

단일 스위치 배전압 방식의 단상 PFC 회로의 제어기법 비교

구대관*, 지준근*, 차귀수*, 임승범**, 목형수***
 순천향대학교*, (주)이온**, 건국대학교***

Comparison of Control Method for Single-phase PFC Circuit with 1-switch Voltage Doubler Strategy

Dae Kwan Ku*, Jun Keun Ji*, Guesoo Cha*, Seung Beom Lim**, Hyung Soo Mok***
 Soonchunhyang University*, EON CO. Ltd**, Konkuk Univ***

ABSTRACT

본 논문에서는 단일 스위치 배전압 방식의 단상 PFC 회로의 제어기법들에 대해 기술한다. 이 PFC 회로는 저가형 이중변환 방식 단상 UPS의 AC DC 변환부에 사용할 수 있으나, 입력 전류의 제어기법에 대한 연구 결과가 알려지지 않았다. 제안된 전류 제어기법들의 입력 전류 제어 성능, 입력 역률, 입력 전류의 THD를 시뮬레이션과 실험을 통해서 비교 검증하였다.

1. 서론

최근 전력품질의 중요성이 부각되고, IEEE Std. 519 1992와 같은 고조파 규정이 정해짐에 따라 전력변환회로의 입력 역률 보상, 입력 전류의 THD 억제 성능을 위해 PFC(Power Factor Correction) 컨버터에 대한 연구가 활발하게 이루어지고 있다. 특히 이중변환(Double Conversion)방식 UPS(Uninterruptible power supply)의 AC DC 변환부에 널리 쓰이고 있다.

저가형 이중변환 방식 단상 UPS의 AC DC 변환부에는 1993년 Salmon에 의해 제안된 단상 단일 스위치 배전압 PWM 승압형 정류기(Single phase 1 switch Voltage Doubler PWM Boost Rectifier)가 대안이 될 수 있다^[1]. 제안된 회로는 온오프 제어가능한 소자 한 개와 브릿지 다이오드만으로 구성되어서 재료비 절감이 가능하다. 하지만 PFC 회로가 제안된 후 전류 제어기법에 관한 연구들이 알려지지 않았다. 특히 PFC의 제어에서 전류 제어의 성능은 입력 역률 보상과 입력 전류의 THD 억제 성능을 결정하기 때문에 중요하다.

본 논문에서는 단일 스위치 배전압 방식의 단상 PFC 회로의 전류 제어기법들에 대해 기술하고, 설계된 전류 제어기들의 입력 전류 제어, 역률 보상, 입력 전류의 THD 억제 성능을 시뮬레이션과 실험으로 비교하였다.

2. 회로구성 및 동작특성

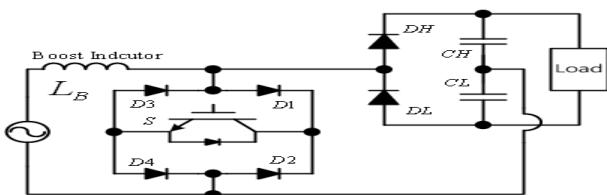


그림 1 단일 스위치 배전압 방식의 단상 PFC 회로
 Fig.1 Single-phase PFC Circuit with 1-switch Voltage Doubler Strategy

그림 1은 단일 스위치 배전압 방식의 단상 PFC 회로이다.

IGBT가 OFF 상태에서는 배전압 회로로 동작 하고, IGBT가 ON 되면 브릿지 다이오드를 통한 회로가 형성되어서 부스트 인덕터에 에너지가 저장된다. 다시 IGBT가 OFF 되면 배전압 회로로 동작하면서 부스트 인덕터에 저장되었던 에너지가 방출 되어 승압작용을 하게 된다.

3. 제어 기법

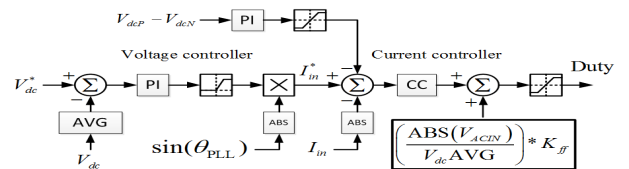


그림 2 제어기 블록다이어그램

Fig.2 Block diagram of controller

그림 2는 PFC 제어기 전체 구조이다. 직류단 전압 제어기는 PI 제어기를 이용하며, 추가로 직류단 캐패시터 전압 불평형을 보상하기 위해 상하단 캐패시터 전압차에 대해서 PI 제어기를 이용해 전류 제어기 입력에 보상하였다. 입력 전류 제어에는 PI 제어기와 비례 공진(Proportional Resonance;PR) 제어기를 이용한다. 두 전류 제어기 모두 영전류 왜곡(Zero Current Distortion)을 감소시키기 위해 절대값 입력 전류 제어를 이용한다. 또한 입력 전류의 진상 현상(Phase Leading)을 줄이기 위해 전류 제어기 출력에 듀티 전향(Duty Feedforward) 보상을 추가하였다.

3.1 PI 전류 제어기

PI 전류 제어기의 전달 함수는 다음식과 같다.

$$\frac{I_{input}}{I_{input}^*} = \frac{s(k_{pc}/L_b) + (k_{ic}/L_b)}{s^2 + s(k_{pc}/L_b) + (k_{ic}/L_b)} \quad (1)$$

위 식에서 L_b 는 부스트 인덕터 정수이다. 비례 이득과 적분 이득 설정은 원형 2차 시스템(Prototype second order system) 설계법에 의해 다음식과 같이 정할 수 있다.

$$k_{pc} = 2\zeta\omega_{nc}L_b, \quad k_{ic} = \omega_{nc}^2L_b \quad (2)$$

3.2 PR 전류 제어기

공진 각주파수 ω 를 가지는 PR 제어기의 전달함수는 연속시간 영역에서 다음식과 같이 표현된다.

$$H_{PR}(s) = k_{pc} + (k_{ic}s)/(s^2 + \omega^2) \quad (3)$$

공진 각주파수 ω 를 전원 주파수 60Hz에 맞추어 $2\pi 60$ rad/sec로 설정하면, 60Hz에서 높은 이득을 얻을 수 있다. 위의 PR 제어기를 블록 다이어그램으로 표현하면 그림 3과 같다^[2].

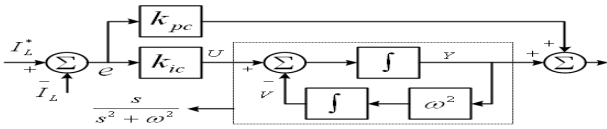


그림 3 PR 제어기의 블록 다이어그램

Fig. 3 Control block diagram of the PR controller

PR 제어기의 이득 설정은 PI 제어기의 이득 설정법과 같이 원형 2차 시스템 설계법으로 정할 수 있다. PR 제어기의 이산 시간 영역 제어기 구현시 대수 루프(Algebraic Loop)를 피하기 위해 공진항의 전향 성분은 Forward Euler 방법으로, 궤환 성분은 Backward Euler 방법을 이용한다^[2].

4. 시뮬레이션 및 실험 결과

설계된 PI 전류 제어기와 PR 전류 제어기 성능을 비교하기 위해 PSIM DLL을 이용한 시뮬레이션과 실험을 수행하였다. 다음 표 1은 사용된 시스템 파라미터이다.

표 1 시스템 정수
Table 1 System parameters

Rated Output Power	3kVA
AC Source Voltage	220Vrms/60Hz
Boost Inductor	430uH
DC Link Capacitor	680uF
Switching Device & Frequency	IGBT, 40kHz
V _{dc} Reference Voltage	760V
Load Type	Half Bridge Inverter & 46 Ohm R Load

그림 5는 전압 제어에 PI 제어기를 이용한 PI 전류 제어기와 PR 전류 제어기의 시뮬레이션 결과 파형들이다. 첫 번째 행의 파형들은 교류 입력 전원과 4배 축소하여 표시된 직류단 전압을 나타내고, 두 번째 행의 파형들은 절대값 전류 지령과 입력 전류를 나타낸다. PI 제어기에는 듀티 전향 보상이 적용되었으며, PR 전류 제어기에는 적용되지 않았다.

직류단 전압 제어기는 지령 760V를 우수하게 추종하였으며, 전류 제어기 역시 지령을 우수하게 추종하였다. 시뮬레이션에서 계산된 입력 역률과 입력 전류의 THD는 PI 전류제어기가 0.967, 8.4%이며, PR 전류 제어기가 0.962, 10.1% 이다.

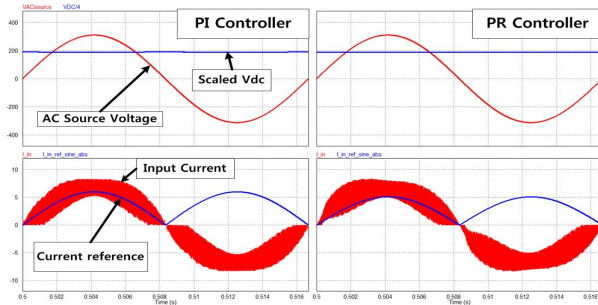


그림 4 시뮬레이션 결과 파형

Fig. 4 Waveforms of simulation results

그림 5는 듀티 전향보상이 적용된 PI 전류 제어기의 실험 결과이다. 첫 번째 파형은 교류 입력 전원과 직류단 전압이고, 두 번째 파형은 절대값 전류 지령과 실제 입력 전류이다. 직류단 전압과 입력 전류 모두 지령을 우수하게 추종하였고, 입력 역률은 약 0.996이며, 입력 전류 THD는 약 8%대이다. PI 전류 제어기에는 입력 전류의 진상 현상을 방지함과 동시에 THD 억제를 위해서 듀티 전향 보상이 반드시 적용되어야 한다.

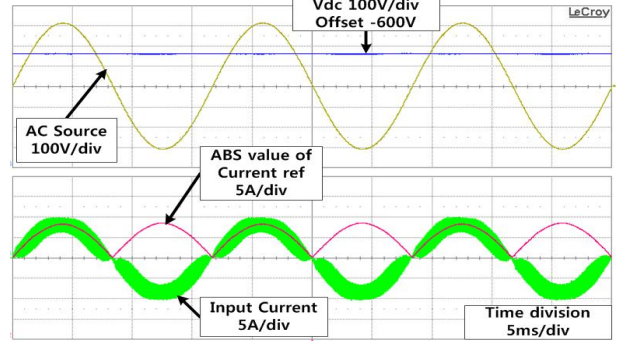


그림 5 PI 전류 제어기의 실험 결과

Fig. 5 Experimental results of PI current controller with duty feed-forward

그림 6은 듀티 전향 보상이 없는 PR 전류 제어기의 실험 결과이다. 직류단 전압과 입력 전류 모두 지령을 우수하게 추종하였고, 입력 전류의 THD는 약 8%대이다. 반면 입력 역률은 PI 전류 제어기보다 감소하여 약 0.991이다. 이 현상은 결과 파형에서 나타난 전류의 진상 현상이 원인으로 추정된다. 또한 PR 전류 제어기는 듀티 전향보상시 입력 전류의 THD 증가 및 입력 역률의 저하를 유발하기 때문에 적용하지 않는 것이 더 우수한 성능을 나타낸다.

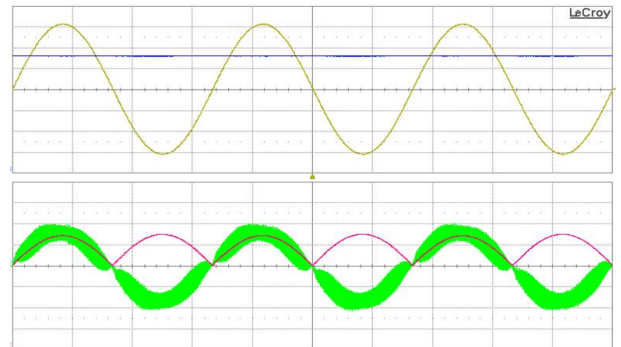


그림 6 PR 전류 제어기의 실험 결과

Fig. 6 Experimental results of PR current controller without duty feed-forward

5. 결론

본 논문에서는 단일 스위치 배전압 방식의 단상 PFC 회로의 입력 전류 제어기법들을 기술하고, 시뮬레이션과 실험으로 비교검증을 하였다. 비교한 전류 제어기는 PI 전류 제어기 및 PR 전류 제어기로서 두 제어기 모두 입력 역률 제어 및 입력 전류의 THD 억제에서 우수한 성능을 보여주었고, PI 전류 제어기가 PR 전류 제어기보다 더 높은 역률과 안정적인 성능을 보여주었다.

이 논문은 (주)이온의 연구비 지원에 의해 연구되었습니다.

참고 문헌

- [1] J.C. Salmon, "Circuit topologies for single phase voltage doubler boost rectifiers", IEEE Trans. on Power Electronics, Vol. 8, no. 4, pp. 521-529, 1993.
- [2] R. Teodorescu, F. Blaabjerg, U. Borup, M. Liserre, "A new control structure for grid connected LCL PV inverters with zero steady state error and selective harmonic compensation", APEC'04, Vol. 1, pp.580-586, 2004.