

역기전력을 이용한 인공심장구동용 브러시리스 직류전동기의 제어에 관한 연구

김진태, 김종천, 이상훈, 김의찬, 민병구

서울대학교 공과대학 제어계측공학과,
서울대학교 의과대학 의공학과

A Study on the Development of the Brushless DC Motor Control System for an Artificial Heart using Back-EMF

Jin Tae Kim, Jong Won Kim, Sang Hun Lee,
Hee chan Kim, Byoung Goo Min

Department of Control and Instrumentation,
College of Engineering, and
Department of Biomedical Engineering,
College of Medicine,
Seoul National University

ABSTRACT

Using back electro-motive force(EMF) signals of a brushless DC motor, the sensorless micro-processor controlled drive system was developed. In this new commutation method, the manual pulses are used for relatively short accelerating phase and then the exact commutational positions are detected based upon the back emf signals. The hardware and software implementations with the experiment to compare the performance of the developed system with the conventional system using hall effect sensors are included. By reducing the number of the required sensors in the artificial heart control system, the total reliability will be increased.

2. 역기전력의 응용원리

회전자가 그림 1에서와 같이 (a)에서 (b)로 움직일 때 A coil이 open되어 있다면 렌즈의 법칙에 의해 N극과 S극이 교차되어 유도되어 나타나게 된다. 이때 (c)에서 보듯 역기전력은 N극이 유도될 때 + 라면 S극이 유도될 때 - 가 되므로 자석이 코일을 지날때 zero-crossing point가 생기게 되고 이것은 곧 회전자가 A coil을 지나고 있다는 정보를 전해주게 된다.

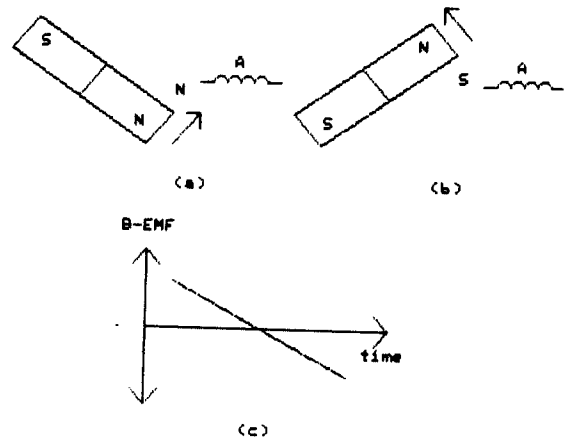


그림 1. 회전자 위치에 따른 역기전력신호

1. 서 론

심장병에 대한 최종적인 치료방안으로 관심이 집중되고 있는 인공심장 개발에 있어서 전동기 구동형은 전동기가 내장되어 혈액주머니를 압축하여 혈액을 순환시키도록 되어있다. 에너지 변환기인 전동기로는 보통 직류전동기 보다 효율이 좋고 기계적 마찰이 없어 신뢰성이 우수한 브러시리스 직류전동기를 사용하고 있는데, 브러시리스 전동기는 정류를 위해 회전자의 위치를 알아내기 위한 장치가 부가적으로 필요하다. 일반적으로는 Hall effect sensor 나 optic sensor 등을 이용하여 회전자 위치를 감지하여 구동하는데 인공심장의 경우 전동기 자체에 sensor board가 부착되어야 하고 신호를 전달하는 추가의 도선이 필요하게되어 인공심장의 크기가 커지고 또 전체 시스템의 신뢰도가 떨어지게 된다. 더우기 sensor 부착위치상의 오류는 최적의 정류를 제공하지 못하게 되므로 효율의 상당한 감소를 가져오게 되어 이런 위치감지 sensor 없이 브러시리스 전동기를 정류하는 방법에 대한 연구가 요구되고 있다. [1][2][7] 본 논문에서는 센서없이 역기전력을 이용한 3상 델타결선 브러시리스 직류전동기의 제어 및 인공심장의 응용 [5]에 대해 다루고 센서를 사용하지 않았을 때와 전동기의 성능을 비교하였다.

3상 델타결선의 경우 역기전력을 이용하기 위해서는 3상 중 한 상은 open되는 Node open 방식의 정류(commutation)를 하여야 하는데 그림 2에서 보듯이 3단자 중 한 단자는(A) 전압E가 인가되고 한 단자는(B) 접지하여 정류를 하였을 때 open 단자인 C에서 역기전력을 관찰하다가 위와 같은 원리를 응용하여 회전자의 위치 정보를 얻을 수 있다. 그러나 3상 델타결선의 경우는 open 단자에 항상 E/2정도의 전압이 존재하므로 역기전력에 의해 E/2 volt.를 crossing하는 순간을 포착하여 다음 정류를 진행시킨다.

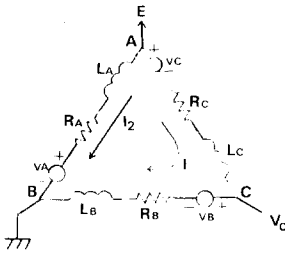


그림 2. 3상 델타결선 전동기 등가회로

위 그림 2. 에서 수학적 해석을 해보면 A단자에서 C단자를 거쳐 B단자로 흐르는 Branch에 대해 전압방정식을 쓰면

$$L\dot{I}_1 + R\dot{I}_1 + v_c + L\dot{I}_2 + R\dot{I}_2 + v_b = E \quad (1)$$

여기서 3상이 symmetric하다고 가정하면 $L_a=L_b=L_c=L$, $R_a=R_b=R_c=R$ 이 된다. 그러면 식(1)은 아래와 같다.

$$2L\dot{I}_1 + 2R\dot{I}_1 + v_c + v_b = E \quad (2)$$

여기서 C단자의 전압 V_c 는 다음과 같다.

$$L\dot{I}_1 + R\dot{I}_1 + v_b = V_c \quad (3)$$

이때 C단자 전압미분식(3)에서 $E/2$ 를 빼서 다시 쓰면,

$$\begin{aligned} V_c - E/2 &= (L\dot{I}_1 + R\dot{I}_1 + v_b) - (L\dot{I}_1 + R\dot{I}_1 + (v_c + v_b)/2) \\ &= (v_b - v_c)/2 \end{aligned} \quad (4)$$

따라서 C단자에서의 전압은 C단자에 연결되어 있는 두 코일에서의 역기전력 신호로 표시됨을 알 수 있다. 3상에 생기는 역기전력은 전기적으로 120도 씩의 위상차를 갖는 sine 함수로 표시되는 다음과 같다.

$$v_a = K_b \omega \sin(\omega t) \quad (5)$$

$$v_b = K_b \omega \sin(\omega t - 2/3\pi) \quad (6)$$

$$v_c = K_b \omega \sin(\omega t - 4/3\pi) \quad (7)$$

여기서 K_b 는 역기전력 상수이고 ω 는 회전자의 각속도이다. 이를 식(4)에 대입하여 합성하면

$$(v_b - v_c)/2 = (K_b \omega \sin(\pi/3))/4 \cos(\omega t) \quad (8)$$

과 같이 되므로 C단자 전압 V_c 가 $E/2$ 를 통과하는 순간 즉 식(8)이 0이 되는 순간에 다음 정류순서를 따라 진행하면 된다.

3. 시스템 구성

역기전력을 이용한 브러시리스직류전동기의 구동 시스템 구성도는 아래 그림 3 과 같다.

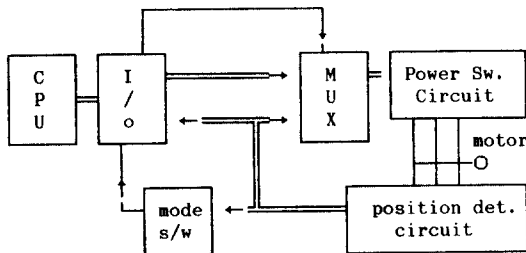


그림 3. 전체 시스템의 구성도

각 부분별 회로의 구성은 다음과 같다.

3.1 위치검출회로 (Position Detector Circuit)

역기전력 신호로부터 회전자의 위치를 알아내기 위한 시스템으로 구성은 그림 4 와 같다.



그림 4. 위치검출회로구성도

3.1.1 수준봉과검출기 (Level crossing detector)

역기전력 신호를 받아 그 신호로부터 회전자의 위치를 알려주어 적절한 정류를 수행할 수 있도록 하는 장치로서 그림 5 와 같이 3단계 즉 비교기, 미분기 그리고 다이오드를 거쳐지게 되어 있고 crossing할 때의 기울기가 (+), (-) 에 대해 따로 출력하도록 하였다.

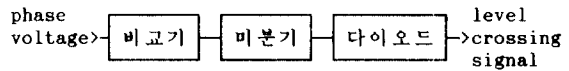


그림 5. 수준봉과검출기의 구성도

3.1.2 잡음제거회로 (Masking circuit)

역기전력 신호는 전동기의 구동단자에서 측정하게 되므로, 구동용 인가전압이 인가되지 않는 Open 상태에서 이용하게 된다. 그러나 구동전압의 ON/OFF 에 따른 Switching Noise 신호인 Transients 현상이 포함되는데, 이를 제거하여 순수한 역기전력 신호만을 얻어내기 위한 장치가 Masking circuit이다.

3.1.3 파형정형 및 구동스위칭회로 (Pulse Shaping and Power Switching Circuit)

Masking을 거친 level crossing 신호들로 부터 전동기를 구동하기 위한 펄스를 발생해 내어 원하는 방향으로 돌도록 해주는 장치를 말한다. level crossing signal은 한 상에 대해 기울기가 (+) (-)일때의 2가지씩 모두 6가지가 나오게 되는데 이들로부터 전동기에 파워를 인가하는 구동스위칭회로(그림 6)의 각 Transistor 를 ON/OFF 하는 신호를 R/S flip-flop 을 이용하여 그림 7 과 같이 만들어낸다. 이와같이 만들어진 한상에 대한 구동 펄스는 그림 8 과 같다. 회전방향에 대해서는 Multiplexer를 이용하여 방향신호에 따라 서로 다른 스위칭을 하여 원하는 방향으로 회전하도록 하였다. 단 역기전력을 이용하기 위해서 전동기의 정류는 반드시 한 상이 open되는 정류방식인 Node open방식을 사용해서 스위칭해야 한다.[6]

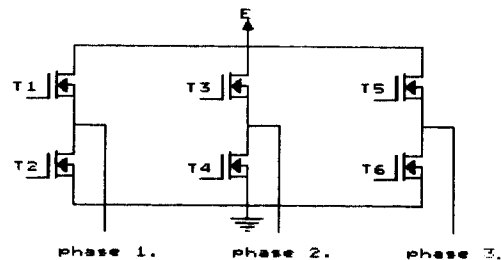


그림 6. Power Switching circuit

Phase 1.		Phase 2.		Phase 3.	
A+	T1:on T5:off	B+	T3:on T1:off	C+	T5:on T3:off
A-	T2:on T6:off	B-	T4:on T2:off	C-	T6:on T4:off

그림 7. Level crossing 신호에 대한 switching sequence (clockwise direction)

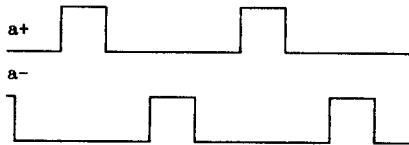


그림 8. 한 상의 구동펄스

3. 2 모드선택기 (Mode Selector)

처음 정지상태에서 전동기를 구동할 때에는 역기전력의 사용이 불가능하므로, 임의로 가속펄스를 주어 역기전력 신호가 이용가능할 때까지 가속시키게 되는데, 역기전력 신호가 이용가능한가를 점검하여 역기전력 신호로 부터 전동기 구동펄스가 나오게 되면 manual mode 에서 B-EMF mode로 스위칭 해주는 H/W 시스템이다. 3개의 D-F/F과 역기전력 신호로 발생하는 6개의 구동펄스를 clock과 입력단에 연결하고 AND하여 스위칭하도록 하였다.

3. 3 주요 Software 의 구성

3.3.1 수동신호 발생 프로그램 (Manual pulse generation program)

역기전력 신호는 전동기 속도에 비례하여 나오게 되는데 처음 출발할 때 부터 어느 정도 속도까지는 역기전력 신호를 이용할 수 없으므로 회전차 위치정보 없이 임의로 구동펄스를 주어 가속시켜야 한다. 빠른 시간에 효과적으로 전동기를 가속시키기 위한 최적 가속 velocity profile이 요구된다. 현재 2차함수 증가 곡선과 같은 유형의 속도 프로필을 이용한 프로그램으로 Manual 가속하고 있다(그림 9).

3.3.2 구동신호추적프로그램(Tracking program)

전동기의 속도가 증가하여 역기전력으로 전동기를 구동하고있을때 큰 부하가 걸리거나 전동기를 감속시킬 필요가 있을때, 또는 어떤 다른 이유에 의해 역기전력 신호가 나오지 않게 되더라도 계속 전동기를 구동하기 위해서는 CPU 가 역기전력 신호에 의한 전동기 구동펄스를 추적하다가 B-EMF mode 에서 Manual mode로 phase오차 없이 스위칭하여 감속하기 위한 기능을 하도록 하였다.

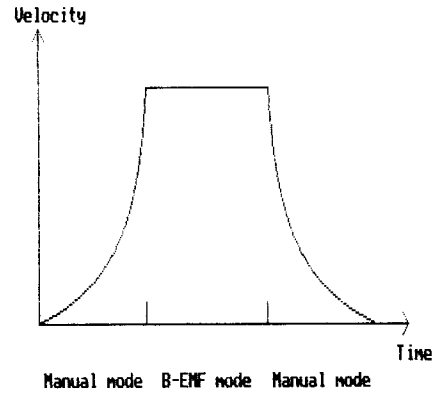


그림 9. 한 구간의 속도 프로필

3.4. 인공지능 응용 응용 알고리즘

본 연구팀의 개발 중인 인공지능은 전동기가 내장되어 전동기 몸체가 좌,우에 붙어 있는 혈액 주머니를 압축하여 줌으로써 혈액을 순환할 수 있게 되어 있는 형태이므로 전동기는 일정한 구간을 왕복운동하게 되어있다. 한 구간내에서의 velocity profile의 형태가 그림 9 와 같을때 manual 구간과 B-EMF 구간을 교차하면서 전동기를 구동하도록 되어 있다. 전동기의 효율을 높이기 위해서는 한 구간에서 Manual 구간을 최소로 줄여야 하는 문제와 정확한 속도와 위치제어를 위한 제어 알고리즘의 개발 및 구현이 해결해야 할 과제로 남아 있다. 인공지능 응용시 사용한 단순한 S/W의 알고리즘이 그림 10 에 있다.

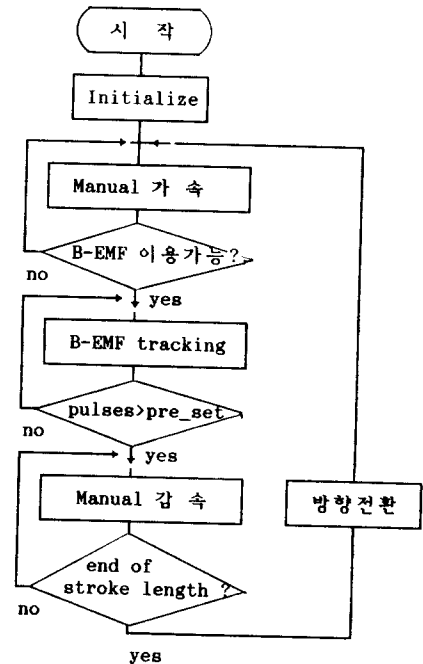


그림 10. 인공지능 응용 응용 알고리즘

4. 실험 및 결과

4. 1 역기전력을 이용한 전동기 구동실험

역기전력을 이용한 브러시리스 전동기의 정류회로를 이용한 브러시리스 전동기(S/M 594-05) 구동실험을 실시하였다. 전동기의 속도를 가속시키면서 한 상의 단자전압을 관찰한 결과 그림 11과 같다. (a)는 역기전력 신호가 이용 불가능한 상태이고 (b)는 역기전력 신호가 이용 가능한 형태로써 앞에서 설명한 transients 현상을 볼 수 있다. 역기전력이 이용 불가능한 현상은 전동기 회전속도가 작은 이유와 manual 펄스로 구동하기 때문에 최적의 정류가 이루어 지지 못한 것으로 볼 수 있는데, 일단 역기전력이 가능한 상태로 모드가 전환되면, 더 낮은 속도에서도 계속해서 역기전력을 이용할 수 있음을 볼 수 있었다. 그림 12는 그림 11의 (b)를 좀더 크게 확대하여 보인 그림으로 transients 현상이 뚜렷이 보임을 알 수 있다. 그리고 이를 비교기에 입력시켜 E/2와 비교하여 나온 출력이 그림 13과 같고 이때에도 transients에 펄스 출력이 보인다. (a)는 비교기의 입력단자에 입력되는 한 상의 단자전압 파형이고 (b)는 입력과 E/2와 비교기 출력을 보인 것으로 transients 현상에 의한 error pulse가 검출되고 있음을 그림을 통해 알 수 있었다. 이를 미분기에 입력하여 얻은 출력은 그림 14(a)와 같고 이를 다이오드에 통과시켜 (b)를 얻는다. 이때 transients에 의한 error signal을 masking하기 위해 그림 15와 같이 전동기 구동펄스를 1msec 정도 delay하여 masking하기 위한 펄스로 사용하였는데 그림에서는 출력이 역전되어 delay되고 있는 파형을 나타내고 있다. 그림 16에서 볼 수 있듯이 (a)펄스를 입력하여 (b)의 masking을 거치고 나면 (c)와 같은 역기전력 신호에 의한 level crossing signal만 남게 되고 transients에 의한 error pulse는 제거되고 그림 16의 (c)같은 펄스가 6개 출력되는데 이를 이용하여 그림 17과 같은 전동기 구동펄스를 파형정형회로를 통해 만들어 내었다. 그림 17과 같은 펄스가 발생하면 mode selector 회로에 의해 지금까지 manual pulse로 전동기를 구동하던 것을 역기전력 신호로 전환하여 구동하게 된다.



그림 11. 한 상의 단자전압 파형

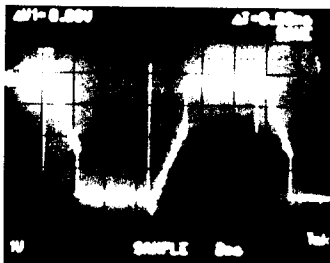


그림 12. 역기전력이 이용가능한 단자전압 파형

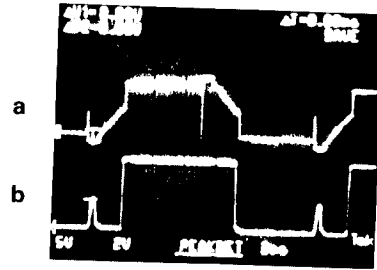


그림 13. Level crossing detector 입, 출력 파형

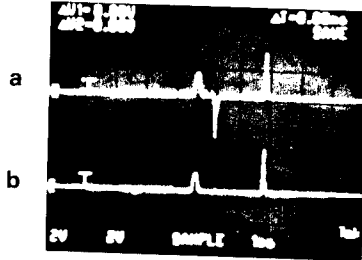


그림 14. diode 입, 출력 파형

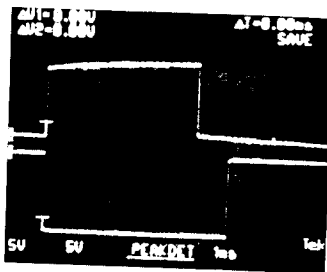


그림 15. delay에 의한 masking pulse의 발생

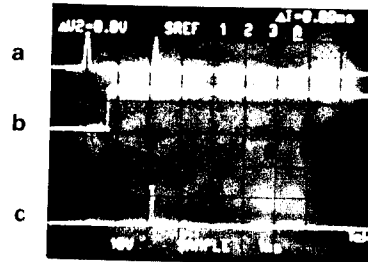


그림 16. 역기전력 신호의 masking 전, 후

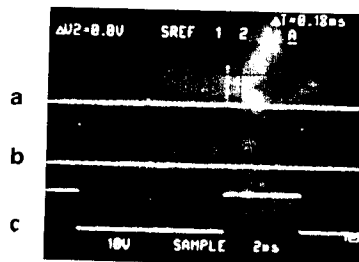


그림 17. 역기전력 신호를 이용한 구동펄스 발생

4. 2 위치센서를 이용하는 경우와 성능비교

Hall sensor를 이용하여 전동기를 구동하는 경우와 역기전력을 이용하여 전동기를 구동하는 경우의 같은 인가전압에 대한 회전속도와 전류를 실험을 통하여 측정 비교 하였다. 역기전력신호는 전전동기내에서 자체 발생하는 신호이므로 commutation가 최적으로 이루어 지는데 비해 전류를 센서를 이용하게 되면 부차하는 위치에 따라 phase오차가 생길 수 있으므로 역기전력을 이용한 경우 보다는 같은 전압에 대해 효율이 낮게 된다. 실험결과가 아래 그림 18, 그림 19에 나타나 있다. 여기서 전류는 $V = I R + K_e \omega$ 로 부터 추정해낸 결과이다.

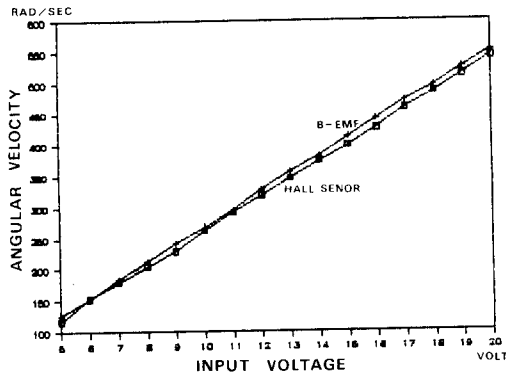


그림 18. 전동기 속도 비교 곡선

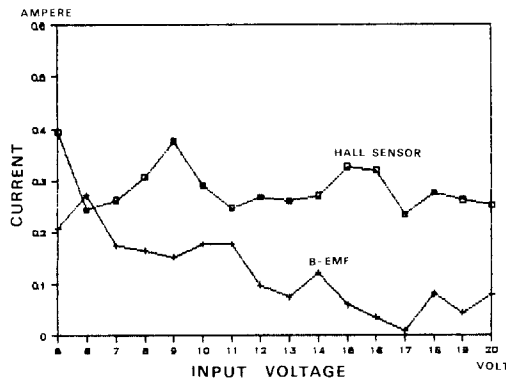


그림 19. 전동기 전류 비교 곡선

5. 토 의

브러시리스 직류전동기의 정류를 위치센서를 사용하지 않고 전동기내에서 발생하는 역기전력신호를 이용하여 수행하는 구동장치를 구성하고 실험을 통하여 그 성능을 확인 하였다. 위치센서를 이용한 정류방법과 역기전력을 이용하는 정류방법은 각각 다음과 같은 장, 단점을 갖고 있다.

- 위치 sensor 에 의한 정류
장점 : 저속제어가 역기전력보다 유리하다.
H/W, S/W가 간단하다.
단점 : 센서보드를 부착해야 한다.
역기전력 보다 효율이 뒤진다.

- 역기전력을 이용한 정류
장점 : 센서보드가 불필요하다.
고속제어시 센서 이용때 보다 효과적인 정류를 한다.
단점 : 저속시 이용 불가능하다.

위치센서를 사용하여 회전자의 위치를 알아내고 정류하는 경우보다 역기전력을 이용하는 것이 전동기의 제어에 있어서 같은 전압에 대해 더 높은 속도를 낼 수 있음을 실험을 통해 확인할 수 있었고 인공심장에 응용한 경우의 방법 및 문제점에 대해서도 고찰해 보았다. 이런 문제점들을 해결하여 인공심장의 응용이 성공적으로 이루어지면 구동장치의 효율 향상으로 전체 시스템의 효율이 증가됨은 물론, 위치센서가 불필요하게 되어 이식되는 심장의 크기를 줄일 수 있으며, 시스템 전체의 신뢰도를 향상시켜 인공심장의 완전이식에 크게 기여할 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] Tsunehiro Endo, Fumio Tajima, Kenichi Iizuka, Hideo Uzuhashi, "Brushless Motor without a Shaft-Mounted Position Sensor", Trans. IEEE of Japan, Vol. 105, No. 1/2, p. 1, 1985.
- [2] Hoang Le-Huy, Alain Jakubowicz, and Robert Perret, "A Self-Controlled Synchronous Motor Drive using Terminal Voltage System", Hoang Le-Huy, Alain Jakubowicz, and Robert Perret, IEEE Trans. on Indust. Apply., Vol. IA-18, No.1, Jan./Feb. 1982.
- [3] Jacob millman, Micro-electronics.
- [4] T. Kenjo and S. Nagamori, Permanent Magnet and Brushless DC motors.
- [5] J.L. Orth, M.S. Isaacson, K.R. Carr, S.D. Nielson, and R.K. Jarvik, "An electronically commutated Brushless DC Motor Applied to a Total Artificial Heart", Proceedings of the first annual international MOTORCON'81 conference.
- [6] C.K. Taft, and R. Gauthier, "Brushless Motor Torque speed curves", 14th Annual Sympo. IMCSD 1985.
- [7] Toshiro Higuchi, "Closed loop control of PM step motors by sensing Back EMF".