

마이크로 프로세서로 손쉽게 구현 가능한 BLDC(Brushless DC)-모터 제어 알고리즘

이 영 주

광운대학교 전자공학과

전화 : 032-580-5737 / 핸드폰 : 016-212-6959

BLDC(Brushless DC) Motor Control Algorithm
to be easily Realized by a Micro Processor

Young-Joo Lee

Dept. of Electronic Engineering, KwangWoon University

E-mail : yyj209@hitel.net

Abstract

BLDC motor is widely used in automation areas for its good maintenance and controllability. In this paper, it is designed for a speed control servo system of sinusoidal type BLDC motor that can be easily adapted to automation systems with lower cost. Also, control parameters & periods are made adjustable according to the sensors of the motor, electric and mechanical time constant, and PI and PD control are used. The processor for the proposed system is a low cost 16bit One-Chip microprocessor. By experimental results from application to the industrial sewing machine, one of the application of BLDC motor, it can be verified that under the given reference, the system is enough as a speed and position servo without overshoots.

I. 서론

BLDC-모터는 우수한 내구성, 같은 체적의 유도 전동기에 비해 큰 토크, 빠른 응답성 및 우수한 제어성능 때문에 현재 각종 메카트로닉스 및 산업자동화 현장에서 서보 모터로서 널리 사용되고 있으며, 향후로도 그 수요가 지속적으로 증대될 전망이다. 모터의 사양 역시, 용도에 따라 저 정밀도의 저가 속도제어형 서보 모터에서부터, 고 정밀도의 속도/위치/토크 제어형에 이르기까지 매우 다양하며, 용량 및 위치검출기 분해능 또한 다양하다.

본 논문은 이러한 BLDC-모터를 마이크로 프로세서를 이용하여 보다 손쉽게, 저렴한 가격으로, 비교적 다

양한 사양의 BLDC-모터를 제어할 수 있는 알고리즘을 제안하고, 실제로, 1회전 내에서 부하변동이 잦고, 항상 정해진 위치에서 정지해야하는 산업용 재봉기에 적용, 그 성능을 평가해 보았다. 산업용 재봉기용 서보 모터는, 용량 400~1000[W], 위치검출기 분해능 200~2000 [PPR]로 다양하며, 전기적/기계적 시정수 또한 다양하다. 이러한 다양한 조건에 대해서, 비교적 용이하게 적용할 수 있는 제어기를 설계하여, 실제 마이크로 프로세서를 이용하여 구현하고 산업용 재봉기에 장착하여 그 성능을 평가하였다.

II. BLDC Motor 제어기 구조

2.1 제어기의 기본구조

통상의 BLDC 모터 제어기의 기본 구조인 마이너 루프 구조를, 360[PPR] 정도의 저 분해능의 위치검출기를 갖는 저가의 모터에서부터, 2000 [PPR]의 고 분해능의 위치검출기를 갖는 비교적 고가의 모터에 함께 적용할 수 있도록 그림1과 같은 구조를 제안하였다.

그림1에서 보는바와 같이, 고 분해능의 위치검출기를 갖는 모터인 경우는 일반의 마이너 루프 구조로(모드-A), 저 분해능의 위치검출기를 갖는 모터인 경우는 위치제어부와 속도제어부를 병렬로 연결하고 그 출력을 서로 더한 값을 Q-축 전류지령으로 사용하는 구조(모드-B)로 전환 되도록 하였다.

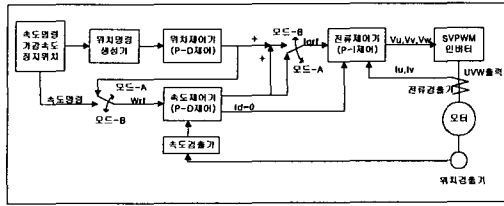


그림3. 제안된 제어기의 기본구조
(Structure of The Proposed System)

2.2 전류제어기

전류제어기는 P-I(Proportional-Integral) 제어를 이용하였으며, 모터에 입력되는 전류의 검출은 3상중 2상만을 검출하였고, 검출된 전류를 각각 자속분전류(I_d)와 토크분전류(I_q)로 변환(D-Q 변환)하고, 전류제어기의 입력전류 명령도 자속분전류명령(I_{dref})와 토크분전류명령(I_{qref})로 입력되도록 하였다. 전류제어 연산의 결과치인 D-축분 전압명령(V_d)과 Q-축분 전압명령(V_q)을 다시 3상으로 변환하여 각 상에 인가할 전압값(V_u,V_v,V_w)을 구하고, 과변조를 거친 후, SVPWM(Space Vector PWM) 인버터 모듈을 구동하도록 하였다. 전류제어에 필요한 파라미터들을 다시 정리해보면, D-Q축 전류명령(I_{dref}, I_{qref}), 검출된 D-Q축 전류값(I_d, I_q), P-I제어 게인(K_{ip}, K_{ii}) 및 전기각(θ)이 있으며, 제어에 필요한 수식은 아래와 같다.

$$I_d = \sqrt{2} \{ I_u \times \sin(\theta + \frac{\pi}{3}) + I_v \times \sin(\theta) \} \quad \text{---(1)}$$

$$I_q = \sqrt{2} \{ I_u \times \cos(\theta + \frac{\pi}{3}) + I_v \times \cos(\theta) \} \quad \text{---(2)}$$

$$dI_{derr} = (I_{dref} - I_d) - (I_{dref1} - I_{d1}) \quad \text{---(3)}$$

$$dI_{qerr} = (I_{qref} - I_q) - (I_{qref1} - I_{q1}) \quad \text{---(4)}$$

$$dV_d = K_{ip} \times dI_{derr} + K_{ii} \times (dI_{derr} - dI_{derr1}) \quad \text{---(5)}$$

$$dV_q = K_{ip} \times dI_{qerr} + K_{ii} \times (dI_{qerr} - dI_{qerr1}) \quad \text{---(6)}$$

$$V_d = \int dV_d \quad \text{---(7)}$$

$$V_q = \int dV_q \quad \text{---(8)}$$

$$V_u = \sqrt{\frac{2}{3}} \{ V_d \times \cos(\theta) - V_q \times \sin(\theta) \} \quad \text{---(9)}$$

$$V_v = \sqrt{\frac{2}{3}} \{ V_q \times \sin(\theta + \frac{\pi}{3}) - V_d \times \cos(\theta + \frac{\pi}{3}) \} \quad \text{---(10)}$$

$$V_w = -(V_u + V_v) \quad \text{---(11)}$$

2.3 속도제어기

속도제어기는 P-D(Proportional-Derivative)제어를 이용하였으며, 제어기의 설정조건에 따라 제어기 입력을 위치제어기 출력 값 또는 별도의 속도명령을 선택할 수 있도록 하였으며, 위치검출기 분해능이 높은 경우(모드-A), 속도제어기의 최종 출력을 Q-축분 전류명

령으로 사용하도록 하였다. 위치검출기 분해능이 낮은 경우(모드-B)는 위치제어기의 출력 값과 더한 값을 Q-축분 전류명령으로 사용하도록 하였다. 또한 속도제어기의 또 하나의 출력 값인 D-축분 전류명령은 모터의 자속분전류를 최소화하기 위해 항상 0으로 설정하였다. 속도제어에 필요한 파라미터로는 속도제어기 입력(W_{rf}), 실제속도(W), P-D제어 게인(K_{vp}, K_{vd}) 및 제어모드(모드-A 또는 모드-B)가 있으며, 제어에 필요한 수식은 아래와 같다.

모드-A : W_{rf}는 위치제어기 출력 값

모드-B : W_{rf}는 속도명령 값

$$dW_{err} = (W_{rf} - W) - (W_{rf1} - W_1) \quad \text{---(12)}$$

$$dI_{drf} = K_{vp} \times dW_{err} + K_{vd} \times (dW_{err} - dW_{err1}) \quad \text{---(13)}$$

$$\text{모드-A : } I_{drf} = \int dI_{drf} \quad \text{---(14)}$$

$$\text{모드-B : } I_{drf} = \int dI_{drf} + \text{위치제어기 출력 값} \quad \text{---(15)}$$

$$I_{drf} = 0 \quad \text{---(16)}$$

2.4 위치제어기의 구조

위치제어기는 P-D 제어를 이용하였으며, 제어기의 설정조건에 따라 위치제어기의 출력 값이 속도제어기의 입력(W_{rf}) 또는 속도제어기의 출력 값과 더해지도록 하였다. 위치검출기 분해능이 높은 경우(모드-A), 위치제어기 출력 값을 속도제어기의 입력으로 사용하였고, 위치검출기 분해능이 낮은 경우, 속도제어기의 출력 값과 더해져 Q-축분 전류명령으로 사용하도록 하였다. 위치제어에 필요한 파라미터로는 위치명령(UDC_{rf}), 실제위치(UDC) 및 P-D제어 게인(K_{pp}, K_{pd})이 있으며, 제어에 필요한 수식은 아래와 같다.

$$dUDC_{err} = (UDC_{rf} - UDC) - (UDC_{rf1} - UDC_1) \quad \text{---(17)}$$

$$dW_{rf} = K_{pp} \times dUDC_{err} + K_{pd} \times (dUDC_{err} - dUDC_{err1}) \quad \text{---(18)}$$

$$W_{rf} = \int dW_{rf} \quad \text{---(19)}$$

III. BLDC Motor 제어기 설계 및 구현

3.1 Hardware 설계

3.1.1 마이크로 프로세서의 선정

마이크로 프로세서의 선정은 16bit×16bit 승산이 가능한 프로세서 중에서 하드웨어 설계부담을 최소화하기 위하여 SVPWM 하드웨어 아키텍처가 내장된 16bit, 16mips급의 마이크로 프로세서(MITSUBISHI M16C62)를 선정하였다.

3.1.2 전류검출용 하드웨어의 설계

마이크로 프로세서에 내장된 10bit ADC (Analog to Digital Converter), 무유도성의 고정밀 Shunt 저항과 ISOL-AMP (Isolation Amplifier)를 이용하여 구현하였다.

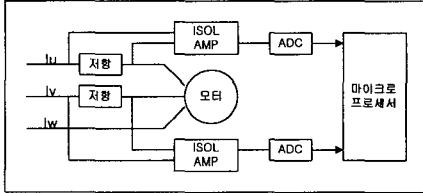


그림4. 전류검출기 구성도 (Block Diagram of Current Sensing)

3.1.3 인버터 모듈의 설계

인버터 모듈은, 하드웨어 설계를 간략화하기 위하여, IPM(Intelligence Power Module)을 이용하였다. 또한 IPM에서 출력되는 에러검출신호를 마이크로 프로세서에 입력함으로써 에러 발생시 이를 프로그램에서 인식하여 적절한 보호조치 및 에러 검출을 알리도록 하였다.

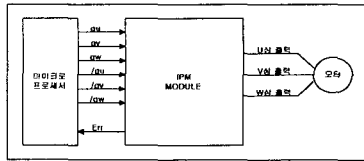


그림5. 인버터 모듈의 구성도 (Block Diagram of Inverter Module)

3.1.4 위치검출기 인터페이스

위치검출기 인터페이스는 마이크로 프로세서에 내장되어 있는 4채널 Up-Down 카운터를 사용하였으며, 모터의 위치검출기로부터 출력되는 90도의 위상차를 갖는 2상 구형파 신호 (A-B 상)를 직접 마이크로 프로세서에 입력하여 모터의 위치 및 속도를 검출하였다.

3.1.5 모터 회전자 자극 검출 인터페이스

모터 계자권선의 Commutation에 필요한 회전자 자극검출신호를 직접 마이크로 프로세서로 입력, 프로그램에서 이를 확인하여 회전자의 자극위치를 판별, Commutation에 필요한 전기각 데이터를 만들어 낼 수 있도록 하였다.

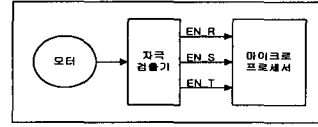


그림6. 자극검출기 인터페이스 (Interface of Pole-Detector)

3.2 Software 구현

연산부하를 줄이고 부동소수점 연산속도가 느린 프로세서에서도 사용이 가능하도록 모든 연산은 정수를 이용하였으며, Software의 호환성을 위해 C-언어를 이용하여 구현하였다. 사용된 컴파일러는 ANSI-C 호환 MITSUBISHI(社)의 NC30 C-컴파일러이며 CPU-에 플레이터를 이용하여 동작을 확인하였다.

3.2.1 전류제어기 Software의 구현

전류제어기 Software의 Flow는 그림5와 같다.

3.2.2 속도제어기 Software의 구현

속도제어기 Software의 Flow는 그림6과 같고, 위치검출기 분해능에 따라 제어주기 가변 및 제어기 모드를 전환하도록 하였으며, 1[rpm] 단위의 제어가 가능하도록 하였다.

3.2.3 위치제어기 Software의 구현

위치제어기 Software는 그림7과 같고, 속도제어기와 마찬가지로 제어대상 모터의 위치검출기 분해능에 따라 제어주기를 가변적으로 설정할 수 있도록 하였다. 입력이 되는 위치명령은 외부에서 제어기로 입력되는 속도명령을 이용하여 생성시켰으며, 속도 명령 값은 가속도/감속도를 주어 생성시키도록 하였고, 속도제어기로 직접 전달될 수도 있도록 하였다.

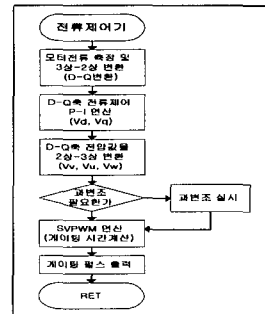


그림7. 전류제어기 Flow (Flow of Current Controller)

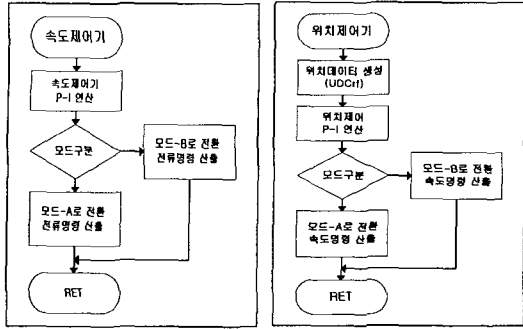


그림8. 속도제어기 Flow (Flow of Speed Controller) 그림9. 위치제어기 Flow (Flow of Position Controller)

IV. 제어기의 성능 검증

4.1 속도 서보로서의 성능

속도 서보로서의 성능평가는 실제 기계에 장착한 상태에서 속도명령과, 가속도/감속도가 주어졌을 때, 얼마나 충실히 추종하느냐를 기준으로 하였으며, 대상모터는 비교적 고가이면서 위치검출기 분해능 2000[PPR] 및 시정수가 작은 모터(MOTOR-A)와, 저가이면서 위치검출기 분해능 360[PPR] 및 시정수가 큰 모터(MOTOR-B)를 대상으로 시험하였고, 가감속 추종결과는 그림8 및 그림9와 같다.

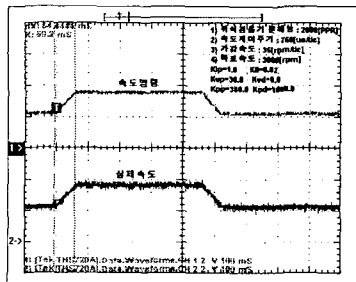


그림10. 모터-A 가감속 추종 결과

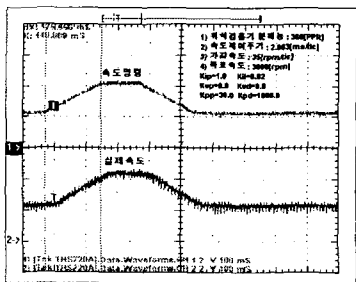


그림11. 모터-B 가감속 추종 결과

4.2 위치 서보로서의 성능

위치 서보로서의 성능평가는 실제 기계에 장착한 상태에서 모터의 1회전 360도 구간 중의 임의위치를 파라미터로 설정하여 제어기에 입력하고, 임의 속도로 모터를 운전하다가 정지 시켰을 때 설정위치와의 위치편차를 기준으로 하였으며, 대상모터는 MOTOR-A와 MOTOR-B를 이용하였다. 실험 결과 모터-A의 경우 목표위치에서 최대 ± 1 도의 위치편차를 보였으며, 모터-B의 경우 최대 ± 3 도의 위치편차를 보였다.

V. 결론

본 논문에서, 제안한 제어알고리즘 및 하드웨어는 DSP가 아닌 16bit급 정도의 마이크로 프로세서에서 비교적 구현이 용이하며 실제로 BLDC-모터의 응용분야의 하나인 산업용재봉기 제어부분에 실제 적용함으로써 그 성능 및 실제 산업현장에서의 적용 가능여부를 평가해 보았으며, 상대적으로 고정밀도를 요하지 않는 조건에서는 충분히 속도/위치서보로 충분한 역할을 할 수 있음을 확인하였다.

이후 보다 추가해야할 과제로는, 가능한 간단한 방법으로 부하의 상태를 스스로 인식하여 각종 제어 파라미터들을 적절히 설정할 수 있는 기법에 대한 연구가 필요하며, 이를 위해 모터의 전기적 시정수와 기계적 시정수, 그리고 이너셔를 추정하여 필요한 파라미터들을 설정하는 방법을 연구한다면 보다 성능이 우수한 제어가 될 것으로 사료된다.

참고문헌

- 1) A.E.Fitzgerald Charles kingsly, Jr. Stephen D.Umans, "ELECTRIC MACHINERY", Forth Edition, McGraw-Hill, PP 311-408, 1983
- 2) IRVING L.KOSOW, "ELECTRIC MACHINERY AND TRANSFORMERS", Second Edition, Prentice-Hall International Editions, PP 214-274, 1991
- 3) Thomas J,Sokira and Wolfgang Jaffe, "Brushless DC Motors (ELETRONIC COMMUTATION AND CONTROLS)", First Edition, TAB BOOKS Inc, PP 1-251, 1990
- 4) 이천전기공업(주) 중앙연구소, "백터제어방식에 의한 유도전동기 Controller 개발", 한국전력공사, PP 74-89, 1995
- 5) CHEEE-MUN ONG, "DYNAMIC SYMULATION OF ELECTRIC MACHINERY", Prentice-Hall Inc, PP 259-350, 1998
- 6) 小山正人 · 玉井伸三 著 / 이용중 · 유우종 · 송승호 공역, "산업용 서보모터의 제어시스템 설계", 대영사, PP 1-217, 1999