

# 브러시리스 직류 전동기의 속도 운전 영역 확장을 위하여 전류 제어기의 궤환 전압을 이용한 진상각 제어 알고리즘

이민효, 문종주, 김장목  
부산대학교

## Phase Advance method of Brushless DC motor Using Feedback Voltage of Current Controller for Wide Range Speed Operations

Min Hyo Lee, Jong Joo Moon, Jang Mok Kim  
Pusan National University

### ABSTRACT

본 논문은 속도 운전 영역 확장을 위한 자동 진상각 제어 알고리즘을 제안한다. 속도 운전 영역 확장을 위하여 상전류의 위상을 역기전력의 위상에 대하여 진상으로 제어한다. 기존의 진상각 제어 방식은 속도 진상각 참조표를 이용하거나 추가적인 하드웨어를 구성하여 제어한다. 참조표를 이용한 제어 방식의 경우 전동기의 특성에 매우 민감하며 운전점이 변경될 경우 제어 특성이 현저히 나빠지는 단점이 있으며, 추가적인 하드웨어를 이용하는 경우 전동기의 제정수에 의존적임과 동시에 제어 시스템의 부피 및 비용 증가와 같은 문제를 야기시킨다. 본 논문은 유효 전압의 크기와 전류 제어기의 궤환 전압을 이용하여 필요한 진상각을 계산한다. 본 논문에서 제안하는 방식의 유용함은 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 타당함을 검증하였다.

### 1. 서 론

3상 BLDC 전동기는 간단한 구조, 높은 출력 밀도 및 적은 유지보수 때문에 다양한 산업 분야에서 사용되어지고 있다.<sup>[1]</sup> 사다리꼴 형태의 역기전력과 준 구형파 형태의 상전류를 가지는 브러시리스 직류 전동기는 영구자석 동기 전동기에 사용되는 좌표 변환 기법을 적용할 수 없으며 그에 따라 자속분 전류를 제어하는 약계자 제어를 적용할 수 없다. 이러한 이유로 인해 브러시리스 직류 전동기의 경우 상전류의 위상을 역기전력의 위상에 대하여 진상으로 제어하는 진상각 제어 방식을 이용하여 고속 운전 영역 제어를 시행한다.

기존의 진상각 제어 방식은 속도 진상각 참조표를 이용하거나<sup>[2, 3]</sup> 브러시리스 직류 전동기의 위치 센서인 홀 효과 센서 출력단에 진상 보상기를 설치하여<sup>[4]</sup> 진상각 제어를 하는 방식이 존재한다. 참조표를 이용하는 방식의 경우 전동기의 일정 출력 운전을 위한 진상각을 미리 계산하여 제어한다. 추가적인 하드웨어를 구성하는 방식의 경우 진상 보상기를 이용하여 일정 출력 운전 영역에서 실제 홀 센서의 출력보다 앞선 위상을 가지는 제어 출력을 만들어서 운전한다. 이러한 방식은 사전에 전동기를 구동하여 일정 출력 운전 시점을 결정하고 속도에 대한 인가 진상각을 계산하여야 한다. 운전 조건이 변경되거나 전동기의 특성을 정확히 알지 못하는 경우에는 제어특성이 나빠진다.

본 논문에서 제안하는 진상각 제어 알고리즘은 전류 제어기

의 궤환 전압과 계산된 유효 전압을 이용하여 운전 조건에 필요한 진상각을 자동적으로 계산한다. 제안한 알고리즘의 유용성은 컴퓨터 시뮬레이션을 이용하여 타당함을 검증하였다.

### 2. 제안하는 진상각 제어 알고리즘

#### 2.1 전류 제어기의 궤환 전압

전동기의 전류 제어기는 전동기 자체의 특성을 제거하고 제어기 이득만으로 전류 제어 특성이 결정되도록 하기 위해 비례적분 제어기를 사용한다. 오차를 적분하여 출력은 만드는 적분 제어기의 특성은 제어기의 출력이 정해진 시스템의 한계치 이상의 값이 지속되면 오차 누적으로 인해 적분기가 포화되게 되며 이는 전체 제어 시스템의 동특성을 저하시킨다. 이러한 적분기의 누적 현상을 방지하기 위해 안티 와인드업 기법이 사용된다.

브러시리스 직류 전동기의 전류 제어기의 와인드업 출력은 전동기의 커뮤테이션 구간과 제어기의 출력이 인가전압 한계에 도달하였을 때 발생한다. 전동기의 커뮤테이션 구간에서 발생하는 와인드업 출력은 그림 1(a)와 같이 저속, 경 부하 조건에서도 간헐적으로 발생하며 그림 2(a)와 같이 인가전압 한계 이상이 되면 일정한 값으로 수렴하는 출력이 나타난다. 인가전압 한계 이상의 영역은 해당 운전 영역이 전원 전압을 다 사용하고 있으므로 해당 속도 이상으로 제어가 불가능하다는 것을 의미하며 일정 출력 운전을 필요로 하는 영역이다.

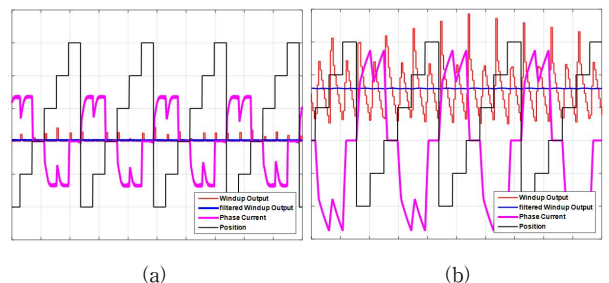


그림 1 (a) 저속, 경 부하 조건 회전자 위치, 전류, 궤환 전압,  
(b) 고속, 정격 부하 조건 회전자 위치, 전류, 궤환 전압

#### 2.2 브러시리스 직류 전동기의 유효전압

그림 2(a)는 일반적인 브러시리스 전동기 제어 방식의 단자 전압과 역기전력 파형이며 그림 2(b)는 임의의 진상각  $\theta_0$ 를 인

가하였을 때의 인가전압 및 역기전력 파형이다. 식 1은 브러시리스 직류 전동기의 전압 방정식이다.

$$\frac{1}{2} V_{DC} = Ri + L \frac{di}{dt} + e \quad (1)$$

식 1에서 우변의 역기전력을 좌변으로 이항하면

$$\frac{1}{2} V_{DC} - e = Ri + L \frac{di}{dt} \quad (2)$$

식 2로부터 인가전압과 역기전력의 차로 인하여 전류가 결정되는 것을 알 수 있다. 이 전압은 전동기의 토크를 발생시키는데 기여한다. 참고문헌 [2]에 의하면 인덕턴스에 의한 전압 강하 성분이 전동기의 역기전력 상승을 제한하는 성분이므로 저항에 의한 전압 강하 성분을 좌변으로 이항하면 식 2는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$V_{eff} = \frac{1}{2} V_{DC} - e - Ri = L \frac{di}{dt} \quad (3)$$

이 전압을 유효전압으로 정의하며 유효 전압과 전류 제어기의 와인드업 출력 전압을 같게 제어함으로써 전압이 부족한 구간에서 필요한 진상각을 출력하는 제어를 구성한다.

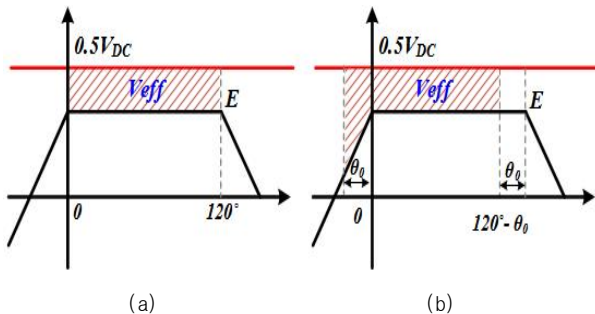


그림 2 (a) 일반적인 BLDC 전동기 제어 방식의 유효전압  
(b) 진상각 제어시의 유효전압

### 3. 시뮬레이션 결과

본 논문에서는 제안한 진상각 제어 알고리즘의 타당성을 검증하기 위해 컴퓨터 시뮬레이션을 진행하였다. 시뮬레이션 프로그램은 MATLAB Simulink를 사용하였다.

그림 3는 일반적인 브러시리스 직류 전동기 제어 방식을 이용하여 2390[RPM] 속도 제어 조건에서  $t = 0.5[\text{sec}]$ 에서 부하 토크를 0.1[N.m]에서 0.37[N.m]로 변경시켰을 때의 파형이며 그림 4는 동일한 조건에서 제안한 알고리즘을 적용하였을 때의 시뮬레이션 파형이다. 일반적인 브러시리스 직류 전동기의 제어 방식으로는 해당 영역에서 속도 제어가 불가능하며 제안한 알고리즘을 적용하면 속도 제어가 가능하며 동일한 평균 토크에 대하여 리플이 저감되는 것을 알 수 있다.

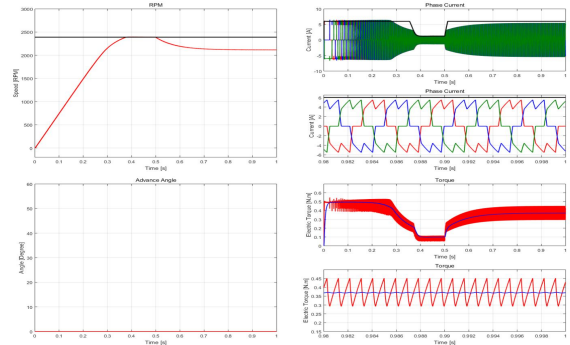


그림 3 일반적인 BLDC 전동기 제어 시 속도, 상전류, 인가 진상각, 발생토크 파형

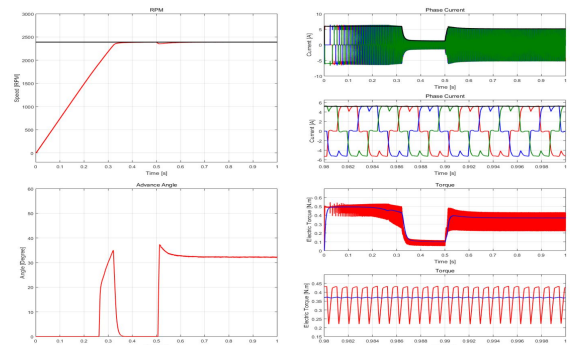


그림 4 제안한 알고리즘 적용 시 속도, 상전류, 인가 진상각, 발생토크 파형

### 4. 결론

본 논문은 전류 제어기의 궤환 전압을 이용한 브러시리스 직류 전동기의 진상각 제어 알고리즘을 제안하였다. 제안된 진상각 제어 알고리즘은 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 그 타당성을 검증하였다.

### 참고 문헌

- [1] Sun Jung Park, Jong Hwan Song, Ho Yong Choi, Man Li Lee, Young Kyung Kong, Jae Goo Bin, "A Study on Design of Inverter for Multi phase Brushless DC Ship Propulsion Motor", Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), 2010 IEEE, 2010, pp.1-5
- [2] 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
- [3] Binh Minh Nguyen, Minh C. Ta, "Phase Advance Approach to Expand Speed Range of Brushless DC Motor", IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON POWER ELECTRONICS AND DRIVE SYSTEMS, 2007
- [4] 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