

소형 브러시리스 DC 전동기의 토크 특성 향상을 위한
최적 구동법에 관한 연구

* ** ◦ ***
박귀태, 송명현, 김용일

* 고려대학교 전기공학과
** 순천대학교 전기공학과
*** 삼성전기(주)

A STUDY ON OPTIMAL DRIVING METHODS FOR IMPROVING TORQUE
CHARACTERISTIC OF MINIATURE BRUSHLESS DC MOTOR

* ** ◦ ***
G.T.Park, M.H.Song, Y.I.Kim

* Dept. of Electrical Eng. Korea Univ.
** Dept. of Electrical Eng. SunChun Univ.
*** Samsung Electro-Mechanics

ABSTRACT

In this paper, we describe the optimal driving method and magnetic flux distribution of permanent magnet which enhance torque characteristics in small-sized 3-phase brushless DC motors. The disadvantages of conventional 120° constant current drive method are torque ripple, switching noise and spike voltage due to the inductance of stator coil. This shortcomings can be avoided by the switching slew-rate of driving current which is called linear voltage driving method. The aim of this study is to analyze linear voltage driving method quantitatively and to determine optimal drive current waveform through computer simulation. The selection of commutation angle and slew rate of a new driving current at switching instants makes torque ripple index minimize and average torque maximize. And the validity of this new driving method was assured by Fourier analysis.

Considering two dimensional nonlinear magnetic flux distribution on the permanent magnet, we suggest optimal flux distribution according to the presented driving method which improves torque characteristics.

1. 서론

근래에 들어 소형 전동기의 소형 경량화, 다기능화, 저소비 전력화, 고성능화의 추세가 따라 여러 형태의 소형 브러시리스 DC 전동기가 등장하고 있다. 소형 브러시리스 DC 전동기는 속도, 토크의 제어가 용이하며 브러시와 정류자 대신에 반도체 소자(transistor inverter)를 이용하여 전기적, 기계적 노이즈가 없고 정기적인 보수도 불필요한 장점이 있기 때문에 AV기와 컴퓨터 주변기기 및 OA 기기 등에 널리 이용되고 있다[1]. 이러한 전동기 중 속방향으로 겹을 갖는 코어리스 타입의 편평형 브러시리스 DC 전동기는 박형화에 용이하며, 자동조립에 적합하고 돌극구조가 없어 코강도크가 발생하지 않으며 제어성이 좋아서 직접구동용으로 이용되고 있다. 그러나, 이 전동기들은 성능상에서 노이즈나 토크맥동에 의한 회전불균일이 큰 문제도 등장하고 있으며, 이 노이즈, 토크맥동은 현찰한 회전이 요구되는 AV나 OA 기기에서 와우 플러터(Wow-Flutter) 특성에 악영향을 끼치는 중요한 항목이다[2,3,4].

본 연구는 기존의 정전류 구동법에서 전기자 전류의 구형파로 스위칭 고조파에 생기는 스파이크 전류의 영향과 스위칭 고조파에 의한 회전불균일 문제가 발생하는 단점을 해결하기 위한, 스위칭 순간의 전류에 약간의 기울기를 주는 선형 구동법(soft switching method)에서, 토크 불균일을 개선하

기 위해, 스위칭 순간의 전류의 기울기 (slew-rate)를 정량적으로 규명코자 하였다.

2. 편평형 브러시리스 DC 전동기

(1) 편평형 브러시리스 DC 전동기의 구조와 회전원리

본 연구의 대상인 편평형 브러시리스 DC 전동기의 전체적인 구성도 및 회전자와 고정자의 형상을 그림 1에 나타내었다.

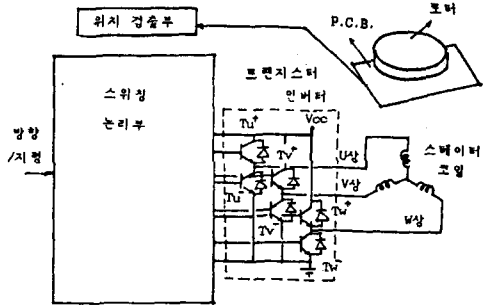


그림 1 (a) 편평형 브러시리스 DC 전동기의 구성도

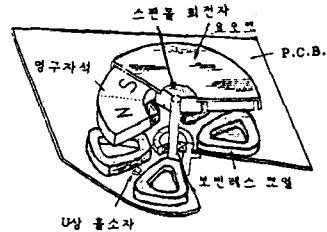


그림 1 (b) 편평형 브러시리스 DC 전동기의 고정자와 회전자의 형상

편평형 브러시리스 DC 전동기의 회전자는 영구자석으로 그림 1(b)에 나타난 바와 같이 도우넛 형상이며, 등간격으로 8극이 착자되어 필드를 형성한다. 고정자는 6개의 보편레스 코일이 PCB 상에 고정되어 있고 이중에 마주보는 2개의 코일이 한쌍을 구성하여 3상 (U상, V상, W상) Y결선으로 되어 있다. 또, 위치검출기로는 홀소자가 이용되고 있는데, 이는 영구자석의 회전에 따른 자극의 변화를 검출하여 트랜지스터를 적절한 시기에 정해진 논리에 의하여 턴-온 또는 오프하는 역할을 한다. 또한, 논리 스위칭부에서 홀소자 출력에 대하여 고정자 코일에 대하여 회전자의 자극이 뒤져있을 때는 인력을, 통과한 경우는

적력을 발생하도록 전류가 흐르게 하여 전동기가 연속적으로 회전할 수 있도록, 트랜지스터를 순서적으로 통전할 수 있게 제작되어져 있다. 전동기의 3상 출사 출력과 상전류의 방향을 그림 2에 나타내었다. 여기서 각 상은 통전각이 120인 정전류가 흐르는 바이폴라 방식임을 알 수 있고 선전류의 방향은 60°를 주기로 전류를 흘려주는 구동방식인 정전류 구동법이라 한다.

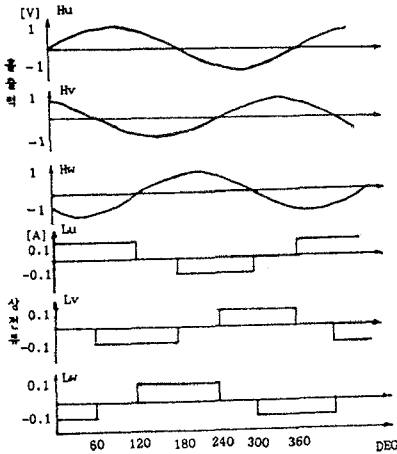


그림 2 3상에서 출 출력과 상전류의 파형

(2) 전동기의 성능 평가

a. 회전속도

소형 브러시리스 DC 전동기의 회전속도를 N_p 라 하면

$$N_p = \frac{120 f}{P} \text{ [rpm]} \quad \text{---- (2.1)}$$

또한 회전자의 속도를 ω_m 이라 하면

$$\omega_m = \frac{2\pi f}{P} \quad \text{---- (2.2)}$$

여기서 P는 자극수, f는 전류의 주파수이다.

b. 자속 (Flux)

소형 브러시리스 DC 전동기의 영구자석에서의 자속분포 파형을 지수함수로 근사시키면 다음식으로 나타내어진다.

$$B_m = B_0 \left[\frac{1 - \exp(-2\theta/\pi r)}{1 + \exp(-2\theta/\pi r)} \right] \quad \text{for } 0 \leq \theta < \pi/2$$

$$B_m = B_0 \left[\frac{1 - \exp(2\theta/\pi r)}{1 + \exp(2\theta/\pi r)} \right] \quad \text{for } \pi/2 \leq \theta < \pi$$

---- (2.3)

여기서 B_0 는 $B_{max}/[1 - \exp(-1/r)]$ 이다. 물론 위식은 $\pi/2$ 를 기준으로 대칭이며 $\pi \leq \theta < 2\pi$ 구간에서는 음의 값으로 지정한다. 이 때, 본 연구에 이용된 S사의 TM-600SS 편평형 브러시리스 DC 전동기의 영구자속의 실측된 자속분포를 (2.3)식으로 근사하면 자속분포는 $r = 0.34$ 의 경우와 일치하므로 이후의 절에서는 이 값을 이용하기로 한다.

c. 역기전압

역기전압 e_k 를 계산하기 위하여, 먼저 코일의 선 요소(line element) dL 이 회전속에서 반경 R만큼 떨어진 거리에 놓여있고 자속 B를 내는 영구자석이 속도 V 로 움직인다고 생각하자. 이 때, 미소역기전압 de_k 는 $V(B \times dL)$ 이고, 영구자석 전동기의 기하학적 형태를 고려하여 역기전압 e_k 를 구하면, 이것은 일반적으로

$$e_k = \int_{\text{phase}} R \cdot \omega_m \cdot B_z \cdot dL_r$$

$$e_k = \frac{d\lambda_k}{dt}, \quad K = U, V, W \quad \text{---- (2.4)}$$

로 되고, ω_m 이 일정하다면 역기전압은

여기서 λ_k 는 K상 쇠교자속($=n\phi_k$), ϕ_k 는 K상 자속, n은 감은 수(턴수)이다.

d. 토크 (Torque)

역기전압을 생각할 때와 동일하게 코일 요소에 작용하는 미소 힘을 dF_k 라 하면

$$dF_k = I \cdot (dL \times B), \quad K = U, V, W$$

이다. 따라서 3상에서의 합력 F_k 는 다음과 같다.

$$F_k = \int_{\text{3phase}} I \cdot (dL \times B)$$

원통좌표계에서 생각하면, $F_k = [F_r \ F_t \ F_z]$ 이고, 여기서, $F_r = I \cdot B_z \cdot dL_r$, $F_t = I \cdot (-B_z) \cdot dL_r$, $F_z = I \cdot (B_r \cdot dL_r - B_t \cdot dL_r)$ 이다. 물론 stator와 rotor가 완전한 대칭이라 하면 F_r 은 상쇄되고 F_t 는 회전토크 성분이며 F_z 은 무효토크 성분에 해당한다. 따라서, 기계적 출력인 토크 τ_e 는

$$\tau_e = (e_{U_i} + e_{V_i} + e_{W_i}) / \omega_m \quad \text{---- (2.5)}$$

으로 된다. 이 때, 평균 토크를 Teo 라 하면

$$Teo = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \tau_e \, d\theta \quad \text{---- (2.6)}$$

이고, 토크맥동지수 γ_p 는 다음과 같다.

$$\gamma_p = \frac{\tau_e}{Teo} = \frac{1}{\sqrt{(\tau_e - Teo)^2}} \quad \text{---- (2.7)}$$

이 토크맥동지수와 평균토크는 이후의 장들에서 전동기의 성능을 평가하는 지수로서 이용된다.

3. 브러시리스 DC 전동기의 일반적인 구동방식

소형 브러시리스 DC 전동기의 일반적인 구동방식은 구동원에 따라 전압 구동과 전류구동으로 나눌 수 있는데 각 방식의 특징을 표 1에 정리하였다.

표 1. 전압 및 전류 구동방식의 특징

구동방식	특징
전류구동	1) 전류를 직접 제어하므로 토크 맥동이 나 W/F를 개선할 수 있다. 2) 콜렉터 출력이므로 기생 발전 등에 주의해야 한다.
전압구동	3) 명령치에 비례하여 전류를 흘리므로 서지 흡수용 회로가 필요하다. 4) 서보 상태에서 부하에 대응하는 전류를 출력시켜서 소비전류를 억제한다.
전압구동	1) 출력이 에미터 팔로워라서 비교적 안정하다. 2) 출력이 변하는 경우 코일에 유기되는 에너지 흡수하기 때문에 응답성이 양호하다. 3) 회로의 소비전류는 전류구동에 비해 증가하는 경향이 있다. 4) 상 절환시 스파이크의 흡수가 가능하다

이러한 두 구동방식에서 원리적으로 균일한 토크를 얻을 수 있는 방법은 정현파 쇠교자속의 코일에 정현파 전류를 흘리는 정현파 구동법과 사다리꼴의 쇠교자속을 내는 코일에 구형파 전류를 흘려 각 상의 정토크 부분을 합하여 3상의 정토크를 얻는 정현파 구동법이 있다. 그러나 실제로 정현파 구동의 경

소형 브러시리스 DC 전동기에서의 선형전압 구동 방식에서 최적구동전류 파형을 얻기 위하여 수치해석 방법에서 토르막동지수를 최소화하면서 평균토크를 최대화 시키는 최적구동전류 파형을 얻기 위하여 선형전압 구동법의 최적구동전류 파형을 연구하기 위해 통전각과 스위칭 시간의 기동시 특성에 대한 분석을 그림 7에 나타내었다. 여기서의 통전각은 한상 통전시 스위칭 시작 순간의 기동시의 증감 방향에서부터 통전이 끝날 때까지의 기동시의 증감 방향을 기준으로 한다. 그리고, 스위칭 시간 기준은 전류가 0이 되는 순간을 기준으로 한다. 스위칭 시간을 기준으로 하여 통전각을 변화시켜 보았을 때, 통전각을 변화시키면 기동시 특성이 달라진다. 그림 7에 나타내었다. 여기서의 기동시 특성은 기동시의 증감 방향에서부터 통전이 끝날 때까지의 기동시의 증감 방향을 기준으로 한다. 그리고, 스위칭 시간을 기준으로 하여 통전각을 변화시켜 보았을 때, 통전각을 변화시키면 기동시 특성이 달라진다. 그림 7에 나타내었다.

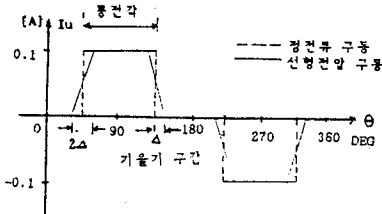


그림 7 선형전압 구동방식에서 상전류파형에 대한 통전각과 스위칭 기동기의 정의

이 때, 선형전압 구동법에서 반주기 동안의 상전류 파형을 수학적으로 나타내면 (4.1)식으로 나타낼 수 있다.

$$I(\theta) = \begin{cases} 0 & \text{for } 0^\circ \leq \theta < 30^\circ - \Delta \\ 0.1[\theta - (30^\circ - \Delta)] / 24 & \text{for } 30^\circ - \Delta \leq \theta < 30^\circ + \Delta \\ 0.1 & \text{for } 30^\circ + \Delta \leq \theta < 150^\circ - \Delta \\ 0.1[\theta - (150^\circ + \Delta)] / 24 & \text{for } 150^\circ - \Delta \leq \theta < 150^\circ + \Delta \\ 0 & \text{for } 150^\circ + \Delta \leq \theta < 180^\circ \end{cases} \quad \text{--- (4.1)}$$

통전각의 변화가 기동기 구간의 변화에 비해 토르막 특성상 큰 변화를 미치지므로 먼저 기동기 구간을 5°로 고정하고 수치해석을 행하여 통전각의 변화에 따른 토르막동지수와 평균토크의 변화를 고찰하면 그림 8과 같다.

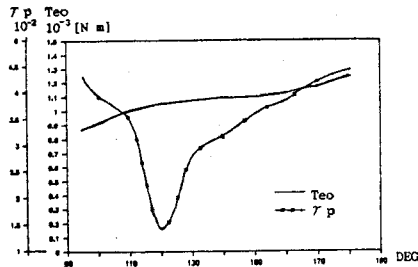


그림 8 통전각의 변화에 따른 토르막동지수와 평균토크의 관계

그림 8로부터 토르막동지수가 가장 낮고 평균토크가 크게 손실되지 않는 통전각은 120° 부근임을 알 수 있다. 통전각 변화에 따른 토르막파형의 변화를 살펴보면 120° 보다 작을 때에는 전류를 흘리는 구간이 너무 짧아서, 스위칭 맥동과 기동기 구간이 내려앉고 있으며 120° 이상의 각에서는 반대로 두 부분이 증폭되어 토르 특성을 도리어 악화시키고 있음을 알 수 있다.

b. 통전 기동기의 설정

선형전압 구동법에서 토르막동이 최소가 되도록 구동전류파형을 결정하기 위해서는 통전각 뿐만 아니라 통전 기동기 구간(각 상전류간의 중첩구간)의 크기 즉, 그림 7에 보인 사다리꼴 전류의 리니어한

기동기 부분이 차지하고 있는 구간의 크기 (= 24)를, 토르막동지수를 최소로 하면서 평균토크를 크게 결정하기 위하여, 수치해석을 행할 때 통전각을 120°로 고정하고 Δ의 변화에 따른 평균토크 및 토르막동지수의 변화를 고찰하면 그림 9와 같은 결과를 얻는다.

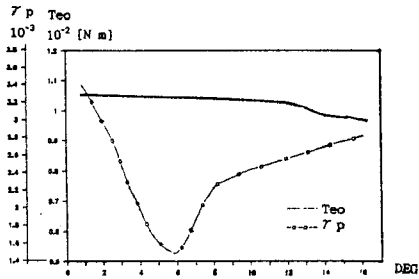


그림 9 Δ의 변화에 따른 평균토크 및 토르막동지수의 변화

그림 9에 보인 바와 같이 Δ의 변화는 Δ = 6°를 기준으로 하여 급격히 감소하다가 완만하게 증가하는데 토르막동은 Δ = 6°까지 보상의 기능을 갖다가 그 이후에서는 오히려 역기능을 하고 있음을 알 수 있다. 여기서, 수치해석시의 한계를 15° 이상 고려하지 않는 이유는 토르 특성이 60°를 주기로 갖기 때문에 맥동 보상으로 Δ를 그 이상 늘리는 것은 무의미하기 때문이다. 실제로 토르 특성의 변화를 살펴보면 Δ가 6°까지는 스위칭맥동뿐 아니라 토르파형상의 산과 골짜기 사이를 때루어 보상을 하는 역할을 하기 때문에 평균토크도 큰 변화를 보이지 않고 있다. 그러므로 최적의 통전 기동기 구간을 6°로 선정한다.

(4) 푸리에 해석에 의한 최적 전류 결정

코아레스 타임의 편평형 브러시리스 DC 전동기는 토르막동에 큰 영향을 끼치는 코킹 현상이 없으므로 토르막동이 전류의 맥동에 크게 의존한다. 선형전압 구동법의 구동전류의 기동기 구간의 크기는 전류와 밀접한 관련이 있다. 따라서, 구동전류를 푸리에 해석하여 전류맥동을 발생시키는 고조파의 크기를 최소화 하는 전류파형을 구하여 전장에서 구한 결과와 비교한다. 선형전압 구동법의 구동전류 파형의 전류맥동성분을 구하기 위하여 선형전압 구동법의 전류파형(그림 7)에 대한 수학적 표현식 (4.1)을 이용한다. 이 전류에 대한 고조파 성분을 구해내기 위하여 푸리에 전계를 하면 다음과 같다.

$$I(\theta) = I_{uo} + \sum I_{un} \sin n\theta \quad \text{--- (4.2)}$$

여기서

$$I_{un} = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi/2} I_u(\theta) \sin n\theta \, d\theta, \quad (n = 1, 3, 5)$$

이 때 상전류 파형은 반파 대칭이므로 π / 2 까지 적분을 행한다. 이 때 얻어진 고조파항의 계수를 I_{ni}라 하면

$$I_{un} = \frac{8}{n^2 \pi} \frac{0.1}{24} \cos \frac{n\pi}{6} \sin n\Delta \quad \text{--- (4.3)}$$

이다. 여기서 고조파 성분의 크기상 1차, 5차, 7차의 3개의 고조파항만을 고려하기로 한다. 이 전류의 고조파들의 크기를 I_{ni}라 하면

$$I_{ni} = \sqrt{\sum I_{kn}^2} = \sqrt{I_1^2 + I_5^2 + I_7^2} \quad \text{--- (4.4)}$$

이것을 최소화하기 위한 Δ를 구하기 위해 ∂I_{ni} / ∂Δ = 0 이 되는 조건을 구하면 다음과 같다.

$$\sqrt{x} = 0 \quad \text{or} \quad \sqrt{x \cdot x'} = 2 \quad \text{----} \quad (4.5)$$

여기서 $x = 0.008 - 0.008 \cos 2\Delta - 1.018 \cdot 10^{-5} \cos 10\Delta$
 $x' = 0.016 \sin 2\Delta + 1.018 \cdot 10^{-5} \sin 10\Delta$

위 방정식을 컴퓨터를 이용하여 풀면 $\Delta = 6.4^\circ$ 에서 위 (4.5)식이 가장 잘 만족된다. 이처럼 전류 고조파함의 크기가 최소로 될 때의 기율기와 수치해석을 통하여 토크 맥동이 최소로 되는 기율기가 정확히 일치하지 않는 이유는 위에서 고조파의 크기를 고려할 때 3개의 고조파만을 고려한 것과, 고려하지 못한 역기전압에 의한 맥동 등에 기인한다.

(5) 최적 자속 분포

영구자석의 자속분포가 토크특성에 직접적으로 영향을 미치게 되므로 이 절에서는 전절에서 제시한 최적전압 구동법에 대하여 영구자석의 다양한 형태의 2차원적인 비선형 자속 분포를 고려하여 토크 특성을 향상시킬 수 있도록 최적 자속 분포를 제시한다. 자속 분포 (r)가 토크특성에 미치는 영향을 조사하기 위해 (2.4)식에서부터 r의 변화에 따른 자속분포의 변화를 살펴보면 그림 10에 나타난 바와 같다. 여기서 자속 분포 형태는 r이 0으로 갈수록 구형파에 가까워지고, ∞에 근사할수록 삼각형에 가까워진다.

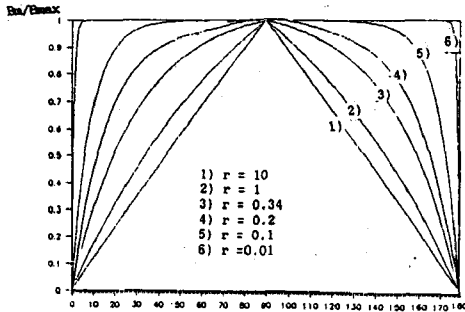


그림 10 r의 변화에 따른 자속 밀도 함수의 형상

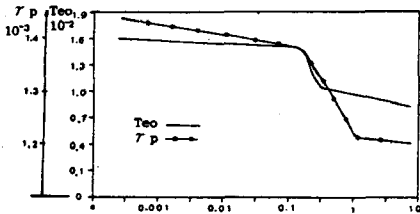


그림 11 r의 변화에 따른 평균 토크 및 토크 맥동지수의 변화

수치 해석을 이용하여 r의 변화에 따른 최적 구동법에서 평균토크 및 토크맥동지수의 변화를 그림 11에 보았다. 여기서 평균토크와 토크맥동이 모두 급격히 감소하므로 평균토크가 비교적 큰 r = 0.2가 가장 적절하다. 실제로 r의 변화에 따른 토크 파형의 변화를 살펴보면 r이 0에 가까울 때는 토크 파형상에 산과 굴짜기가 없거나 스위칭맥동과 그 보상 부분이 증폭되어 나타나며, 또한 r이 10 정도 되어 삼각형의 형상을 가질 때에는 토크맥동도 떨어지고 평균토크가 9×10^{-5} 정도로 너무 작게 된다. 따라서 r = 0.2일 때 즉, 자속 분포가 사다리꼴일 때 선형전압 구동법에서 토크 특성이 향상되는 최적의 자속 분포임을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 소형 권평형 브러시리스 DC 전동기의 토크 특성을 향상시키기 위하여 구동방식과 구동법에 따른 영구자석에서의 최적자속분포에 관한 연

구에서 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 구동방식의 측면에서 해석적 방법으로 선형전압 구동법을 토크맥동지수를 최소로 하면서 가능한 한 평균토크를 최대화하도록 하여 최적 선형전압 구동법을 얻었다.
2. 또한 위 구동법을 소형 권평형 브러시리스 전동기인 TM-600SS에 적용하여 이 구동법의 구동 전류파형의 봉전각을 변화시킬 때 120° 근방에서 스위칭 순간의 기율가를 조정할 때 $\Delta = 6^\circ$ 에서 토크 특성의 현저한 향상이 있었다.
3. 영구자석의 자속분포를 수식으로 표현하여 1, 2항에서 제시한 최적 구동법에서의 토크 특성 향상을 위한 최적자속분포는 사다리꼴 ($r = 0.2$) 이었다.

앞으로 연구해야 할 문제로는 스위칭 순간에 발생하는 리플을 완전히 제거하는 방법 등이 모색되어야 할 것이다. 그리고 본 논문에서 제안한 결과를 ASIC의 설계에 적용하면 토크특성의 개선을 도모할 수 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- 1) 谷腰俊司: "D.C. フラシスモータと制御回路", 総合電子出版社
- 2) 강대훈: "소형 정밀 DC 모터의 회전 속도 변동의 평가 및 측정 기술", SEMCO Technical Journal, vol.1, Sep, 1988
- 3) 森野弘司: "フラシス D.C. モータのトリクリップ", 回転電機対策, '87 小形モータ技術シンポジウム, A6-3, pp1-11, 1987
- 4) 松岡重: "面定向型モータの自動設計手法", National Technical Report, vol.30, no 5, Oct, 1987
- 5) 淺妻定平: "OA分野に於けるモータ制御の現状技術", '88 小形モータ技術シンポジウム, B2-3, pp 1-11, 1988
- 6) K.Arai, A.Fukuda, S.Yamamoto: "Motor Drive I.C.s to Decrease Torque Ripple", National Technical Report, vol.30, no 6, Dec, 1984
- 7) T.Nakata, N.takahashi, K.Uehara: "Analysis of Magnetic Characteristic of a Brushless DC Motor Taking into Account the Distribution of Magnetization", IEEE Trans.Magnetics, vol. MAG-22, no 5, Sep, 1986
- 8) Y.Murai, Y.Kawase, K.Ohashi, K.Okuyama: "Torque Ripple Improvement for Brushless DC Miniature Motors", IEEE, IAS, pp21-26, 1987
- 9) 香田徳, 稻治利夫: "VTR用小形モータ", 機械設計, vol.32, no 6, May, 1988