

7상 BLDC 전동기의 고속 운전 영역 확장을 위해 PI 전류 제어기의 안티와인드업 출력 전압을 이용한 자동 진상각 알고리즘

이재원, 김형진, 마재성, 김동윤, 김장목
부산대학교 전기공학과

Automatic Advance Angle Control Algorithm Using Anti Wind-up Output Voltage of PI current Controller to Expand High-Speed Operation Region of 7-Phase BLDC Motor

Lee Jae Won, Kim Hyeong Jin, Ma Jae Sung, Kim Dong Yoon, Kim Jang Mok
Department of Electrical Engineering, Pusan National University

ABSTRACT

물레이션을 이용하여 타당함을 검증하였다.

본 논문에서는 7상 BLDC 전동기를 이용한 수중 부하 시스템에서 전동기의 고속 운전 영역 확장을 위한 자동 진상각 알고리즘을 제안한다. 고속 운전 영역 운전 시 역기전력 상승에 따라 전류 지연 현상이 발생한다. 이를 보상하기 위해 기존의 제어 방식은 Look Up Table을 이용한 진상각 방식 또는 추가적인 하드웨어를 구성하여 제어한다. 이는 운전점이 변경될 경우 제어 특성이 현저히 나빠지고, 전동기의 제정수에 의존적이고, 제어 시스템의 부피 및 비용 증가와 같은 문제를 야기시킨다. 본 논문은 진상각 인가를 통해 확보할 수 있는 유효 전압을 계산하고 안티와인드업 출력 전압을 이용하여 필요한 진상각을 자동적으로 인가한다. 본 논문에서 제안하는 방식은 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 비교 및 분석하였다.

1. 서론

7상 BLDC 전동기는 전기각으로 $2\pi/7$ 로 배치된 상 권선에서 측정된 상전류 7개와 전류 지령이 각각의 PI 전류 제어기로 입력되고, 7개의 전압 지령으로 회전자에 따라 게이팅 신호를 생성 후 인버터 시스템에 인가함으로써 전동기는 회전하게 된다. 높은 출력 밀도와 고전력 운전이 가능하여 고속 운전을 위한 수중 부하 시스템에서 활용된다.

사다리꼴 형태의 역기전력과 준 구형파 형태의 상전류를 갖는 7상 BLDC 전동기의 고속 운전 시, 역기전력 상승에 따라 유효 전압이 부족해지고, 상 권선의 리액턴스 증가로 전류 지연 현상이 발생하여 토크 맥동과 속도 제어 성능이 크게 떨어지는 문제를 야기하게 된다. 이에 따라 역기전력의 위상에 대하여 상 전류의 위상을 진상으로 제어하는 진상각 제어 방식을 이용하여 고속 운전 영역 제어를 시행한다. 기존의 진상각 제어 방식은 Look Up Table^[1]을 이용하거나 BLDC 전동기 위치 센서 출력단에 진상 보상을 설치^[2]하는 방식을 사용하였다. 그리고 3상 BLDC 전동기를 이용한 자동 진상각 제어 방식은 PI 전류제어기의 궤환 전압을 이용하여 유효 전압과 비교하여 진상각을 계산^[3]하였다.

본 논문은 7상 BLDC 전동기의 6상 도통 제어 방식^[4]의 특성에 맞추어, 진상각 인가를 통해 확보할 수 있는 유효 전압을 계산하고 안티와인드업 출력 전압을 이용하여 필요한 진상각을 자동적으로 계산한다. 제안한 알고리즘의 유용성은 컴퓨터 시

2. 제안하는 진상각 제어 알고리즘

2.1 7상 BLDC 전동기의 안티와인드업 출력 전압

7상 BLDC 전동기의 안티와인드업 제어기가 포함된 전류 제어기의 블록 다이어그램은 그림 1와 같다. 7상 BLDC 전동기의 6상 도통 제어 방식의 경우 PI 전류 제어기 7개가 각 회전자에 따라 동작^[4]하게 되는데, PI 전류 제어기의 출력인 전압 지령이 인버터의 전압 한계보다 크게 될 경우 안티와인드업 출력이 나타나게 된다. 각 상의 안티와인드업 출력에 평균을 취하여 얻어낸 출력은 전동기의 전압 지령을 충족시키기 위해 필요한 전압으로 나타낼 수 있다.

7상 BLDC 전동기의 고속 운전 영역에서 안티와인드업 출력은 일정한 값으로 수렴된다. 이 영역에서 진상각 제어를 시행하면 안티와인드업 출력의 크기가 감소하게 된다. 이는 진상각 인가를 통해 전동기를 제어할 수 있는 유효 전압을 확보를 의미한다.

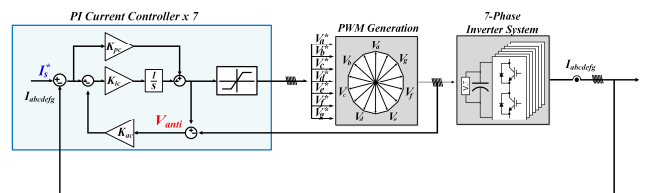


그림 1 7상 BLDC 전동기 시스템의 안티와인드업 제어기가 포함된 전류 제어기 블록 다이어그램

2.2 7상 BLDC 전동기의 유효 전압

그림 2는 7상 BLDC 전동기의 극전압과 역기전력 파형이다. BLDC 전동기의 전압 방정식은 식(1)과 같다.

$$\frac{V_{DC}}{2} = R_s i_a + L_s \frac{di_a}{dt} + E \quad (1)$$

식 1에서 우변의 역기전력을 이항하여 정리하면 식2와 같다.

$$\frac{V_{DC}}{2} - E = L_s \frac{di_a}{dt} + R_s i_a \quad (2)$$

식 2로부터 인가전압과 역기전력의 차로 전류가 결정이 되

고, 저항에 의한 전압 강하 성분을 이항하면 식3과 같다

$$\frac{V_{DC}}{2} - E_{max} - R_s i_a = L_s \frac{di_a}{dt} \quad (3)$$

참고문헌[1]에 의하면 인덕턴스로 인한 전압 강하 성분이 전 동기의 역기전력 상승을 억제한다. 따라서 이 전압을 유효 전압이라 정의하고 진상각 제어를 하지 않을 경우 유효 전압의 크기는 식4와 같다.

$$V_{eff} = \frac{V_{DC}}{2} - E_{max} - R_s i_a \quad (4)$$

진상각이 인가되지 않았을 경우 극전압과 역기전력의 차이로 나타나지만 진상각이 인가되었을 경우 그림2(b)와 같이 역기전력의 크기가 일정하지 않은 구간에서 7상 BLDC 전동기의 도통 시 유효 전압은 식5와 같이 전압 크기로 정의한다.

$$V_{eff} = \left(\frac{V_{DC}}{2} - E_{max} - R_s i_a \right) + \left(\frac{7E_{max}}{\pi} \theta_0^2 \right) * \left(\frac{7}{6\pi} \right) \quad (5)$$

이 전압을 유효 전압으로 정의하며 진상각 인가를 통해 안티 와인드업 출력과 유효 전압을 같게 제어함으로써 전압이 부족할 구간에서 필요한 진상각을 출력하는 제어기를 구성한다.

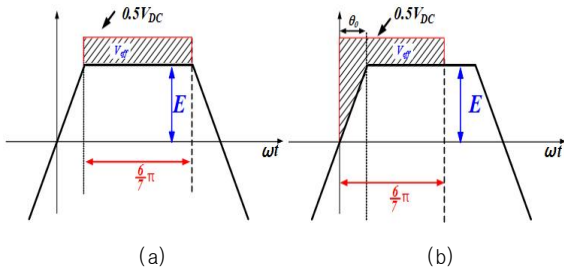


그림 2 (a) 7상 BLDC 전동기 제어 방식의 유효 전압
(b) 진상각 제어시 유효 전압

3. 시뮬레이션 결과

본 논문에서는 7상 BLDC 전동기의 자동 진상각 제어 알고리즘의 타당성을 검증하기 위해 컴퓨터 시뮬레이션을 진행하였다. 시뮬레이션 프로그램은 MATLAB Simulink를 사용하였다.

그림3는 일반적인 7상 BLDC 전동기 제어 방식을 이용하여 정격속도 이상의 제어 조건에서 t = 0.1[sec]에서 수중 부하 토크를 0[%]에서 100[%]으로 변경시켰을 때의 파형이며 그림 4는 동일한 조건에서 제안한 알고리즘을 적용하였을 때의 시뮬레이션 파형이다. 일반적인 7상 BLDC 전동기의 제어 방식은 해당 영역에서 속도 제어가 불가능하며 제안한 알고리즘을 적용하면 유효 전압 확보를 위한 진상각이 인가되어 속도 제어가 가능한 것을 알 수 있다.

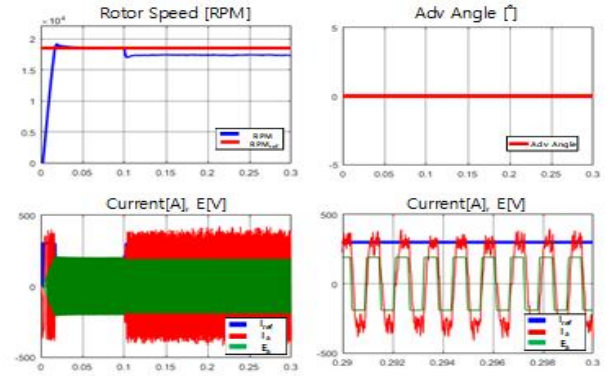


그림 3 일반적인 7상 BLDC 전동기 제어 시 속도, 인가 진상각, 상전류, 역기전력 파형

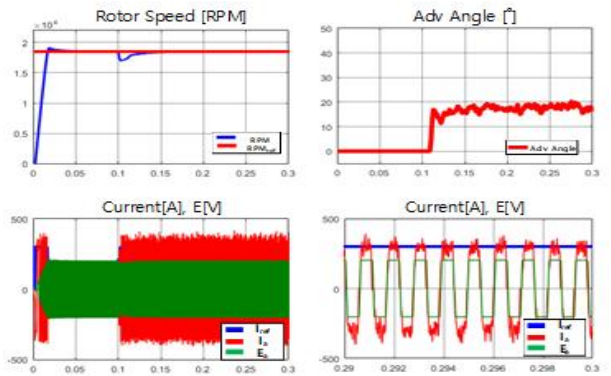


그림 4 제안한 알고리즘 적용 시 속도, 인가 진상각, 상전류, 역기전력 파형

4. 결론

본 논문은 안티와인드업의 출력 전압을 이용한 7상 BLDC 전동기의 진상각 제어 알고리즘을 제안하였다. 제안된 진상각 제어 알고리즘은 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 그 타당성을 검증하였다.

참고 문헌

- [1] C. C. Chan, J. Z. Jiang, W. Xia, K. T. Chau., "Novel Wide Range Speed Control of Permanent Magnet Brushless Motor Drives", IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS, 1995
- [2] C. L. Chiu, Y.T. Chen, Y.H. Shen and R.H. Liang, "An Accurate Automatic Phase Advance Adjustment of Brushless DC Motor", IEEE TRANSACTION ON MAGNETICS, 2009
- [3] 이민호, "브러시리스 직류 전동기의 속도 운전 영역 확장을 위하여 PI 전류 제어기의 안티 와인드업 제한 전압을 이용한 자동 진상각 알고리즘", 석사학위 논문, 부산대학교 2017
- [4] Sang Woo Park, Hyung Seok Park, Jong Joo Moon, Jang Mok Kim, Won Sang Im, "Maximum efficiency control method in 7 phase BLDC motor by changing the number of the excited phase windings", IEEE ECCE, 2016