

고안정 전류원 전자석 전원장치의 출력 필터 설계

최원식*, 김민재*, 정일우*, 박기현**, 박현철*
 포항공과대학교*, 포항가속기연구소**

Output Filter Design of High Precision Current Source Magnet Power Supply

Won-Shik Choi*, Min-Jae Kim*, Il-Woo Jeong*, Ki-Hyeon Park**, Hyun-Chul Park*
 Pohang University of Science and Technology*, Pohang Accerelator Laboratory**

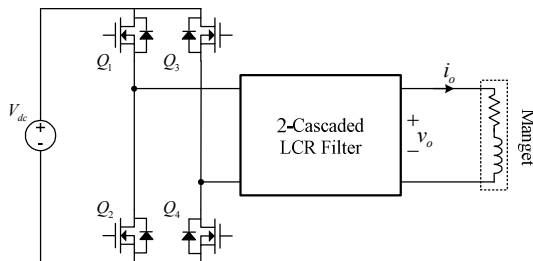
Abstract - 본 논문은 양방향 전류 제어를 위한 고안정 전류원 전원 장치의 영점 전류 부근에서의 PWM 방법과 출력 필터 설계를 위한 가이드 라인에 대해 기술 하였다. LCR 출력 필터의 공진점에서 전압의 크기를 줄이기 위한 댐핑 저항의 크기에 따라 Bode plot을 통해 임피던스와 전달함수의 주파수 특성을 분석하고 낮은 Q-factor를 갖는 출력 필터의 댐핑 저항 크기를 확인 하였다.

1. 서 론

가속기에서는 MPS(Magnet Power Supply)를 전자석과 연결하여 자속을 발생시키며 정밀하게 전류를 제어한다. 정밀한 가속 장치의 빔 제어를 위해서 사용되는 전자석은 종류에 따라 MPS의 전류와 전압 용량이 다양하며 수A에서 수백A에 달한다[1]. 전원장치는 디지털 제어와 신호 처리를 통한 시스템의 소형화가 가능해지고 개발의 유연성이 증대되었다. 컨버터의 출력 리플과 노이즈를 감소시키기 위해서 필터 설계가 필요하며 지령 전류를 추종하기 위한 제어기 설계가 요구된다. 본 논문에서는 MPS용 컨버터의 안정된 출력을 위한 필터를 설계 하였다.

2. 본 론

2.1 MPS 시스템 구성



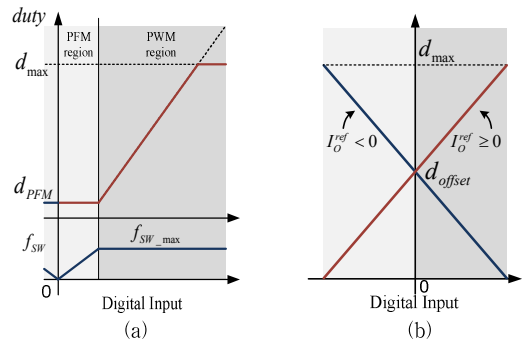
<그림 1> MPS 시스템의 구성

설계된 MPS 시스템은 H-브리지 타입의 컨버터와 LCR 소자로 구성된 출력 필터로 그림 1과 같다. 양방향 전류 출력을 위해 두 개의 벽 컨버터가 병렬로 동작하는 방식이다. MPS의 일반적인 출력 필터는 2개의 cascaded LCR low pass 필터 회로로 구성되며 출력 필터를 구성해 출력 전압의 리플과 노이즈를 감소시킨다[2].

2.2 양방향 영점 부근 전류 제어를 위한 스위칭 방법

양방향 MPS의 경우 매우 미세한 전류로 영점 부근에서 제어가 가능해야 하며, (+), (-)전류 변환이 왜곡되지 않아야 한다. 즉 영점 부근의 전류 제어와 같이 낮은 전류를 제어 할 경우 제어기 출력 duty가 작아서 스위치가 도통되지 못한다. 이를 위해 낮은 듀티에서는 그림 2와 같이 최소 듀티(d_{PFM})로 주파수 제어(a)를 하거나 Unipolar-PWM 방식으로 오프셋 듀티(d_{offset})를 변경하여 두 레그의 듀티 차이로 전류를 발생(b)시킨다. (b)의 경우 스위칭 주파수 두 배의 유효 주파수 전압이 부하에 인가되므로 스위칭 리플 전압을 줄일 수 있고, 필터 설계시 유리한 장점이 있다.

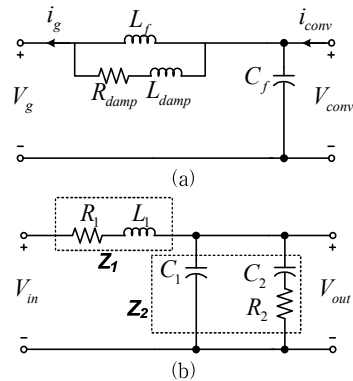
오프셋 듀티(d_{offset})가 50%인 경우 PWM 파형은 스위칭 주기 내에서 대칭으로 발생한다. 반면 PFM을 이용할 경우, 낮은 주파수로 영점 부근의 전류를 제어하며 출력 필터 설계시 대역폭이 이를 충분히 감안해야 하며 필터 대역폭이 낮아지게 된다. 따라서 영점 부근의 전류 제어를 위해서는 오프셋 듀티를 이용한 Unipolar-PWM 방식이 효과적이다.



<그림 2> 양방향 전류 제어를 위한 듀티 발생 방법 비교 (a)PFM + PWM (b)Offset duty 이용

2.3 출력 필터 구성 및 특성

컨버터에서 발생하는 스위칭 고조파 노이즈 전류를 제거하기 위해서 그림 3 (a)와 같이 EMI 노이즈 필터를 구성할 수 있다. 출력 전류가 작은 시스템의 필터는 LC low pass 필터로 단순하게 구현할 수 있지만 공진 주파수에서 Q값이 크므로 이를 줄이고, dc 전류에 의한 댐핑 저항의 열손실을 줄이기 위해 그림 3 (b)와 같이 RC 직렬 회로를 추가한다.



<그림 3> 댐핑 필터의 종류 (a)입력 EMI 노이즈 필터 (b)출력 리플 노이즈 필터

이러한 필터를 MPS에 적용하여 컨버터의 입력전류의 고조파 전류와 출력 리플 전압을 줄일 수 있다. 출력 전압의 리플 노이즈를 줄이기 위한 방법 Praeg low pass 필터[3]의 입출력 전압전달함수 $H(s)$ 를 구하면 다음과 같다.

$$H(s) = \frac{sT_2 + 1}{s^3 T_2 L_1 C_1 + s^2 (T_1 T_2 + L_1 C_1 + L_1 C_2) + s(T_1 + T_2 + T_3) + 1}$$

where, $T_1 = R_1 C_1$, $T_2 = R_2 C_2$, $T_3 = R_1 C_2$

R1을 생략하면 아래의 식과 같다.

$$H(s) \approx \frac{sT_2 + 1}{s^3 T_2 L_1 C_1 + s^2 L_1 (C_1 + C_2) + sT_2 + 1}$$

주어진 L_1, C_1, C_2 에서 임계 댐핑을 위한 R_2 값은 일반적인 조건은 $R = \sqrt{L/C_1}$, $C_2 \rightarrow \infty$ 이나 실제 설계를 위해서는 회로의 부피, 경제성을 고려해야 한다.

만약 $C_2 \ll C_1$ 일 경우 전달함수와 극점, 임계 댐핑을 위한 R_2 를 구하면 다음과 같다.

$$H(s) \approx \frac{R_2}{s^2 L_1 C_1 R_2 + s L_1 + R_2}$$

$$s_{1,2} = -\frac{1}{R_2 C_1} \pm j \frac{1}{C_1} \sqrt{\frac{4C_1}{L_1} - \left(\frac{1}{R_2}\right)^2}, R_2 = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{L_1}{C_1}}$$

2.4 Bode plot을 이용한 출력 필터 설계

출력 필터 공진주파수의 Q-factor가 커지면 컨버터의 출력 전압이 해당 주파수의 과도상태가 길어지며, 제어기 설계시 시스템의 안정도를 낮출 수 있다. 또한 MPS는 안정되고 정밀한 전류 공급이 가능해야 하므로 가급적 공진점에서 낮은 Q-factor를 갖도록 설계 되어야 한다. 출력 필터의 소자임피던스와 전달함수를 주파수 도메인에서 확인할 수 있다.[4] 출력 필터 전달 함수는 다음과 같다

$$H = \frac{v_o}{v_i} = \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2}$$

인덕터와 캐패시터의 값이 정해진 상황에서 그림 3(b)의 출력 필터를 고려하였다. 댐핑 저항(R_2)과 캐패시터(C_2)를 직렬로 연결하고 R_2 의 값이 특성임피던스 Z_{O1}, Z_{O2} 크기를 기준으로 변화할 경우 주파수 특성을 bode plot으로 그림 4에 도시하였다.

그림 4(a), (c)는 R_2 가 Z_{O1} 과 Z_{O2} 보다 크거나 작을 경우이다. (a)는 L_1 과 C_1 의 공진 주파수에서 L_1 과 C_1 이 R_2 와 병렬 연결되어 R_2 에 의해 이득이 제한되며 Q_{O1} 값을 가지게 된다. (c)는 L_1 과 C_2 의 공진 주파수에서 Z_{O2} 와 R_2 의 직렬 연결되고 R_2 에 의해 이득이 제한되며 Q_{O2} 의 값을 갖는다. 각각의 Q-factor는 다음과 같이 계산된다.

$$Q_{O1} = R_2 \sqrt{C_1/L_1}, Q_{O2} = \sqrt{C_1/L_1} / R_2$$

그림 4(b)는 낮은 Q-factor를 갖는 출력 필터로 $Z_{O2} \leq R_2 \leq Z_{O1}$ 일 때 전달 함수 H 의 점근선은 -20dB/dec로 -40dB/dec로 차수가 감소하며 공진 주파수는 -20dB/dec 점근선에 위치한다. 또한 Z_{O1}, Z_{O2} 와 공진으로 인한 큰 Q값이 발생하지 않는다. 따라서 댐핑 저항 R_2 는 다음과 같은 조건에서 설계 되어야 함을 알 수 있다.

$$Z_{O1} \leq R_2 \leq Z_{O2}$$

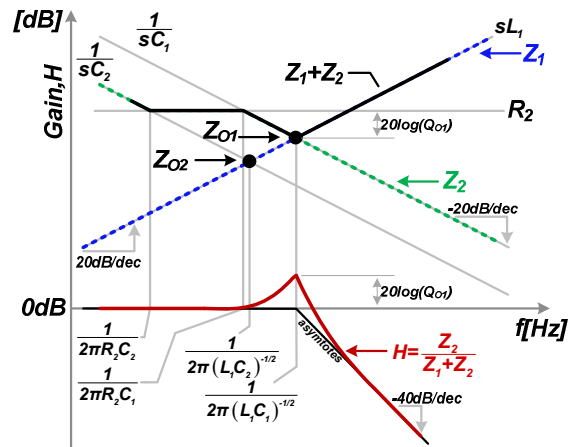
여기서, $Z_{O1} = \sqrt{L_1/C_1}$, $Z_{O2} = \sqrt{L_1/C_2}$ 으로 표현할 수 있다.

3. 결 론

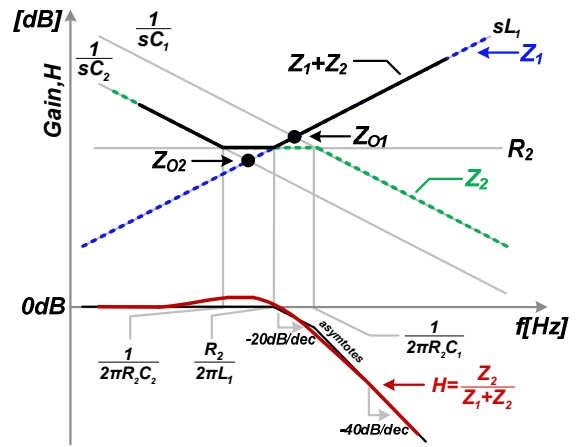
본 논문에서는 양방향 전류 제어용 전자식 전원 장치의 영점 전류 부근에서의 효과적인 스위칭 방법과 출력 필터의 설계에 대해서 연구하였다. 전자식 전원 장치의 유효 스위칭 주파수를 높이고, 낮은 전류에서도 출력 필터의 대역 폭 이상에서 스위칭 하기 위해서 Up-down count 삼각파를 이용한 Unipolar-PWM 방식이 적합하다. 출력 전압의 리플 성분을 줄이고 댐핑 저항의 열손실을 고려한 RC 직렬 회로가 추가된 출력 필터에서 댐핑 저항의 크기에 따른 출력 필터의 주파수 특성을 확인 하였다. 낮은 Q-factor를 갖도록 댐핑 저항은 두 특성 임피던스 사이의 값으로 설계 되어야 하며 두 특성 임피던스의 크기차이가 크고, 댐핑 저항이 Z_{O1} 값에 가까울수록 Q-factor가 더욱 낮아지게 된다.

[참 고 문 헌]

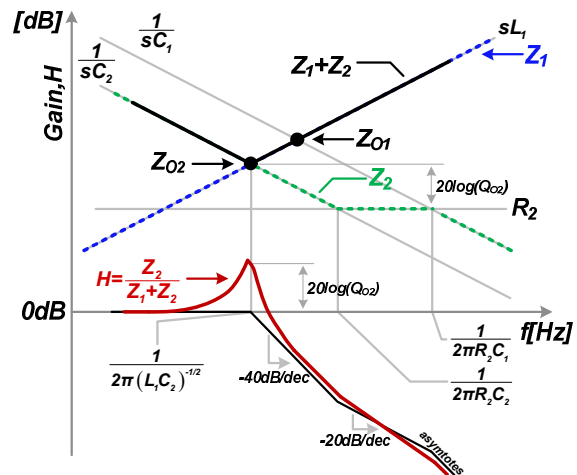
- [1] Sato, H. et al, "Application of the Power Devices for the Accelerator Magnet Power Supply," Power Conversion Conference - Nagoya, 2007. PCC '07, vol., no., pp.911,918, 2-5 April 2007
- [2] Pavan Kumar, M.R.; Kim, J. M S, "Capacitor current feedback for output filter damping in switched-mode magnet power supplies," Magnetics, IEEE Transactions on, vol.30, no.4, pp.1778,1781, Jul 1994
- [3] Praeg, Walter F., "A High-Current Low-Pass Filter for Magnet Power Supplies," Industrial Electronics and Control Instrumentation, IEEE Transactions on, vol.IECI-17, no.1, pp.16,22, Feb. 1970
- [4] R.W.Erickson and D. Maksimović, Fundamentals of Power Electronics, 2nd ed. New York, USA: KAP Publication, 2001



(a) $R_2 > Z_{O1}$ 일 때 Bode plot



(b) $R_2 \leq Z_{O1}, R_2 \geq Z_{O2}$ 일 때 Bode plot



(c) $R_2 < Z_{O2}$ 일 때 Bode plot

<그림 4> 댐핑 저항(R_2)에 따른 출력 필터의 주파수 특성