

# 고정밀 전류형 PWM 컨버터의 입출력 필터 설계

김효성 · 최재호

천안공업전문대학 제어계측과 · 충북대학교 전기공학과

## Input Output Filter Design of High-precision CS PWM Converter

Hyo-sung Kim · Jac-ho Choi

Cheon-an Tech. College · Chung-buk University

**Abstract** - CS PWM converter is appropriate for the high power and high precision current control. The input/output filters of the CS PWM converter limit the output DC current range and may destroy the system with filter resonance, and make the system equation more complicated. In this paper, the systematic and simple filter design method which considers not only the harmonic attenuation but the total system performance also is proposed.

### 1. 서론

전류형 PWM 컨버터는 내구성이 높고 전류응답이 빠르다는 등의 장점이 있기 때문에 고출력, 고정밀을 요하는 응용에 아주 적합한 구조의 전원이라 할 수 있다.<sup>[1,2]</sup>

전류형 PWM 컨버터의 입출력단에는 수동필터가 필수적으로 사용된다. 그러나 수동필터를 사용함으로써 컨버터 출력 전류의 운전영역이 제한되고 컨버터의 스위칭에 동기하는 수동필터의 공진현상에 의해 시스템이 파괴될 위험성이 있으며 시스템의 특성식이 복잡하게 되는 등의 문제가 발생하게 된다.

본 논문에서는 이러한 점들을 종합적으로 고려한 고정밀 전류형 PWM 컨버터에 대한 입출력 수동필터의 설계에 관하여 연구한다. 입출력필터의 설계결과를 퍼유닛법으로 표현함으로써 다양한 전원조건에 대하여도 설계결과를 간단히 적용할 수 있도록 하였다.

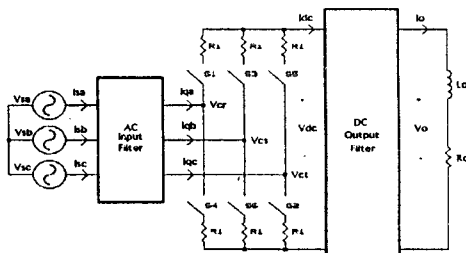


그림 1. 전류형 PWM 컨버터의 개념도.

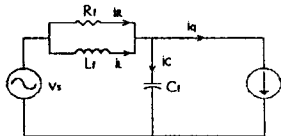


그림 2 RLC형 교류입력필터의 단상등가회로.

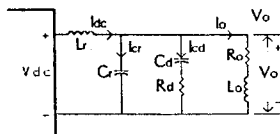


그림 3 LC-RC형 직류출력필터의 회로도.

### 2. 자석전원장치의 구성

#### 2.1 전류형 PWM 컨버터의 구조

그림1은 전류형 PWM 컨버터를 사용한 자석전원시스템의 구성도를 보인다.

#### 2.2 교류 입력 필터

교류입력측 전원전류의 제한조건으로는 입력역률과 총고조파왜형률(THD)을 정의 한다.

$$THD_i = \frac{\left( \sum_{k=3,5,7} I_{ik}^2 \right)^{1/2}}{I_d} \times 100 (\%) \quad (1)$$

where,  $I_{ik}$  = magnitude of the  $k$ -th harmonic current of  $i_a$ ,  
 $I_d$  = magnitude of the fundamental current of  $i_a$ .

본 논문에서는  $THD_i < 5\%$ 로 한다.

LC필터는 차단주파수대에서 고조파 전류와 공진하면 매우 큰 전류가 흐르게 되어 시스템에 악영향을 줄 수 있다. 이 점을 극복하기 위하여 본 논문에서는 RLC형 필터 구조를 제안한다.<sup>[3,4]</sup> RLC형 필터는 감쇄저항이 필터 인덕터와 병렬로 접속되어 있어서 고조파 성분의 전류만을 감쇄저항에 흐르도록 함으로써, 감쇄저항에서의 전력손실을 혁신적으로 줄이면서도 필터의 고조파 억제력은 그대로 유지할 수 있다. 또한 필터 인덕터에는 기본파의 전류만 흐르도록 되어서 필터 인덕터에 고조파 전류가 유입되는 것을 막고 필터 인덕터를 보호하는 기능도 가진다. 그림 2)는 RLC형 필터의 단상등가회로를 보인다.

RLC형 필터에서 감쇄저항과 감쇄계수의 관계는 다음식과 같다.<sup>[3,4]</sup>

$$\zeta = \frac{1}{2\omega_c C R_f} = \frac{1}{2R_f} \sqrt{\frac{L_f}{C_f}} \quad (2)$$

예를 들어, 교류입력필터의 감쇄비율  $\zeta=0.25$ 의 값으로 할 때 계단응답에 대한 오버슈트는 약 44%정도 된다.

#### 2.3 직류 출력 필터

직류 출력측 부하전류의 제한조건으로는 식(3)과 같이 부하전류의 맥동률(Ripple Factor;  $RF_o$ )을 정의 한다.

$$RF_o = \frac{\left( \sum_{k=1,3,5} I_{ok}^2 \right)^{1/2}}{I_{avg}} \times 100 (\%) \quad (3)$$

where,  $I_{ok}$  = Magnitude of the  $k$ -th harmonic current of  $i_o$ ,  
 $I_{avg}$  = Average value of  $i_o$ .

직류출력필터는 기본적으로 LC형 필터로 구성된다. 극히 낮은 전류맥동을 요구하는 경우 필터용량이 매우 증대하며, 공진을 억제하기 위하여 그림3)과 같이 감쇄저항  $R_d$ 를 필터 커패시터와 병렬로 접속한다. 또한 감쇄저항에 지속적인 직류성분의 전류가 흐르지 않도록 감쇄용 커패시터  $C_r$ 를 직렬로 접속한다.

### 3. 위출력 필터설계 알고리즘

#### 3.1 교류입력필터 설계 알고리즘

그림4) 및 그림5)는 각 필터 차단주파수  $f_c$ 에서 히스테리시스 밴드폭  $\delta$ 의 크기에 대한 컨버터 스위칭 주파수  $f_s$ 와 전류 고조파왜형률  $THD_i$ 의 관계를 보인다.

분석결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다. 첫째, 필터의 차단주파수를 감소시키면 컨버터의 스위칭 주파수와 전원전류의 고조파왜형률이 모두 감소 한다. 둘째, 히스테리시스 밴드

폭을 줄이면 컨버터의 스위칭 주파수는 증가하지만 진원전류의 고조파왜형율은 감소한다.

따라서, 본 논문에서는 다음과 같은 최적 필터 설계과정을 수립하였다.

- (1) 초기의 필터 차단주파수  $\omega_c$ 를 설정한다.
- (2) 밴드 폭을 큰 값에서 작은 값으로 감소시켜 가면서 규정된 컨버터의 스위칭 주파수를 갖는 밴드 폭의 값을 찾고 그 값을  $\delta_{PS}$ 로 한다.
- (3) 마찬가지로 (2)의 과정에서 같이 밴드 폭을 감소시키면서 규정된 진원전류의 총고조파왜형율을 갖는 밴드 폭을 찾고 그 값을  $\delta_{THDi}$ 로 한다.
- (4)  $\delta_{ERR} = \delta_{PS} - \delta_{THDi}$ 를 구한다.
- (5) 식4)에 의해  $\delta_{ERR}$ 를 최소로 하는 필터의 차단주파수  $\omega_c'$ 를 계산한다.
- (6)  $\delta_{ERR}$ 이 허용범위내로 들어올 때까지 (2)-(5)의 과정을 반복하여 필터의 차단주파수  $\omega_c$  및 히스테리시스 밴드폭  $\delta_{FIND}$ 를 구한다.

그림6)에 컨버터의 스위칭 주파수 및 진원전류의 총고조파왜형율을 고려한 히스테리시스 밴드폭 및 필터 차단주파수의 최적설계 개념을 보인다. 이 때 새로운 필터 차단주파수  $\omega_c'$ 의 결정은 다음의 식에 의한다.  $k$ 는 탐색계수 이다.

$$\omega_c' = \omega_c(1 - k(\delta_{PS} - \delta_{THDi})) \quad (4)$$

### 3.2 직류 출력필터 설계

자석부하 회로를 포함하여 해석한 컨버터의 출력전압  $V_{dc}$ 에 대한 직류필터의 출력전압  $V_o$ 의 전달함수블록도를 그림7)에 보인다. 전달함수는 식5)와 같이 유도된다.

$$\frac{V_o}{V_{dc}} = \frac{b_2s^2 + b_1s + b_0}{a_4s^4 + a_3s^3 + a_2s^2 + a_1s + a_0} \quad (5)$$

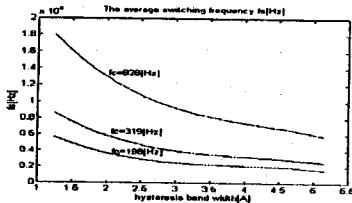


그림 4 필터차단주파수를 파라미터로 한 컨버터 스위칭주파수와 히스테리시스밴드폭과의 관계.

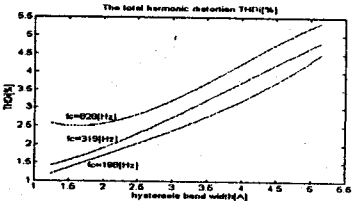


그림 5 필터차단주파수를 파라미터로 한 THDi와 히스테리시스밴드폭과의 관계.

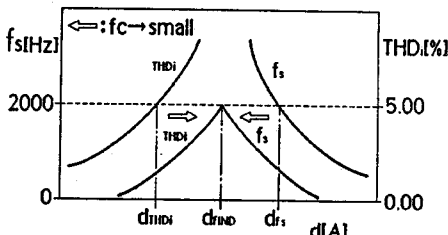


그림6 히스테리시스밴드폭과 필터차단주파수의 탐색 알고리즘.

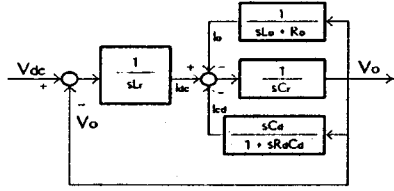


그림 7 부하자석을 고려한 직류출력필터의 블록선도.

where

$$\begin{aligned} a_4 &= L_r L_o R_d C_d C_r \\ a_3 &= L_r (L_o (C_r + C_d) + R_o R_d C_d C_r) \\ a_2 &= L_r (L_o (C_r + C_d) + R_d C_d) + L_o R_d C_d \\ a_1 &= L_r + L_o + R_o R_d C_d \\ a_0 &= b_0 = R_o \\ b_2 &= L_r R_d C_d \\ b_1 &= R_o R_d C_d + L_o \end{aligned}$$

위의 식에서 분자항의 영점의 근은 근의 공식에 의하여 다음과 같이 구해진다.

$$z_{1,2} = -\frac{1}{R_d C_d} \text{ and } -\frac{R_o}{L_o} \quad (6)$$

분자항의 영점 2개를 소거하기 위해 분모 항을;

$$\begin{aligned} D(s) &= a_4 \left( s + \frac{1}{R_d C_d} \right) \left( s + \frac{R_o}{L_o} \right) (s^2 + 2\zeta_o \omega_o s + \omega_o^2) \\ &= a_4 s^4 + a_3 s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + a_0 \end{aligned} \quad (7)$$

로 놓으면 식7)의 계수는 식5)의 분모항의 계수와 같아야 하므로 다음의 조건식이 유도된다.

$$C_d = \frac{L_o}{R_o^2} \quad (8)$$

$$R_d = R_o \quad (9)$$

$$\omega_o = \sqrt{L_r C_r} \quad (10)$$

$$\zeta_o = \frac{1}{2R_o} \sqrt{\frac{L_r}{C_r}} \quad (11)$$

따라서 위의 식8)과 식9)의 조건을 만족시키도록 필터요소 관계를 설정하면 컨버터출력전압  $V_{dc}$ 에 대한 직류필터출력전압  $V_o$ 의 전달함수는 식12)와 같이 2계차 미분식으로 간단화 된다.

$$\frac{V_o}{V_{dc}} = \frac{1}{L_r C_r (s^2 + 2\zeta_o \omega_o s + \omega_o^2)} \quad (12)$$

따라서,  $\omega_o$ ,  $\zeta_o$ 를 적절히 선정함으로써 간단히 원하는 고조파 억제 및 감쇄비를 갖는 출력 필터를 설계할 수 있다.

## 4. 시뮬레이션

### 4.1 입출력 필터설계

설계대상 시스템의 입출력 사양은 표1)과 같다.

표 1 제안된 자석전원장치의 입출력 사양

Items	Specification
AC input voltage	3φ, 220[V]±10%, 60[Hz]
DC output voltage	50 ~ 250[V]
DC output current	40 ~ 200[A]
Output current ripple	≤ 0.01[%] peak to peak
AC input power factor	≥ 90[%]
Average switching freq.	2[kHz]
Magnet load	Inductance 21.49[mH] Resistance 1.0746[Ω]

시뮬레이션 모델에 대하여 설계된 입출력 필터의 값은 표2)와 같다.

표 2 피유닛 표현에 의한 입출력필터 자료.

AC input filter	$\omega$ [rad/s]	911
	$\zeta$	0.59
	$x_L$ [p.u]	0.0467
	$y_C$ [p.u]	0.09124
DC output filter	$r$ [p.u]	70
	$\omega_0$ [rad/s]	400
	$\zeta_0$	1.0
	$x_L$ [p.u]	75.78
	$y_C$ [p.u]	35.456
	$r$ [p.u]	0.731
	$y_C$ [p.u]	567.22

4.3 시뮬레이션 결과

그림8) 및 9)에 시뮬레이션 결과를 보인다. 그림8)은 교류 전원측 전류의 파형이다. 전원전압과 동상을 이루고 있고 총고조파왜형율은 4.8[%]이다. 그림9)는 자석부하전류의 파형이다. 맥동률이 9.5[ppm]이 된다.

5. 실험결과

5.1 실험장치의 사양

실험용 파이로트 시스템의 사양은 표3)과 같다.

표 3 실험용 파이로트 시스템의 사양.

AC input condition	No. of phases	3
	Frequency[Hz]	60
	Rated voltage[V]	220
	Rated power[kVA]	1.0
DC output condition	Output voltage[V]	50~250
	Output current[A]	1.0~3.3
Magnet Load	Inductance[mH]	1289.5
	Resistance[Ω]	64.48
	Time constant[ms]	20

5.2 입출력 필터설계

피유닛법을 적용하여 설계된 입출력필터의 값은 표4)와 같다.

표 4 실험용 파이로트 시스템의 필터설계 자료.

AC input filter	$\omega$ [rad/s]	911
	$\zeta$	0.25
	$L_f$ [mH]	6
	$C_f$ [μF]	5
DC output filter	$R_f$ [Ω]	70
	$\omega_0$ [rad/s]	400
	$\zeta_0$	1.0
	$L_f$ [mH]	322.4
	$C_f$ [μF]	75.78
	$R_f$ [Ω]	64.48
	$C_f$ [μF]	310.13

5.3 실험 결과

그림10) 및 11)은 실험에 따른 각파형이다. 전원전류의 파형은 고조파가 충분히 억제되고 있으며, 위상도 기준전압파형과 동상을 이루고 있다.

6. 결론

고출력, 고정밀 전류제어를 요구하는 전류형 PWM 컨버터의 입출력필터 설계에 관하여 연구한 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 고조파 억제력 및 컨버터의 스위칭주파수를 종합적으로 고려한 간단하고 체계적인 교류필터 설계방법을 제시하고 설계 데이터를 도출하였다.
- 2) 높은 유도성을 갖는 자석부하를 함께 고려한 LC-RC형 출력필터의 특성을 해석하였고, 그 결과를 이용하여 간단한 출력필터 설계방법을 제안하였고 설계 데이터를 도출 하였다.
- 3) 피유닛 표현을 사용함으로써 필터설계 자료를 임의의 정격전압 및 정격출력을 갖는 시스템에 사용되어질 수 있도록 일반화 하였다.

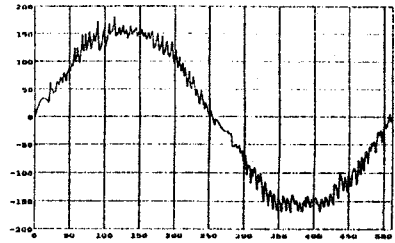


그림 8 교류 전원측 전류의 시뮬레이션 파형.

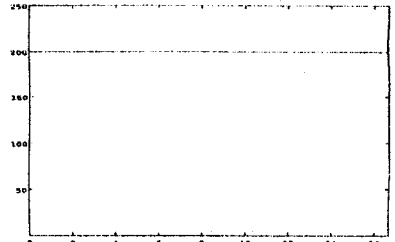


그림 9 부하측 직류전류의 시뮬레이션 파형.

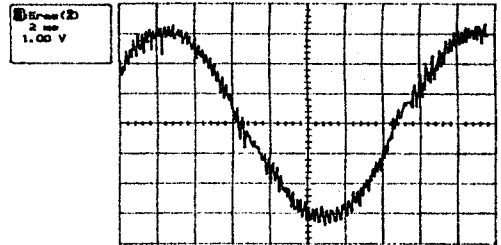


그림 10 교류전원측 전류의 실험파형;  $i_L$ (1[A/div]).

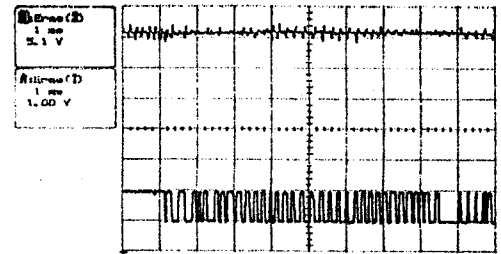


그림 11 부하전류와 스위칭신호의 파형; a)  $i_L$ (1[A/div]), b)  $S_i$ (1[S/div]).

<참고문헌>

1. D. Ciscato, L. Malesani, L. Storari, L. Rossetto, P. Tenti, G. L. Basile, and F. Voelker, "Optimum Control of PWM Rectifiers for Magnet Supply," *EPE Firenze*, vol. 2, pp. 89-93, 1991.
2. D. Ciscato, L. Malesani, L. Rossetto, P. Tenti, G. L. Basile, M. Pasti, and F. Voelker, "PWM Rectifier with Low dc Voltage Ripple for Magnet Supply," *IEEE Trans. on Ind. Appl.*, vol. 28, no. 2, pp. 414-420, Mar./Apr. 1992.
3. 김효성, 김태용, 최재호, 신완호, "LRC 구조에 의한 전류형 GTO 컨버터의 입력필터 설계", *電氣學會 秋季發表會*, pp. 231-234, 1992.
4. T. W. Kim, H. S. Kim, and J. H. Choi, "Input Filter Design for Current Source PWM GTO Converter," *Proceedings of PCC-Yokohama '93*, pp. 32-37, 1993.