
Brushless DC 전동기의 모델링과 동특성 해석

전내석* · 박정환* · 조성훈* · 이성근* · 김윤식*

The Analysis of Dynamic Characteristics and Modeling of Brushless DC Motor

Nae-Suck Jeon* · Jeung-Hwan Park* · Sung-Hun Cho* · Sung-Geun Lee* · Yoon-Sik Kim*

요 약

직류전동기는 자속 및 토크 제어가 간단하고 정밀하여 가변속 구동장치로 많이 사용된다. 그러나 정류자와 브러시의 접촉 및 마모부분이 있으므로 정기적인 보수, 점검이 필요하며, 정류자의 정류 한계상 고속화 및 고압화에 문제가 있고, 대용량화에도 한계가 있으며, 설치하는 환경에도 큰 제약이 따른다. 따라서 이러한 단점을 극복하기 위해 직류전동기를 BLDC 전동기로 대체하여 가변속 제어하는 방법의 연구가 오래 전부터 지속되어 왔다.

본 논문에서는 PWM 인버터로 구동되는 BLDC 전동기의 수학적 모델을 전개하였고, 실험에 의한 파라미터 추정을 통하여 BLDC 전동기의 동특성 및 정상상태특성을 토크, 속도, 전압과 전류에 대하여 시뮬레이션 및 분석하였다.

ABSTRACT

DC motors have widely been used in the field of variable-speed driving system since it is easy to control flux and torque of the motors precisely but it is hard to check and maintain those periodically. In addition, there are difficulties in high power and high speed running due to rectifying limit of commutator, and are a lot of restrictions in installation. Therefore, speed control in BLDC(Brushless DC) motors have seriously been studied for a long while.

In this paper, a mathematical model of BLDC motor driven by PWM inverter is developed. Dynamics and steady-state characteristics of BLDC motor are simulated and analyzed with a series of experiments for the parameter estimation : torque, speed, phase voltage and current.

1. 서 론

최근 산업화의 동향은 전력용 스위칭 소자의 특성 개선과 마이크로프로세서와 디지털기술의 발달로 산업계의 다양한 분야로 확대되고 있는 추세이다.

BLDC(Brushless DC) 전동기는 3상 인버터로 구동되는 전동기이며, 주로 시스템 내에서 속도와 위치제어를 하기 위하여 사용된다. 이를 위해 DC 전동기 및 AC 전동기가 사용되었으며, 특히 정확한 속도 및 위치제어를 하기 위해서 주로 DC 전동기가 사용되어 왔다. 그러나 전력전자의 발달로 브러시를 제거한 BLDC

* 한국해양대학교 전기공학과

접수일자: 2001. 12. 13

전동기가 많은 분야에서 DC 전동기를 대신하게 되었다. 이러한 BLDC 전동기는 고효율과 용이한 속도제어, 큰 기동토크의 특성을 지니고 있을 뿐만 아니라, DC 전동기에 비해 전기적, 기계적 노이즈 제거 및 유지보수의 불필요성 등에 대한 장점을 가지고 있다. 이에 따라 수많은 제어가 필요한 기기 및 전기 추진장치 등의 큰 토크와 향상된 운전특성이 요구되는 곳에 주로 사용된다[1].

따라서 본 논문에서는 이러한 BLDC 전동기를 수학적으로 모델링하고 시뮬레이션 및 실험을 통해 이를 분석하여 전동기의 과도, 정상상태 특성 등을 살펴보고자 한다.

II. 시스템의 모델링

2.1 전동기의 전압방정식

그림 1은 일반적인 BLDC 전동기의 등가모델을 나타내고 있다[2-3].

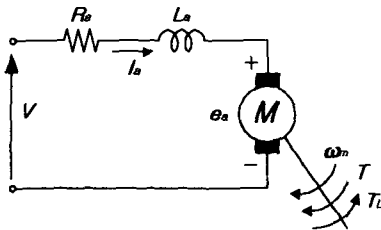


그림 1. BLDC 전동기의 등가회로
Fig. 1 Equivalent circuit of BLDC motor
여기서, V : 인가전압 [V]

L : 전기자 인덕턴스 [H]

e_a : 역기전력 전압 [V]

R : 전기자 권선저항 [Ω]

I_a : 전기자 전류 [A]

ω_m : 전동기 회전속도 [rad/s]

BLDC 전동기의 동작을 자계강도와 권선구조로 표현하는 것보다 전기자 전류 I_a 에 의해 발생하는 토크 T 와 토크 상수 K_T 및 축의 회전속도 ω_m 에 의해 발생하는 기전력 e_a 와 역기전력 상수 K_E 로 표현하는 것이 보다 일반적이므로, 전동기의 전압 및 토크 방

정식은 다음과 같이 표현 가능하다.

$$V = L \left(\frac{dI_a}{dt} \right) + RI_a + e_a \quad (1)$$

$$e_a = K_E \omega_m \quad (2)$$

영구자석형 전동기의 경우 공극에서의 자계를 일정한 것으로 가정한다면, 전동기의 발생 토크는 전류에 비례하게 되어 식(3)로 나타낼 수 있다.

$$T = K_T I_a \quad (3)$$

전동기 회전자의 관성 모멘트를 J , 전동기의 마찰 토크와 부하 토크를 T_F , T_L , 회전수에 비례하는 점성 마찰토크를 D 라 하면 전동기의 운동방정식은 식(4)로 표현될 수 있다.

$$T = J \frac{d\omega_m}{dt} + D\omega_m + T_F + T_L \quad (4)$$

2.2 전동기의 속도 전달함수

전동기의 전달함수를 구하기 위해 식(1), (3), (4)을 라플라스 변환하면 식(5), (6), (7)과 같다[4-6].

$$V(s) = (sL + R)I(s) + K_E \omega(s) \quad (5)$$

$$T(s) = K_T I(s) \quad (6)$$

$$T(s) = (Js + D)\omega(s) + (T_F + T_L) \left(\frac{1}{s} \right) \quad (7)$$

식(5), (6), (7)을 이용하여 전동기의 블록선도를 나타내면 그림 2와 같다.

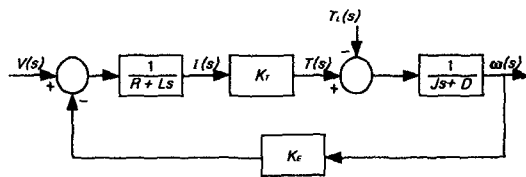


그림 2. 전동기의 블록선도
Fig. 2 Block diagram of motor

그림 2의 전달함수는 식(8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$G_P = \frac{\omega(s)}{V(s)} = \frac{G(s)}{1 + G(s)H(s)} \quad (8)$$

$$G(s) = \frac{K_T}{(R+Ls)(Js+D)}, H(s) = K_E$$

$$G_{R(s)} = \frac{K_T}{(R+Ls)(Js+D) + K_E K_T} \quad (9)$$

일반적으로 전동기의 인덕턴스가 매우 작을 경우, 식(9)는 식(10)과 같이 간단히 표현된다.

$$G_{R(s)} = \frac{K_T}{s^2LJ + sRJ + K_E K_T} \quad (10)$$

이때, 전달함수의 극점은 식(11), (12)로 표현된다.

$$p_1 = \frac{-RJ + RJ(1 - \frac{2LK_E K_T}{R^2J})}{2LJ} \approx -\frac{K_E K_T}{RJ} \quad (11)$$

$$p_2 = \frac{-RJ - RJ(1 - \frac{2LK_E K_T}{R^2J})}{2LJ} \approx -\frac{R}{L} \quad (12)$$

또한 식(10)의 전달함수는 식(13), (14)로 나타낼 수 있다.

$$G_P(s) = \frac{\frac{K_T}{LJ}}{(s + \frac{K_E K_T}{RJ})(s + \frac{R}{L})} \quad (13)$$

$$G_P(s) = \frac{(\frac{1}{K_E})}{(s\tau_M + 1)(s\tau_E + 1)} \quad (14)$$

$$\tau_M = \frac{RJ}{K_E K_T}, \tau_E = \frac{L}{R}$$

앞에서 인덕턴스가 매우 작다고 가정했으므로 τ_M (기계적 시정수)은 τ_E (전기적 시정수)보다 훨씬 크며 $\tau_E \ll 1$ 경우, 식(14)은 식(15)와 같이 나타낼 수 있다.

$$G_P(s) = \frac{1/K_E}{(s\tau_M + 1)} \quad (15)$$

2.3 파라미터 산출

입력 또는 부하의 변동에 대해 양호한 동특성을 갖는 제어시스템의 설계를 위하여 수학적 등가모델이 필요하며 수학적 등가 모델로부터 오차 및 정상상태에

서의 부하변동에 대한 응답특성등 유용한 정보를 얻는 것이 가능하다.

BLDC 전동기는 영구자석에 의한 계자의 자속이 일정하므로, 전기자 도체에는 식(2)에서와 같이 전류의 흐름에 대응하는 역기전력 e_a 가 회전속도에 비례하여 유기되며, 식(3)에서와 같이 전기자전류 I_a 와 비례관계를 갖는 회전자 토크가 발생한다. 따라서, BLDC 전동기의 안정된 제어기 설계를 위해서는 역기전력 상수 K_E 및 토크 상수 K_T 등의 정확한 파라미터 산출이 필요하다.

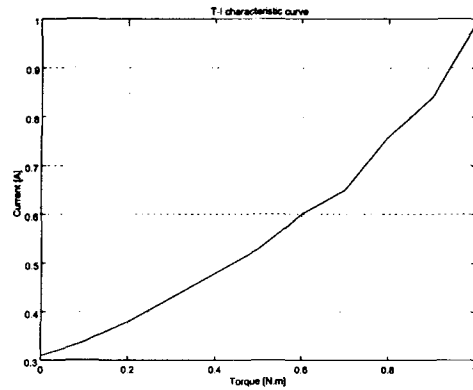


그림 3. T-I 특성 곡선
Fig. 3 The characteristic curve of T-I

그림 3은 정격전압 208[V]에서의 전동기 운전시 다이나모메타를 이용하여 점차적으로 부하 인가시 토크 및 전류를 실측한 것이다. 토크 및 전류특성이 비선형성을 나타내고 있으나, 본 논문에서는 제어 파라미터의 선형성과 역기전력 상수와와의 상관관계를 고려하여 토크 상수 K_T 를 산출하였다. 일반적으로 전동기내의 자기적인 포화현상이 없고, 전압강하로 인한 손실이 없는 경우 역기전력 상수와 토크 상수는 $K_T = K_E$ 의 관계를 갖는다[2].

$$K_E(\text{V/rad/s}) = K_T(\text{N-m/A}) \quad (16)$$

즉, SI단위계에서 K_E 가 V/rad/s로, K_T 가 N-m/A로 표시된다면 K_E 와 K_T 는 동일하다는 것을 알 수

있다.

표 1은 선간 저항 및 리액턴스를 측정하기 위하여 임피던스 분석기(HIOKI 3531)를 이용하였으며, 코일 저항은 운전중의 온도상승을 고려하여 전동기를 일정 시간동안 구동시킨 후에 실측하였다.

표 1. 측정된 선간 저항 및 리액턴스
Table 1 Measured resistance and reactance

Freq. [Hz]	L_s [mH]	R_s [Ω]
5 5	154.32	12.379
	113.51	11.367
	155.51	12.269
6 0	154.00	12.869
	112.77	11.614
	155.55	12.763
6 5	153.86	13.393
	111.32	11.874
	155.35	13.322
평균	140.68	12.428

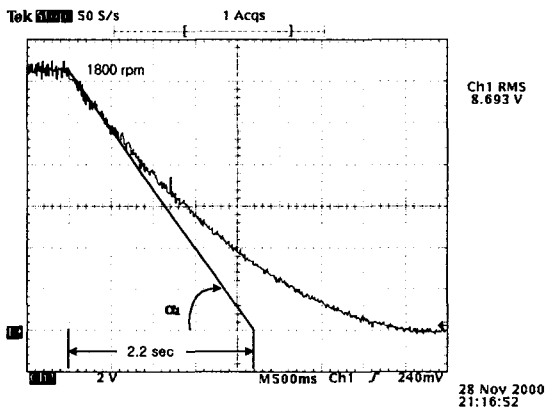


그림 4. 감속 곡선
Fig. 4 Run-down curve

그림 4는 무부하 상태로 일정속도로 운전중인 전동기의 인가전압을 차단한 후 전동기가 정지할 때까지의 관성을 실측한 감속실험(run-down test)의 특성곡선을 나타낸 것이다. 이 곡선으로 관성모멘트 J 를 다음

과 같이 구할 수 있다[7].

$$T - T_F = J \frac{d\omega}{dt} \quad (17)$$

$$-J \frac{d\omega}{dt} = -Ja_1 = T_F \quad (18)$$

여기서, $d\omega/dt=0$, $T = T_F$ 이다.

표 2는 파라미터를 산출하기 위하여 실험으로부터 구한 BLDC 전동기의 정수 및 정격을 나타낸 것이다.

표 2. BLDC 전동기의 사양
Table 2 The specification of BLDC motor

Parameters & ratings	values
Rated output	0.2 [kW](1/4HP)
Rated voltage	208 [V]
Rated load current	0.8 [A]
Rated speed	1800 [rpm]
Pole P	4
Stator winding resistanc R	12.428 [Ω]
Stator leakage reactance L	141.25 [mH]
Torque constant K_T	1 [N-m/A]
Back-EMF constant K_E	1 [Volt/rad/sec]
Moment of inertia J	0.0029 [$\text{kg} \cdot \text{m}^2$]

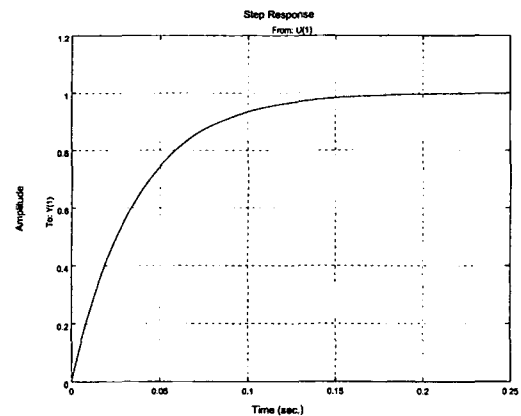


그림 5. 스텝응답 특성에 대한 시뮬레이션
Fig. 5 Simulation result of step response

시스템에 단위계단 입력이 가해지면 출력의 상승시간과 정상상태 오차를 알 수 있으며, 입력 변화시 출력의 정상상태 값으로 시스템의 정상 이득을 파악할 수 있다. 또한, 정상상태에 도달하기 전의 출력 변화 형태로 과도특성에 관한 정보도 얻을 수 있다.

그림 5는 모델링 이론을 근거로 단위계단 함수를 인가하였을 때의 시간영역 응답특성을 나타내며 시스템의 정상상태에 도달하는 정정 시간이 약 0.18[s]를 나타내고 있다[8-9].

III. 실험장치의 구성

본 논문에 사용된 전동기는 1/4HP(0.2kW), 4극, 브러시리스 DC 전동기이며, 인버터를 거쳐 가변주파수를 만들어 내고, 이 전원을 전동기에 연결하고 속도측정을 위하여 축단에 타코 제너레이터를 부착하였다. 브러시리스 DC 전동기에 전원을 공급하여 이에 대한 특성을 고찰하기 위한 실험장치의 구성은 그림 6과 같이 구성되어 있다.

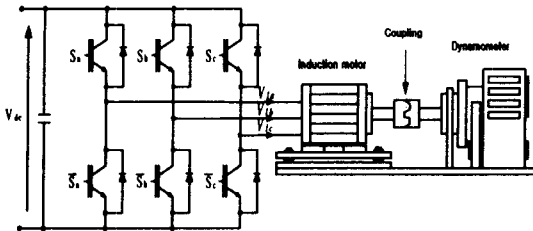


그림 6. BLDC 전동기 시스템 구성
Fig. 6 Configuration of BLDC motor system

일반적인 3상 전압형 인버터의 구성도는 그림 6과 같이 나타낼 수 있다. 여기에서 V_{1a} , V_{1b} , V_{1c} 는 Y결선된 전동기에 공급되는 1차 전압이고, V_{dc} 는 인버터에 공급되는 직류전압이다. 6개의 IGBT 반도체 스위칭소자를 이용하며, 이들 전력용 반도체 소자들의 on-off 스위칭 과정에 의해서 직류가 원하는 주파수의 교류로 바뀌게 된다.

전동기의 토크특성은 다이내모메타를 이용하여 측정하였으며, 전원이 인가된 피측정 전동기를 다이내모메타로 서서히 브레이킹하는 순간 피측정 전동기의 축에 걸리는 유효분 성분을 검출하였다.

IV. 실험 및 고찰

3상 PWM 인버터의 출력을 브러시리스 DC 전동기에 공급하여 그에 대한 무부하 및 부하시의 속도특성, 전류 특성을 고찰하고 파형을 오실로스코프로 관찰하였다.

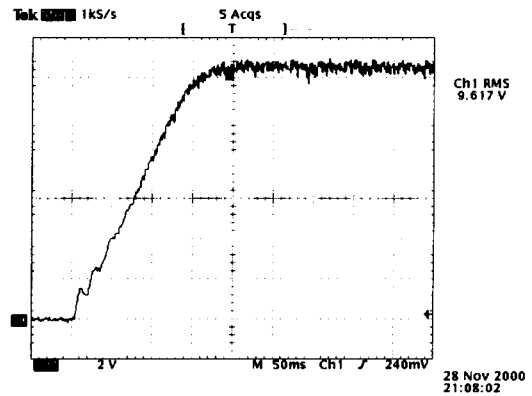


그림 7. BLDC 전동기의 스텝응답 특성
Fig. 7 Step response characteristic of BLDC motor

그림 7은 본 논문에서 사용한 BLDC 전동기의 전압에 대한 단위 속도응답 특성을 실측한 결과이다. 그림 5에서 제시한 스텝응답의 시뮬레이션 결과와 비교하면 단위 응답특성이 상호 일치하는 것을 알 수 있으므로, 그림 7의 응답 결과로부터 본 논문에서 실행한 파라미터 추정의 타당성을 확인할 수 있다.

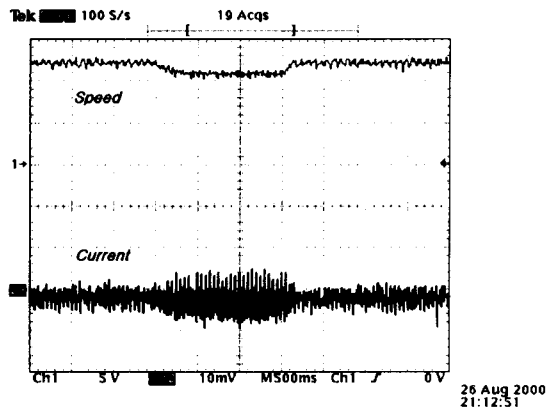


그림 8. 부하 인가시 속도와 전류 파형
Fig. 8 Waveform of speed and current at load approval (load 0→1N-m)

그림 8은 1800[rpm]으로 무부하 운전 중 다이내모 메타 장비를 이용하여 갑자기 부하(1N-m)를 인가했을 경우 속도 응답과 전류 응답 파형을 나타낸 것이다. 1800[rpm]에서 약 0.3[A]의 전류가 흐르고 있는 중에 갑자기 부하를 인가할 경우 속도가 약 1500[rpm]으로 떨어짐과 동시에 전류는 약 1[A]로 증가하였다.

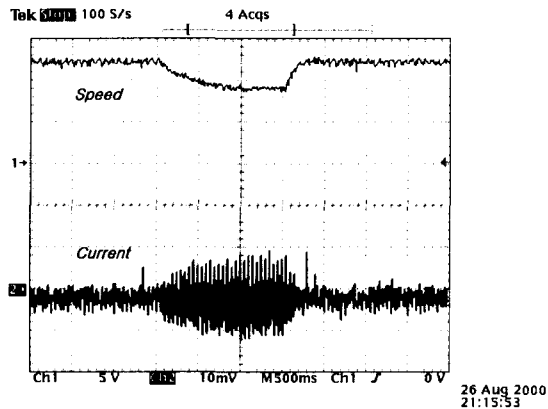


그림 9. 부하 인가시 속도와 전류 파형
Fig. 9 Waveform of speed and current at load approval (load 0→2N-m)

그림 9는 무부하 운전 중 2[N-m]의 부하를 인가했을 경우 속도 응답과 전류 응답 파형을 나타낸 것이다. 속도가 약 1250[rpm]으로 떨어짐과 동시에 전류는 2[A]로 증가하였고, 부하의 크기에 비례하여 전류의 변동폭도 증가함을 알 수 있다.

V. 결론

본 논문에서는 BLDC 전동기의 수학적 모델링을 이용 이를 시뮬레이션 하였으며, 3상 PWM 인버터에 의해 구동되는 전동기의 각종 특성을 파악할 수 있었다. 전기회로의 응답은 회전자의 기계적 운동에 비해 매우 신속히 이루어지므로, 전동기의 전달함수를 나타내는 특성 방정식에서 전기자 인덕턴스 L의 영향은 전기자 저항에 비해 매우 미소하고 회전자 점성마찰계수 D가 다른 요소에 비하여 상당히 적으므로, 이를 무시한 경우 BLDC 전동기의 입력 전압 V와 출력 회전수 ω 의 상관관계를 2계 선형 미분방정식으로 표현할 수

있으며, BLDC 전동기의 실험을 통하여 파라미터를 산출하였다.

BLDC 전동기의 스텝응답의 시뮬레이션 결과와 전압에 대한 단위 속도응답 특성을 실측한 실험 결과로부터 단위 응답특성이 상호 일치하였으며, 응답 결과로부터 본 논문에서의 파라미터 추정치의 타당성을 확인할 수 있었다. 향후 본 논문에서 제안한 파라미터 추정 및 동특성이 BLDC 전동기를 제어 대상으로 각종 산업분야에 보다 효과적으로 응용 가능하리라 사료된다.

참고 문헌

- [1] Paul C. Krause, *Analysis Of Electric Machinery*, McGraw-Hill Book Company, 1986
- [2] Benjamin C. Kuo, *Automatic Control Systems*, 7nd Edition, Prentice-Hall, 1995
- [3] Katsuhiko Ogata, *Modern Control Engineering*, Prentice-Hall, 1997
- [4] 김철진, 임태빈, "Brushless DC Motor의 제어 파라미터 추정과 안정도향상", 대한전기학회 논문지, 제48권, 3호, pp.131-138, 1999. 3
- [5] 윤신용, 김현수의 2인, "브러시리스 직류전동기의 정속도 운전을 위한 디지털 PI제어", 대한전기학회 논문지, 제49권, 6호, pp.395-402, 2000. 6
- [6] 노광호, 김용의 3인, "BLDC 전동기의 디지털 속도 제어기에 관한 연구", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp.991-993, 2000. 7
- [7] Peter Vas, *Parameter Estimation Condition Monitoring And Diagnosis Of Electrical Machines*, Oxford Science Publications, 1993
- [8] *MATLAB Reference Guide*, The Mathworks Inc., 1992
- [9] Robert H. Bishop, *Modern Control System Analysis and Design Using MATLAB*, Addison-Wesley, 1993

저 자 소 개



전내석(Nae-Suck Jeon)

1994년 부경대학교 제어계측공학과 졸업
1999년 한국해양대학교 기관공학과 졸업 (석사)

현재 동대학원 전기공학과 재학중 (박사과정)
※관심분야 : 전력전자, 전기기기, 제어시스템



박정환(Jeung-Hwan Park)

1998년 한국해양대학교 전기공학과 졸업
2001년 동대학원 전기공학과 졸업 (석사)

현재 동대학원 전기공학과 재학중 (박사과정)
※관심분야 : 전력전자, 태양광/풍력발전, 제어시스템



조성훈(Sung-Hun Cho)

1998년 한국해양대학교 전기공학과 졸업
2000년 동대학원 전기공학과 졸업 (석사)

현재 동대학원 전기공학과 재학중 (박사과정)
※관심분야 : 마이크로프로세서응용, 벡터제어, 디지털 조속기시스템, Real-time 시뮬레이션 시스템



이성근(Sung-Geun Lee)

1983년 한국해양대학교 기관학과 졸업
1990년 동대학원 기관학과 졸업 (석사)
1998년 동대학원 졸업(박사)

현재 한국해양대학교 전기전자공학부 조교수

※관심분야 : 선박용 전기기기 및 μ -프로세서 응용



김윤식(Yoon-Sik Kim)

1977년 한국해양대학교 기관학과 졸업
1979년 동대학원 기관학과 졸업(석사)
1986년 동경공업대학 대학원 졸업(석사·박사)

현재 한국해양대학교 전기전자공학부 교수
※관심분야 : 전력전자, 디지털가버너, MHD 발전