

Brushless 직류 소형모터의 sensorless 제어에 대한 연구

(A Study for sensorless Control of Brushless DC-Minimotor)

김인구** · 이광식**

(In-Ku Kim** · Kwang-Sik Lee**)

(독일 Berlin공대 전기기계연구소·영남대학교 전자정보공학부)

Abstract

This paper present the design, produce, circuit design and practical measurement for a Brushless DC Motor(BLDCM) with Ferrit-Magnet. It was used PI controller. The practical PI control has bin widely used for DC-Motor.

1. 서 론

1866년에 독일의 베르너 지멘스가 “ 전기모터의 원리 ”를 발견하였으며, 이것이 전동기 발전의 시초가 되었다. 그후 11년이 지난 1877년에 베를린에서 최초로 직류 전기모터를 공업적으로 이용하게 되었다. 이 직류모터는 지금까지 세계 최초의 전기 구동력을 이용한 것으로 기록되었고, 이 모터는 꽤 오랫동안 사용되었다. 하지만 효율이 떨어지는 이유로 인하여 점점 더 교류모터에 밀리는 추세를 보였다. 하지만 의료기와 같은 특수한 분야에서는 아직도 중요한 위치를 차지하고 있다[1][2][3].

BLDC 모터는 브러시용 전동기에 비해서 브러시와 정류자를 갖고 있지 않으므로 효율이 높고 소음이 없으며 수명이 훨씬 더 길다. 일반적으로 영구자석형 동기전동기는 자석의 자화 방식에 따라서 정현파형 또는 제형파(Trapezoidal waveform)로 분류할 수 있다. 물론 역기전력도 정현파와 제형파일 수 밖에 없다. 아울러 브러시 없는 모터를 구동시키기 위해서는 회전자의 위치를 정확하게 검출해야 하는데 이 회전자의 위치측정 방법에는 센서를 사용하거나 그 외 여러 가지 방법이 있으나 그 중 센서를 없애면서 역기전력을 이용한 방법이 있다 [4][5][6][7].

이 방법은 고정자에 유기되는 전압을 이용하게 되는데 특히 전류가 흐르지 않는 고정자권선을 이용할 수 있는 장점이 있다. 이 방법의 단점으로는 첫 스타트시 유기되는 전압이 0[V] 이므로 충분한 역기전력이 발생할 때까지 회전 시켜주는 보조구동 장치가 필요하다. 그때까지 스텝모터방식으로

구동시키는 방법도 있으며 아울러 반사되는 빛을 이용해서 회전자의 위치를 측정하는 방법도 있다 [8][9][10][11].

브러시와 회전자의 위치를 측정하는 센서가 없는 모터도 일반 모터와 같은 특성을 가지며 회전자의 위치에 따라서 고정자 권선에 전류를 흘려준다. 전기적 스위치를 이용한 구동 파라미터는 일반적으로 모터의 시정수에 지대한 영향을 미치며 Y결선 방식의 고정자 권선을 이용하고 공극에서의 자력은 정현파를 형성하는 자화 방식이 가장 널리 보급되고 있다(CD-Rom Driver, Harddisk, Audio기, Video기기 등)[12][13][14][15].

이 논문의 중점은 소형 또는 초소형 모터에 두었고 소형 모터라 함은 1 [kW] 이하, 미국 시스템에서는 1 마력이하의 모터를 이야기하고 초소형 모터라 함은 주로 의료용 산업에 또는 항공우주산업에 사용되는 것으로서 전체 전력이 1~10[W] 범위 내의 것을 이야기한다.

2. 직류모터의 구조

모터는 권선이 감겨있는 고정자와 주로 영구자석으로 이루어진 회전자 그리고 베어링, 축과 케이스로 구성되고 있으면서 아래의 그림 1 과 같은 형태의 것들이 있다.

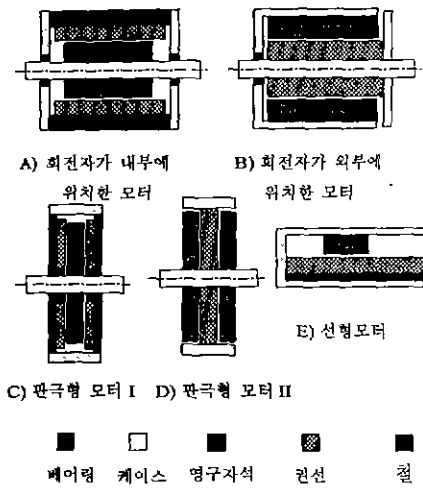


그림 1 여러 가지 소형모터의 구조
Fig. 1 Konstruktion of diverse DC-Motor

3. BLDC 모터의 원리

3.1 BLDC모터의 기본식

고정자는 3상 구동권선과 회전자에 영구자석 계자로 구성되어 있으며 이에 대한 등가회로는 그림 2와 같다.

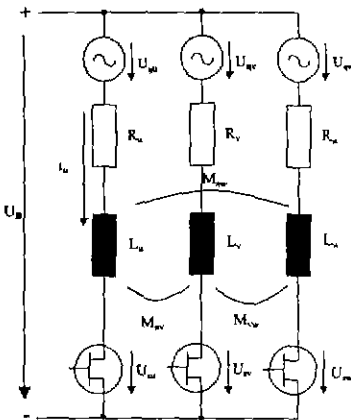


그림 2 BLDC모터의 등가회로
Fig. 2 Equivalent circuit of BLDC motor

전동기의 기본식은 아래와 같이 표현 할 수 있다

$$UB = i * R + L * \frac{di}{dt} + UM + Uq + US \quad (1)$$

U_M 이 0이라 가정하면 식 (1)은 다음과 같이 된다.

$$UB = i * R + L * \frac{di}{dt} + Uq + US \quad (2)$$

3.2 BLDC 모터의 역기전압

BLDC모터의 역기전압식은 다음과 같다.

$$Uq = (\nu \times B) * l \quad (3)$$

여기서, $\nu = \omega * r$, $\omega = 2 * \pi * f$
이 식은 다음과 같이 쓸 수 있다

$$Uq = 2 * Bm * l * N * \omega * r \\ = 2 * \pi * n * Bm * l * N * 2 * r \quad (4)$$

여기서 B_m : 최대자속밀도
 l : 권선길이
 n : 회전자의 회전수(1/s)
 N : 권선수

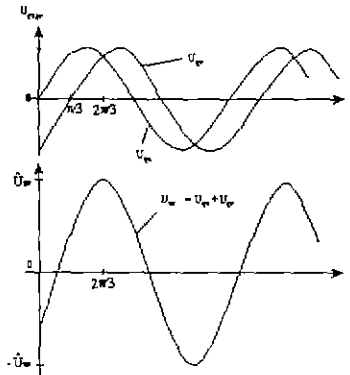


그림 3 상단 그리고 선간 역기전압파형
Fig. 3 Waveform induced voltage for line and phase

그림 3과 그림 4에 각각 역기전압의 선간, 상간 파형 그리고 on-off 시의 파형을 그린 것이다. 여기에서는 정현파 역기전력을 가진 영구자석을 사용한 경우를 예로 들었다. 선간 전압의 평균치를 3 권선 모터의 경우에는 아래와 같이 계산 할 수 있다.

$$U_{q,avr} = \frac{1}{\gamma} * \int_{\alpha}^{\alpha+\gamma} Uq(\alpha) * d\alpha \\ = \frac{1}{\pi/3} * \int_{\alpha}^{\alpha+\pi/3} Uq * \sin(\alpha) * d(\alpha) \quad (5)$$

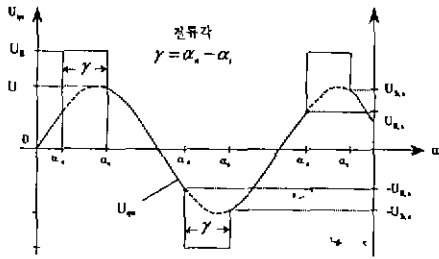


그림 4 선간 전압파형
Fig. 4 Waveform of line voltage

정확히 대칭적인 전압 변환(\$\alpha_e = \pi/3, \alpha_a = \pi/3\$) 시에는 식(5)는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned}
 U_q &= U_{q, \text{line}} = \frac{3}{\pi} * U_q. \text{max} = \frac{3}{\pi} * 2 * U_q, \text{line} \\
 &= 2\pi * \frac{3}{\pi} * N * l * r * B_m * n \\
 &= 2\pi * C\theta * n
 \end{aligned} \tag{6}$$

여기에서 \$C\theta\$ 는 모터의 시정수이고 다음과 같다.

$$C\theta = \frac{\pi}{3} * N * l * r * B_m \tag{7}$$

3.3 BLDC 모터의 모멘트 관계

BLDC 모터의 전력관계는 다음과 같이 표기 할 수 있다.

$$P = U_q * i = \text{mel} * \omega \tag{8}$$

여기에서 mel = 내부 또는 전기적 모멘트이고
\$\omega\$ = 각속도 이다.

식 8은

$$\begin{aligned}
 \text{mel} &= \frac{U_q}{2\pi n} * i = \frac{3}{\pi} * N * l * r * B_m * i \\
 &= C * \theta * i
 \end{aligned} \tag{9}$$

전류 파형의 형태는 회전자의 위치에 따라서 변하는 데 아래와 같은 식 (10)으로 나타낼 수 있으며 그 모양은 그림 5과 같다.

$$i(t) = \frac{1}{Rl + R} * (U_b - U_q(t)) \tag{10}$$

여기에서

\$Rl\$: 입력측의 전기저항과 반도체의 스위칭저항,
\$R\$: 권선저항

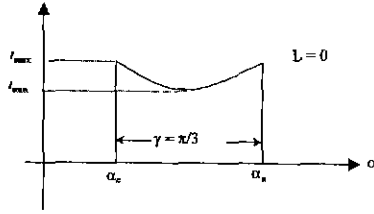


그림 5 상 전류의 파형
Fig. 5 Waveform for phase Current

4. BLDC 모터의 제어

모터를 운용시 고정자 권선에서 발생하는 열과 그 외 부하변동에 따라서 회전수가 변하게 된다. 이 회전수를 일정하게 유지하기 위한 방법에 일반적으로 폐루프회로를 이용하게 되는 데 그 계통도는 그림 6과 같다.

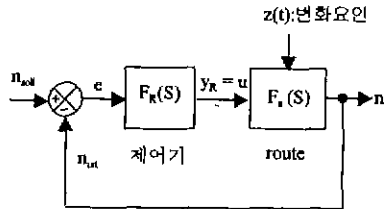


그림 6 직류전동기의 회전수 제어를 위한 폐회로
Fig. 6 Block diagram of DC motor

4.1 BLDC 모터의 수학적 모델

BLDC 모터는 고정자의 3상 구동권선과 회전자의 영구자석 계자로 구성되어 있으며, 이에 대한 등가회로는 그림 2에 이미 소개하였다. 직류전동기 제어를 설계하기 위해서는 입력과 출력특성을 확인 할 수 있는 수학적 모델을 필요로 한다.

식 (1)은 \$U_m = U_s = 0\$ 이라는 가정하에 다음과 같이 간단히 할 수 있다

$$U = i(t) * R + L * \frac{di(t)}{dt} + U_q \tag{11}$$

역기전압은 자속밀도와 회전수에 비례하므로 다음과 같이 표시 할 수 있다.

$$U_q = C_u * \theta * \omega(t) = C * \omega(t) \tag{12}$$

여기에서 C : 전압 정수 C_u : 시정수
 θ : 고정자석의 자속밀도

식 (12)를 식 (11)에 대입하면

$$U = C * \omega(t) + i(t)*R + L * \frac{di(t)}{dt} \quad (13)$$

$$\frac{di(t)}{dt} = -\frac{R}{L} * i(t) - \frac{C}{L} * \omega(t) + \frac{1}{L} * U \quad (14)$$

$\theta = \text{const}$ 인 것을 감안하면 모멘트방정식은

$$M = C * i(t) = M_l + M_s \quad (15)$$

여기에서 M_l : 부하 모멘트

M_s : 가속 모멘트

이상적인 상황에서는

$$U_q(t) * i(t) = M(t) * \omega(t) \quad (16)$$

$$M(t) = M_r(t) + M_b(t) + M_l = C_r(t) * \omega(t) + J * \frac{d\omega}{dt} + M_l$$

여기에서 부하 모멘트와 C_r 을 무시하면 무부하시

$$\frac{d\omega(t)}{dt} = \frac{C}{J} * i(t) \quad (17)$$

식 (14)와 식 (17)에서 다음 관계식을 얻는다.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i(t) \\ \omega(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & -\frac{C}{L} \\ -\frac{C}{J} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i(t) \\ \omega(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix} U_q(t) \quad (18)$$

이 식을 다시 쓰면

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i(t) \\ \omega(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a11 & a12 \\ a21 & a22 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i(t) \\ \omega(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b1 \\ 0 \end{bmatrix} U_q(t) \quad (18a)$$

$$\Leftrightarrow x(t)' = A * x(t) + B * U_q(t) \quad (19)$$

이 식 (19)의 블록선도는 그림 7에 소개한다

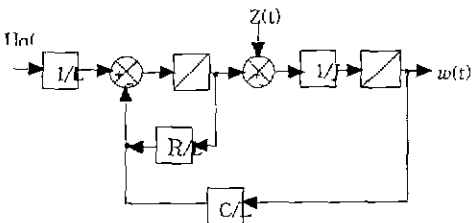


그림 7 BLDC motor 제어 블록선도

Fig. 7 Block diagram for BLDC motor

4.2 BLDC 모터의 제어기

PI-제어기를 사용하여 회전수를 제어하도록 하는데 있어서 이 제어식은 다음과 같은 식으로 쓸 수 있다.

$$x(t) = K(t)(e(t)) + \frac{1}{T_n} \int e(t) dt \quad (20)$$

여기에서 K : 증폭배수

T_n : 수정시간

$e(t)$: 장애치

제어 변환식은 식 (11)을 Laplace Transformation 해서 식 (20)과 함께 다음과 같다.

$$F(s) = \frac{vr(s)}{e(s)} = K \frac{sT_n + 1}{sT_n} \quad (21)$$

실험에 사용된 모터에서 $K = 0.62$, $T_n = 400$ ms 를 얻을 수 있었고 초기치는 0으로 두었다.

5. 실험 및 고찰

앞의 이론적인 것을 토대로 하여 실험을 하였으며 제작된 모터의 사양을 표1에 나타냈다.

표 1 페라이트 자석을 이용한 BLDC 모터의 사양
 Table 1 Specification of BLDC motor with Ferrit

	기호	단위	수치
자석길이	l_{ak}	mm	10
자석의 두께	d_m	mm	3.5
회전자 길이	l_r	mm	13
역기전압	U_q	V	2.56
정격전압	U	V	6
정격전류	I	A	1
정격회전수	n	min ⁻¹	5300
정격모멘트	M_n	mNm	1.3
정격 출력	P	W	3
효율	η	%	53
모터직경	D	mm	23.6
모터길이	l_m	mm	23.5
축의 직경	ϕ	mm	2
권선길이(/상)	l_{cu}	m	4.14

실험을 하는 데 있어서 역기전압의 파형(그림 8), 역기전압의 실효치(그림 9), $M-n$ 특성곡선(그림 10), $M-\alpha$ 특성곡선(그림 11), 무부하시(그림 12)와 부하시(그림 13)의 $n-t$ 관계, 정격 운전시 $U-I$ 파형(그림 14), 특성곡선(그림 15)을 소개하였다.

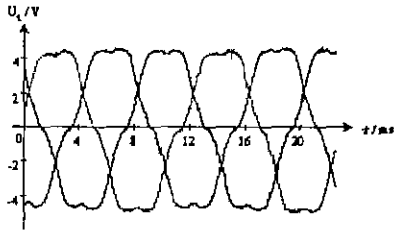


그림 8 유기전압의 파형
Fig. 8 Waveform of induced voltage for BLDC motor

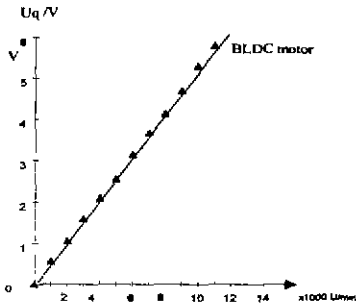


그림 9 회전수에 따른 유기전압의 실효치
Fig. 9 Effective value of induced voltage for BLDC motor

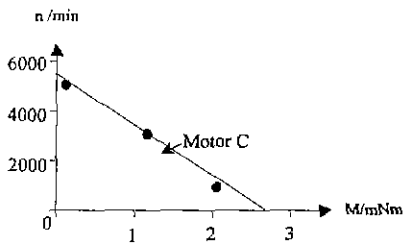


그림 10 M-n 특성곡선
Fig. 10 M-n value for BLDC moto

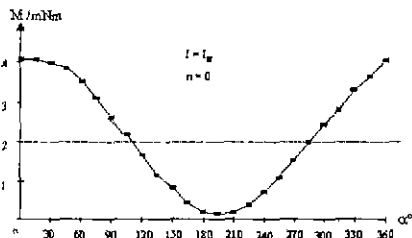


그림 11 M-α 특성곡선
Fig. 11 M-α value for BLDC motor

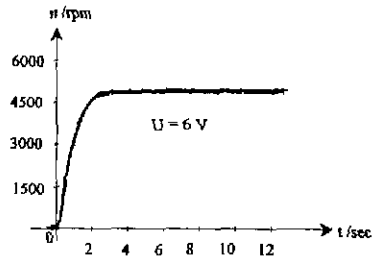


그림 12 무부하시 n-t 곡선
Fig. 12 Waveform n-t (no load)

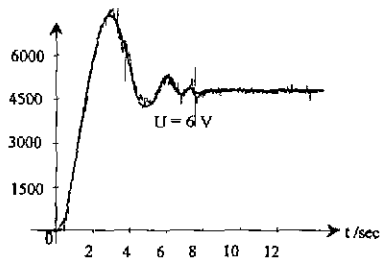


그림 13 부하시 n-t 곡선
Fig. 13 Waveform n-t (with load)

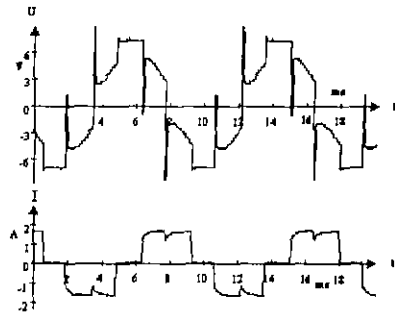


그림 14 정격운전시 U, I 파형
Fig. 14 Waveform of U, I (with load)

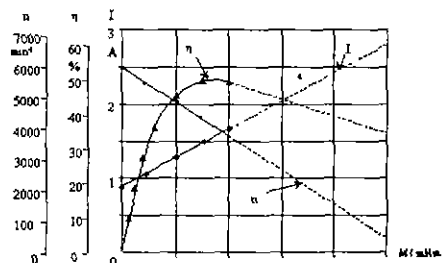


그림 15 BLDC 모터의 특성곡선
Fig. 15 Specification of BLDC motor

6. 결론

센서와 브러시가 없는 직류 소형모터는 현재까지 아주 적은 부분을 차지하고 있으나 그 수요량은 증가하는 추세에 있다. 이 논문에서 이론적인 것과 실질적으로 영구자석을 이용한 센서 없는 BLDC 모터에 대하여 살펴보았다. PI 제어기로서 PWM (Puls-Width-Modulation)을 이용해서 회전수를 안정시킬 수 있었다. 정격전압과 전류로 운영 시에 생기는 열로 인한 모터의 특성에는 변화가 없었다. 모터의 특성곡선을 그려내었고 이론치와 실험을 통한 측정치와 일치하는 것을 알 수 있었다. 또한 여기에서는 철심이 없는 방식으로 고정자 권선을 직접 손으로 제작함으로써 손실이 더욱 크게 되었다. 보다 높은 에너지 밀도를 갖고 있는 자성 재료 즉 NdFeB, 또는 Bonded NdFeB를 이용하게 되면 효율을 높일 수 있을 것이다.

참고문헌

- [1] Tietze, U. und Schenk, Ch.: Halbleiter-Schaltungstechnik, 9. Auflage, Springer Verlag, Heidelberg, New York, London, Paris, 1989.
- [2] Antognini, L. und Paratte, J.: Self Synchronisation of PM Step and Brushless Motors: A new Sensorless Approach. IMCSD, 1990.
- [3] Akademischer Verein Hütte e.V.: Die Grundlagen der Ingenieurwissenschaften. Springer Verlag, Berlin, 1996.
- [4] Brinkmann, K.: Bemessungsgrundlagen für Gleichstrom-Kleinstmotoren mit Dauermagneten. ETZ-Fachber. 1, 1975, S. 134-141.
- [5] Beisse, A.: Permanentmagneterregte über ungesteuerte Zweipulsgleichrichter aus dem Wechselstromnetz gespeiste Gleichstrommotoren. Beitrag zum Betriebsverhalten. Dissertation, Uni. Stuttgart, 1976.
- [6] Choi, D. S.: Bürstenloser Gleichstromscheibenläufermotor mit magnetoresistiven Sensor Diss.TU-Berlin 1992.
- [7] C. S. Park.: Theorie und Experimentelle Untersuchungen an einem elektronisch kommutierten Scheibenläufer-Kleinstmotor, Dissertation, TU-Berlin 1989
- [8] Faulhaber Motoren: Der Katalog 1998/1999, Dr. Fritz Faulhaber GmbH & Co. KG
- [9] Hanitsch, R.: Elektronisch gesteuerte Kleinstmotoren mit dauermagnetischem Rotor, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 9. 1728, 182-187.
- [10] Hameyer, K. and Hanitsch, R.: Optimization of a rotating actuator with permanent magnets, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 104-107, 1135-1136, 1992.
- [11] Hanitsch, R., Park, C. S. and Hameyer, K. : Novel dic type motors *Journal of Magnetism and Magnetic Material*, 80 1989, 131-134.
- [12] Stölting, Hans-Dieter. und Achim Beisse.: Elektrische Kleinmaschine, BG Teubner Verlag, Stuttgart, 1987
- [13] Vogt, K.: Elektrische Maschinen, Berechnung rotierender elektrischer Maschinen. VEB Verlag Technik, Berlin, 1996.
- [14] Wegner, K.: Über das Betriebsverhalten von elektronisch kommutierten Gleichstrom-Kleinstmotoren mit permanentmagnetischem sinusförmigen Erregerfeld und sterngeschalteten Wicklungssträngen, Dissertation, TU-Berlin, 1976
- [15] Werninck, E. H.: Electric Motor Handbook, McGRAW-HILL Book Company(UK) Limited, Maidenhead, Berkshire, England, 1998.