

복합연막탄 선회구동장치를 위한 정밀 BLDC 서보 위치 제어기 개발

구본민 · 박무열 · 최중경 · 최승진*

창원대학교

The Development of a Precision BLDC Servo Position Controller for the Composite Smoke Bomb Rotational Driving System

Koo Bon Min · Park Moo yurl · Choi Jung Keyung · Choi Sung Jin*

Changwon National University, C&G*

E-mail : kolio@hananet.net

본 연구는 산업자원부 지방기술혁신 사업(RTI04-01-03) 지원으로 수행되었습니다.

요 약

본 논문은 BLCD 모터를 사용하여 복합연막탄 선회구동 장치를 정밀 제어하는 시스템 설계 및 알고리즘 개발을 그 목적으로 하고 있다. 복합연막탄은 적위협을 가리는 역할을 하므로 매우 짧은 시간 내에 적 위협을 감지하고 그에 대응해야 하므로 빠른 응답성을 갖도록 설계 되어야 한다. 따라서 300Hz ~ 500Hz의 빠른 전류 응답성을 가지는 전류 제어기를 설계하였으며 기존에 많이 사용되던 공간벡터 PWM을 사용하지 않고 MIX-MAX PWM 방식을 사용하여 연산속도를 향상 시켰다. 연막탄이 정확히 발사되기 위한 정밀 위치제어기를 제안하였으며 PC기반의 모니터링 프로그램을 통해 전류, 전압, 위치, 속도 등의 파라미터를 그래프로 확인 가능하도록 구현하였다.

부동소수점 방식의 고속 DSP인 TMS320VC33을 사용하여 제어기를 구성 하였으며 PWM발생부는 CPLD인 EPM7128을 사용하여 구현 하였다.

ABSTRACT

This paper presents a study on the accuracy position Controller design for the Composite Smoke Bomb Rotational driving system using a BLDC servo motor. Function of Smoke Bomb is blind in the enemy's sight so that need to high response. The BLDC servo motor controller was designed with DSP(TMS320VC33), IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor), IGBT gate driver and CPLD(EPM7128). This paper implements those control with vector control and MIN-MAX PWM.

Vector control requires information about rotor positions, a resolver should be used to achieve that. The main controller is implemented with a TMS320VC33 high performance floating-point DSP(Digital Signal Process) and PWM Generator is embodied using EPM7128.

1. 서 론

정밀한 제어 특성을 요구하는 산업용 혹은 가정용 기기의 구동을 위한 서보용용 분야에 DC 모터대신 BLDC 모터 사용이 급격히 증대되고 있다. BLDC모터 구동 시스템은 기존의 DC모터를 사용한 서보 시스템에서의 브러쉬 및 정류자편의 기계적인 마모에 의한 유지 보수 문제와 이로 인한 소음, 분진, 스파크가 없어 사용환경에 제약이 없으며 속응성, 제어성, 신뢰성이 우수하다. BLDC모터를 원활히 제어하기 위해서는 항상 정확한 회전자의 위치 정보를 알아야 하고 이 위치 정보를 토대로 3상 입출력 변수 관계식을 단

상의 입출력 변수 표현식으로 바꾸어 제어 입력 계산을 용이하게 해주는 벡터 제어방법이 많이 사용되고 있으며 현대의 전자 제어 기술의 도움으로 그 유용성이 한층 커지고 있다. 회전자의 위치정보를 획득하기 위해서 회전자에 레졸버나 엔코더, 또는 홀소자와 같은 위치 검출기를 부착하여야 한다. 구현된 시스템에서는 회전자의 절대 위치 검출을 위해 레졸버를 사용하였으며 아날로그 형태의 레졸버 출력을 RDC(Resolver to Digital Converter)를 통해 디지털 신호로 변환하여 그 절대 위치를 검출했다.

전체적인 제어 시스템의 하드웨어 구성은 DSP(TMS320VC33)를 중심으로 IGBT(Insulated

Gate Bipolar Transistor)와 IGBT의 게이트를 구동하기 위한 PWM펄스를 생성하는 CPLD부, 드라이버, 정류기와 평활용 콘덴서를 사용한 컨버터부, 전동기의 각 상전류를 센싱하는 회로부, DC 링크 전압의 변동을 검출하는 회로부, 과전압과 과전류로 인한 시스템 보호회로, 절대 위치 검출을 위한 레졸버 인터페이스부 등으로 크게 구성되어 있다. 본 논문에서는 BLDC모터를 사용하여 복합연막탄의 선회구동부를 제어 하는 것을 그 목적으로 하고 있으므로 빠른 응답특성을 갖는 시스템의 구성에 큰 비중을 두고 설계 되었다.

실제 구현된 시스템의 투시도를 그림 1-1에 나타내었다.

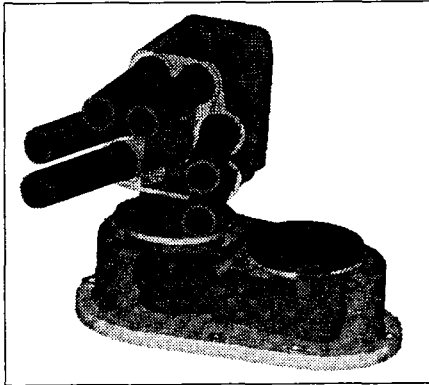
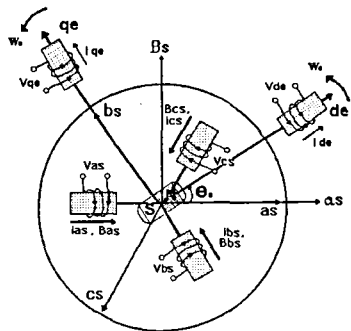


그림 1-1 실제 구현된 시스템 투시도

II. 본론

2.1 BLDC모터의 벡터제어기법



as-bs-cs : Y 또는 Δ 결선인 3상의 고정자 자기 좌표축
 as-bs : 2상의 직각 고정자 자기 좌표축
 de-qe : 회전자의 동기 속도 회전하는 2상 직각 좌표축

그림 2-2. 2차원공간에서의 3상 고정 좌표계(as-bs-cs)와 2상 동기 회전좌표계(de-qe)의 관계

고정자에 인가되는 전원은 3상의 서로 120도 위

상차를 갖는 전압, 전류이지만 타여자 직류전동기와 같은 특성을 갖게 하기 위해 한 축(qe 축)이 회전자 영구자석 자계와 직각을 유지하면서 회전자와 같은 속도로 회전하는 2상의 직각 동기회전축을 제안하고, 이 직각 축 상에서 토크발생 전류(iqe)를 계산한 후 다시 이를 구현할 수 있는 3상 전류를 만드는 것이 BLDC 전동기의 벡터제어임을 알 수 있다.

3상의 전류의 합이 0 이므로 다음 조건을 이용하여 고정자 3상의 전압방정식을 표현하면 식 (1)과 같다. ($i_{as} + i_{bs} + i_{cs} = 0$)

$$\begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + \frac{d}{dt}L_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s + \frac{d}{dt}L_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s + \frac{d}{dt}L_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} E_{as} \\ E_{bs} \\ E_{cs} \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서 V_{as} , V_{bs} , V_{cs} 는 고정자 상전압이며 i_{as} , i_{bs} , i_{cs} 는 고정자 상전류, E_{as} , E_{bs} , E_{cs} 는 영구자석 계자가 고정자 권선에 유기되는 속도 기전력이다. 벡터제어를 하기 위해 좌표계 변환을 거쳐 다음 수식들을 얻을 수 있다.

$$\begin{cases} v_{de} = (R_s + pL_d)i_{de} - \omega_m L_q i_{qe} \\ v_{qe} = (R_s + pL_q)i_{qe} + \omega_m L_d i_{de} + \omega_m \Psi_f \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} \frac{d\omega_m}{dt} = -\frac{B}{J}\omega_m + \frac{K_t}{J}i_{qe} - \frac{T_L}{J} \\ \frac{d\theta_m}{dt} = \omega_m \\ (\omega_m = \frac{\omega_e}{P}, K_t = \frac{3}{2}P\Psi_f) \end{cases} \quad (3)$$

2.2. 전압변조 방식

벡터제어를 하기 위해서 전압의 폭을 조절하여 전류의 양을 조절하는 각종 변조기법들이 사용되고 있다. 지금까지 연구되어진 전압 변조 방식은 크게 최적 전압 변조 방식, 삼각파 비교 전압 변조 방식, 공간 벡터 전압 변조 방식(Space Vector Modulation, SVM), 오프셋(Offset) 전압을 이용한 전압 변조 방식 등이 있다. 특히 SVM 기법은 다른 방식에 비해 직류링크 전압의 이용율이 높고, 전류 고조파 왜형을 크게 줄일 수 있어 다른 방식보다 우수하다. 그러나 SVM은 섹터 및 전압 변조 방식을 일일이 고려하여 구현되는 반면에, 오프셋 전압 방식은 SVM과 직류 링크 전압 이용률은 같지만, 섹터의 판별 없이 다양한 전압 변조 방식을 간단히 구현할 수 있어서 연산 수행 시간이 감소하는 장점이 있다. 본 논문에서는 오프셋(Offset) 전압을 이용한 전압변조 방식을 사용하였다.

2.3. 육섯 전압을 이용한 전압변조 방식

본 논문에서 사용된 육섯 전압을 이용한 전압변조 방식은 육섯 전압을 이용하여 폴전압을 결정 한 후, 게이팅 인가시간을 직접적으로 계산하므로 간단히 구할 수 있다. 육섯 전압 V_{sn} 은 임의로 선정가능하며 이 값에 따라 기존의 다양한 전압 변조 방식이 구현될 수 있다. 이 방식은 3상 출력 상전압의 합은 0 이므로, 폴전압에 직류성분을 인가하여도 실제출력 상전압에는 나타나지 않는다는 것을 의미한다. 즉, 육섯 전압은 3상 전압 변조의 숨겨진 자유도라 할 수 있다. 상전압 지령치중 최대값, 최소값을 판단하면, 선택 가능한 육섯 전압의 범위는 다음과 같다.

$$-\frac{V_{dc}}{2} - V_{min} \leq V_{sn} \leq \frac{V_{dc}}{2} - V_{max} \quad (4)$$

주어진 상전압 지령치로부터 식(4) 범위 안의 적절한 육섯 전압을 선택하여 폴 전압 지령치를 결정할 수 있다. 대칭 공간 벡터 전압 변조 방식의 원리는 유효 전압 벡터 (V_n, V_{n+1}) 가 전압 변조의 한 주기 내에 정 중앙에 위치하도록 하는 것이다. 만약 최대치 폴전압 및 최소치 폴전압의 절대값이 동일할 경우, 그림 2-2에서 알 수 있듯이 유효 전압 벡터가 전압 변조의 한 주기 내에 중앙에 위치하게 한다. 따라서 육섯 전압을 최대치 폴전압 및 최소치 폴전압의 절대값이 동일하도록 설정하면 기존의 대칭 공간 벡터 전압 변조 방식을 구현할 수 있다. V_{sn} 은 식 (5)과 같다.

$$V_{sn} = -\frac{V_{max} + V_{min}}{2} \quad (5)$$

폴전압은 기본적으로 스위칭 상태에 의해 결정되므로 폴전압을 이용하여 스위칭 시간을 결정하는 것은 다른 전압정보(상전압 또는 정지좌표계 ds-qs 전압)를 이용하는 것보다 훨씬 간단하다. 폴전압과 게이팅 인가시간 사이의 관계를 그림 2-2에 나타내었다.

그림에서 보면 폴전압과 게이팅 인가시간 사이의 선형적인 관계를 이용해서, 게이팅 시간을 구한다. 한 주기 내에 모든 소자가 온(ON)하는 구간을 온 시퀀스(ON sequence), 오프(Off)하는 구간을 오프 시퀀스(Off sequence)라 하며, 식(6), (7)는 각각 온시퀀스, 오프 시퀀스일때의 게이팅 시간을 나타낸다.

$$T_{ga} = -\frac{V_{sn}}{V_{dc}} \cdot T_s + \frac{T_s}{2} \quad (ON) \quad (6)$$

$$T_{ga} = \frac{V_{sn}}{V_{dc}} \cdot T_s + \frac{T_s}{2} \quad (OFF) \quad (7)$$

이러한 현상이 일어날 경우 동일 위상 과변조 기법을 이용하여 식(8)와 같이 새로운 $V'_{as}, V'_{bs}, V'_{cs}$ 를 계산한다. α 값은 식(9)으로 둔다. 식(5)로 육섯 전압을 다시 설정한 후 폴전압을 이용하여 게이팅 인가시간을 다시 구해준다.

$$V'_{as} = \alpha V_{as}, V'_{bs} = \alpha V_{bs}, V'_{cs} = \alpha V_{cs} \quad (8)$$

$$\alpha = \frac{V_{dc}}{V_{max} - V_{min}} \quad (9)$$

육섯 전압 변조 방식의 전압 변조 지수의 최대값을 구해보면, 상 전압 지령치의 주기성에 의해 전압 지령치가 섹터1에 속해 있으며, 식(12)을 만족한다고 가정하자.

$$V_{max} = V_{as}, V_{min} = V_{cs} \quad (10)$$

$$V_{max} - V_{min} \leq V_{dc} \quad (11)$$

식(4)으로부터 유효한 육섯 전압이 선택될 수 있으려면 식(11)을 만족해야한다. 식(10), (11)을 연립하여 구한 전압 변조 지수의 최대치는 $2/\sqrt{3}$ 이며 이 값은 기존의 SVM과 동일하다.

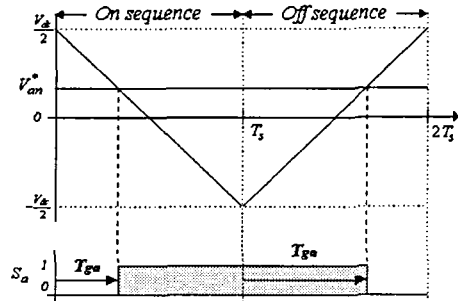


그림 2-2 폴전압과 게이팅 인가시간의 관계

2.4. 위치제어 알고리즘

본 시스템에 사용된 전체적인 제어주기는 그림 2-3에서 보는바와 같이 51.2us를 기준으로 전류제어를 수행하며 1ms 마다 속도제어와 위치제어를 수행하는 형태로 구성되어 있다.

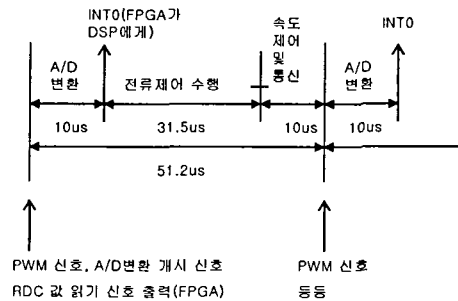


그림 2-3 전체 제어 흐름도

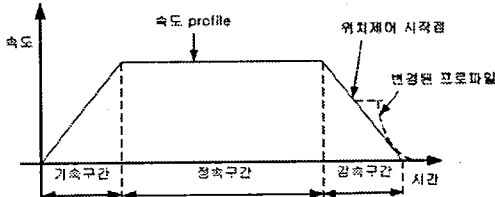


그림 2-4 일반적인 위치제어 방법

일반적인 위치제어 방법으로는 그림 2-4에서와 같이 가속구간과 정속구간에서는 정해진 속도 프로파일(Profile)에 의해 속도제어를 통하여 목표 위치를 추종하다가 위치오차가 일정 범위 안에 들어오는 순간부터 위치제어를 시작하는 것이다. 이 방법의 경우 위치제어를 시작하기 전까지는 계속해서 위치 오차가 누적되므로 위치제어를 시작하는 시점에 누적된 위치오차에 의한 제어입력이 크게 들어가게 되어 전류의 급격한 변화를 가져오게 되고 위치추종 시간이 증가하게 된다.

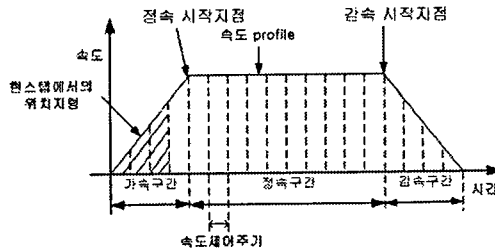


그림 2-5 본 논문에 제안된 위치제어 방법

본 시스템에 제안된 위치제어 방법은 일반적인 위의 방법 대신 초기에 위치 지령으로부터 가속구간, 정속구간, 감속구간을 지정한 뒤 각 구간별로 세분화된 위치 지령을 형성하는 방법을 제안하였다. 따라서 위치제어가 진행되어감에 따라 현재 구간이 가속, 정속, 감속중 어느 구간인지를 판별한 뒤 각 구간별로 그 스텝에 해당하는 면적을 통해 위치 지령을 생성해 내고 그 위치 지령과 센싱된 현재 위치로부터 위치오차를 계산하여 속도 지령을 만들어 내는 방법을 사용하였다. 이러한 형태로 제어를 할 경우 계산량이 많아지는 단점이 있으나 고속의 DSP를 사용하므로 그것은 그다지 큰 문제가 되지 않았으며 단순한 P 제어만을 사용하여 만족할 만한 제어 특성을 보였으며 일반적인 위치제어에서 나타났던 위치제어 시작 시점까지 위치 오차가 크게 누적되어 전류의 급격한 변화를 가져오던 문제를 줄일 수 있었다.

III. 실험결과

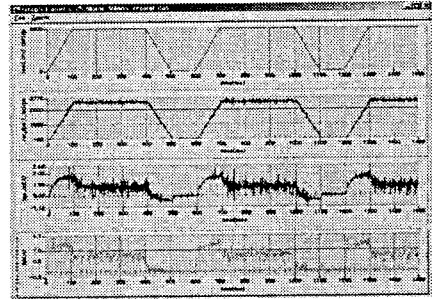


그림 3-1 속도제어 결과

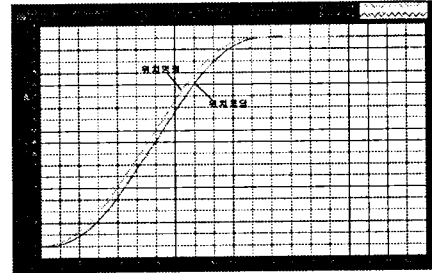


그림 3-2 위치제어 결과

IV. 결론

본 논문은 BLDC 모터를 사용하여 복합연락단 선회동 장치에 사용될 정밀 위치제어기를 설계 하는데 그 목적을 두고 연구 되었다. 빠른 응답 특성과 정밀한 위치제어를 위해 많은 연산량이 요구됨에 따라 옵셋 전압을 이용한 전압 변조 방식을 사용하여 연산량을 줄이고 고속의 부동 소수점 연산 전용의 DSP인 TMS320VC33을 사용하여 빠른 처리가 가능한 제어 시스템을 구성하였다. PWM 발생부는 CPLD(EPM7128)를 사용하여 소프트웨어적으로 구현하였다. 이러한 시스템을 토대로 정밀 위치제어에 사용될 위치제어 알고리즘을 제안 하였으며 실제 실험을 통해 빠르고 정확한 위치제어가 이루어짐을 확인하였고, 실제 부하 조건의 시스템에 장착하여 우수한 성능을 검증하였다.

참고문헌

- [1] Recharad Valentine "Motor Control Electronics Hand Book, McGraw-Hill 1998.
- [2] Dorf, Modern Control System, Addison Wesley Publishing Company, 1992.
- [3] 최중경, "서보기 제어특론 I", 창원대학교 대학원, 1999.
- [4] 서울대학교 기초전력공학 공동연구소 하계강좌, "전동기 구동 시스템의 설계 및 실습"