

하이브리드 PWM 방식을 이용한 브러시리스 직류 전동기의 속도 제어 성능 향상

Performance Improvement of BLDC Motor Speed Control Using Hybrid PWM Method

이 동훈*, 김 일환**, 남 부희***
(Donghoon-Lee. Ilwan-Kim. Buhee-Nam)

Abstract – This paper considers pulse width modulation (PWM) methods which are used in 3-phase brushless DC motor controller. Due to many disadvantages of bipolar PWM method, unipolar PWM method is mostly used in industrial field. In constant speed control application, the unipolar PWM method shows a good performance of speed control. But in the wide range of speed control application, it shows a poor performance especially when deceleration is needed. So we propose hybrid PWM method that utilizes two PWM methods according to the sign of speed controller output. The simulation and experimental result shows that the proposed method improves a speed control performance of the brushless DC motor which is applied to industrial sewing machines.

Key Words : Brushless DC, Unipolar PWM, Bipolar PWM, Hybrid PWM, Speed Control

1. 서 론

브러시리스 직류 전동기는 직류 전동기와 달리 부리쉬가 없어 보수가 필요 없으며, 회전자의 위치에 동기하여 고정자 권선에 이상적인 구형과 전류를 흘려주면 직류 전동기와 마찬가지로 전류에 비례하는 일정한 토크를 발생하는 특징이 있어 산업용 기계의 속도 및 위치제어에 많이 활용되고 있다. 그러나 고정자 권선의 인덕턴스 성분으로 인하여 이상적인 구형과 전류를 흘려주는 것은 거의 불가능하기 때문에 권선에 흐르는 전류가 전환되는 구간에서 출력 전류에 맥동이 생긴다[1], [2]. 이러한 전류 맥동은 전동기가 회전할 때 진동과 소음의 원인이 되어 브러시리스 직류 전동기를 고정밀 제어에 사용하는 것에 큰 문제가 되고 있다. 그리하여 전류 전환 구간에서 발생되는 전류 맥동을 줄이기 위한 연구결과가 많이 발표되었다[1], [2], [3], [4]. 그러나 제안된 방법들에 의해 구현된 시스템은 유도 전동기 혹은 동기 전동기 시스템에 비하여 가격대비 제어성능이 좋지 못하므로 실제 산업현장에 적용되기에 적합하지 못하다.

그러므로 본 논문에서는 산업계에서 일반적으로 사용되는 내부 전류제어기가 없이 속도제어기만으로 이루어진 저가형 제어기를 넓은 범위의 가변속 제어 및 위치 제어에 응용하기 위한 목적으로, 제어기의 가장 기반이 되는 PWM 방식에 대하여 연구한다.[5], [6]. 이에 따라 일반적으로 사용되는 유니폴라 PWM 방식이 제어성능에 문제가 되는 부분을 분석하

고, 이러한 영역에서 바이폴라 PWM 방식을 사용하는 하이브리드 PWM 방법을 이용하여 제어 성능을 개선시킨다. 응용분야로서는 공업용 미싱의 속도제어 실험을 통하여 그 성능이 향상됨을 확인함으로써 그 유효성을 보인다.

2. PWM의 전압방정식

2.1 유니폴라 PWM의 전압방정식

그림 1은 유니폴라 PWM에서 스위치 온 시의 동작을 나타낸다. Q1과 Q2가 온 되어 A상에서 C상으로 전류가 흐르는 상태를 보여주고 있으며, 이때의 전압방정식은 식(1)과 같다.

$$L_a \frac{di_a}{dt} + R_a i_a = V_s - E \quad (1)$$

여기서 L_a 는 상간 인덕턴스, R_a 는 상간 저항, i_a 는 전류, V_s 는 직류전원전압, E 는 모터의 상간 역기전력이다.

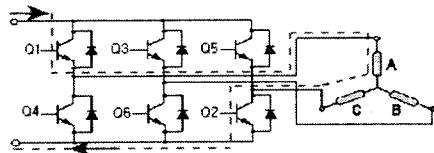


그림 1. 유니폴라 PWM 방식에서 스위치 온시의 전류흐름

유니폴라 PWM 방식의 오프시의 동작은 Q1이 오프되고 Q2는 그대로 온 상태를 유지한다. 이 때 흐르던 전류는 Q4의 다이오드를 통해서 계속해서 흐르며, 이 경우의 전압방정식은 식(2)와 같다.

$$L_a \frac{di_a}{dt} + R_a i_a = -E \quad (2)$$

저자 소개

* : 江原大學 制御計測學科 博士課程

** 正會員 : 江原大學 制御計測學科 副教授 · 工博

***正會員 : 江原大學 制御計測學科 教授 · 工博

식(2)로부터 유니풀라 PWM에서 스위치 오프시의 전류는 역기전력에 의해서만 영향을 받음을 알 수 있다. 한편, 감속을 하는 경우에는 전압지령이 음으로 되므로, 이 때의 온과 오프시의 전압 방정식은 식(3)과 같다.

$$\begin{aligned} L_a \frac{di_a}{dt} + R_a i_a &= -V_s - E \\ L_a \frac{di_a}{dt} + R_a i_a &= -E \end{aligned} \quad (3)$$

식(3)에서 알 수 있듯이 PWM의 온과 오프시 모두에서 $-E$ 보다 더 작은 전압만이 인가됨을 알 수 있고, 이것은 유니풀라 PWM 방식에서 음의 방향의 전류제어를 어렵게 하는 요인이 되어 제어성능을 나쁘게 한다.

2. 2 바이풀라 PWM의 전압 방정식

바이풀라 PWM 방식의 PWM 온시의 전압방정식은 식(4)와 같고, 오프시의 전압방정식은 식(5)로 표현될 수 있다.

$$L_a \frac{di_a}{dt} + R_a i_a = -V_s - E \quad (4)$$

$$L_a \frac{di_a}{dt} + R_a i_a = V_s - E \quad (5)$$

식(4), (5)에서 볼 수 있듯이, 바이풀라 PWM은 음의 전압에 대하여 스위치 온 시에는 공급전압이 $(-V_s - E)$ 로 식(3)과 같으나 오프시에는 $(V_s - E)$ 가 되어 유니풀라 PWM 방식과는 달리 음의 전압에 대한 제한이 없어지게 되며, 바이풀라 PWM 방식의 음의 방향의 전류 제어의 성능이 좋은 이유가 된다.

3. PWM의 출력 특성 분석

3.1 유니풀라 PWM의 출력 특성 분석

유니풀라 PWM의 출력 특성은 듀티 변화에 따른 전류의 파형을 살펴봄으로써 알 수 있다. 유니풀라 PWM 방식에 의한 전류는 Critical Duty Cycle에 의하여 Continuous Conduction과 Discontinuous Conduction으로 나누어 질 수 있다. Continuous Conduction은 전류가 영이 되지 않고 연속적으로 흐르는 상태를 말하며 Discontinuous Conduction은 전류가 영이 되는 부분이 존재하여 전류의 흐름이 부분적으로 끊기는 상태를 말한다. 이 두 상태의 경계부분을 Critical Duty Cycle이라 하며 이는 스위치 온 시의 초기 전류 값이 영이고 스위치 오프기간이 끝나는 시점의 전류 값이 영이 되는 듀티이다. 이 듀티는 식(6)과 같이 계산되어 진다.

$$d_c = \frac{T_a}{T} \ln \left[1 + \frac{E}{V_s} \left(e^{\frac{T}{T_a}} - 1 \right) \right] \quad (6)$$

여기서, 전기자 시정수 $T_a = \frac{L_a}{R_a}$ 이다.

Critical Duty Cycle보다 PWM 듀티가 작은 경우에는 Discontinuous Conduction 상태의 전류 파형이 나타난다. 이

경우 PWM 온 시간(dT)에 의하여 흐르는 최대전류 값(I_{max})과 이 최대 전류 값에 의하여 PWM 오프시 전류가 영이 되는데 걸리는 시간(t_x)은 식(7)에 의하여 계산되어질 수 있다.

$$\begin{aligned} I_{max} &= \frac{V_s - E}{R_a} \left(1 - e^{-\frac{dT}{T_a}} \right) \\ t_x &= T_a \ln \left[1 + \frac{I_{max} R_a}{E} \right] \end{aligned} \quad (7)$$

또한 PWM 온 시(dT)과 PWM 오프시 전류가 영이 되는데 걸리는 시간(t_x)에 의하여 정상상태 전기자 전류(i_a)와 공급전압(v_a)은 식(8)과 같이 표현될 수 있다.

$0 < t < dT$ 일 때,

$$\begin{cases} i_a(t) = \frac{V_s - E}{R_a} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_a}} \right) \\ v_a(t) = V_s - E \end{cases}$$

$dT < t < t_x + dT$ 일 때,

$$\begin{cases} i_a(t) = I_{max} e^{-\frac{(t-dT)}{T_a}} - \frac{E}{R_a} \left(1 - e^{-\frac{(t-dT)}{T_a}} \right) \\ v_a(t) = -E \end{cases}$$

$(t_x + dT) < t < T$ 일 때,

$$\begin{cases} i_a(t) = 0 \\ v_a(t) = 0 \end{cases} \quad (8)$$

PWM 듀티가 Critical Duty Cycle보다 큰 경우에는, Continuous Conduction 상태의 전류 파형이 나타난다. 이 경우의 정상상태 전기자 전류(i_a)와 공급전압(v_a)은 식(9)와 같이 표현된다.

$0 < t < dT$ 일 때,

$$\begin{cases} i_a(t) = \frac{V_s - E}{R_a} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_a}} \right) + I_{min} e^{-\frac{t}{T_a}} \\ v_a(t) = V_s - E \end{cases}$$

$dT < t < T$ 일 때,

$$\begin{cases} i_a(t) = -\frac{E}{R_a} \left(1 - e^{-\frac{(t-dT)}{T_a}} \right) + I_{max} e^{-\frac{(t-dT)}{T_a}} \\ v_a(t) = -E \end{cases} \quad (9)$$

3.2 바이풀라 PWM의 출력 특성 분석

바이풀라 PWM의 출력 특성도 유니풀라 PWM과 같은 방법으로 분석될 수 있으며, Critical Duty Cycle은 식(10)으로, Discontinuous Conduction 상태의 전류식과 Continuous Conduction 상태의 전류식은 각각 식(11)과 (12)로 표현될 수 있다.

$$d_c = \frac{T_a}{T} \ln \left[\frac{1 + e^{\frac{T}{T_a}}}{2} + \frac{E}{2V_s} \left(1 - e^{\frac{T}{T_a}} \right) \right] \quad (10)$$

$0 < t < dT$ 일 때,

$$\begin{cases} i_a(t) = \frac{-V_s - E}{R_a} (1 - e^{-\frac{t}{T_a}}) \\ v_a(t) = -V_s - E \end{cases}$$

$dT < t < t_x + dT$ 일 때,

$$\begin{cases} i_a(t) = I_{\max} e^{-\frac{(t-dT)}{T_a}} - \frac{E-V_s}{R_a} (1 - e^{-\frac{(t-dT)}{T_a}}) \\ v_a(t) = V_s - E \end{cases}$$

$(t_x + dT) < t < T$ 일 때,

$$\begin{cases} i_a(t) = 0 \\ v_a(t) = 0 \end{cases} \quad (11)$$

$0 < t < dT$ 일 때,

$$\begin{cases} i_a(t) = \frac{-V_s - E}{R_a} (1 - e^{-\frac{t}{T_a}}) + I_{\min} e^{-\frac{t}{T_a}} \\ v_a(t) = -V_s - E \end{cases}$$

$dT < t < T$ 일 때,

$$\begin{cases} i_a(t) = \frac{V_s - E}{R_a} (1 - e^{-\frac{(t-dT)}{T_a}}) + I_{\max} e^{-\frac{(t-dT)}{T_a}} \\ v_a(t) = V_s - E \end{cases} \quad (12)$$

4. 하이브리드 PWM 방식의 설계

하이브리드 PWM 방식은 유니폴라와 바이폴라 PWM 방식의 분석된 자료를 토대로 하여 설계된다. 유니폴라 PWM 방식은 음의 방향의 전류제어가 어려우므로, 바이폴라 PWM 방식을 속도제어기의 음의 출력에 대하여 사용한다. 또한 PID 속도제어기의 출력을 전류 지령값으로 사용하며, 이 지령값을 정상상태 평균 전류값으로 만족하는 PWM 드uty로 변환하는 루틴이 포함된다. 정상상태 전류 출력값을 PWM 드uty로 변환하기 위해서는 구하여진 식(6)-(12)를 이용하여 미리 테이블로 구성한 후 사용한다. 그러므로 제어기는 역기전력과 속도제어기의 출력을 입력으로 하여 PWM 드uty가 계산되어지는 입출력 함수와 PID 속도제어기로 구성될 수 있다. 그림 2에 제안한 제어기의 블록도를 나타낸다.

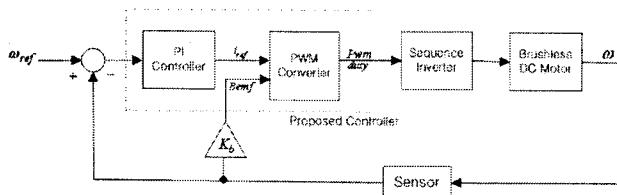


그림 2. PWM 드uty 변환루틴이 포함된 제어기 블록도

4. 실험 결과 및 고찰

그림3과 그림4에 유니폴라 PWM 방식과 제안된 하이브리드 PWM 방식에 대한 공업용 미싱에의 속도제어 실험결과를 나타내었다. 하이브리드 방식이 유니폴라 방식에 비하여 음의 방향의 전류제어가 잘 되어 속도제어 성능이 좋아짐을 알 수 있다.

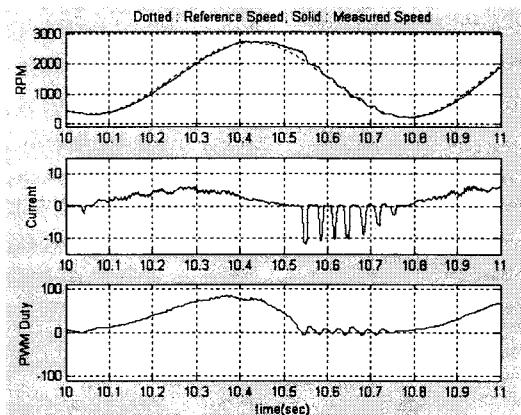


그림 3. 유니폴라 방식을 사용할 때의 속도제어

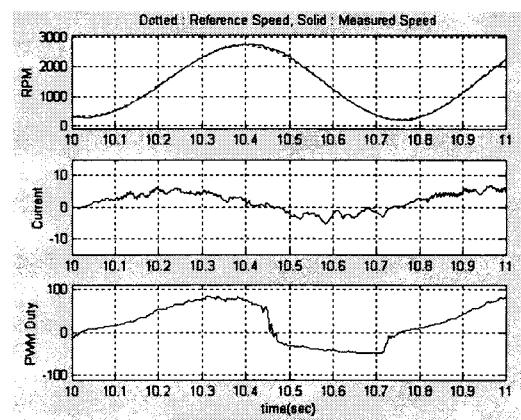


그림 4. 하이브리드 방식을 사용할 때의 속도제어

참 고 문 헌

- [1] R. Carlson, M. Lajoie-Mazenc, and J. C. S. Fagundes, "Analysis of torque ripple due to phase commutation in brushless dc machines", IEEE Trans. on Industry Applications, vol. 28, no 3, pp. 632-638, 1992.
- [2] C. S. Berendsen et al., "Commutation Strategies for Brushless DC Motors : Influence on Instant Torque", IEEE Transactions on Power Electronics. Vol. 8, No. 2, pp. 231-236, 1993.
- [3] Seog-Joo Kang and Seung-Ki Sul, "Direct Torque Control of Brushless DC Motor with Nonideal Trapezoidal Back EMF", IEEE Transaction of Power Electronics, vol. 10, NO. 6, November 1995.
- [4] Chang-hee Won, Joong-Ho Song, and Ick Choy, "Commutation Torque Ripple Reduction in Brushless DC Motor Drives Using a Single DC Current Sensor", ICPE, pp. 409-413, 2001.
- [5] R. Krishnan, "Electric Motor Drives : Modeling, Analysis, and Control", Prentice Hall, pp. 124-143, 2001.
- [6] J. Holtz, "Pulsewidth Modulation for Electronic Power Conversion", Proceedings of the IEEE, Vol. 82, No. 8, pp. 1194-1214, Aug 1994.