

개선된 평균 전류 제어 방식 역률 개선 회로의 제어에 관한 연구

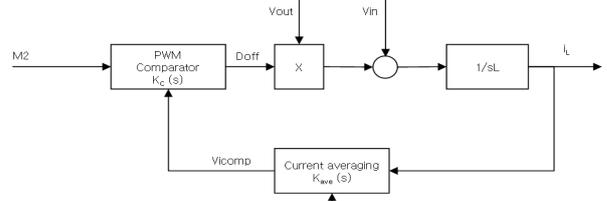
김태규, 김태우, 최현의, 김민찬, 안호균, 윤태성  
 창원대학교 전기공학과

A Study on the control of Power Factor Correction Circuit  
 by Advanced Average Current Control

Tae-Kue Kim, Tae-Woo Kim, Hyun-Eui Choi, Min-Chan Kim, Ho-Kyun Ahn, Tae-Sung Yoon  
 Department of Electrical Engineering, Changwon National University, Korea

**Abstract** - The purpose of this paper is a study on the control of Power Factor Correction circuit by advanced average current control. The international standard organizations have made an effort to resolve these problems caused by the harmonics and announced the international standards for limiting the harmonic currents of the electrical devices and products. For improving power factor and reducing harmonics, many studies are progressed rapidly. In this study, we explain a method of an advanced average current control. And then, the performances of the PFC circuit applying a advanced average current control method are simulated and verified by Matlab/Simulink.

이 증가하도록 하고, 출력전압이 높아지면, 마찬가지로 게인을 조정하여 듀티비를 줄여 오프타임이 증가하도록 한다.



<그림 1> 전류 제어 루프 블록 다이어그램

1. 서 론

전력품질을 개선하기 위하여 많은 연구가 진행되고 있다. 그 중에서 역률과 고조파 문제를 해결하기 위한 방법으로 PFC(Power Factor Correction)가 상용 교류 전력을 직류 전력으로 변환하기 위해 이용되는 일반적인 커패시터 입력형 정류기에 적용되어 지고 있다. 이러한 전력 기기에서의 역률과 고조파 문제를 국제적으로 규격화하기 위하여, 여러 표준기구들에서 규격을 규정하고, 수출·입 제품에 대하여 의무화할 것을 권장하고 있다[1].

역률 개선을 위하여 여러 가지 방법들이 연구되고 있으며, 회로측면에서는 승압형, 강압형, 승강압형, 플라이백, 하프브리지 등등의 많은 토폴로지들이 비교·연구되고 있으며, 제어측면에는 크게 전류불연속모드, 전류연속모드, 전류연속모드로 구분되어 지고 있고, 그 중 소용량 부분에는 전류연속모드 방식이 많이 이용되고 있으며, 그 이상의 중·대용량 부분에서는 전류연속모드 제어방식이 많이 이용되고 있다. 전류연속모드 제어방식은 세부적으로, 평균전류제어, 최대전류제어, 히스테리시스전류 제어 방식으로 구분할 수 있다. 이 중에서 평균전류제어 방식이 성능과 제어측면에서 우수한 것으로 알려져 있다[2]. 본 논문에서는 토폴로지는 승압형 컨버터를 이용하고, 제어방식에서는 평균전류제어 방식에서 개선된 평균전류제어 방식에 대하여 설명하고, 이를 시뮬레이션하여 평가하는 것에 대하여 논하고자 한다.

2. 본 론

2.1 전류 제어 루프

승압형 컨버터의 인덕터 전류는 출력전압이 일정하다면 입력전압과 오프시간에 의해 결정되며, 승압형 컨버터의 입·출력 방정식으로부터 관계식을 유도할 수 있다. 인덕터 전류( $i_L$ )를 피드백하여 오프듀티( $d_{off}$ )를 결정하게 된다. 인덕터 전류가 증가하면, 오프타입이 증가하고, 오프타입이 증가하면, 다시 인덕터전류가 감소하게 되어 전류를 제어하게 된다. 결국 입력전압에 따라 오프듀티가 비례하여 변화하고 이에 전류루프를 구성하여 전류의 변화도 입력전압과 오프듀티에 비례하도록 전류 제어 루프를 구성한다.

전류 제어 루프는 그림 1과 같이 표현할 수 있다. 인덕터 전류를 센싱하여 평균하고, 그 신호를 램프 신호와 비교하여 듀티비를 결정하게 된다. 전류 평균회로는 로우패스필터(LPF)를 통해 스위칭을 통한 인덕터전류를 평균하고, 램프신호와 비교하여 듀티비를 결정한다. 이때 출력 전압을 제어하기 위해 검출된 출력 전압의 오차증폭기를 거친 신호( $V_{comp}$ )를 이용하여 비선형게인(nonlinear gain) M1, M2를 결정하게 되고, 전류평균회로와 PWM 비교기(comparator)에 곱하여 입력전류를 통해 듀티비를 결정함에 있어 출력전압을 제어하기 위해 전류제어 루프에 비선형 게인을 반영한다. 다시 말해, 출력전압이 낮아지면, 평균된 전류신호와 램프신호에 일정 게인을 곱하여 듀티비를 늘여 온타입

2.1.1 전류 평균 회로

전류 평균 회로의 전달함수는 식 (1)과 같이 표현되어진다. 이때 평균회로의 커패시터는 평균주파수에 의해 결정되며, 그 차단주파수(corner frequency)는 스위칭주파수의 약 1/5정도로 결정된다[3]. 따라서 평균회로의 커패시터  $C_{icomp}$ 는 식 (2)에 의해 결정된다.

$$K_{ave}(s) = \frac{V_{icomp}}{i_L} = \frac{\frac{K_1 R_{sense}}{M_1}}{1 + s \frac{K_1 C_{icomp}}{M_1 g_{OTA2}}} \quad (1)$$

$$C_{icomp} \geq \frac{g_{OTA2} M_1}{K_1 \cdot 2\pi f_{ave}} \quad (2)$$

2.1.2 PWM 비교기

일반 비교기 동작과 같이 램프전압과 입력전압의 비를 통해 듀티비( $D_{on}$ )를 결정할 수 있으며, 보호기능을 수행하기 위해 nor게이트가 하나 설계 되어, 반대로  $D_{off}$ 를 결정하게 된다. 전류 평균 회로에서와 같이 비선형 게인 M2가 램프신호에 곱해져 램프신호의 기울기를 조정함으로써 듀티비를 조정하게 된다.

$$K_c(s) = \frac{d_{off}}{V_{icomp}} = \frac{1}{K_{FQ} M_2} \quad (3)$$

2.1.3 정상상태 인덕터 전류 해석

승압형 컨버터 모델링에서 설명했듯이,  $d_{off}$ 는  $K \cdot i_L$ 로 치환할 수 있고, 이때 modulation gain K는 앞서 구한 전류평균회로의 전달함수( $K_{ave}$ )와 PWM 비교기의 전달함수 ( $K_c$ )로 구할 수 있다. 따라서 전류에 관한 식은 식 (4)로 표현할 수 있다.

$$i_L(s) = (V_{in} - V_{out} K_c(s) K_{ave}(s)) i_L(s) \frac{1}{sL} \quad (4)$$

그리고 입력이  $V_{in}$ , 출력이  $D_{off}$  인 루프(loop)의 전달함수를 생각한다면, 전달함수는 식 (5)로 구할 수 있다.

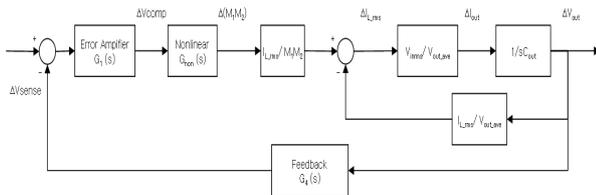
$$\frac{d_{off}}{V_{in}} = G_c(s) = K_{ave}(s) K_c(s) \frac{V_{out}}{sL} = \frac{\frac{K_1 R_{sense} V_{out}}{K_{FQ} M_1 M_2 L}}{s(1 + s \frac{K_1 C_{icomp}}{M_1 g_{OTA2}})} \quad (5)$$

다시 인덕터 전류  $i_L$ 에 대해서 정리하면, 식 (5)와 같이  $V_{in}$ 을 제외한 나머지를 상수(K)로 치환하면, 전류 제어 루프를 통해 정상상태에서 인덕터 초크 전류  $i_L$ 은 식 (6)에서 보는 바와 같이 항상  $V_{in}$ 에 비례하여 변하는 것을 알 수 있다.

$$I_L = \frac{K_{FQ}M_1M_2V_{in}}{K_1R_{sense}V_{out}} \quad (6)$$

## 2.2 전압 제어 루프

출력전압 제어루프는 그림 2와 같이 블록 다이어그램으로 나타낼 수 있다. 출력전압 제어루프는 전류 제어루프에서 설명한 바와 같이 출력전압의 변화를 검출하여 비선형 게인을 조정하여 PWM 신호의 펄스폭을 조정함으로써 출력전압을 제어하도록 하는 것이다. 회로에 대해 그 전달특성을 분석함에 있어, 선형으로 볼 수 있는 유용한 구간에 대해서만 해석을 위해 소신호(small signal) 모델링 한다.



<그림 2> 전압 제어 루프의 소신호 모델링

### 2.2.1 출력 스테이지

인덕터 전류  $i_L$ 의 변화에 따른 출력전압의 영향을 모델링한 것이다. 전달함수는 다음과 같이 표현할 수 있으며, 수식을 변형하여 두 부분으로 나누어 계산할 수 있다.

$$G_3(s) = \frac{\Delta V_{out}}{\Delta I_{L,rms}} = \frac{\Delta V_{out}}{\Delta I_{out}} \cdot \frac{\Delta I_{out}}{\Delta I_{L,rms}} = \frac{V_{in,rms}}{V_{out,ave}} \cdot \frac{1}{sC_{out}} \quad (7)$$

이렇게 구한  $G_3(s)$ 를 전달함수  $G_{23}(s)$  하나로 묶어 생각하면,  $G_3(s)$ 식을 통해 식 (8)과 같이  $G_{23}(s)$ 를 구할 수 있다.

$$G_{23}(s) = \frac{\Delta V_{out}}{\Delta(M_1M_2)} = \frac{\frac{V_{out,ave}}{M_1M_2}}{1 + \frac{s}{2\pi F_{23}}} \quad (8)$$

### 2.2.2 비선형 게인 블록

비선형 게인은 출력전압 검출과 에리 증폭기를 통한  $V_{comp}$  신호에 의해 PWM신호를 발생하는 램프신호와 전류평균신호에 곱해지는 비선형적인 게인  $M_1, M_2, M_1 \cdot M_2$ 값을 발생하게 된다.

### 2.2.3 오차 증폭기 보상

출력전압은 2배주파수 리플을 포함하고 있으므로 이 리플의 영향으로 인해 스위칭에 영향이 미치지 않도록 보상기를 설계한다. 보상기는 2배주파수(120Hz)이하로 crossover-frequency(대략 10~20Hz)를 설정하여 2pole-1zero 보상기를 설계한다. 전달함수는 식 (9)와 같이 구할 수 있다.

$$G_1(s) = \frac{\Delta V_{comp}}{\Delta I_{OTA1}} \cdot \frac{\Delta I_{OTA1}}{\Delta V_{sense}} = \frac{g_{OTA1}(1+s/2\pi f_{cz})}{(C_2+C_3)s(1+s/2\pi f_{CP})} \quad (9)$$

### 2.2.4 피드백

출력 전압을 검출하는 회로로서 전달함수는 식 (10)과 같이 표현될 수 있다.

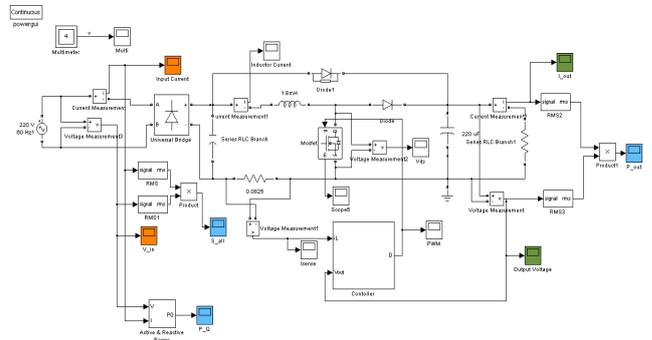
$$G_4(s) = \frac{\Delta V_{sense}}{\Delta V_{out}} = \frac{R_2}{R_1+R_2} \quad (10)$$

따라서 전체 전압제어루프의 전달함수는 식 (11)로 구할 수 있다.

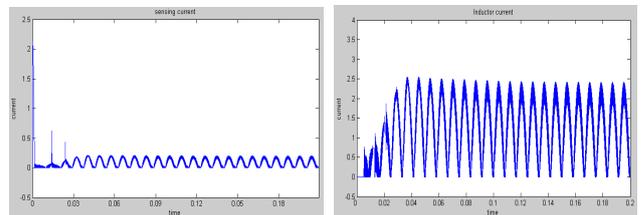
$$G_V(s) = G_1(s)G_{non}(s)G_{23}(s)G_4(s) \quad (11)$$

## 2.3 시뮬레이션 및 결과

본 논문의 제어 방식을 토대로 승압형 컨버터 방식의 역률 개선 회로에 대한 결과를 Matlab/Simulink를 통하여 검증하였다. 그림 3와 Simulink의 Simpowersystems 라이브러리의 전력소자를 이용하였고, 본 논문의 제어방법에 따른 제어기를 Simulink 내에서 설계하여 효율 및 기타 항목들을 평가하였다.

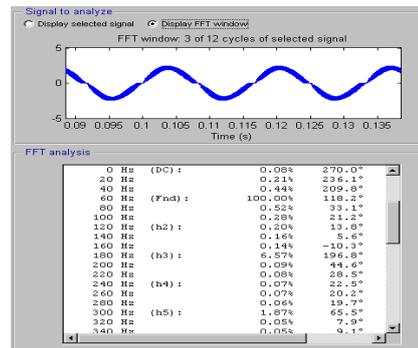


<그림 3> 승압형 컨버터 방식의 역률 개선 회로



(a) 검출 전류

(b) 인덕터 전류



(c) 고조파 분석

<그림 4> 결과 파형 분석

## 3. 결 론

본 논문에서는 역률 개선 제어 방식 중 개선된 평균전류 제어 방식에 관하여 논하였다. 기존 평균전류 제어방식은 입력전압을 센싱하여 승상기를 통해 기준신호를 생성하고 입력전류를 검출하여 입력전류가 전압과 동상을 유지하도록 제어를 하고, 출력전압을 일정하게 유지하기 위해 출력전압을 검출, 듀티비를 조정하였다. 그러나, 본 논문의 제어방식은 입력전류, 출력전압만을 검출하여 제어를 하는 방식에 관하여 논하고, 그 결과를 Matlab/Simulink를 통하여 검증하였다. 개선된 평균전류 제어 방식에 관하여 제어관점에서 분석하고, 그것을 실제 시뮬레이션하여 분석함으로써 향후 역률 개선 회로 제어방식에 대한 제어방법을 연구하는데 크게 도움이 되리라 기대된다.

## [참고 문헌]

- [1] 한국표준협회, "KS C IEC 61000-3-2", 한국산업규격, 2005
- [2] Lloyd H. Dixon, "Average Current Mode Control of Switching Power Supplies", Unitrode, Application Note, pp. 3.356-3.369, 1999
- [3] Luo Junyang, Jeoh Meng Kiat, Huang Heng Cheong, "A New Continuous Conduction Mode PFC IC with Average Current Mode Control", IEEE PEDS, pp. 1110-1114, 2003