

3차 고조파의 영향을 고려한 5상 유도전동기의 약계자 운전

강성운, 신혜웅, 이교범
아주대학교

Field Weakening Control for Five-Phase Induction Motor Drives considering the Effect of the 3rd Harmonic

Seong Yun Kang, Hye Ung Shin, and Kyo Beum Lee
AJOU UNIVERSITY

ABSTRACT

본 논문은 고속영역에서 3차 고조파의 영향을 고려한 5상 유도전동기의 약계자 운전을 제안한다. 5상 유도전동기는 집중권의 형태로 되어있어 공극 자속이 제 3차 공간 고조파 성분을 포함한다. 따라서 5상 유도전동기의 역기전력은 3차 고조파가 포함된 형태이므로, 5상 유도전동기의 약계자 운전은 3차 고조파 성분을 고려하여 수행해야 한다. 약계자 운전에 앞서 정격 이하의 속도에서는 간접벡터제어를 사용하고, 정격이상의 고속 영역에서는 최대 토크 발생과 전압 및 전류 제한 영역을 고려한 약계자 운전을 수행한다. 본 논문에서는 3차 고조파를 고려한 5상 유도전동기의 약계자 운전을 시뮬레이션으로 검증한다.

1. 서론

현재 다상 유도전동기는 선박 혹은 항공기 시스템과 같은 대용량 시스템에서 주목을 받고 있다. 이러한 대용량 가변속 유도전동기 구동시스템에서는 주로 3상 유도전동기보다 다상 유도전동기가 사용된다. 그 중 5상 유도전동기는 주파수 증가에 따른 소음 감소, 전류 밀도의 증가, 3차 고조파 전류 성분으로 인한 출력 토크 증가, 고장진단 및 허용제어 등의 장점이 있기 때문에 많은 연구가 진행되고 있다[1].

5상 유도전동기는 고정자 권선의 구조가 집중권이기 때문에, 자속밀도 파형은 사다리꼴 형태를 갖는다. 3차 고조파 성분이 포함된 전류는 자속밀도 파형과 같은 사다리꼴 형태를 가지므로 5상 유도전동기의 출력 토크를 향상시킬 수 있다. 5상 유도전동기는 3차 고조파 성분이 포함된 전류를 주입함으로써 $d_1 - q_1$, $d_3 - q_3$ 2개의 좌표계가 존재하게 되며 각각을 독립적으로 제어하여 구동한다[2].

본 논문에서는 3차 고조파를 고려한 5상 유도전동기의 약계자 운전을 수행한다. 5상 유도전동기의 고속운전을 위해, 정격 이하의 속도에서는 간접벡터제어를 수행하고, 정격이상인 고속 영역에서는 약계자 운전을 수행한다. 적용된 약계자 운전은 시뮬레이션으로 타당성을 검증한다.

2. 5상 유도전동기의 약계자 운전

2.1 5상 유도전동기의 모델 해석

그림 1은 각도 θ 에 대한 집중권의 권선 함수 $N(\theta)$ 를 나타내고, N 은 턴 수를 나타낸다. 5상 2극 유도전동기의 상당 고정자 권선은 공간적으로 72° 의 위상차를 가지며, 집중권으로 구

성된다. 집중권 형태의 권선 함수는 공극자속이 제 3차 공간 고조파 성분을 포함하고 있어 사다리꼴 형태의 파형이 나타난다.

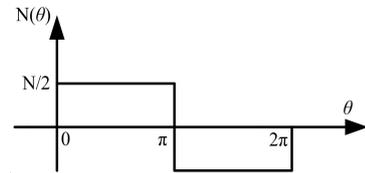


그림 1. 5상 유도전동기의 권선함수

Fig. 1. Winding function of five-phase induction motor(IM)

그림 2는 3차 고조파를 고려한 역기전력의 파형을 나타낸다. 기본파의 15% 크기인 3차 고조파를 주입한 역기전력은 기본파와 위상이 일치할 때 사다리꼴 형태의 파형이 형성되는 것을 알 수 있다. 이러한 3차 고조파의 주입으로 인해 전압 변조 범위가 늘어나 더 큰 출력 전압을 얻을 수 있다. 그러므로 5상 유도전동기에 공급되는 전류는 기본파로 구성된 전류보다 출력 토크 발생이 유리하다.

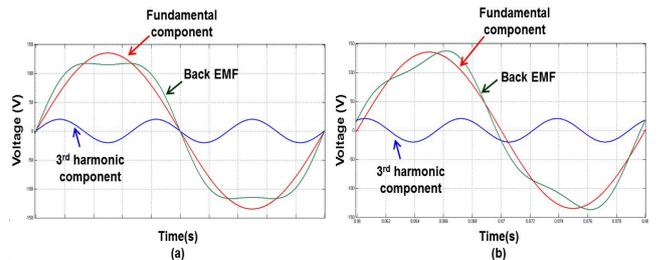


그림 2. 3차 고조파를 고려한 역기전력 파형 (a) 위상이 일치할 경우, (b) 위상이 불일치할 경우

Fig. 2. Considering the 3rd-harmonic electromotive force(EMF) waveform (a) phase match case and (b) phase mismatch case

2.2 약계자 제어

그림 3은 유도전동기의 속도 영역을 나타낸다. 유도전동기의 일정 출력 영역의 특성은 고속운전 능력이 요구되는 분야에 적합하다. 따라서 일정 출력영역에서의 운전은 벡터 제어 수행 시 d축 전류를 이용하여 쉽게 자속을 감소할 수 있어 약계자 운전에 용이하다.

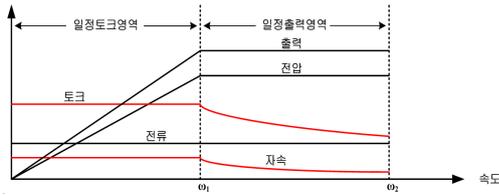


그림 3. 유도전동기의 속도 영역
Fig. 3. Speed area of IM

그림 4는 간접 벡터제어를 이용한 5상 유도전동기의 제어 블록도이다. 일정토크영역에서의 운전은 그림 4에서 제시한 간접 벡터제어를 적용하며, 일정출력영역에서는 간접 벡터제어를 기반으로 d축 전류를 감소하는 약계자 운전을 적용한다.

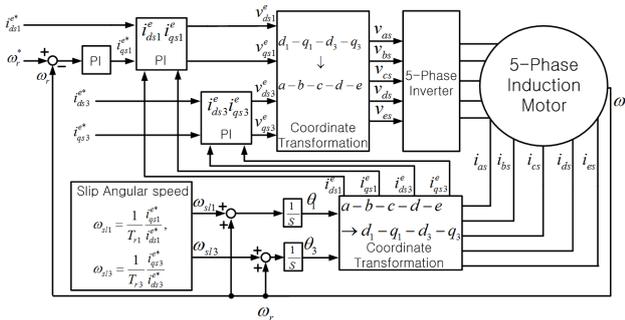


그림 4. 간접 벡터제어를 이용한 5상 유도전동기 제어 블록도
Fig. 4. Control system block diagram of a five-phase induction machine using an indirect vector control

약계자 운전은 출력 토크를 최대로 얻기 위해 전압 제한과 전류 제한을 고려하여 d축 지령을 계산한다. 식 (1)과 식 (2)는 동기좌표계에서의 d q축 전압 방정식을 이용한 전압 제한 식과 전류 제한 식을 나타낸다.

$$(w_e \sigma L_s i_{qs}^*)^2 + (w_e L_s i_{ds}^*)^2 \leq V_{smax}^2 \quad (1)$$

$$i_{ds}^{e*2} + i_{qs}^{e*2} \leq I_{smax}^2 \quad (2)$$

식 (1)과 식 (2)를 이용하여 약계자 영역에서 사용하는 d축 지령 전류는 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$i_{ds}^* = \sqrt{\frac{(V_{smax}/w_e)^2 - (\sigma L_s I_{smax})^2}{L_s^2 - \sigma^2 L_s^2}}, i_{qs}^* = \sqrt{I_{smax}^2 - i_{ds}^{e*2}} \quad (3)$$

식 (4)는 기본과와 3차 고조파 성분에 의한 출력토크를 나타낸다[3].

$$T_{e1} = \frac{P}{2} \frac{L_{m1}^2}{L_{lr1} + L_{m1}} i_{ds1}^* i_{qs1}^*, T_{e3} = \frac{P}{2} \frac{L_{m3}^2}{L_{lr3} + L_{m3}} i_{ds3}^* i_{qs3}^* \quad (4)$$

전체 출력토크는 기본과와 3차 고조파 성분에 의한 출력토크의 합으로 나타낼 수 있다. 3차 고조파 주입으로 인해 3차 성분의 토크가 더해지면 5상 유도전동기의 출력 토크는 증가한다.

표 1은 시뮬레이션을 위한 5상 유도전동기의 파라미터 값을 나타낸다.

표 1 5상 유도전동기의 파라미터 값
Table 1 Parameter value of five-phase IM

| 파라미터 | 값 | 단위 | 파라미터 | 값 | 단위 |
|----------|------|----------|-----------|--------|------------------|
| 정격속도 | 3000 | rpm | L_{ls} | 0.0029 | H |
| 정격전압 | 135 | V | L_{lr1} | 0.0029 | H |
| 정격전류 | 11.3 | A | L_{lr3} | 0.0016 | H |
| R_s | 0.67 | Ω | L_{m1} | 0.104 | H |
| R_{r1} | 0.52 | Ω | L_{m3} | 0.0111 | H |
| R_{r3} | 0.32 | Ω | J | 0.04 | kgm ² |

그림 5는 약계자 운전 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 약계자 운전 시뮬레이션은 정격이상의 속도인 3000 rpm에서부터 d축 전류를 감소하며 5000 rpm까지 진행하였다. 또한 3차 전류지령은 기본과의 15%로 설정하여 제어를 수행하였다.

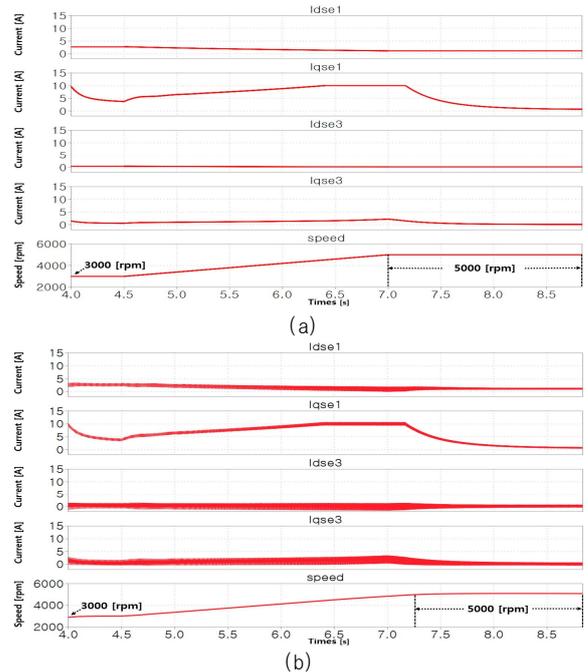


그림 5. 5상 유도전동기의 약계자 운전 시뮬레이션 파형 (a) 지령 값, (b) 실제 값

Fig. 5. Field weakening drives of five-phase IM simulation (a) reference value and (b) real value

3. 결론

본 논문에서는 고속영역에서 3차 고조파의 영향을 고려한 5상 유도전동기의 약계자 운전을 제안한다. 약계자 운전은 기본과 성분과 3차 고조파 성분을 제어함으로써 고속영역의 지령속도를 안정적으로 추종함을 확인할 수 있었다. 제안하는 5상 유도전동기의 약계자 운전은 시뮬레이션으로 타당성을 검증하였다.

참고 문헌

- [1] E. Levi, "Multiphase electric machines for variable speed applications," IEEE Trans. Ind. Electron, Vol. 55, No. 5, pp. 1893-1909, 2008.
- [2] M. H. Kim, H. W. Jung, and H. J. Song, "Development of Squirrel cage Induction Motor for 5 phase 1.5 kW," Journal of KIIEE, Vol. 28, No. 1, pp. 57-68, 2014.
- [3] L. Zheng, J. E. Fletcher, B. W. Williams, and X. He, "Dual Plane Vector Control of a Five Phase Induction Machine for an Improved Flux Pattern," IEEE Trans. Ind. Electron, Vol. 55, No. 5, pp. 1996-2005, May 2008.