

디지털적으로 제어되는 플라이백 컨버터를 사용하는 BLDC 전동기 드라이브에 대한 연구

김남훈*, 백원식**, 최경호***, 황돈하#, 김민희**, 원재선##, 김동희###

*청주대학교, **영남이공대학, ***경북전문대학, #KERI, ##삼성전기, ###영남대학교

Study on BLDC Motor Drive using Digitally Controlled Flyback-Converter

N.H. Kim*, W.S. Baik**, K.H. Choi***, D.H Hwang#, M.H. Kim**, D.H. Kim##

*Cheongju Univ., **Yeungnam College of Sci.&Tech., ***Kyungbuk college, #KERI,

##Samsung electro-mechanic co., ##Yeungnam Univ.,

ABSTRACT

On this paper, digitally controlled flyback dc-dc converter and dc-ac inverter for bldc motor control are presented, which is used one processor. This system has 12V battery input for the flyback-converter, and the flyback-converter generates 30V output for BLDC motor inverter input. In order to compensate the flyback-converter, the transfer function of flyback converter is derived and digital PI compensator is adapted. Through bode diagram, stability of digital flyback-converter is analyzed.

To verify the proposed system, digital simulation of the bldc motor drive using digital flyback-converter are performed.

1. 서 론

최근 전력전자의 발달과 프로세서의 발달로 인해서 아날로그적으로만 가능했던 시스템들을 디지털적으로 구현할 수 있게 되었으며, 시스템들의 상호 통신과 업데이트의 용이성을 위해서 아날로그 시스템에서 디지털 시스템으로 많은 관심이 집중되고 있다.

또한 휴대용 제품의 보급화와 배터리 기술의 발달로 인하여 배터리를 사용하는 전력변환 제품들이 많이 보급되고 있다. 일반적인 배터리 사용 제품의 경우는 그림 1과 같이 DC에서 DC로 변환하는 컨버터와 DC에서 AC로 다시 변환하는 인버터로 구성이 되며, 부하로는 휴대용 청소기, 핸드 드릴등과 같은 소형 전동기를 사용하는 제품들이 많이 사용된다. 승압형 컨버터로는 출력 파워에 따라 푸쉬풀 컨버터(Push-pull converter), 포워드 컨버터(Forward converter), 플라이백 컨버터(Flyback converter)가 주로 사용된다.

본 논문에서는 12V 배터리 전원을 30V로 승압하기 위해서 플라이백 컨버터(Flyback converter)를 사용하였으며, 플라이백 컨버터를 보상하기 위해서 보드선도를 통하여 플라이백 컨버터를 분석하고, 디지털 PI 보상기(PI compensator)를 사용하여 안정성을 보상하였다. 또한 op-amp를 사용하는 아날로그 보상 회로를 제거함으로써 아날로그 회로를 최소화하였고, 승압된 플라이백 컨버터의 출력 전압을 이용하여 BLDC전동기를 구동하였다. BLDC 전동기 제어와 플라이백 컨버터의 보상회로는 하나의 프로세서를 사용하여 구성될 수 있으며, 제안된 시스템을 검증하기 위하여 시뮬레이션을 통하여 시스템의 동특성을 살펴본다.

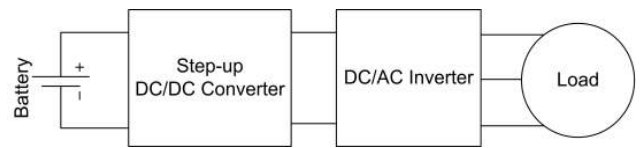


그림 1 DC-AC 전력변환기의 블록다이아그램
Fig. 1 The block diagram of DC-AC power converter

2. 플라이백 컨버터

2.1 등가회로

그림 2는 플라이백 컨버터의 DC 평균화 회로 모델, 그림 3은 동특성 회로모델 보여주고 있으며 그림2와 3 에서부터 다음의 수식(1)-(3)을 유도할 수 있다^{[1][2]}.

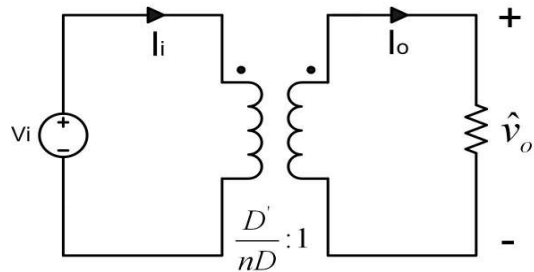


그림 2 Flyback 컨버터의 DC평균화 회로 모델
Fig. 2 DC average model of flyback converter

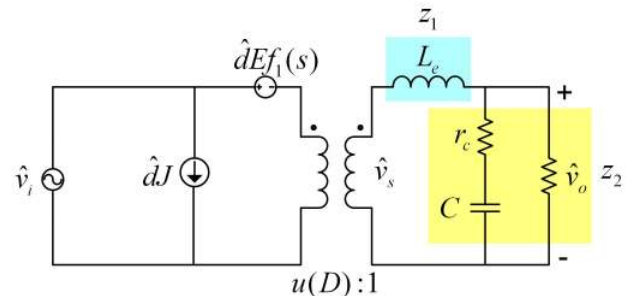


그림 3 Flyback 컨버터의 동특성 회로 모델
Fig. 3 Dynamic circuit model of flyback converter

$$V_o = V_i/u(D) \quad (1)$$

$$\hat{V}_o = \hat{V}_s \times \frac{z_2}{z_1 + z_2} \quad (2)$$

$$\widehat{V}_o = \widehat{d} \cdot E \cdot f_1(s) / u(D) \times \frac{z_2}{z_1 + z_2} \quad (3)$$

여기서, $E = \frac{V_o}{nD^2}$, $f_1(s) = 1 - \frac{DL_e}{R}s$, $u(D) = \frac{D'}{nD}$,

$$L_e = \frac{n^2 L}{D^2}, n = \frac{N_s}{N_p} \text{ 그리고 } D' = 1 - D \text{이다.}$$

수식(3)을 다시 정리하면 아래와 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{\widehat{V}_o}{\widehat{d}} = \frac{V_o}{DD'} \frac{(1 - L_e \frac{D}{R}s)(1 + r_c C s)}{\frac{L_e C (R + r_c)}{R} s^2 + (\frac{L_e}{R} + r_c C)s + 1} \quad (4)$$

플라이백 컨버터의 제어 전달함수 식(4)에 식(1)을 대입하면 (5)와 같이 다시 쓸 수 있다.

$$G_{ds} = \frac{\widehat{V}_o}{\widehat{d}} = \frac{nV_i}{D^2} \frac{(1 - L_e \frac{D}{R}s)(1 + r_c C s)}{\frac{L_e C (R + r_c)}{R} s^2 + (\frac{L_e}{R} + r_c C)s + 1} \quad (5)$$

2.2 제안된 시스템

일반적으로 DC-DC 컨버터를 구성하기 위해서는 그림4에서 나타나는 바와 같이 에러보상회로(Error compensator)와 컴퍼레이터(Comparator)를 아날로그적으로 구성한다. 에러보상 회로와 컴퍼레이터는 op-amp와 수동소자를 이용해서 회로를 구성하거나, 전용 IC와 수동소자를 이용해서 구성하게 된다.

그러나 본 논문에서는 아날로그적인 보상회로를 사용하지 않고 디지털 PI제어를 이용하여 플라이백 컨버터를 보상하여 안정하게 동작되도록 구성하였다.

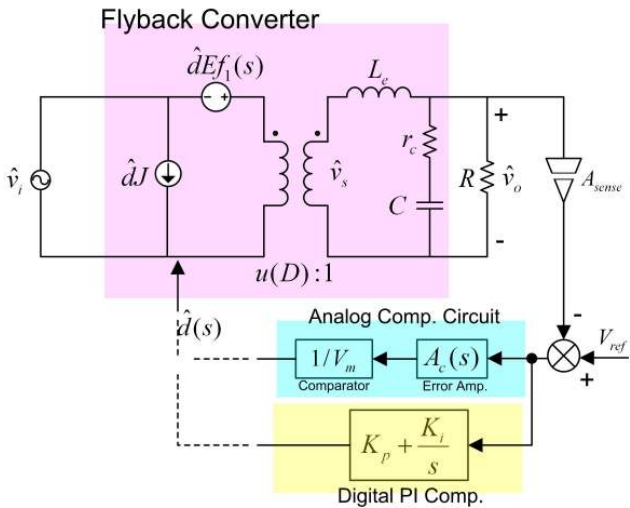


그림 4 Flyback 컨버터의 제어특성 블록도
Fig. 4 Control block diagram of flyback converter

$$Ac(s)_{pi} = k_p + \frac{k_i}{s} = \frac{k_p s + k_i}{s} \quad (6)$$

여기서 k_p 는 비례 보상기(P compensator)의 이득, k_i 는 적분 보상기(I compensator)의 이득이다.

3. BLDC 전동기

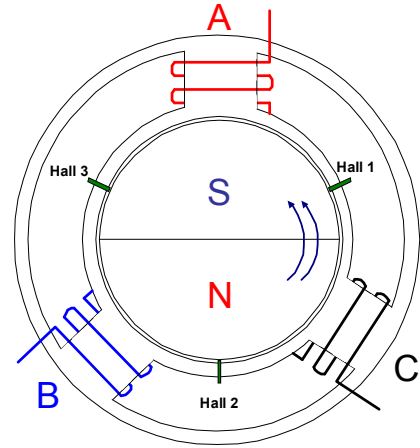


그림 5 BLDC 전동기의 구조와 신호
Fig. 5 BLDC motor structure and signals

영구자석형 전동기(Permanent magnet motor)는 역기전력의 형태에 따라서 사인파의 역기전력을 가지는 영구자석형 동기전동기(PM synchronous motor)와 구형파의 역기전력을 가지는 BLDC 전동기(Brushless DC motor)으로 나타낼 수 있다^[3].

일반적으로 BLDC전동기는 60deg 도통 방식과 120deg 도통 방식을 사용하는데, 본 논문에서는 120deg 도통 방식을 사용한다. 그림 5는 BLDC 전동기의 구조와 위치신호에 따른 이상적인 전류 파형을 보여준다.

$$\begin{pmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R + sL & 0 & 0 \\ 0 & R + sL & 0 \\ 0 & 0 & R + sL \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{pmatrix} \quad (7)$$

$$T_e = \frac{i_a e_a + i_b e_b + i_c e_c}{\omega_{rm}}$$

(8)

여기서 V_a, V_b, V_c 는 상전압, R 은 각상의 저항, L 은 각상의 인덕턴스, i_a, i_b, i_c 는 상전류, e_a, e_b, e_c 는 각상의 역기전압, T_e 는 토크 그리고 ω_{rm} 은 회전자 각속도를 나타낸다.

4. 시뮬레이션

제안된 시스템의 타당성을 검증하기 위해서 기존에 사용되는 아날로그 보상회로와 제안된 디지털 PI 보상기의 보드선도와 동작 특성을 시뮬레이션을 통하여 살펴보았다. 표1은 설계된 플라이백 컨버터의 사양과 파라미터를 나타낸다.

그림 6은 플라이백 컨버터의 안정도를 판별하기 위한 각 시스템들의 보드선도를 보여주고 있다. 여기서 컨버터의 스위칭 주파수가 50kHz이므로 교차 주파수는 10kHz이고, 교차 주파수에서의 플라이백 컨버터(G_{ds_total})의 이득을 보면 -52dB 정도의 값을 가진다는 것을 알 수 있다. 따라서 아날로그 보상기(Acs)와 디지털 PI 보상기(Acs_PI)를 각각 교차 주파수(10kHz)에서 52dB 정도의 값을 가지도록 설계를 하여 보상해 주었다. 보드선도에서 알 수 있듯이 아날로그 보상기(sys_with_comp)와 디지털 PI 보상기($sys_with_comp_PI$)를 사용한 전체 시스템이 교차주파수에서 0dB의 값을 가진다는 것을 볼 수 있다.

그림 7은 시스템 구성도를 보여주고 있으며, 부하로 사용된 BLDC 전동기는 팬부하이다.

그림 8은 안정도 판별에 의해서 설계된 아날로그 보상기(V_{o_1} , I_{r_1})와 디지털 PI 보상기(V_o , I_r)를 사용한 플라이백 컨버터의 출력전압과 전류 특성을 보여주고 있다. 초기 정상상태까지는 0.02초가 걸리며, 0.05초 이후에 정격의 78%의 부하를 주었고, 다시 0.1초 후에 무부하 상태로 하였다. 시뮬레이션에서 보는 바와 같이 제안된 디지털 PI보상기와 아날로그 보상기를 사용한 플라이백 컨버터가 모두 비슷한 특성을 나타내고 있음을 알 수 있다.

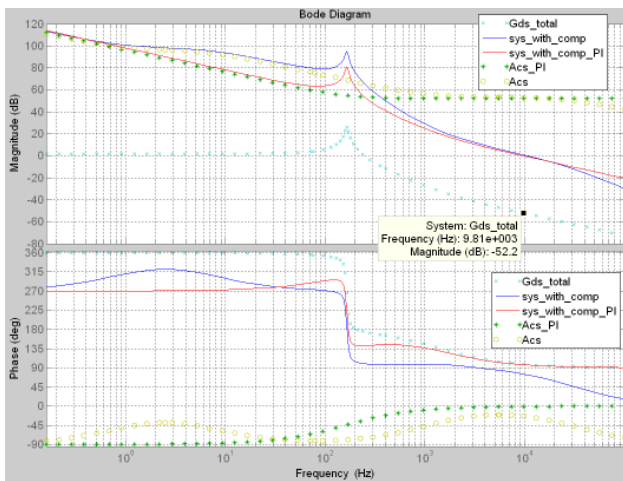


그림 6 플라이백 컨버터의 보드선도
Fig. 6 Bode diagram of flyback converter

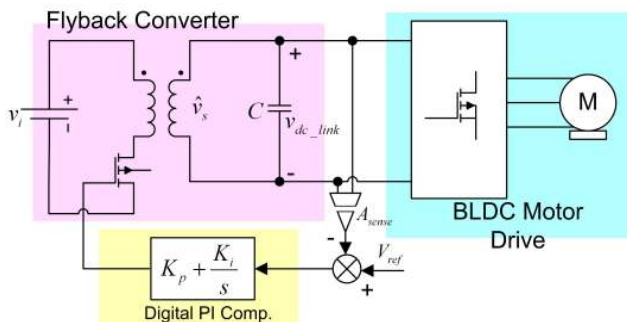


그림 7 시스템 구성도
Fig. 7 System configuration

표 1 플라이백 컨버터 사양
Table 1 Specification of flyback converter

V_i	11 ~ 13 V	V_o	30 V
I_o	1 A	P_o	30 W
L_m	300 μH	C	300 μF
N_p	10 turns	N_s	20 turns
A_{sense}	0.1	r_c	0.045
f_{sw}	50 kHz	R	30 ohm

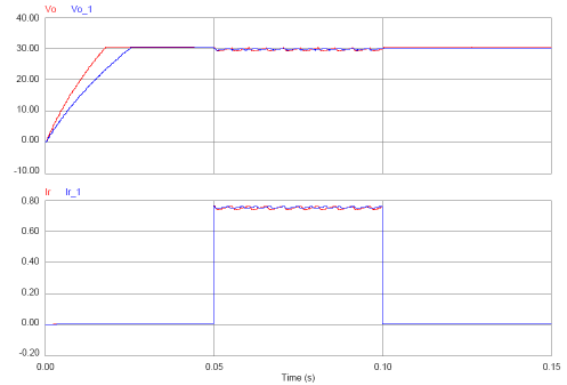


그림 8 플라이백 컨버터의 출력
Fig. 8 Dynamic characteristics of flyback converter

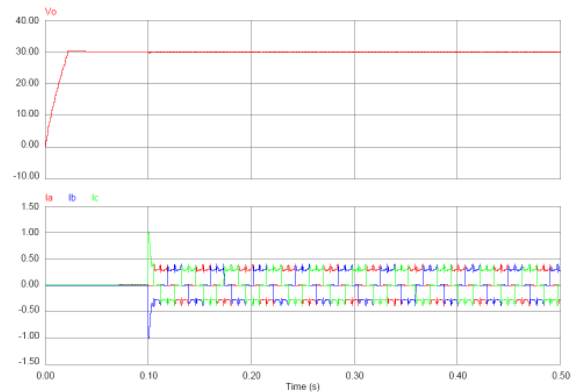


그림 9 디지털 PI 보상기를 사용한 플라이백 컨버터의 출력
Fig. 9 Dynamic characteristics of flyback converter using digital PI compensation

5. 결론

본 논문에서는 배터리를 이용한 BLDC 전동기 드라이브를 구성하기 위해서 디지털 PI 플라이백 컨버터를 이용하여, 안정적인 DC링컨단 전압을 발생하였다. 기존의 아날로그 보상기를 사용하는 플라이백 컨버터는 op-amp와 수동소자를 이용하기 때문에 추가적인 비용의 발생이 불가피 하지만, 디지털 PI 보상기를 사용함으로써 플라이백 컨버터의 회로를 최소화 시키고, 가격을 줄일 수 있다. 또한 BLDC 드라이브에서 사용하는 프로세서를 사용함으로써 추가적인 부담이 없으며, 시뮬레이션 결과에서 알 수 있듯이 좋은 동특성을 보여주고 있다.

참고 문헌

- [1] 김희준, 스위치모드 파워플라이, 성안당, 2005.
- [2] H.W. Whittington, V.W. Flynn, and D.E. Macpherson, Switched mode power supply supplies design and construction, Research studies press ltd., 1997.
- [3] J.R. Hendershot Jr. and TJE Miller, Design of Brushless Permanent Magnet Motors, Oxford, 1994..