

2자유도 제어를 이용한 직축형 BLDC 모터의 속도제어 연구

이종현 · 백승길* · 이철환* · 강승욱** · 김용주*** · 한경희*
 *영지대학교 · **기톨릭상지대학 · ***동양공업전문대학

A Study Stratum Axial Type BLDC Motor Speed Control using TDOF Controller

Jong-Hyun Lee · Seung-kil Baek · Cheol-Hwan Lee · Seung-Uk Kang · Yeong-Ju Kim · Kyung-Hee Han
 Myongji University, Catholic Sangji College, Dong Yang Technical College

Abstract - Stratum Axial Type BLDC Motor has remarkable efficiency owing to outstanding characteristics of speed and torque as well as its small size.

In this paper, 2-Degree of Freedom PI (TDOF PI) control method is presented in order to improve the efficiency of Stratum Axial Type BLDC Motor and the simulation proves that the separate control for speed characteristic from answering characteristic of load torque particularly allows the construction of superior control system to PI control system.

These results are significant in that the improved Stratum Axial Type BLDC Motor enables the production of much smaller, lighter, and noiseless electric home appliances such as air-conditioner and refrigerator.

1. 서 론

브러시리스 직류 전동기 (Brushless DC Motor)는 유도에 비하여 전원의 안정성과 넓은 속도 범위에 대한 높은 효율을 유지하며, 수명이 길고 제어기 설계가 용이하여 가변속 운전이 요구되는 응용개소에 최적의 전동기로 각광 받고 있다.⁽¹⁾⁽²⁾

BLDC 모터는 고정자와 회전자의 구조 및 설계에 따라 Core type(Outrotor type, Innerrotor type)과 Coreless type(Axial Type)으로 분류 할수 있다. 이 둘을 비교하면 고티크, 고속회전, 빠른 응답특성, 축방향 진동은 Core type이, 그리고 구동용 코일이 코어가 없는 공심 코일 형태로 되어있기 때문에 코킹 토크, 박형화, 재료 손실면에서는 Coreless type이 유리한 상반된 특성을 가진다.

이러한 모터를 제어하기 위한 방법을 살펴보면, PI제어 기법을 많이 사용하게 되는데 이는 속도 응답과 부하토크 응답이 서로 간섭을 일으키므로 w_m^* 의 스텝변화에 대한 모터 속도 w_m 의 오버슈트가 작아지는 동시에 부하토크 T_L 의 응답회복시간이 짧은 속도제어는 곤란한 특성을 가진다. 따라서 이를 보완할 2자유도 PI 제어 방식(TDOF PI : 2-Degree of Freedom PI)을 제안 한다.⁽³⁾⁽⁴⁾

본 논문에서는 축방향 진동 및 재료손실, 코킹토크등이 적고 고티크, 박형화의 실현이 가능한 Coreless Type(Axial Type)의 축방향 2중 회전자 BLDC 모터를 사용하였다. 또한 2자유도 PI제어 방식을 도입하여 저령속도 w_m^* 과 부하토크 T_L 을 독립적으로 제어함으로써 PI제어방식 보다 빠른 속도 추종과 부하토크 응답이 양호한 제어를 구성하고 이를 시뮬레이션을 통하여 검증하였다.

2. BLDC 모터의 특성

BLDC 모터는 일반 DC 모터에서 브러시와 정류자를 자극 센서와 반도체 스위치로 대체한 것으로 Core type(Radial type)과 Coreless type(Axial type)으로 분류 할수 있다.

2.1 Coreless Type(Axial Type) BLDC Motor

Coreless Type BLDC Motor는 코어가 없기 때문에 회전자의 관성이 비교적 크고, 슬롯리스 구조로 코깁이 없으며 모터의 크기를 소형으로 할수 있다.그러나 회전시 축방향의 진동으로 노이즈가 발생하는 단점을 가진다.

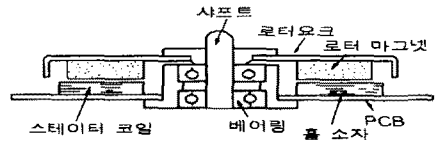


그림 1. Coreless Type BLDC Motor의 구조

2.2 Coreless 축방향 2중 회전자 BLDC Motor

Coreless 2중 회전자 구조 BLDC Motor는 회전자를 중심으로 대칭을 이루고 있어서 회전시 발생하는 축방향의 진동성 노이즈가 적고, 고티크, 고효율 및 박형화가 가능하다.

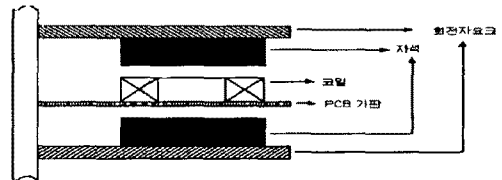


그림 2. 축방향 2중 회전자 BLDC 모터의 단면도

2.3 축방향 2중 회전자 BLDC 모터의 모델링

그림 3은 2중 회전자 모터의 전기적인 등가회로를 표시한 것이다. 모터의 특성 방정식은 식 (1)과 (2)로부터 시작된다.

$$V_{abc} = R_s i_{abc} + \frac{d}{dt} \lambda_{abc} \quad (1)$$

$$\lambda_{abc} = L_s i_{abc} + \lambda_m \quad (2)$$

식 (1),(2)를 역기전력이 고려된 전압 방정식으로 정리하면 다음과 같다.

$$V_{abc} = R_s i_{abc} + \frac{d}{dt} (L_s i_{abc}) + e_{abc} \quad (3)$$

e_{abs} 는 회전자가 회전함에 따라 각상의 코일에 유기되는 역기전력을 나타낸다.

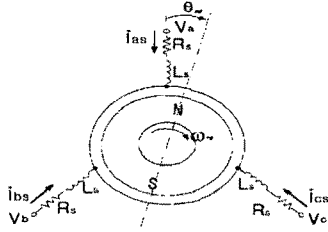


그림 3. BLDC 모터의 등가회로

다시 식(3)을 $d-q$ 좌표변환을 하여 표현하면 다음과 같이 나타낼 수 있다. 식(4)와(5)를 상태 방정식으로

$$v_{qs} = R_s i_{qs} + L_s \frac{d}{dt} i_{qs} + \omega_r L_s i_{ds} + \omega_r \lambda_m \quad (4)$$

$$v_{ds} = R_s i_{ds} + L_s \frac{d}{dt} i_{ds} - \omega_r L_s i_{qs} \quad (5)$$

정리하면 다음과 같다.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_s} & \omega_r \\ -\omega_r & -\frac{R_s}{L_s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \end{bmatrix} + \frac{1}{L_s} \begin{bmatrix} v_{ds} \\ v_{qs} \end{bmatrix} - \frac{1}{L_s} \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_r \lambda_m \end{bmatrix} \quad (6)$$

여기에서 $e_{qa} = \omega_r \lambda_m$ 는 영구자석의 전기자 권선 쇠교 자속수로 속도에 의한 기전력이므로 제어할 수 없다. 따라서 식(6)은 $d-q$ 축 전기자 전압인 v_{ds} 와 v_{qs} 로 $d-q$ 축 전기자 전류인 i_{ds} 와 i_{qs} 를 제어할 수 있음을 나타낸다.

토크는 직교하는 전기자 권선 쇠교 자속수와 전기자 전류의 곱으로 표시할 수 있으므로 다음과 같이 정리된다.

$$T_e = P \lambda_m i_{qs} \quad (7)$$

기계계의 운동방정식은 식(8)과 같으며, T_e 는 모터의 부하토크, T_L 는 부하토크, J 는 모터와 부하의 관성 모멘트 ($J_L + J_M$). $p (= d/dt)$ 는 미분 연산자이다. 그림 4는

$$pJ \left(\frac{\omega_r}{P} \right) = pJ \omega_m = T_e - T_L \quad (8)$$

앞서의 관계식들로부터 구할 수 있는 블록 선도이다.

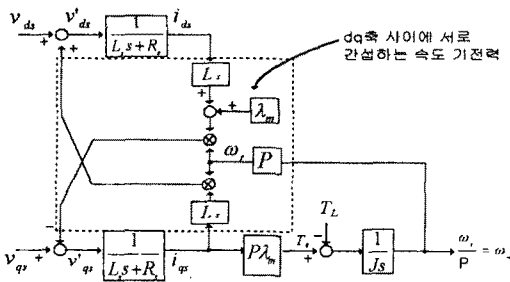


그림 4. $d-q$ 좌표로 표시한 BLDC 모터의 블록도

그림 4에서와 같이 $d-q$ 축 사이에는 서로 간섭하는 속도 기전력이 존재한다. 이때, 최대 토크를 발생하기 위하여 자속분 전류인 d 축 전류와 토크분 전류인 q 축 전류를 분리하여 제어하는 것이 필요하게 되는데, 이를 비간섭 제어라 한다. v'_{ds} , v'_{qs} 의 $d-q$ 축의 전기자 권선 임피던스 인가전압을 비간섭화된 상태에서 제어가 가능한 입력변수가 되도록 정리하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P i_{da} = -\frac{R_s}{L_s} i_{ds} + \frac{1}{L_s} v'_{ds} \quad (9)$$

$$P i_{qa} = -\frac{R_s}{L_s} i_{qs} + \frac{1}{L_s} v'_{qs}$$

전체 제어 블록 시스템을 구성해보면 다음과 같다.

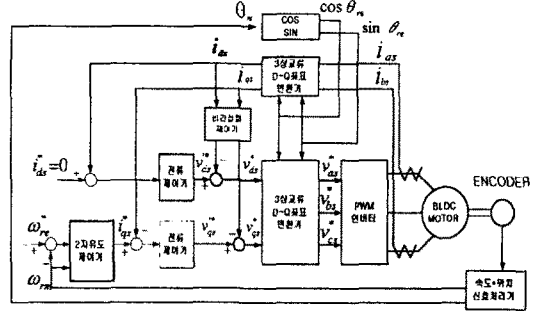


그림 5. 전체 제어 블록시스템

3. 2차 유도 PI 속도 제어기

브러시리스 DC 모터의 $d-q$ 좌표에 식(9)와 같은 제어기를 설정하고, 속도제어기를 중심으로 고려하면 그림 6. 과 같은 블록 선도가 된다.

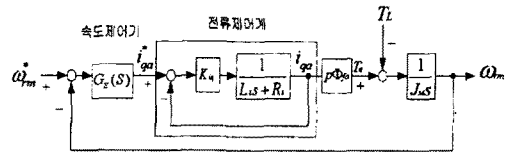


그림 6. 속도 제어계의 블록선도

그림 6.에서 알수 있듯이 전류 제어계는 마이너 루프로 사용된다. 그러면 i_{qa} 제어계는 P제어로, 비례이득을 K_{iq} 로 하면 전달함수는 식(10)과 같다.

$$G^c_{iq}(s) = \frac{i_{qs}(s)}{i^*_{qs}(s)} = \frac{K_{cq}}{T_{cq}s + 1} \quad (10)$$

여기에서 K_{cq} 는 다음식과 같다.

$$K_{cq} = \frac{K_{iq}}{R_s + K_{iq}} \quad T_{cq} = \frac{L_s}{R_s + K_{iq}} \quad (11)$$

BLDC 모터를 대상으로 교차각주파수 ω_c 를 이용하여 이득 K_{iq} 의 값을 구하면 거의 1에 근사된다. 따라서 식(10)은 다음과 같이 가정할 수 있다.

$$G^c_{iq}(s) = \frac{1}{T_{cq}s + 1} \quad (12)$$

또한 속도제어계의 전달함수를 구하면 다음식과 같다.

$$G_s(s) = K_{sp} + \frac{K_{si}}{s} \quad (13)$$

토크정수를 K_T 로 하고 간략화를 위하여 i_{qa} 제어계를 생략하면 속도지령 w^*_{rm} 과 부하토크 T_L 에 대한 모터 속도 w_{rm} 의 전달함수는 다음과 같다.

$$\frac{w_{rm}(s)}{w^*_{rm}(s)} = \frac{K_T(K_{sp}s + K_{si})}{J_M s^2 + K_T K_{sp}s + K_T K_{si}} \quad (14)$$

$$\frac{w_{rm}(s)}{T_L(s)} = \frac{s}{J_M s^2 + K_T K_{sp}s + K_T K_{si}} \quad (15)$$

식(14)과(15)는 PI 제어기에 있어서의 전달함수이다. 이는 적분이득 K_{si} 와 비례이득 K_{sp} 의 값에 따라 계

산되어지는데 식(14)의 지령속도와 식(15)의 부하토크가 서로 간섭을 일으켜 지령속도 w^*_{rm} 의 스텝변화에 대한 모터 속도 w_{rm} 의 오버슈트가 작아지는 동시에 부하토크 T_L 의 응답회복시간이 짧은 속도제어는 곤란한 특성을 가진다. 이 두식을 독립적으로 제어할수 있는 방식으로 2자유도 PI제어 방법이 있으며 전달함수는 다음과 같다.

$$\frac{w_{rm}(s)}{w^*_{rm}(s)} = \frac{K_T(aK_{sp}s + K_{si})}{J_M s^2 + K_T K_{sp}s + K_T K_{si}} \quad (16)$$

$$\frac{w_{rm}(s)}{T_L(s)} = \frac{s}{J_M s^2 + K_T K_{sp}s + K_T K_{si}} \quad (17)$$

여기에서 전달함수 이득 K_{si} 와 K_{sp} 의 값을 설정하면 부하 토크 T_L 에 대한 w_{rm} 의 응답특성은 결정되지만 속도지령 w^*_{rm} 에 대한 w_{rm} 의 응답특성은, 이득값에 의해 결정되어도, 파라미터 α 값을 조절하면 변화 시킬수 있다. 즉, w^*_{rm} 과 T_L 에 대한 응답 특성을 독립적으로 제어할 수 있다. 그림 7의 제어계는 2개의 응답 특성을 독립적으로 설정할 수 있으므로 2자유도 제어계라 한다.

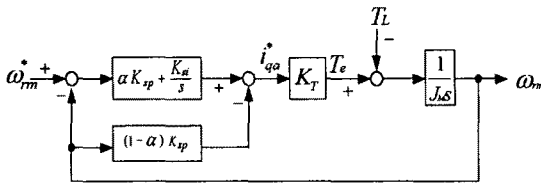


그림 7. 2자유도 PI 속도제어계의 블록선도

그림 7.에서 알수 있듯이 $\alpha=1$ 로 하면 PI 제어기로 되고, $\alpha=0$ 으로 하면 IP 제어기가 되어 1자유도 제어계가 됨을 알수 있다.

4. 시뮬레이션

표 1. 모터 파라메터

정격출력, 전압	100[W], 24[V]
$R_s(75^\circ\text{C})$	0.35[Ω]
L_s	0.0017[H]
역기전력	0.268[v · s/rad]
극수	16
관성계수(J_M)	0.00135[kg · m ²]
정격속도	1300[rpm]
정격토크	0.49[N · m]

그림 8,9,10.은 $\omega_{sc} = 200$ [rad/sec], $\omega_{pi} = 40$ [rad/sec], 지령속도는 1000[rpm], 375[sec]에서 0.8[(N · m)의 부하 왜란을 인가했을 때의 파형이다. 그리고 그림 8.은 $\alpha=1$, 그림 9.는 $\alpha=0.6$, 그림 10.은 $\alpha=0.2$ 일때의 특성을 나타낸다. 파형에서 알수 있듯이 $\alpha=0.6$ 으로 한 2자유도 PI제어방식이, $\alpha=1$ 인 PI제어방식 보다 같은 부하특성을 유지하고 있는 가운데 속도특성이 양호함을 알수 있다. 한편 $\alpha=0.2$ 일 때의 특성은 과도한 오버슈트 현상을 보여주고 있다.

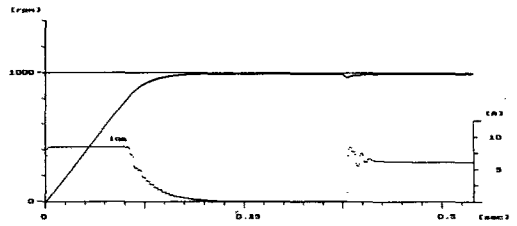


그림 8. PI속도제어계의 스텝응답과 부하응답

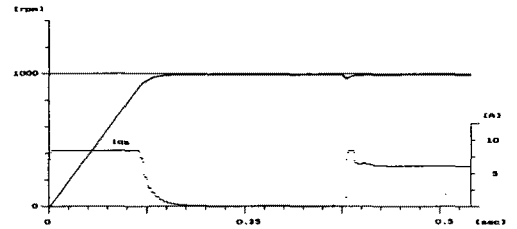


그림 9. 2자유도 PI속도제어계의 스텝응답과 부하응답

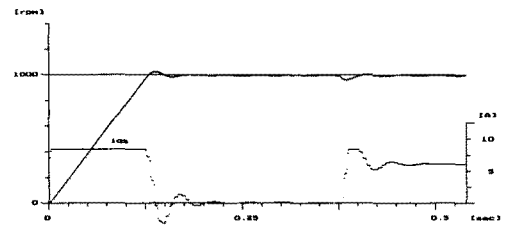


그림 10. 2자유도 PI속도제어계의 스텝응답과 부하응답

5. 결 론

본 논문에서는 모터의 크기가 작고, 효율 및 속도, 토크 특성이 양호한 축방향 2중 회전자 BLDC 모터에 2자유도 PI 제어방식을 적용시켰다. 특히 속도 특성과 부하토크의 응답 특성을 독립적으로 제어함으로써 PI제어기 보다 향상된 제어기를 구성 할수 있음을 시뮬레이션을 통하여 알수 있었다.

향후 에어컨의 실내 송풍기나 환풍기, 냉장고의 콤프레서 등과 같이 소형, 경량, 저소음이 요구되는 가전제품에 활용 가치가 있다고 판단된다.

(참 고 문 헌)

- [1] P. Pilly, R. Krishnan, "Application Characteristics of Permanent Magnet Synchronous and Brushless DC Motor for Servo Drives," Conf. Rec. IEEE/IAS Annual Meeting, pp. 30-39, 1987.
- [2] 여형기, 김태형, 박정배, 이광운, 유지운, "BLDC 전동기용 센서리스 드라이브 토크 리플 저감을 위한 전류 방법" 전력전자 학술대회 논문집, pp 337-341, 1998
- [3] 손주환, 이영진, 이진우, 조현철, 이만형, 이권순, "2자유도 PID 제어기를 이용한 UCT의 조향제어제 관한 연구" 대한전기학회 하계학술대회 논문집 pp 972-975, 1999
- [4] 小山正人, 玉井伸三, 杉本英彦, "산업용 서보모터의 제어시스템 설계", pp 73-181 1999
- [5] S. Ogasawara and H. Akagi, "An Approach to Position Sensorless Drive for Brushless DC Motor," Conf. Rec. of 1994 IEEE IAS'90, pp. 443-447, 1990