

브러시리스 DC 모터의 모델링과 동특성 해석

최병인*, 백수현*, 김용*, 윤신용*, 임대빈**, 김철진***
 동국대학교*, 전자부품연구소**, 한라공과대학***

The Analysis of Dynamic Characteristics and Modeling of Brushless DC Motor

B. I. Choi*, S. H. Baek*, Y. Kim*, S. Y. Yun*, T. B. Im**, C. J. Kim***
 DongGuk University*, KETI**, Halla Institute of Technology***

Abstract - In this paper, a mathematical model of Brushless DC machine fed by pwm inverter is developed. Dynamic and steady state characteristics of Brushless DC motor is simulated and analyzed: electromagnetic torque, speed, phase voltage, and current. In mathematical modeling, the shaft transformation referencing rotor frame from "a,b,c" three phase frame to "d,q" two phase frame is described.

된 인버터로부터 전원이 공급된다.

1. 서론

브러시리스 DC 모터는 3상 인버터로 구동되는 영구자석 동기모터이다. 이러한 모터가 최근 전력전자 분야의 발달과 더불어 실질적으로 전자기적 추진 시스템등의 다양한 산업 분야에서 사용되고 있으며, 현재 많은 연구와 개발이 추진되고 있는 중이다. [1]~[2]

모터는 주로 시스템내에서 속도와 위치제어를 하기 위하여 사용된다. 이를 위해 DC 모터 및 AC 모터가 사용되었으며, 특히 정확한 속도 및 위치제어를 하기 위해서 주로 DC 모터가 사용되어 왔다. 그러나 전력전자의 발달로 브러시를 제거한 브러시리스 DC 모터가 많은 분야에서 DC 모터를 대신하게 되었다. 이러한 브러시리스 DC 모터는 고효율과 용이한 속도제어, 큰 기동토크의 특성을 지니고 있을 뿐만 아니라, 또한 DC 모터에 비해 전기적, 기계적 노이즈 제거 및 유지보수의 불필요성등에 대한 장점을 가지고 있다. 이에 따라 주로 로봇틱스, 항공과 수 많은 제어에 필요한 기기 및 전기 추진장치등의 큰 토크와 향상된 운전특성이 요구되는 곳에 주로 사용된다. [3]~[5]

따라서 본 연구에서는 이러한 브러시리스 DC 모터를 수학적으로 모델링하고 시뮬레이션하여 이를 분석하여 모터의 과도 및 정상상태 특성등을 살펴보고자 한다.

2. 시스템의 모델링

2.1 브러시리스 DC 모터의 전압 및 토크 방정식

그림 1은 고정자 권선이 Y결선으로 되어있고 회전자는 영구자석으로 되어있는 브러시리스 DC 모터의 구조이다. 여기서 3상의 각 고정자 권선은 서로 120°의 위상차를 가지고 있으며, 이상적으로 같은 저항값과 N_s의 턴수를 지니고 있다. 또한 고정자 권선은 정현적으로 분포되어있다고 가정하고 철손과 기계적인 손실은 무시한다.

고정자는 회전자 속도에 대응하는 주파수에 의해 스위칭

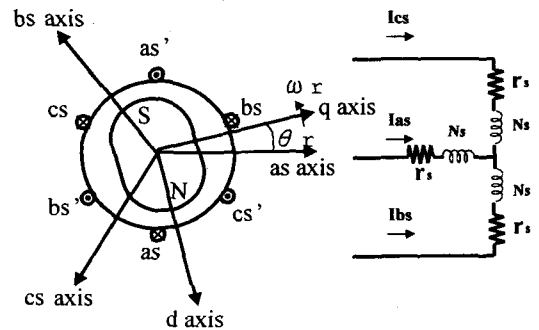


그림 1. 2극 브러시리스 DC 모터

브러시리스 DC 모터의 전압방정식은 식 (1)과 같다.

$$V_{abc} = R_s i_{abc} + p \lambda_{abc} \quad (1)$$

$$(V_{abc})^T = [V_{as} \quad V_{bs} \quad V_{cs}] \quad (2-1)$$

$$(i_{abc})^T = [i_{as} \quad i_{bs} \quad i_{cs}] \quad (2-2)$$

$$(\lambda_{abc})^T = [\lambda_{as} \quad \lambda_{bs} \quad \lambda_{cs}] \quad (2-3)$$

여기서 전압 V_{as} , V_{bs} , V_{cs} 는 서로 120°의 위상차를 가지고 모터 회전자의 전기각속도 ω_r 과 같은 주파수를 가지고 있다.

쇄교자속은 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\lambda_{abc} = L_s i_{abc} + \lambda_m \quad (3)$$

L_s 와 λ_m 는 식 (4),(5)와 같다.

$$L_s = \begin{bmatrix} L_{ii} & L_{ij} & L_{ik} \\ L_{ji} & L_{jj} & L_{jk} \\ L_{ki} & L_{kj} & L_{kk} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\lambda_m = \lambda_m \begin{bmatrix} \sin \theta_r \\ \sin(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (5)$$

여기서

λ_m : 영구자석에 의한 쇄교자속의 크기

θ_r : 회전자에 고정된 기준프레임에 대한 a상 축과 q 축 사이의각

쇄교자속 λ_{abc} 은 식 (6)과 같다.

$$\lambda_{as} = L_{ii} i_{as} + L_{ij} i_{bs} + L_{ij} i_{cs} + \lambda_m \sin \theta_r \quad (6-1)$$

$$\lambda_{bs} = L_{ji} i_{as} + L_{jj} i_{bs} + L_{jk} i_{cs} + \lambda_m \sin(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) \quad (6-2)$$

$$\lambda_{cs} = L_{ki} i_{as} + L_{kj} i_{bs} + L_{kk} i_{cs} + \lambda_m \sin(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \quad (6-3)$$

영구자석에 의한 쇄교자속을 제외한 쇄교자속을 나타낸 식 (4)는 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$L_{ii} = L_b + L_a - L_b \cos 2\theta_r, \quad (7-1)$$

$$L_{jj} = L_{ji} = -\frac{1}{2} L_a - L_b \cos 2(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) \quad (7-2)$$

$$L_{kk} = L_{ki} = -\frac{1}{2} L_a - L_b \cos 2(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \quad (7-3)$$

$$L_{jk} = L_{kj} = -\frac{1}{2} L_a - L_b \cos 2(\theta_r + \pi) \quad (7-4)$$

$$L_{ij} = L_{is} + L_a - L_b \cos 2(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) \quad (7-5)$$

$$L_{kk} = L_b + L_a - L_b \cos 2(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \quad (7-6)$$

여기서

L_b : 누설 인덕턴스

L_a : 권선 인덕턴스의 평균값

L_b : 공극의 크기가 일정하지 않기 때문에 발생된 인덕턴스의 값

토크 방정식은 다음 식 (8)과 같다.

$$T_e = K \left(\frac{2}{P} \right) \frac{d w_r}{dt} + B_m \left(\frac{P}{2} \right) w_r + T_L \quad (8)$$

여기서 P : 극수

전자기적 토크는 식 (9)와 같이 표현될 수 있다.

$$T_e = \frac{P}{2} \left\{ 2 L_b \left[\left(i_{as} - \frac{1}{2} i_{bs}^2 - \frac{1}{2} i_{cs}^2 - i_{as} i_{bs} - i_{as} i_{cs} + 2 i_{bs} i_{cs} \right) \sin 2\theta_r + \frac{\sqrt{3}}{2} \left(i_{bs}^2 i_{cs}^2 - 2 i_{as} i_{bs} + 2 i_{as} i_{cs} \right) \cdot \cos 2\theta_r \right] + \lambda_m \left[\left(i_{as} - \frac{1}{2} i_{bs} - \frac{1}{2} i_{cs} \right) \cdot \cos \theta_r + \frac{\sqrt{3}}{2} \left(i_{bs} - i_{cs} \right) \sin \theta_r \right] \right\} \quad (9)$$

2.2 회전자 기준 좌표에서의 전압 및 토크 방정식

전압방정식에서 시변인덕턴스를 제거하기 위하여 고정자 상의 변수를 회전자 기준 좌표를 이용하여 변환하였다. "a,b,c" 상의 3상의 시스템을 "q,d,0"의 회전자 기준 시스템으로 변환시키면 회전자 기준 프레임에서 전압방정식은 식 (10)과 같다.

$$V_{r_{qdos}}^r = r_s i_{r_{qdos}}^r + w_r \lambda_{r_{qdos}}^r + p \lambda_{r_{qdos}}^r \quad (10)$$

여기서

$$\left(\lambda_{r_{qds}}^r \right)^T = \left[\lambda_{r_{ds}}^r \quad -\lambda_{r_{as}}^r \quad 0 \right] \quad (11)$$

$$\lambda_{r_{adCs}}^r = \begin{bmatrix} L_q & 0 & 0 \\ 0 & L_d & 0 \\ 0 & 0 & L_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{r_{as}}^r \\ i_{r_{ds}}^r \\ i_{r_{cs}}^r \end{bmatrix} + \lambda_m \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

따라서

$$V_{r_{as}}^r = (r_s + p L_q) i_{r_{as}}^r + w_r L_d i_{r_{ds}}^r + w_r \lambda_m^r \quad (13)$$

$$V_{r_{ds}}^r = (r_s + p L_d) i_{r_{ds}}^r - w_r L_q i_{r_{as}}^r \quad (14)$$

$$V_{r_{os}} = (r_s + p L_k) i_{r_{os}} \quad (15)$$

$$\text{단, } L_q = L_b + \frac{3}{2} (L_a - L_b)$$

$$L_d = L_b + \frac{3}{2} (L_a + L_b)$$

원통형 회전자를 가지고 있는 모터에서는 $L_d = L_q$ 이다. 또한 전자기적 토크는 식 (16)과 같다.

$$T_e = \left(\frac{3}{2} \right) \left(\frac{P}{2} \right) \left[\lambda_m^r i_{r_{as}}^r + (L_d - L_q) i_{r_{as}}^r i_{r_{ds}}^r \right] \quad (16)$$

여기서, 전압방정식 (13),(14)는 다음과 같이 변환된다.

$$i_{r_{as}}^r = \int -\frac{1}{L_q} [V_q - r_s i_{r_{as}}^r - w_r L_q i_{r_{ds}}^r - \lambda_m w_r] dt \quad (17-1)$$

$$i_{r_{ds}}^r = \int -\frac{1}{L_d} [V_d - r_s i_{r_{ds}}^r + w_r L_d i_{r_{as}}^r] dt \quad (17-2)$$

그리고 회전자의 기계각속도는 식 (18)과 같이 나타낸다.

$$w_m = \int (T_e - B_m w_r - T_L) dt \quad (18)$$

이때 회전자의 전기각속도 w_e 은 $\frac{P}{2} w_m$ 이다.

회전자의 전기각 θ_e 은 $\int w_e dt + \theta_e(0)$ 이고 인버터의 전기각은 회전자의 전기각으로 결정되므로 인버터 전압의 전기각은 $\theta_e = \theta_r$ 이다.

이 경우 브러시리스 DC모터의 센서는 회전자의 극위치와 q축과 d축의 위치를 검출할 수 있다. 즉, 모터가 인버터로부터 전원을 공급받을 때 인버터의 점호각을 제어함으로써 $V_{r_{as}}^r$ 과 $V_{r_{ds}}^r$ 를 변화시키는 것이 가능하게 되는 것이다. 즉 위에서 설명한 것처럼 전원의 주파수는 다음과 같다.

$$w_e = w_r$$

(단 w_e : 전원의 주파수, w_r : 회전자의 전기각속도)

2.3 3상 PWM 인버터

브러시리스 DC 모터를 구동시키기 위해서 공급되는 전원으로서는 3상 PWM인버터를 사용하였다. 기준파로서는 사인파가 반송파로서는 삼각파가 사용된다. 이와 함께 변조지수는 0.95로 사인기준파와 비교하기 위한 삼각파의 주파수는 500Hz를 채택하여 시뮬레이션을 시행하였다. 여기서

$$\text{변조지수 } M = \frac{\text{사인 기준파의 크기}}{\text{삼각 반송파의 크기}} = 0.95$$

회전자 기준 좌표로 시스템을 변형시킨후 각 공급전압과 전류 및 토크 또한 R. H. Park 가 처음으로 동기모터 해석에서 변수를 변화시킨 Park's transformation에 의해 3상 전압 V_{abc} 과 전류 I_{abc} 를 2상 V_{dq} 와 I_{dq} 으로 변형하였다.

Park's transformation 은 식 (19)와 같다

$$[P] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta_r & \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin \theta_r & \sin(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (19)$$

Inverse Park's transformation 은 식 (20)과 같다.

$$[P]^{-1} = \begin{bmatrix} \cos \theta_r & \sin \theta_r & 1 \\ \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & 1 \\ \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & 1 \end{bmatrix} \quad (20)$$

3. 시뮬레이션 결과

이 장에서는 비선형시스템 전문 해석 패키지인 ACSL을 사용하여 3상 PWM 인버터에 의해서 구동되는 브러시리스 DC 모터의 동특성 및 정상상태 특성을 시뮬레이션한 결과를 분석하였다.

앞절에서 설명한 이론을 근거로하여 브러시리스 DC 모터는 회전자 기준 좌표 전압방정식으로 변환되며, 이와 함께 전압전압은 2상으로 변환시킨다.

또한 시뮬레이션은 공급된 전압과 모터의 파라미터 즉, 권선저항과 인덕턴스, 쇠교자속에 의해서 전류를 구해내고 이를 통해 토크값을 구한 다음 속도를 구하였다.

모델링 이론을 근거로 하여 시뮬레이션 함으로써 전원을 공급한 후의 과도상태와 부하를 변화시켰을 때 그리고 변조지수를 변화시킬 경우의 전압, 전류 토크, 그리고 속도 및 개루프 속도제어에 대한 가상실험을 실시하였다.

시뮬레이션 조건으로서 직류 전압은 25V를 공급하였고 부하는 0.1[Nm]를 가하였으며, 모터는 원통형 회전자이기 때문에 $L_q = L_d$ 이다.

-그림 3은 전원을 공급하였을 때 과도 및 정상상태 특성.

그림 3.1은 PWM 인버터의 시간에 대한 한상의 상전압을 나타낸다.

그림 3.2는 전압을 공급하였을때의 시간에 대한 상전류를 나타내며, 초기 구동시 상전류는 크게 증가했다가 감소하여 정상상태에 이른다.

그림 3.3은 시간에 대한 토크를 나타내며, 기동시 큰 기동토크를 보여준다. 정상상태시는 토크 리플이 발생함을 알 수 있다.

그림 3.4는 시간에 대한 속도를 나타내며 그림에서 알 수 있듯이 빠른 속도응답특성을 나타낸다.

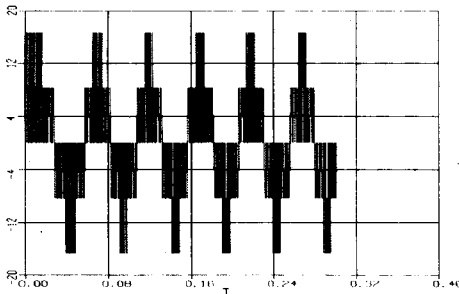


그림 3.1 상전압

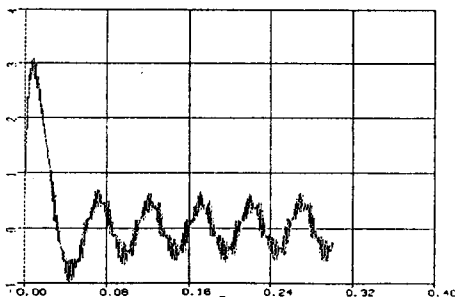


그림 3.2 상전류

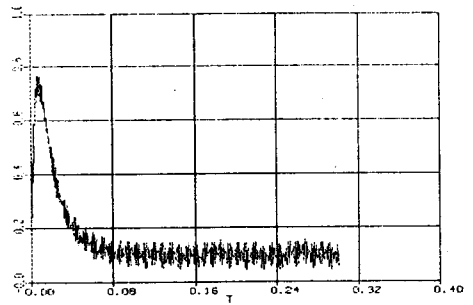


그림 3.3 토크

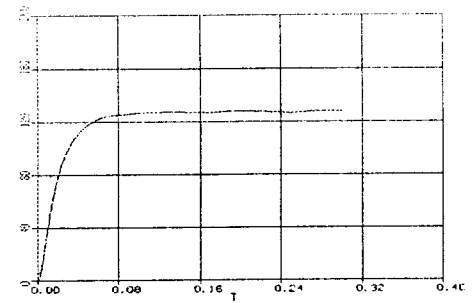


그림 3.4 속도

-그림 4는 정상상태 동작시 부하를 변화시켰을 때 모터의 전원 및 각 변수들의 시간의 변화에 대한 특성. 단, 부하는 0.3초 이후 0.1에서 0.4[Nm]로 증가시켰다.

그림 4.1는 3상 전압중 시간에 대한 한상의 상전압을 나타내며, 부하가 증가할 때 속도는 감소하므로, 회전자 주파수와 전원의 주파수를 동기 시키기 위해 상전압의 주파수가 작아짐을 알 수 있다.

그림 4.2는 이때의 상전류를 보여준다. 부하증가시 전류는 더욱 큰 토크를 내기 위해 증가한다.

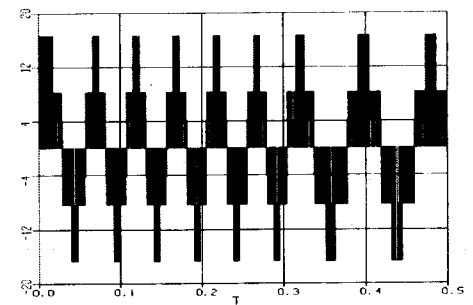


그림 4.1 상전압

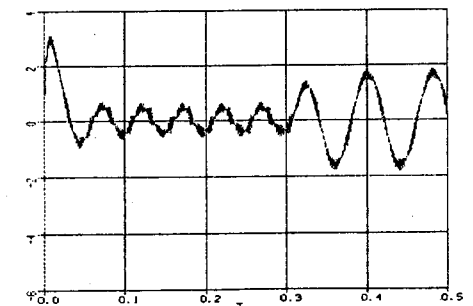


그림 4.2 상전류

그림 4.3은 시간에 대한 토크를 나타낸다. 역시 많은 리플을 가지고 있다.
 그림 4.4는 속도곡선이며, 부하의 증가시 감소한다. 이 속도가 곧 전원의 주파수로 공급된다.

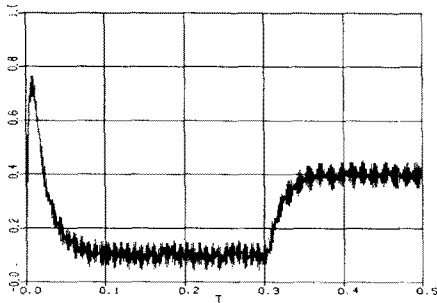


그림 4.3 토크

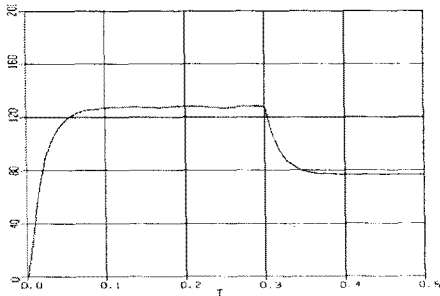


그림 4.4 속도

- 그림 5는 변조지수의 변화에 따른 모터의 개루프 속도 제어시의 특성. 단, 0.3초 이후에 변조지수를 0.95에서 0.5로 변화시켰다.

그림 5.1은 시간에 대한 상전압을 보여준다. 변조지수를 낮춤으로써 속도 감소에 의한 전압전압의 주파수 변화를 보여준다.

그림 5.2는 전류를 나타낸다. 크기는 변화없이 전압과 마찬가지로 주파수만 바뀌었다.

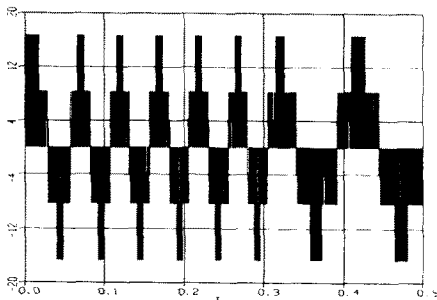


그림 5.1 상전압

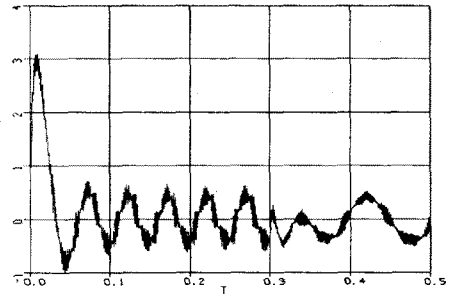


그림 5.2 상전류

그림 5.3은 시간에 대한 토크를 나타낸다.
 그림 5.4는 시간에 대한 속도를 나타내며, 변조지수의 감소에 따라 즉 DC 공급전압의 감소에 따라 속도가 감소하는 것을 볼 수 있다.

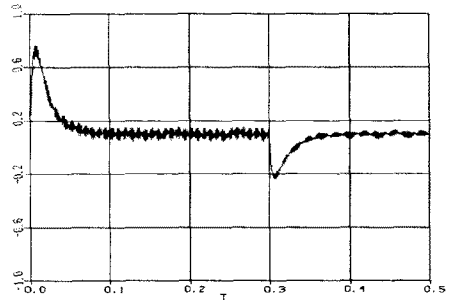


그림 5.3 토크

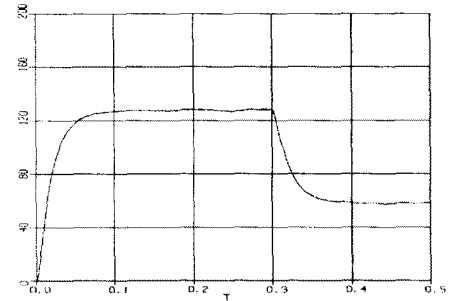


그림 5.4 속도

4. 결론

본 연구에서는 브러시리스 DC 모터의 수학적인 모델링을 하였고 이를 시뮬레이션 함으로써 3상 PWM 인버터에 의해 구동될때 모터의 각종 특성을 파악할 수 있었다.

모델링에 있어서 인버터 전원의 주파수는 모터 회전자의 주파수와 동기시켜 주었고 회전자 기준 시스템을 통한 BLDC 모터를 2상으로 변환하였다. 이에 따라 전압방정식에서 시변 인덕턴스를 제거할 수 있으며, 또한 토크 방정식 미분항이 없는 식으로 변환할 수 있었다.

이러한 조건에 따라 전압을 공급하였을때 초기상태, 부하를 변화시켰을 때, 그리고 DC 공급 전압의 크기를 변화시켰을 때 모터의 상전압, 상전류, 토크특성, 그리고 회전자 속도에 대한 과도상태 및 정상상태 특성을 살펴 보았다.

시뮬레이션에 의한 브러시리스 DC 모터는 빠른 속도응답특성과 높은 기동토크를 나타내었지만, 전류와 토크에서는 많은 리플이 발생하였다.

(참고 문헌)

1. Paul C. Krause, Oleg Wasynczuk, Scott D. Sudhoff, "Analysis of Electirc Machinery", IEEE PRESS, 1987
2. TJE Miller, J.R. Hendershot Jr, "Design of Bushless Permanent Magnet Motors", Clarendon Press · Oxford, 1989
3. 전자부품종합기술연구소, "고출력 브러시리스 DC 서보 모터 개발에 관한 연구", 통상산업부, 1996
4. T. Kenjo and S. Nagamori, "Permanent Magnet and Brushless DC Motors", Oxford, 1985
5. Neyram Hemati, Ming C. Leu, "A Complete Model Characterization of Brushless DC Motors", IEEE IAS, 1990