

소형 BLDC 전동기의 효율 특성 향상을 위한 전류파형 제어기법에 관한 연구

김승한, 박창석, 정태욱[†]
경남대

A Study of Current Waveform Control Method for Efficiency Characteristic Improvement of Small BLDC Motor

Seung-Han Kam, Chang-Seok Park, Tae-Uk Jung[†]
Kyungnam University

Abstract - 3상 BLDC 전동기의 경우, PMSM보다 간단하며 제어가 상대적으로 용이하다는 장점을 갖는다. 본 논문에서는 기존의 IPM의 최대 토크 운전 방식에서 착안하여 기존의 SPM타입의 전동기 운전방식과는 달리 최대 토크 지점에 인가되는 유효전압을 상승시켜 토크의 활용률 및 효율 특성을 향상시키는 운전방식을 제안한다. 유효요소해석 및 시뮬레이션을 통해 제안된 운전방식의 타당성을 검증하였다.

1. 서 론

오늘날 여러 사업 분야에서 무분별한 공해 유발에 의해 환경오염이 심각해짐에 따라 무공해 동력원의 필요성이 대두되어, 공장 및 사무 자동화기기 그리고 가전 기기 등의 여러 분야에서 필요성을 인지 및 수요가 늘어났다. 기존의 단순한 AC 전동기의 적용분야는 점차 감소하고 있으며, DC 전동기는 효율 및 동작 특성, 제어의 용이성 등은 만족시킬 수 있으나, 브러쉬와 정류자를 통한 기계적인 정류과정을 거쳐야 하는 구조적인 특성으로 인해 고속 운전이 불가능할 뿐만 아니라, 정상 운전 중에도 전기적 스파크, 기계적 소음이 발생하고 기계적 접촉으로 인해 불가피하게 정류자 마모가 발생되므로, 전동기의 수명 단축과 정기적인 유지 보수의 필요성으로 인해 신뢰성을 요하는 시스템에서 치명적인 문제점을 안고 있다.[1][2]

일반적으로 BLDC 전동기의 역기전력의 형태에 따라 PMSM(Permanent Magnet Synchronous Motor)와 BLDCM(Brushless DC Motor)로 나눌 수 있다. 역기전력의 형태가 정현파(Sinewave) 형태의 경우 PMSM이라 부르며 토크 리플이 적고 철손이 적어 효율이 높기 때문에 서보용으로 적합하다는 장점이 있으나 정현파를 3상 벡터 제어를 위해 구동 알고리즘이 복잡해지고, 데드타임을 필요로 하며 3상 3여자 운전 방식에 따른 손실증대로 효율 특성 면에서 불리하다. 또한 PMSM의 경우 전동기의 안정적인 구동을 위해 연속적인 회전자 위치를 검출해야한다.

역기전력의 형태가 사다리꼴(Trapezoidal) 형태의 경우 BLDCM이라 부르며, 전류를 구형파로 제어하기 위해 3상 2여자 운전방식을 하며 회전자 위치는 전기각으로 60°마다 검출하여 제어하게 된다. 또한, BLDCM은 3상 2여자 운전방식으로 PMSM에 비해 전동기 이용률이 66.7%[6]로 작은 값을 갖는다. 이 때문에 같은 토크 출력에서 3상 2여자 방식은 3상 3여자 운전방식보다 더 많은 상전류를 필요로 하고, 그 결과 최대 출력이 작아지며 상전환 구간에 토크리플이 발생하는 단점이 있으나 구동 알고리즘과 구조가 간단하므로 제어가 상대적으로 용이한 소형 BLDC 전동기에 적합하기 때문에 널리 사용되어지고 있다.[3]

이에 본 논문에서는 BLDC 전동기의 효율 향상을 위한 최적 전류파형 제어기법을 제안한다. 벡터 및 유효요소해석을 통해 최대 토크 지점을 도출하였으며, 도출된 토크점을 활용하여 최적의 유효 전압 레퍼런스 값을 찾기 위하여 PSIM 시뮬레이션을 통해 최적 전류파형 제어의 타당성을 검증하였다.

2. 본 론

2.1 BLDC 전동기 최대 토크 지점

제안된 전류파형 제어기법은 BLDC 전동기의 기계적인 최대 토크 점을 기반으로 회전자의 위치가 최대 토크 점에 위치했을 때, 인가되는 유효 전압을 증가시켜 전류를 제어하는 방식이다. 이러한 전류제어를 통하여 최대 토크가 발생하는 지점의 토크 활용률을 증가시킬 수 있다. 일반적으로 BLDC 전동기의 토크는 다음 수식과 같이 계산된다.

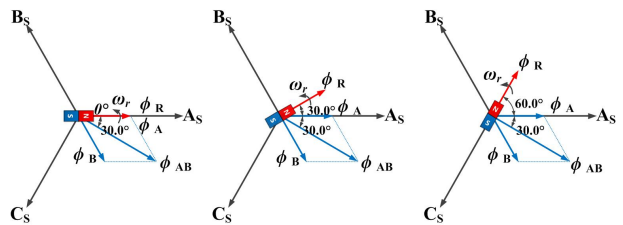
$$T = 3 \frac{V_t E_f}{\omega_s X_s} \sin\theta \quad [Nm] \quad (1)$$

여기서, V_t 는 인가전압, E_f 는 역기전력, ω_s 는 각속도, X_s 는 고정자 리액턴스, θ 는 토크 각이다.

위 식을 통해 BLDC 전동기의 최대 토크가 발생하는 지점은 회전자 자속과 통전되는 두 상의 합성 자속이 $\sin 90^\circ$ 를 이루는 지점이며, 이를 회전자 위치각을 자속 벡터도와 유효 요소 해석을 통해 도출하였다.

2.1.1 자속 벡터도를 이용한 회전자 위치 각

그림 1은 BLDC 전동기의 회전자 자속과 고정자 자속의 벡터도를 나타내며 회전자의 회전방향은 반시계 방향이다. BLDC 전동기 구동 시 최대 토크 지점은 회전자 자속 벡터 ϕ_R 과 A_s, B_s 의 합성 자속 벡터 ϕ_{AB} 가 90° 를 이루는 지점이 최대 토크 지점이며 이때의 회전자 자속 벡터의 위치각은 90° 를 이루는 지점이 최대 토크 지점이며 이때의 회전자 자속 벡터의 위치각은 60° 이다.



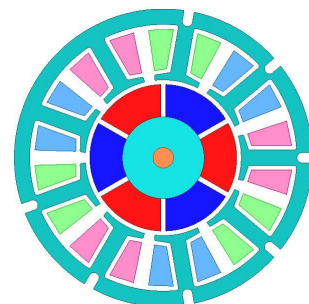
<그림 1> 회전자 자속과 고정자 자속의 벡터도

- A_s, B_s, C_s : A, B, C상 고정자 전류
- ϕ_R : 회전자 자속
- ϕ_A, ϕ_B, ϕ_C : A, B, C상 자속
- ϕ_{AB} : A, B상 합성 자속
- ω_r : 회전자 각속도

BLDC 전동기의 제어방식의 경우, 전동기 회전자 위치정보는 홀센서를 이용하여 전기각으로 60°마다 검출하게 된다. 따라서 6가지 구간으로 나누어 드라이브를 해석 할 수 있으므로 각 구간별 회전자 자속 벡터각을 도출하였다.

2.1.2 유효요소 해석을 통한 최대 토크 지점

앞서 도출한 자속 벡터도를 기반으로 BLDC 전동기의 2D 모델링을 통하여 FEA 유효요소 해석을 수행하였다. 그림 2는 제안된 기법에 사용된 BLDC 전동기의 FEA 모델이며, 전동기의 파라미터는 표 1과 같다.

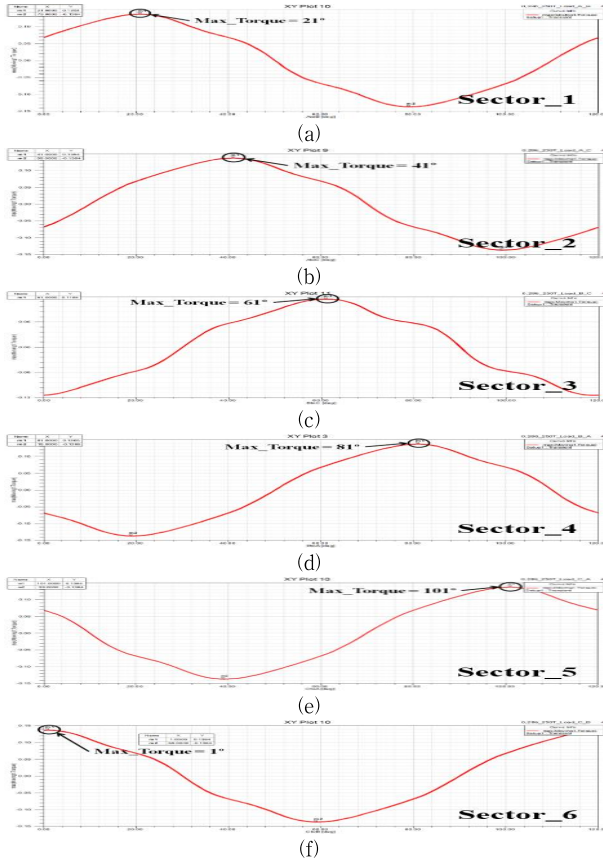


<그림 2> BLDC 전동기의 유효요소해석 모델

<표 1> BLDC 전동기의 파라미터

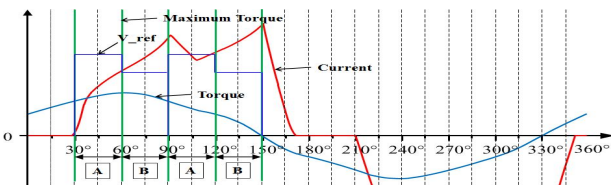
| Parameter | Value |
|-------------------------------|-------|
| DC_Link [V] | 320 |
| Phase Resistance [Ω] | 13.2 |
| Number of Pole | 6 |
| Number of Slot | 9 |
| Rated Speed [rpm] | 3600 |
| Outer Diameter [mm] | 60 |
| Depth [mm] | 20 |

BLDC 전동기의 유한요소 해석법을 통하여 각 구간의 최대 토크 지점을 도출하였고, 각 구간별 토크 특성을 해석하기 위하여 BLDC 전동기의 일반적인 6구간으로 나누어 구간별로 도통되는 전류를 인가한 후 토크의 변화를 해석하였다.



<그림 3> 구간 별 최대 토크 점

2.2 제안한 전류파형 제어기법



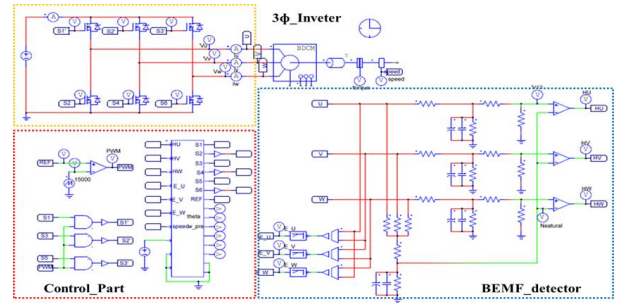
<그림 4> 제안된 유효전압 레퍼런스 패턴

제안한 최적 전류제어 기법은 최대 토크점을 기반으로 최대 토크 지점에 인가되는 유효 전압을 증가시키는 방식이다. 이러한 최적화 한 전류제어를 통하여 최대 토크가 발생하는 지점의 토크 활용률을 증가시킬 수 있다. 그림 4는 최대 토크 점을 활용하여 유효 인가전압 레퍼런스 V_{ref} 의 패턴을 나타내었다.

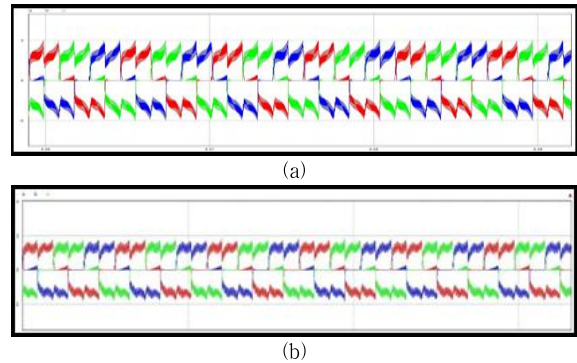
A구간에는 각 삭의 도통 시작점부터 최대 토크점까지 전동기에 인가되는 유효 전압을 상승시키는 최대토크 운전을 한다. B구간에는 앞서 A구간에서 상승시킨 V_{ref} 의 값만큼 감소시켜 기존 구동방식의 평균 유효 인가 전압과 전체 평균 유효 인가전압 값이 동일하다.

2.3 시뮬레이션

정격 속도 3600[rpm], 정격 출력 50[W]의 특성을 가진다. 3상 BLDC 전동기 드라이브 회로를 그림 5와 같이 구성하였다.



<그림 5> 3상 BLDC 전동기 드라이브 시뮬레이션 회로



<그림 6> 3상 BLDC 전동기 드라이브 시뮬레이션 회로

그림 6은 최적 전류파형 제어기법의 적용 전, 후의 전류파형이다. 앞서 제안한 전류 파형제어 기법에 따라 전기각 60°인 최대 토크 점에 유효 인가 전압 레퍼런스를 상승시켜 전류 리플 또한 감소하였으며, 효율은 기존방식은 51.6[%], 제안된 방식은 56.7[%]로 5.1[%]만큼 상승한 것을 확인할 수 있다. 시뮬레이션에서의 효율이므로 각 소자의 손실이 포함되지 않았으므로 시작기 실험을 통해 실제 효율에 대한 추가적 검증이 필요하다.

3. 결 론

본 논문에서는 최대 토크 점을 활용한 BLDC 전동기의 전류 파형제어 기법을 제안한다. BLDC 전동기의 최대 토크 지점을 도출하기 위하여 자속 백터도 분석 및 유한요소해석을 통해 최대 토크 점을 도출하였다. BLDC 전동기의 회전자 위치정보를 가지고 있는 역기전력을 입력받아 회전자의 위치각을 실시간으로 계산하여 전류 파형제어를 하였다. A, B구간을 나눠 증가 및 감소를 시켜 기존 운전방식과 같은 평균 유효전압 레퍼런스 값을 가진다. 제안한 기법의 유효성을 확인하기 위해 시뮬레이션을 진행하였다. 동일 출력 기준으로 입력 전력을 비교하였으며, 효율은 51.6[%]에서 5.1[%]상승한 56.7[%]로 결과를 보였다. 추후 시작기 제작 및 실험을 통해 제안한 전류 파형제어 기법의 타당성을 검증할 것이다.

본 연구는 교육부와 한국연구재단의 지역혁신인력양성사업으로 수행된 연구결과임 (NRF-2013H1B8A2028789)

[참 고 문 헌]

[1] Grodon R. Slemon, "High-Efficiency Drives Using Permanent-Magnet Motors", Proc. of IEEE IECON'93, 725-730, 1993
 [2] T.J.E Miller, "Design of Brushless Permanent Magnet Motor", Clarendon Press, Oxford, 1994
 [3] Mei Ying, Pan Zaiping, "A Novel Starting Method of Sensorless BLDC Motor for Electric Vehicles", international Conference on Electrical and Control Engineering, 3212-3215, 2010