 함께 사용하였다.<sup>[4]</sup> 그림 2는 시뮬레이션 파형을

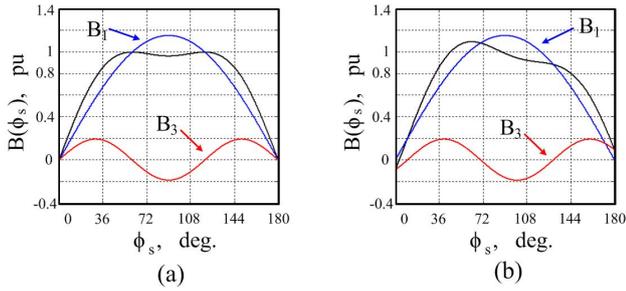


그림 1 자속밀도 파형  
(a) 자속각이 일치할 경우 (b) 자속각이 불일치할 경우

표 1 전동기 파라미터

고정자 저항( $r_s$ )	6.4138[Ω]
기본파 회전자 저항( $r_{r1}$ )	7.5548[Ω]
3차 고조파 회전자 저항( $r_{r3}$ )	4.4896[Ω]
고정자 누설 인덕턴스( $L_{ls}$ )	45.13[mH]
기본파 회전자 누설 인덕턴스( $L_{lr1}$ )	45.13[mH]
3차 고조파 회전자 누설 인덕턴스( $L_{lr3}$ )	22.63[mH]
기본파 자화 인덕턴스( $L_{m1}$ )	673.61[mH]
3차 고조파 자화 인덕턴스( $L_{m3}$ )	57.59[mH]

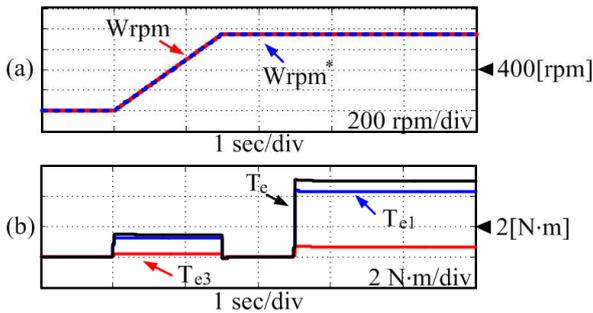


그림 2 전동기 속도 및 토크 파형  
(a) 전동기 속도 (b) 전동기 토크

보여주며 3.5[sec]에 부하가 인가되었고 4.5[sec]에서 제안된 알고리즘이 적용되었다. 그림 2(b)에서 정상상태의 기본파 토크는 4.56[N·m], 3차 고조파 토크는 0.46[N·m]이다. 즉, 3차 고조파의 토크는 전체 토크에서 약 9.1% 정도 기여한다. 분포권 5상 유도전동기와 비교할 경우 토크가 9.1% 증가했다고 볼 수 있다. 본 논문의 시뮬레이션은 자속의 포화가 고려되지 않았으므로 비동기화로 인한 토크의 감소는 알 수 없으나, 자속각 오차와 역기전력 파형으로부터 동기화제어를 확인할 수 있다. 그림 3은  $\theta_{e1}$ 와  $\theta_{e3}$ 의 오차가 알고리즘 적용 후에는  $0.1^\circ$  이내로 줄었음을 확인할 수 있다. 그림 4의 (a)와 (b)는 알고리즘 적용 후 수렴된 전류 지령값으로 잘 제어됨을 알 수 있다. 그림 5(a)는 알고리즘을 적용하지 않은 경우의 왜곡된 역기전력 파형을 보여준다. 그림 5(b)는 알고리즘 적용 후의 역기전력 파형이며, 기본파와 3차 고조파의 역기전력 파형이 일치함을 보여준다.

### 3. 결론

본 논문은 집중권 5상 유도전동기의 고정자 자속 기준 벡터 제어방법을 제안하였다. 운전 중 부하가 유발하는 비동기화 문

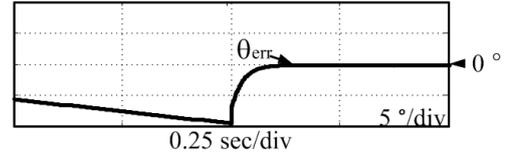


그림 3 고정자 자속각 오차

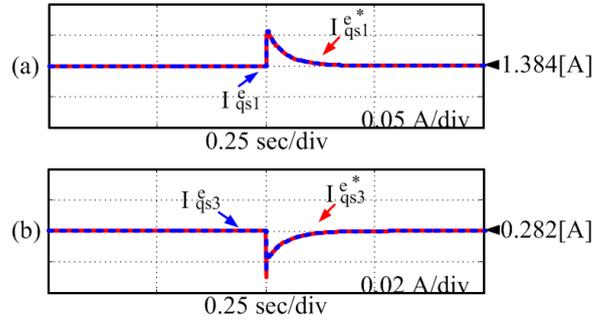


그림 4 q-축 전류

(a) 기본파 전류 (b) 3차 고조파 전류

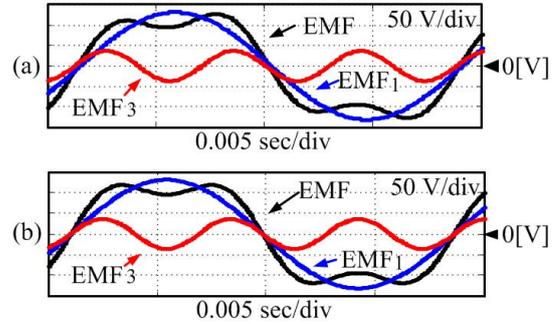


그림 5 역기전력 파형

(a) 알고리즘 적용 전 (b) 알고리즘 적용 후

제는 자속밀도의 파형이 왜곡되어 자속이 포화되고 철손의 증가와 토크의 감소를 야기한다. 각각 공간의 슬립을 같은 크기로 제어하고 자속각을 일치시켜 비동기화 문제를 해결하였다. 시뮬레이션으로부터 자속각의 오차와 동기화된 역기전력 파형을 확인하여 제안된 알고리즘의 타당성을 증명하였다.

### 참고 문헌

- [1] H. Xu, H.A. Toliyat, L.J. Petersen, "Five phase induction motor drives with DSP based control system", IEEE Transactions on Power Electronics, vol.17, no.4, pp.524-533, 2002.
- [2] L. Zheng, J.E. Fletcher, B.W. Williams, X. He, "Dual Plane Vector Control of a Five Phase Induction Machine for an Improved Flux Pattern", IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol.55, no.5, pp.1996-2005, 2008.
- [3] A.S. Abdel Khalik, M.I. Masoud, B.W. Williams, "Improved Flux Pattern With Third Harmonic Injection for Multiphase Induction Machines", IEEE Transactions on Power Electronics, vol.27, no.3, pp.1563-1578, 2012.
- [4] P.L. Jansen, R.D. Lorenz, D.W. Novotny, "Observer based direct field orientation: analysis and comparison of alternative methods", IEEE Transactions on Industry Applications vol.30, no.4, pp.945-953, 1994.