

# 임계 도통 모드 부스트 역률 보상 회로의 전 고조파 왜형률 개선을 위한 새로운 제어 방법

이제현, 김정원, 이문현, 조보형, 임준혁\*  
 서울대학교, 한국 전력 공사\*

## New Control Method to Improve Total Harmonic Distortion of Critical Conduction Mode Boost Power Factor Correction

Je Hyun Yi, Jung Won Kim, Moon Hyun Lee, Bo Hyung Cho, and Jun Hyuk Im\*  
 Seoul National University, KEPCO\*

### ABSTRACT

본 논문에서는 저 용량에서 많이 사용되는 임계 도통 모드 부스트 역률 보상 회로의 새로운 제어 방법을 제안한다. 제안하는 제어 방법은 임계 도통 모드로 동작 시에 회로의 주요 파형들을 수식적으로 분석하여 입력 전류가 입력 전압을 추종할 수 있는 최적의 온 시간을 도출하는 방식이다. 100W 급 하드웨어를 통하여 제안하는 제어 방법의 실험 결과를 검증하였다.

### 1. 서론

부스트 역률 보상 회로의 동작 모드는 연속 도통 모드, 불연속 도통 모드, 임계 도통 모드로 나눌 수 있다. 이 중 임계 도통 모드로 부스트 역률 보상 회로를 동작 시키면 연속 도통 모드에 비해서 다이오드의 역 회복 문제가 없고 보조 회로 없이도 소프트 스위칭이 쉽다. 또한 불연속 도통 모드에 비해 각 소자들의 전류 스트레스가 줄어들고 입력 필터의 크기를 줄일 수 있다.<sup>[1]</sup> 따라서 300W 이하의 저 용량 역률 보상 회로는 대부분 임계 도통 모드로 동작 시킨다.

임계 도통 모드 부스트 역률 보상 회로는 전통적으로 일정한 시간으로 제어 한다. 스위칭 소자를 이상적이라고 가정하고 회로의 동작 모드를 분석하면 일정한 시간으로 제어 시에 입력 전류가 입력 전압을 추종 할 수 있기 때문이다. 하지만 스위칭 소자의 소프트 스위칭을 위해 인덕터의 전류가 0이 된 이후에 스위치를 온 시키기 전에 지연 시간을 두면 전 고조파 왜형률과 역률의 왜곡이 발생한다.

본 논문에서는 기존의 제어가 지니는 한계점을 개선하기 위한 새로운 제어 방법을 제안한다. 제안하는 가변 온 시간 제어 방법은 회로의 주요 파형 분석을 통한 수식적인 접근으로 입력 전압의 크기에 따른 스위치의 온 시간을 구하는 방식이다. 100W 급의 하드웨어 실험을 통해 제안하는 제어 방법의 성능을 검증하였다.

### 2. 제안하는 제어 방법

그림 1은 임계 도통 모드 부스트 역률 보상 회로의 회로도이다. 그림 2와 그림 3은 각각 입력 전압의 크기에 따른 인덕터 전류와 인덕터 전압, 스위치의 드레인 소스 전압을 도시하였다. 스위칭 손실을 줄이기 위해 인덕터 전류가 0이 된 이후

에 지연 시간을 두면 인덕터와 스위치의 기생 캐패시터의 공진으로 인덕터 전류가 0보다 작은 영역이 존재한다. 입력 전류의 평균값은 식 (1)과 같다.

$$I_{in} = \frac{1}{T_s} \int_{T_s} i_L dt = \frac{1}{T_s} \left( \frac{1}{2} \frac{V_{in}}{L} t_{on} (t_{on} + t_{off}) - S_{neg} \right) \quad (1)$$

$S_{neg}$ 는 인덕터 전류가 0보다 작은 영역의 넓이를 의미한다.

입력 전압이 출력 전압의 절반보다 큰 경우는 인덕터의 에너지가 부족하기 때문에 드레인 소스 전압이 0이 될 수 없다. 따라서 이때는 그림 2와 같이 공진 주기의 절반이 되는 시점에

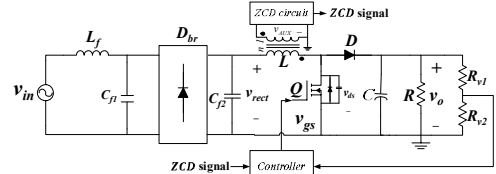


그림 1 임계 도통 모드 부스트 역률 보상 회로  
 Fig. 1 A Critical conduction mode boost Power factor correction converter

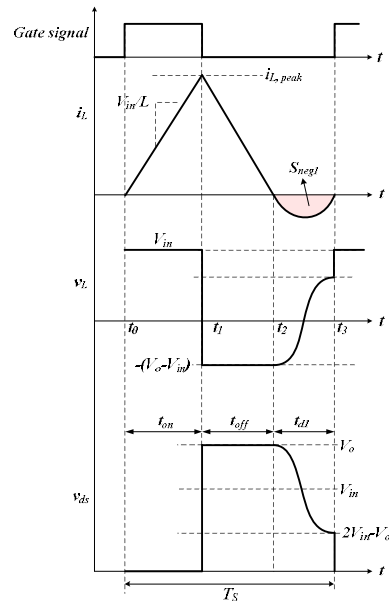


그림 2 입력 전압이 출력 전압의 절반 보다 큰 경우 주요 파형  
 Fig. 2 A main waveform when input voltage is higher than half of output voltage

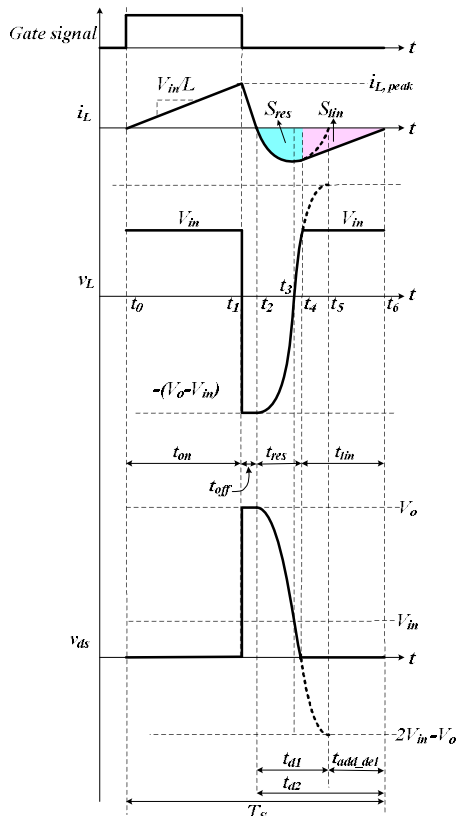


그림 3 입력 전압이 출력 전압의 절반 보다 작은 경우 주요 파형

Fig. 3 A main waveform when input voltage is lower than half of output voltage

드레인 소스 전압이 최소가 되므로 고정적인 지연 시간 이후에 스위치를 온 시킨다.

반면 입력 전압이 출력 전압의 절반보다 작은 경우는 그림 3과 같이 인덕터의 에너지가 충분하여 드레인 소스 전압을 0으로 만들 수 있다. 이로 인해 드레인 소스 전압이 0으로 떨어진 이후에 인덕터의 전류가 선형적으로 0까지 증가하게 되는 하나의 모드가 추가된다. 입력 전압의 범위에 따라서  $S_{neg}$ 는 식 (2)와 같다.

$$S_{neg} = \begin{cases} 2C_{oss}(V_o - V_{in}) & V_{in} > V_o/2 \\ \frac{1}{2}C_{oss} \frac{V_o^2}{V_{in}} & V_{in} < V_o/2 \end{cases} \quad (2)$$

식 (2)를 식 (1)에 대입하여 입력 전압과 입력 전류에 관한 식을 얻을 수 있다. 그 식에서 식 (3)의  $k$ 가 일정하면 입력 전압과 입력 전류의 비가 일정하여 입력 전류가 입력 전압을 추종할 수 있다. 식 (3)을 온 시간에 대해 정리하면 지연 시간을 고려한 최적의 가변 온 시간은 식 (4)와 같다.

$$k = \begin{cases} \frac{1}{t_{on} + t_{off} + t_{d1}}(t_{on}(t_{on} + t_{off}) - 4LC_{oss}(V_o/V_{in} - 1)) & \text{when } V_{in} > V_o/2 \\ \frac{1}{t_{on} + t_{off} + t_{d1}}(t_{on}(t_{on} + t_{off}) - (LC_{oss}(V_o/V_{in})^2)) & \text{when } V_{in} < V_o/2 \end{cases}$$

$$\text{where } t_{d1} = \pi \sqrt{LC_{oss}}, t_{d2} = \sqrt{LC_{oss}}(\theta + (\frac{V_o}{V_{in}} - 1)\sin\theta) \quad (3)$$

$$t_{on} = \begin{cases} \frac{k + \sqrt{k^2 + 4(1 - \frac{V_{in}}{V_o})(k + \frac{4t_{d1}}{\pi^2}(\frac{V_o}{V_{in}} - 1))t_{d1}}}{2} & \text{when } V_{in} > V_o/2 \\ \frac{k + \sqrt{k^2 + 4(1 - \frac{V_{in}}{V_o})(k + \frac{4t_{d1}}{\pi^2}(\frac{V_o}{V_{in}})^2)t_{d2}}}{2} & \text{when } V_{in} < V_o/2 \end{cases} \quad (4)$$

### 3. 실험 결과

표 1과 같은 제원을 가지는 역률 보상 회로를 제작하여 제어 방법을 검증하였다. 동일한 회로에 대해 제안하는 제어 방법이 전 고조파 왜형률을 줄이는데 적합함을 보이기 위해 일정한 시간 제어 방법을 비교 군으로 실험하였으며 실험 결과는 표 2와 같다. 모든 범위의 전압에서 제안하는 가변 온 시간 제어 기법이 전 고조파 왜형률을 줄이고 있음을 확인할 수 있다.

표 1 제안하는 제어 방법의 검증을 위한 프로토타입 설계 사양

Table 1 Hardware parameter of proposed control method

출력 파워	100W	출력 Cap.	100uF
출력 전압	400V	인덕터	430uF
스위치 Cap.	380pF	입력 전압	90 ~ 264V

표 2 일정 온-시간 제어와 제안하는 가변 온-시간 제어를 적용한 임계 도통 모드 역률 보상 회로의 전 고조파 왜형률

Table 2 Total Harmonic Distortion of CRM boost PFC converter using constant on-time control and proposed on-time control

입력 전압	90V	110V	220V	264V
일정 온 시간 제어	12.39%	13.25%	13.59%	12.01%
제안하는 가변 온 시간 제어	3.67%	3.74%	5.5%	7.42%

### 4. 결론

본 논문에서는 임계 도통 모드 부스트 역률 보상 회로를 제어하기 위한 새로운 가변 온 시간 제어 방법을 제안하였다. 소프트 스위칭을 위한 지연 시간 때문에 발생하는 입력 전류의 왜곡을 보상하기 위해서 인덕터 전류의 파형을 분석하여 수식적으로 역률 보상을 위한 최적의 온 시간을 계산하였다. 제안하는 제어 방법은 100W급 하드웨어 실험을 통해 검증하였다.

본 연구는 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지 기술 평가원(KETEP)과 산업평가관리원의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다.(No. 2011T100100025)

### 참고 문헌

- [1] L. Huber, B. T. Irving and M. Jovanovic, "Effect of Valley switching and switching frequency limitation on line current distortions of DCM/CCM boundary boost PFC converters", IEEE Trans. Power Electron., vol. 24, no.2, Feb. 2009, pp.339-347.
- [2] 임준혁, 개선된 Variable On time 제어를 이용한 임계 도통 모드 부스트 역률 보상 회로, 석사 학위 논문, 서울대학교, 2014.