
전차의 포탑 선회, 고저 구동용 10kW BLDC 전동기

가변속 전류제어기 개발

박무열 · 구본민 · 최중경

국립창원대학교

The Development of a Speed Changeable Current Controller for Driving a 10kW BLDC Motor for Revolving and Elevating a Turret of a Tank

Moo-yurl Park · Bon-min Koo · Jung-Keying Choi

Changwon National University

E-mail : home6641@naver.com

요 약

본 논문에서는 전차 포탑의 선회, 고저를 담당하던 기존의 유압시스템을 모터를 사용하는 전기시스템으로 대체한 후 이 시스템에 벡터제어기법을 적용하였다. 모터의 각 상에 원하는 교류 전류를 공급하기 위한 전압원 인버터의 스위칭 방법으로는 주로 사용하는 공간벡터 PWM 변조방식 보다는 연산량이 적어서 빠른 연산을 수행할 수 있는 MIN-MAX PWM 변조방식을 사용하였으며 디지털 필터를 설계 적용하였다. 설계된 전류제어기는 전차의 환경시제에서 전류제어, 속도제어, 주파수응답 및 속도 궤적 추종 실험을 하였으며 그 성능을 입증하였다.

ABSTRACT

For revolving and elevating a turret of a tank, we substitute an existing oil pressure system with an electric system using a motor and applied the vector control method to this system. A switching method of an inverter for providing desired sinusoidal current to each phase of a motor, we adopted min-max pulse width modulation method which takes less computation time, rather than space vector pulse width modulation method. We designed a digital filter and applied it to the control system. Developed current controller is verified its performance through a current control test, speed control test, frequency response and tracking a profile of speed test.

키워드

BLDC, 벡터제어, PWM, 포탑제어

1. 서 론

근래에 많이 사용되는 브러시리스 직류전동기(Brushless Direct Current Motor, BLDC)는 기존의 직류전동기가 가진 가장 큰 약점인 정류자와 브러시의 마모로 인한 정기적인 유지, 보수, 고속 회전 및 사용 환경의 제약을 극복하고 가장 큰 장점인 선형적인 전류-토크 특성을 구현하였다. 이러한 BLDC 전동기의 장점 때문에 최근에는 전차의 포탑 제어에 사용되던 기존의 유압 시스템이 전동기를 사용하는 전기시스템으로 변화되고

있다.

본 논문에서는 포탑의 고저, 선회 구동을 위하여 BLDC 전동기를 사용하였으며 벡터제어 알고리즘 및 육섯 전압을 이용한 전압변조방법을 이용하여 전류제어기를 구현하였다. 전동기의 구동에 필요한 여러 가지 주변 장치들과 실제 제어 알고리즘을 연산, 수행하는 초고속 연산 처리 능력을 가지는 디지털 신호처리기(Digital Signal Processor, DSP)를 사용하여 시스템을 제작하였으며, 이들 간의 인터페이스는 하드웨어를 간략화하기 위하여 대단위 프로그래머블 로직 장치

(Complex Programmable Logic Device, CPLD)를 통해 구현하였다. 제작된 시스템은 전차의 환경 시제에서 선회/고저 전류제어, 속도제어 및 사다리꼴 속도 궤적 추종 시험을 통하여 그 성능을 보여준다.

II. 본론

1. 좌표계변환을 통한 동기좌표계에서의 전압방정식 표현

시스템의 모델에 있어 시스템에 영향을 주는 모든 요소들을 고려한다는 것은 현실적으로 불가능하며 BLDC 전동기의 수학적 모델에 있어 아래와 같은 현실적인 가정을 전제로 BLDC 전동기의 수학적 모델을 전개하게 된다.

- 고정자 권선은 3상 Y 결선 대칭분포이며 공극의 기자력은 정현파이다.
- 고정자 철심의 자화특성은 선형이다.
- 고정자 철손은 무시한다.
- 회전자는 표면 부착형으로 영구자석의 비투자율이 거의 1이므로 실질적인 공극의 길이가 커서 돌극성이 없다.
- 회전자 영구자석의 전기저항이 매우 크므로 동손 및 철손은 무시한다.

동기 프레임 모델은 인가전원의 각속도(ω_e)와 같은 속도로 회전하는 동기회전좌표계에서 본 모델이다. 이 모델은 정현파 입력 시에 변수들이 정상상태에서 직류량으로 나타나기 때문에 교류기 해석에 많이 적용되고 있다. 먼저 3상 고정자 좌표계(as-bs-cs)와 2상 직각 동기회전좌표계(de-qe)의 관계 그리고 각 좌표계에서의 등가 코일 형상과 합성 벡터의 모습을 그림 1에 보인다. 그림 2는 코일로 등가 표현된 영구자석 자계가 de축과 일치되도록 벡터제어를 실행하는 경우에 있어 BLDC 전동기의 등가 de-qe 모델을 보여준다.

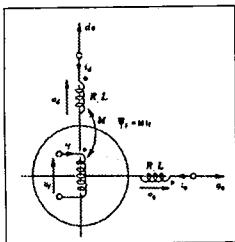


그림 1. 코일 등가된 영구자석 자계와 동기회전축과의 관계

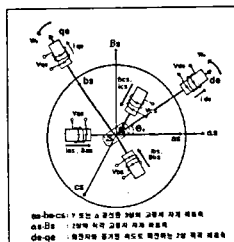


그림 2. 3상 고정좌표계와 2상 동기회전좌표계의 관계

위 그림에서 실제 고정자에 인가되는 전원은 서로 120도 위상차를 갖는 3상의 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 축상에서 토크발생 전류(iqe)를 계산한 후 다시 이를 구현할 수 있는 3상 전류를 만드는 것이 BLDC 전동기의 벡터제어 임을 알 수 있다.

동기회전축 상에서의 변수로 표현되는 모터 방정식인 동기 프레임 상의 모델을 얻기 위해서는 먼저 3상 고정자 좌표계에서의 전압-전류-자속방정식으로 표현되는 3상 모델로 BLDC 모터의 특성을 나타내야 한다.

$$V_{abc} = R_s I_{abc} + \frac{d\lambda_{abc}}{dt} \quad (\text{수식 1})$$

$$\begin{aligned} (V_{abc} &= [v_{as} \ v_{bs} \ v_{cs}]^T, R_s : \text{고정자저항}, \\ I_{abc} &= [i_{as} \ i_{bs} \ i_{cs}]^T, \lambda_{abc} = [\lambda_{as} \ \lambda_{bs} \ \lambda_{cs}]^T) \end{aligned}$$

고정자 각 상에 유기되는 쇄교자속(flux linkage) λ_{abc} 는 다음과 같이 다시 표현된다.

$$\lambda_{abc} = L_s I_{abc} + \lambda_m \quad (\text{수식 2})$$

여기서, L_s 는 고정자 각 상의 인덕턴스이고, λ_m 은 회전자의 영구자석에 의해 고정자 축에 유기되는 쇄교자속이다. 이 유기자속은 3상 고정좌표계의 as 축을 기본으로 하는 회전자의 전기각 θ_e 에 따라 수식 3과 같이 정현적으로 변화한다. 이러한 쇄교자속의 회전자 절대위치에 따른 정현파 분포 가능성은 인가전원의 주파수와 회전자의 회전 주파수가 같은 BLDC 전동기에 있어 회전자의 위치에 동기된 인가전원의 필요성과 균일한 최대토크 발생을 전제로 할 때 이루어진다. 대부분 영구자석 회전자가 동기회전 좌표계의 d 축과 일치되도록 하고 3상 인가전류에 의한 합성벡터는 qe 축에 일치시켜 벡터제어를 수행한다. 그림 1에 이 관계가 잘 도시되어 있다.

$$\lambda_m = \Psi_F \begin{bmatrix} \cos \theta_e \\ \cos(\theta_e - \frac{2}{3}\pi) \\ \cos(\theta_e + \frac{2}{3}\pi) \end{bmatrix} \quad (\text{수식 3})$$

$$\theta_e = \int_0^t \omega_e(\tau) d\tau + \theta_e(0) \quad (\text{수식 4})$$

위 식에서 Ψ_F 는 영구자석에 의해 고정자 권선에 유기되는 쇄교자속의 크기이다. 3상 방정식에

영구자석에 의한 쇄교자속 항(수식2)을 대입한다.

$$V_{abc} = R_s I_{abc} + \frac{dL_s I_{abc}}{dt} + E_{abc} \quad (\text{수식 5})$$

여기서 E_{abc} 는 회전자의 회전에 의해 각 상의 코일에 유기되는 역기전력(Back EMF)으로 다음과 같이 표현된다.

$$E_{abc} = -\omega_e \Psi_F \begin{bmatrix} \sin\theta_e \\ \sin(\theta_e - \frac{2}{3}\pi) \\ \sin(\theta_e + \frac{2}{3}\pi) \end{bmatrix} \quad (\text{수식 6})$$

3상 고정좌표계 값을 동기 속도 ω_e 로 회전하는 회전 좌표계 값으로 바꾸기 위해 변환 행렬을 곱하고 정리하면 동기 회전 프레임상의 모델은 다음과 같다.

$$\begin{cases} v_{de} = R_s i_{de} + \frac{d}{dt} \lambda_{de} - \omega_e \lambda_{qe} \\ v_{qe} = R_s i_{qe} + \frac{d}{dt} \lambda_{qe} + \omega_e \lambda_{de} \end{cases} \quad (\text{수식 7})$$

$$\begin{cases} \lambda_{de} = L_d i_{de} + \Psi_F \\ \lambda_{qe} = L_q i_{qe}, \quad (L_d = L_q = L_s) \end{cases} \quad (\text{수식 8})$$

II. 회전자의 절대위치에 따른 θ_e 의 결정

BLDC 전동기에 벡터제어를 잘 적용하기 위해서는 3상 고정좌표계와 2상 동기회전좌표계사이의 정, 역 변환을 잘 할 수 있어야 한다. 이를 위해서는 변환 공식에 포함되어 있는 θ_e 의 정보가 필요하다. 이 정보 중에도 특히 $\theta_e(0)$ 의 정보가 중요한데, 그 이유는 일단 초기 위상이 결정되면 회전자의 전기각 위치 변화에 따라 인가되는 합성자계 역시 똑같은 각 변위를 가지도록 벡터제어가 되기 때문이다. 즉 초기 위상의 부적절한 선택에 의해 영구자석 자계와 고정자 합성자계가 최고의 토크를 발휘하는 90°의 위상차를 가지지 못하는 경우가 발생할 수 있는 것이다. 이러한 두 자계의 위치 관계를 벡터제어에서 지켜주기 위해서는 3상 고정좌표계와 2상 직각 동기회전좌표계가 표현되는 2차원 공간에서 영구자석자계의 위치를 표현 할 수 있어야 한다.

제어를 위한 i_{qe} 값을 지정하고 i_{de} 값을 0으로 놓았을 때 벡터제어에 의해 실제 인가 할 3상 전류 값을 구하기 위해 다음과 같은 역 변환 식을 이용한다.

$$\begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} = \frac{3}{2} \begin{bmatrix} \cos\omega t & -\sin\omega t \\ \cos(\omega t - \frac{2}{3}\pi) & -\sin(\omega t - \frac{2}{3}\pi) \\ \cos(\omega t + \frac{2}{3}\pi) & -\sin(\omega t + \frac{2}{3}\pi) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{de} \\ i_{qe} \end{bmatrix} \quad (\text{수식 9})$$

$$\begin{aligned} i_{as} &= i_{de} \cos\theta_e - i_{qe} \sin\theta_e \\ &= \sqrt{i_{de}^2 + i_{qe}^2} \cos(\theta_e + \theta) \\ &= \sqrt{i_{de}^2 + i_{qe}^2} \cos(\omega t + \theta_e(0) + \theta) \end{aligned} \quad (\text{수식 10})$$

여기서 θ 는 qe축 전류와 de축 전류가 이루는 각을 의미하며, de축 전류를 0으로 놓았기 때문에 90°가 된다. $\theta_e(0)$ 는 현재 영구자석 자계의 위치이므로 210°를 대입한다. 이 결과 t=0 에서의 3상 전류는 다음과 같이 결정되며, 이 값에 의해 고정자의 합성자계벡터가 영구자석 자계에 비해 CW 방향으로 90°앞서서 발생함을 알 수 있다.

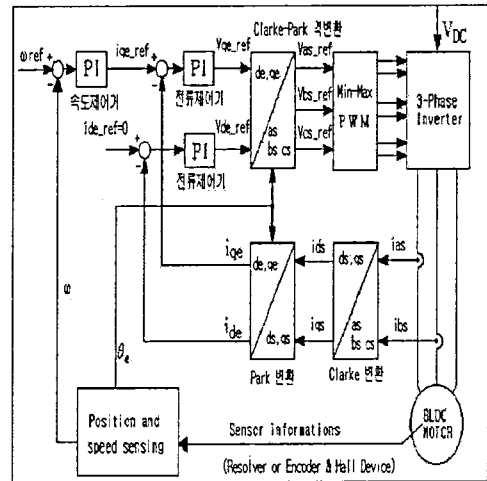


그림 3. 육상 전압을 이용한 전압변조방식을 이용하는 벡터제어 블럭도

III. 성능 평가 결과 및 분석

본 논문에서 사용된 전차의 환경시제 고저/선회 전력증폭기의 전류, 속도제어 특성 및 주파수 응답 특성을 시험한 결과 다음과 같은 결과를 얻었으며 이는 전차의 체계 요구조건을 만족하였다.

표 1. 전류제어 응답특성

구분	입력(A)	상승시간(sec)	Ripple(A)
선회	CW	30	± 3.0
	CCW	30	± 3.0
고저	상승	30	± 3.0
	하강	30	± 3.0

표 2. 선회 시스템의 계단파형 입력특성

구분	입력 (rad/s)	최대치 (mil/s)	최대치 도달 시간(s)	상승 시간 (s)	오버 슈트 (%)
선회 시계	0.035	52.95	0.207	0.084	48.3
	0.175	221.17	0.303	0.214	24.0
방향	0.349	393.89	0.523	0.366	10.8
선회 반시계	0.035	53.15	0.208	0.081	48.9
	0.175	218.16	0.295	0.207	22.4
방향	0.349	390.15	0.509	0.360	9.7

표 3. 고저 시스템의 계단파형 입력특성

구분	입력 (rad/s)	최대치 (mil/s)	최대치 도달 시간(s)	상승 시간 (s)	오버 슈트 (%)
고저 상승	0.035	61.88	0.119	0.067	73.3
	0.175	264.40	0.127	0.075	48.3
	0.349	428.20	0.222	0.158	29.4
고저 하강	0.035	55.88	0.090	0.058	56.5
	0.175	253.07	0.122	0.074	41.9
	0.349	410.61	0.224	0.155	15.5

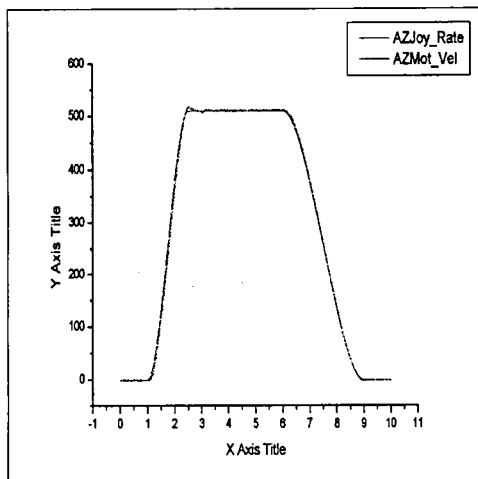


그림 4. 500mil/s의 포탑 쪽 최고 속도를 사다리꼴 가감속 패턴에 의해 추종하는 결과

그림 4는 가속구간 및 정속구간에서는 정해진 속도 궤적으로 목표 위치를 추종하다가 위치오차가 일정 범위 안에 들어오는 순간부터 위치제어를 시작하여 얻어진 그래프이다. 여기서, 1 mil/sec [포탑] = 0.0009803 rad/sec [포탑] = 0.009362 rpm [포탑] = 6.035 rpm [모터]이다.

IV. 결 론

본 논문에서는 전차 포탑의 선회, 고저 구동을 위하여 BLDC 전동기를 사용하여 벡터제어 기법을 적용하였다. 빠른 응답 속도를 얻기 위해 최대 8개의 명령을 동시에 처리하는 고속의 부동소수점(floating point)형 DSP(TMS320C6701)를 사용하였으며, 전동기 제어에 필요한 여러 주변 장치들과의 인터페이스 및 전압원 인버터의 스위칭을 위한 PWM 발생로직을 CPLD(EPM7256S)를 이용해 VHDL로 구현하여 회로를 간략화 시켰다. 속도 궤적 프로파일을 적용하여 가속시에 피크성 전류에 의한 기계적 마모를 줄이고 속도제어 추종 성능을 개선하였다. 개발된 시스템을 전차 환경시제에 실험하여 전차의 요구조건을 만족하는 결과를 얻어 그 성능을 입증하였다.

참고문헌

- [1] 최중경, "서보기기 제어특론 I", 창원대학교 대학원, 1999
- [2] Phillips & Nagle, "Digital Control System Analysis and Design", Prentice Hall, 2th
- [3] Texas Instruments, "TMS320C6000 Peripherals Reference Guide", 2001 Feb 2
- [4] Kevin Skahill, "VHDL for PROGRAMMABLE LOGIC", Addison Wesley, 1996.