

개방 사고시 BLDC 피드백 제어 시스템

임채영, 임진우, 이동수, 이진우, 이승호, 우대현, 김주영, 김남현, 정상웅
 동아대학교 전기공학과

BLDC Feed back Control System Under Open Circuit Accident

Che-Young Im, Jin-Woo Lim, Dong-Su Lee, Jin-Woo Lee, Seung-Ho Lee,
 Dae-Hyun Woo, Ju-Young Kim, Nam-Hyun Kim, Sang-Yong Jung
 Department of Electrical Engineering Dong-A University

Abstract 본 논문에서는 BLDC 운전 중 각 상의 결상 사고에 따른 토크 및 속도의 최적화에 대해 연구하였다. BLDC 모터의 구동을 위하여 ATmega16이 사용되었으며 제어기법으로는 PWM(Pulse Width Modulation) 기법이 사용된다. 속도 제어는 Hall Sensor의 검출 속도에 따라 Duty비를 제어하여 이루어지며 회전자 위치는 Hall Sensor 검출 방식을 통하여 이루어진다. 이러한 BLDC 모터를 이용하여 예기치 못한 결상 상황의 발생 시 토크의 감소로 인한 급제동에 대비하여 부하에 상응하는 토크를 최대한 낼 수 있도록 알고리즘을 구현하였다.

1. 서 론

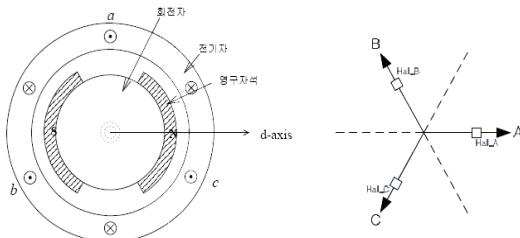
BLDC 모터는 우수한 내구성, 같은 체적의 유도 전동기에 비해 높은 토크밀도, 빠른 응답성 및 우수한 제어성을 지닌다. 또한 현재 각종 메카트로닉스 및 산업자동화 현장에서 서보 모터로서 널리 사용되고 있으며, 향후 그 수요가 지속적으로 증대될 전망이다. 모터의 사양 역시, 용도에 따라 정밀도가 낮은 속도 제어형 서보 모터에서부터 정밀도가 높은 속도/위치/토크 제어형에 이르기까지 매우 다양하며, 용량 및 위치 검출기 분해능 또한 다양하다.

한편, BLDC 전동기 구동용 인버터 시스템에서 발생하는 고장의 종류를 살펴보면 전원공급원에서의 일선지락 정류기, 다이오드의 단락, 커패시터의 파괴, 부하 회로의 단락, 스위칭 소자의 고장, 전압, 전류 센서의 고장 등이 있는데 본 논문에서는 다상으로 제어되는 모터가 운전 도중 예기치 못한 사고로 인해 전선(한 상)이 단선될 경우를 가정하였다. 이로 인하여 운전 상태에서는 토크가 감소되고, 정지 상태에서는 기동토크의 부족으로 기동이 되지 않는 현상이 나타난다. 이에 대비해 마이크로 프로세서를 이용해 토크를 향상시킬 수 있는 BLDC 모터 제어 알고리즘을 제안하였다.

2. 본 론

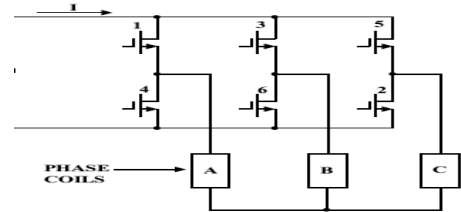
2.1 BLDC 모터의 구조 및 동작원리

일반적인 DC 모터의 경우 전류에 비해하는 토크 및 속도 특성에 많은 분야에 사용되고 있지만, 우수한 특성에도 불구하고 기계적 마찰에 의한 브러시의 마모 및 스파크의 발생으로 정기적인 유지보수가 필요하다. 그러나 BLDC 모터의 경우 이러한 점을 보완하기 위하여 그림 1과 같이 회전자 권선을 영구자석으로 대체하고 동시에 정류자 대신에 Transistor Switching 회로를 이용하여 회전자계를 형성하게 된다.



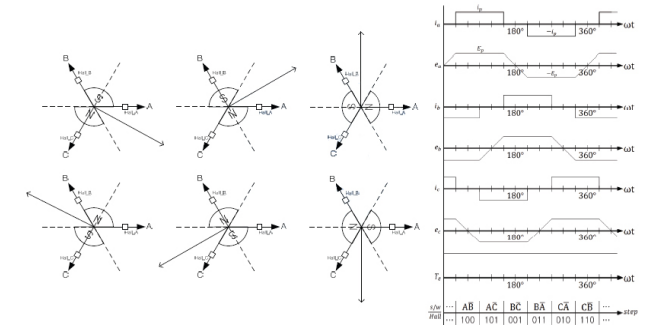
< 그림 1. BLDC 모터의 구조와 Hall Sensor의 배치 >

BLDC 모터를 고효율로 운전하기 위해서는 고정자 전류에 의해 형성된 회전자계가 영구 자석의 자계에 대해 전기적으로 항상 직교해야 한다. 이러한 운전을 위하여 회전자의 위치를 파악 하는 Hall Sensor가 사용된다.



< 그림 2. 3상 BLDC전동기에 사용되는 스위칭소자 구동회로 >

BLDC 모터의 회전자계를 Hall Sensor의 검출에 따라 회전자계의 움직임을 ATmega16을 이용하여 제어하였다. 이 스위칭 동작을 위하여 그림 2와 같이 6개의 MOSFET이 사용된다. 그리고 그림 1과 같이 Hall Sensor는 BLDC 모터에 120°로 배치되어 있으며 이에 따라 Hall Sensor의 검출을 위해 그림 3과 같이 six-step으로 구성하였다. 또한 고정자의 합성자계가 회전자의 위치보다 90° 앞선 자계를 형성할 수 있도록 프로 그래를 코딩하였다.



(a) 회전자 위치 검출을 위한 six-step (b) 상전류 및 역기전력 파형

< 그림 3. 회전자 위치 검출과 전류 및 역기전력 파형 >

여기서 BLDC 모터는 일반적으로 그림 3과 같이 120° 간격으로 발생하는 사다리꼴 형태의 역기전력이 평탄한 구간에 구형파의 전류를 흘려 줄으로써 토크 맥동이 없는 원활한 구동이 가능하다. BLDC 모터는 식 (1)과 같은 전압 방정식으로 나타낼 수 있으며, 발생 토크는 식(2)와 같다.

$$\begin{bmatrix} v_{as} \\ v_{bs} \\ v_{cs} \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

상 전압 : v_{as}, v_{bs}, v_{cs} 상전류 : i_a, i_b, i_c 역기전력 : e_a, e_b, e_c
 상 저항 : R, 자기인덕턴스 : L
 발생하는 토크는 다음과 같다.

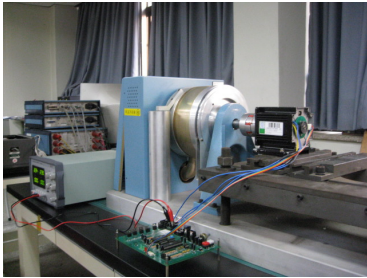
$$T_e = \frac{e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c}{\omega_m} \quad (2)$$

여기서, ω_m 회전 각속도이다.

2.3 결상 시 BLDC 모터의 특성

본 논문에서는 3상으로 구동되는 BLDC의 운전 중에 예기치 못한 결상의 경우를 가정하여 실험을 하였다. 그림 4와 같이 BLDC와

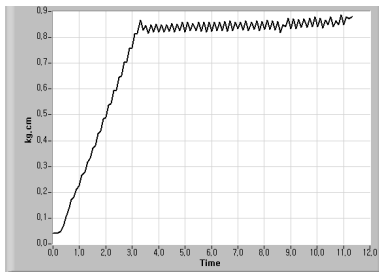
Dynamometer를 커플링 후 Dynamometer에 Ramp 신호를 인가하여 BLDC 모터가 정지하기 직전까지 토크를 측정하였다.



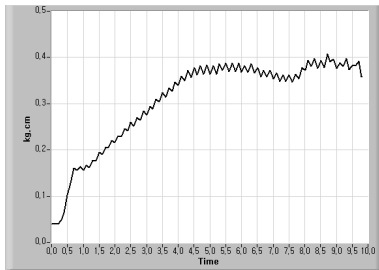
< 그림 4. Dynamometer와 BLDC의 coupling >

결상의 경우 소음이 커지고 토크가 줄어드는 현상을 관찰할 수 있었는데 소음 보다는 토크의 감소에 주목하였다. 결상 시 토크는 감소하는데 부하토크 보다 작은 경우, BLDC 모터가 급정지하게 된다. 이때의 충격은 축 및 부하, 그리고 모터에 그대로 전달되어 예상치 못한 사고를 유발할 수 있다.

그림 5는 BLDC의 3상 운전 중의 토크와 2상 운전 중의 토크를 나타낸 것이다. 그림 5에서 보면 3상 운전 중의 토크에 비해 결상 시의 토크가 상당히 떨어진 것을 알 수 있다. 3상 운전 중의 최대토크는 0.880kg.cm 이지만 1초 후에 결상을 가정하여 실험하였을 때 최대토크가 0.358kg.cm로 약 59.3%만큼 감소되어 앞선 실험데이터와 상당한 차이를 보이는 것을 알 수 있다.



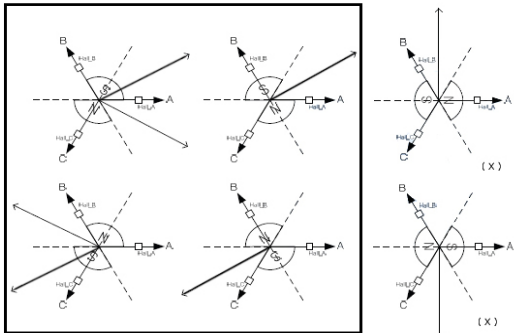
(a) 3상 운전시의 토크 특성



(b) 결상 시의 토크 특성

< 그림 5. 3상 운전 중의 BLDC와 결상시의 BLDC 토크 특성 >

2.4 결상 시 BLDC 모터의 개선 알고리즘

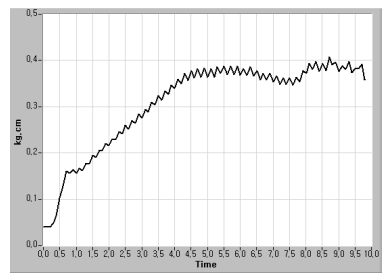


< 그림 6. 결상 시 회전자계 발생 구역 >

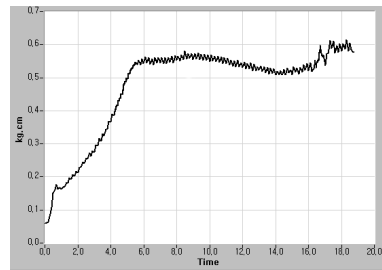
3상 결상 시에는 회전자의 위치검출을 홀 센서로 감지를 하는데 홀 구역이 6가지로 나뉘어져 각 구역(60°)에 맞게 회전자계가 발생한다. 그러나 3상 중 1상 결상 시에는 3상과는 다르게 6개의 홀 구역 중 2개의 홀 구역에 있을 때만 회전자계가 발생하여 나머지 4개의 구역에는 힘이 발생하지 않는다. 따라서 불안정한 회전자계로 인하여 회전자의 움직임 또한 불안정하게 된다. 이에 의해 그림 5에서 토크가 전체적으로 고르지 않고 일정영역에서 감소하는 것을 알 수 있는데 전체적인 토크 및 최대 토크 또한 감소한 것을 확인할 수 있다. 이로 인해 결상의 경우 3상 운전 시의 프로그램과 다르게 회전자계를 형성할 수 있는 새로운 프로그램 코딩의 작성이 필요하다.

한 상의 결상 시 6개의 구역 중 2개의 구역만이 이용되는 방법을 그림 6과 같이 4개의 구역에서 회전자계가 발생하도록 프로그램을 코딩하여 작성하여 토크의 크기를 향상시켰다.

프로그램 소스 코드 개선 후 Dynamometer를 이용하여 토크를 측정 한 결과 그림 7의 (a)에서처럼 결상 시 개선 전의 토크는 3상 운전 시와 비교하여 약 59.3%의 감소폭을 가졌지만 스위칭 구간 변경 한 후의 토크 값은 그림 7의 (b)에서와 같이 0.576kg.cm로 약 34.5%의 저감율을 가진다. 따라서 본 논문에서 제안한 코딩기법을 적용했을 때는 기존과 비교하여 약 1.61배 개선되는 것을 알 수 있다.



(a) 결상 시 개선 전의 토크 그래프



(b) 결상 시 개선 후의 토크 그래프

< 그림 7. 결상 시 개선 전후의 토크 비교 >

3. 결 론

본 논문에서는 3상 운전 중 BLDC 모터가 예기치 못한 결상 사고 시에 토크의 감소로 인한 피해를 예방하고자 새로운 알고리즘을 구현하였다. 이를 위해 PWM 제어 기법을 사용하였으며, 2상시 two-step에서 four-step으로 전환하여 구동한 결과 향상된 토크를 얻을 수 있었다.

[참 고 문 헌]

[1] Charles I. Hubert, "ELECTRIC MACHINES", Prentice-Hall Inc, pp, 575-579, 2002.
 [2] Charles M. Gilmore, 'Microprocessors Principles and Applications', SciTech, 2001
 [3] T.J.E Miller, "Brushless Permanent-Magnet and Reluctance Motor Drives," Clarendon Press, Oxford, 1989.
 [4] 설승기 저, "전기기기 제어론 개정판", 홍릉과학출판사, 2009
 [5] Pragason Pillay and Ramu Krishnan, "Application Characteristics of Permanent Magnet Synchronous and Brushless DC Motor for Servo Drives", IEEE Trans, pp.986-996, 1991
 [6] 송봉길 저, "AVR ATmega128 마이크로컨트롤러 (IAR EWAVR 컴파일러를 이용한)", 성안당, 2005