

저도통 손실, 저가의 ZVT 단상 역률 보상 회로

백 주 원^{*}, 조 정 구^{*}, 김 원 호^{*}, 임 근 희^{*}, 송 두 익^{**}, 권 순 걸^{**}

* 한국전기연구소 전력변환연구팀, ** 경남대학교 전기공학과

ZVT single phase power factor correction circuit with low conduction loss and low cost

J. W. Baek^{*}, J. G. Cho^{*}, W. H. Kim^{*}, G. H. Rim^{*}, D. I. Song^{**}, S. G. Kwon

^{*}KERI, ^{**}Elec. Eng. Dept., Kyung Nam University

Abstract - A new low conduction loss, low cost zero-voltage-transition power factor correction circuit (PFC) is presented. Conventional PFC which consists of a bridge diode and a boost converter (one switch) always has three semiconductor conduction drops. Two switch type PFCs reduces conduction loss by reducing one conduction drop but the cost is increased because of increased number of active switches. The proposed PFC reduces conduction loss with one switch, which allows low cost. Conduction loss improvement is a little bit less than that of two switch type, but very close up. Operation and features are comparatively illustrated and verified by simulation and experimental results of 1 kW laboratory prototype.

I. 서론

최근, IEC-552-2와 같은 고조파에 대한 기준이 정해지면서 입력전류 고조파 저감과 고 역률 보상회로에 대한 관심이 증대되고 있다. 그러므로 교류 입력전압을 전파정류하여 큰 전류 콘덴서로 출력전압을 필터하는 기존의 정류기는 낮은 입력역률을 가지며 입력전류 파형이 심하게 왜곡되기 때문에 많은 용용분야에서 점차 배제되고 있다.

현재까지 제안된 역률보상회로들을 그림 1에 나타내었다. 그림 1(a)는 정류 다이오드 후단에 boost 컨버터를 사용하여 입력전류를 제어하는 방식으로 저가로 구성할 수 있기 때문에 가장 널리 사용되고 있는 회로중의 하나이다. 고주파 동작시 스위칭 손실 및 EMI의 감소를 위해서 그림 1(b)와 같이 ZVT 회로를 추가하여 소프트 스위칭을 할 수 있다. 이 경우, 100~300 kHz 정도의 스위칭이 가능하다. 이 회로의 특징 중의 하나는 가격이 산 반면에 항상 3 개의 반도체 소자를 통해 전류가 흐르므로 도통 손실이 크다는 단점을 갖는다.

도통손실을 줄이기 위해서 그림 1(b)(c)와 같은 회로들이 제안되었다. 2 개의 능동소자를 사용하고 boost 인덕터를 정류기 입력단에 배치하므로서 항상 2개의 반도체 소자만 도통하도록 하여 전체적인 도통손실을 줄였다. 그림 1(b)는 한 leg에 2 개의 능동 스위치를 배치한 구조로, 소자의 역도통 다이오드의 회화복 시간이 작아야 하기 때문에 MOSFET과 같은

소자는 사용이 곤란하다. ZVT 회로를 사용할 경우에는 MOSFET을 사용할 수 있지만 ZVT 회로에 2 개의 능동 스위치가 들어 가므로 가격 경쟁력이 떨어 진다. 따라서, 그림 1(b)의 회로는 ZVT 회로 없이 IGBT와 같은 소자를 사용하여 20 kHz 정도의 스위칭을 하는 용도에 적합하게 사용될 수 있다. 그림 1(c)의 회로는 브릿지의 아랫쪽에 2 개의 스위치를 배치한 구조로서, 고속 다이오드를 별도로 사용하기 때문에 MOSFET과 같은 소자를 사용할 수 있으며, ZVT 회로 구성도 하나의 능동소자로 구성이 가능하기 때문에 고효율, 고주파 용용분야에 적합한 회로이다. 그렇지만, 그림 1의 (b)(c)의 회로 모두 능동 스위치의 추가에 따른 가격상승 때문에 널리 사용되지 못하고 있다.

본 논문에서는 단지 하나의 능동 스위치를 사용하여 도통손실을 줄일 수 있는 새로운 역률보상회로를 제안한다 (그림 2). 능동 스위치의 온시에는 3 개의 반도체 소자를 통해서 전류가 흐르고, 오프시에는 단지 2 개의 소자를 통해서 흐르도록 하므로서 duty cycle에 따라서 도통손실이 변하는 구조이다.

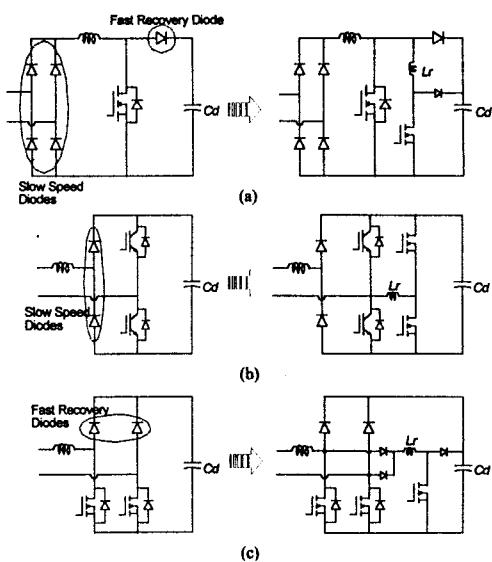


그림 1. 기존의 역률 보상회로: (a) 기본 구조, (b)(c) 저 도통손실 구조

도통순실의 개선 정도는 2 개의 능동소자를 사용한 회로 보다는 작지만, 역률보상회로의 특성상 duty cycle이 작을 때 대부분의 전류가 흘러가므로 저가로 2 개의 능동소자를 사용한 구조와 거의 비슷한 효율을 낼 수 있다. 영전압 스위칭을 위해서 그림 2와 같이 ZVT 회로를 부가할 수 있다. 제안된 역률보상 회로의 동작원리 및 특징에 대해서 설명하고, simulation 및 실험으로 증명한다.

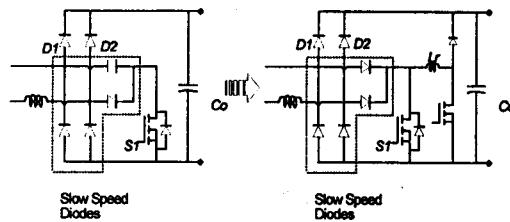


그림 2. 제안된 ZVT 단상 역률보상회로

II. 제안된 역률보상회로의 동작원리

제안된 boost 컨버터의 동작설명은 이해를 돋기 위해 ZVT 동작과 회로의 기본 동작으로 나누어서 설명한다. 그림 3에 나타난 바와 같이 양의 입력전압에 대해 기본 동작모드는 2개로 나눌 수 있다. Powering 모드에서는 능동소자가 커지고 입력 인덕터에 입력전압이 걸려서 입력전류는 Da-S1-Dd로 이어지는 경로를 따라 흐르게 된다. 이때, 입력전류는 V_s/L_s 의 기울기로 선형적으로 증가해서 입력인덕터에 에너지가 저장된다. Freewheeling 모드는 스위치 S1을 껐면서 시작되며, D1-Vo-Dd 경로를 따라서 전류가 흘러서 입력인덕터에 저장되었던 에너지가 출력 쪽으로 전달되게 된다. 이때, 입력전류는 $(V_o - V_s)/L_s$ 의 기울기로 선형적으로 감소하게 된다. 여기서 주목할 것은 전류가 powering 모드에서는 3개의 소자를 통해서 흐르지만 freewheeling 모드에서는 2개의 소자만을 통해서 흐르기 때문에 도통순실이 줄어드는 것을 알 수 있다. 또한, 입력전압의 음의 반주기 동안은 그림 2의 동작모드와 마찬가지로 powering, freewheeling모드로 동작하며, powering 구간에서 D_b-S1-D_c, freewheeling 구간에서 D₂-V_o-D_d의 경로로 전류가 흐른다. 제안된 회로의 ZVT 동작모드와 동작 파형은 다음 그림 4와 5에 나타내었다. 여기서 입력전압이 약이 경우를 기준하여 동작모드를 설명한다.

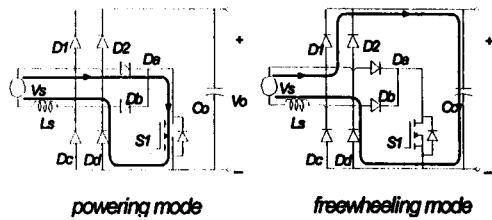


그림 3. 제안된 역률보상회로의 기본 동작 모드.

모드 1 : 이 모드에서는 다이오드 D1을 통해 부하로 전력이 전달된다.

모드 2 : 보조 스위치 S2가 터온하며, 따라서 공진인덕터 Lr에 전류가 선형적으로 증가한다. 이와 동시에 다이오드 D1에 흐르는 전류는 감소한다.

모드 3 : 입력전류와 공진인덕터 Lr에 흐르는 전류가 같아지면, 다이오드 D1으로 흐르는 전류가 영이 되면서 오프된다. 그러므로 스위치 S1 양단에 연결된 커패시터가 Lr를 통해 전원전압에서 영으로 방전하기 시작한다.

모드 4 : S1의 별렬접속 커패시터가 모두 방전하고 나면, 역별렬접속 다이오드가 도통하기 시작한다. 이때 S1은 영전압 터온을 하게 된다.

모드 5 : S1을 통해 전류는 다시 증가하기 시작하고, 보조 스위치 S2에 흐르는 전류는 감소하기 시작한다.

모드 6 : S1을 통해 다시 입력단 인덕터 전류는 증가되고 Ls에 에너지가 축적된다.

모드 7 : S1이 터온하면 다시 부하로 전류가 다이오드 D1을 통해 전달되고 S1의 별렬 접속 다이오드는 전원전압으로 충전된다.

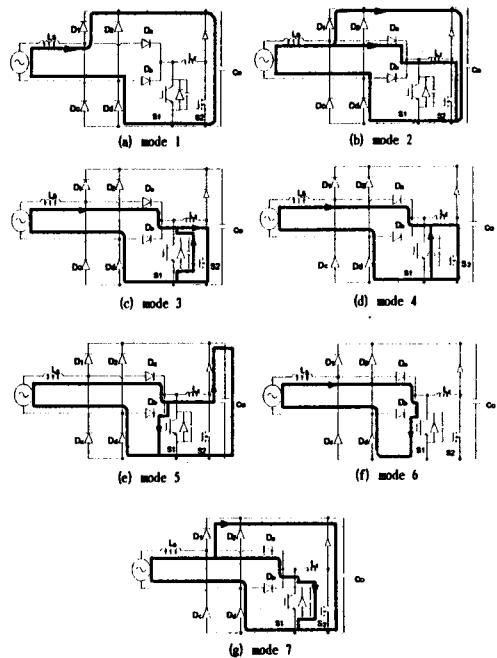


그림 4. 제안된 회로의 ZVT 동작모드

III. 제안된 회로의 특성 및 설계

A. 손실 비교

일반 역률보상회로는 입력전압에 따른 duty cycle이 다음 그림 6과 같이 입력전압이 클수록 작아지게 된다. 그러므로 본 논문에서 제안한 회로는 입력전류가 큰 부분에서 스위

치 S1의 온 시간이 작아지게 된다. 따라서 대부분의 전류가 스위치 S1이 오프한 뒤, 다이오드 두 개를 통해 전력이 부하로 전달되는 freewheeling 상태에서 흐르게 된다. 그러므로 본 논문에서 제안한 회로는 효율면에서 기존의 두 개의 능동 스위치를 이용하는 역률보상회로에 보다는 작지만 거의 비슷한 특성을 보인다.

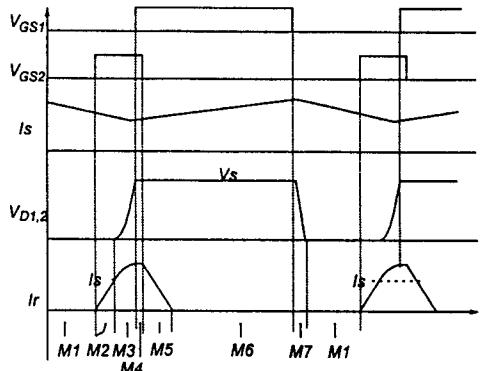


그림 5. ZVT에 의한 소자 동작파형

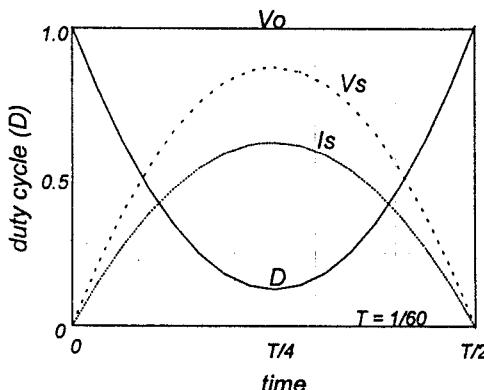


그림 6. 입력전압과 duty cycle의 관계

B. 간략한 설계

■ 입력조건 :

입력전압 = 110V, 출력용량 $P_o = 1kW$, 출력전압 $V_o = 200V$
스위칭 주파수 $f_s = 20kHz$

■ 설계 :

최소의 도통 시간은 다음 식과 같이 결정할 수 있다.

$$\Delta t \leq \frac{1}{f_s} \left(1 - \frac{V_p}{V_o} \right) \quad (1)$$

여기서, V_p 는 입력전압의 첨두치를 나타낸다.

그러므로 최소시간은 약 10us이 된다. 보조스위치의 게이트 시간은 이보다 작아야 하므로 본 논문에서는 2us으로 결정하였으며, 이에 따라 공진인덕터는 약 20uF으로 결정하였다.

C. 제어기 설계

제안된 역률보상회로는 연속전류모드로 제어하였다. 그리고 그

림 7에서처럼 Unitrode사의 제어용 IC 3854를 이용하여 제어 회로를 구성하였다. 입력전압과 전류, 그리고 출력전압은 모두 센서를 이용하여 절연된 신호를 피드백 받아서 제어하였다. 그리고 보조회로 스위치 S2의 게이트 신호는 S1 스위치의 게이트 신호의 상승 부분을 monostable multivibrator에 인가하여 얻었다.

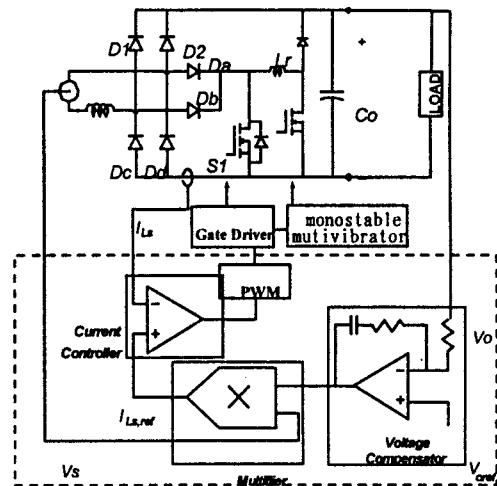


그림 7. 계량적인 제어기 블록도

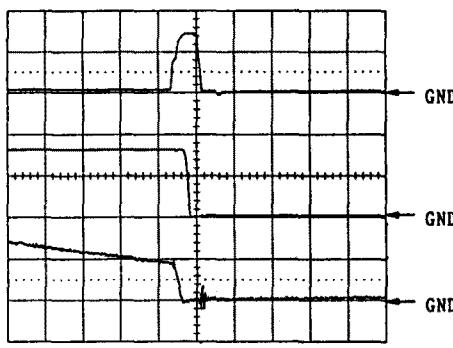
V. 실험 결과

제안된 회로의 타당성을 검증하기 위해 1kW, 20kHz의 ZVT 역률보상회로를 제작, 시험하였다. 실험에 사용된 소자는 다음과 같다.

- S1 : IRFP460(500V, 20A)
- S2 : IRFP450(500V, 15A)
- Ls : 250uH (37turn, PQ5050 core)
- Lr : 20uH (13turn, PQ3030 core)
- D1,D2 : HFA30PA60C (600V/30A)
- Da,Db,Dc,Dd : 정류용 브릿지 다이오드(600V, 25A)

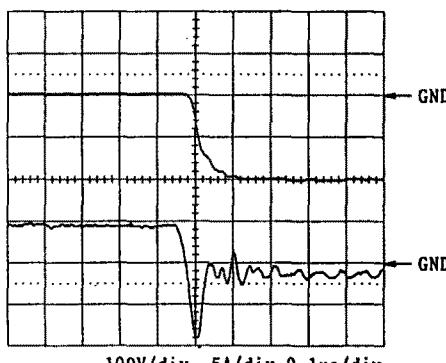
그림 8은 보조회로에 의한 ZVT동작을 각 소자의 파형으로 나타낸 것이다. 주 소자 S1의 온 이전에 보조 스위치 S2의 터نب은으로 공진 인덕터에 전류가 증가하고 S1이 영전압에서 터너블을 볼 수 있다. 다음 그림 9는 ZVT 가 없을 때 다이오드 D1, D2의 오프시 역 회복 전류가 발생하는 것을 나타낸다. 그리고 그림 10은 보조회로의 ZVT 동작에 의해 다이오드 D1 또는 D2가 역회복 전류없이 오프되는 것을 보여준다. 그림 11은 정격 출력용량에서 입력전압과 전류 파형을 보여준다. 그림 12는 기존의 대표적인 역률 보상회로들(그림 1(a), (c))과의 효율 비교

를 보여준다. 제안된 회로의 효율이 거의 2개의 능동 스위치를 이용한 회로의 것과 거의 비슷하게 나옴을 알 수 있다.



10V/div (V_{gs} : Auxiliary switch),
100V/div (V_s : main switch),
5A/div, 0.2us/div

그림 8. ZVT 동작에 따른 각 소자 파형



100V/div, 5A/div, 0.1us/div

그림 9. 다이오드 D1, D2의 전압 역회복 특성
(ZVT 보조회로 없을 때, 위 : 전압, 아래 : 전류)

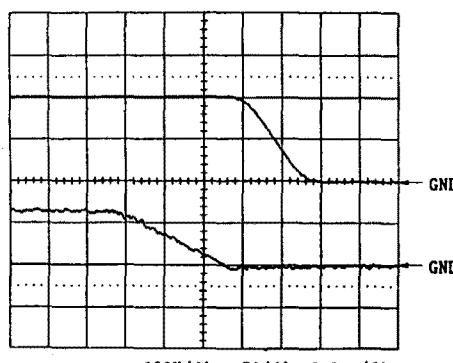
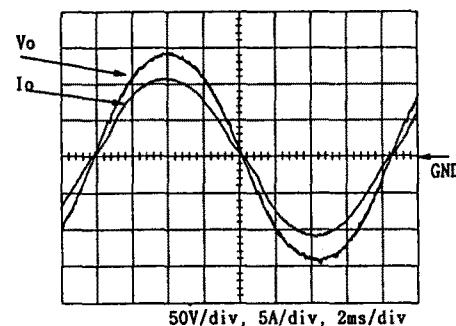


그림 10. 다이오드 D1, D2의 전압 역회복 특성
(ZVT 보조회로 있을 때, 위 : 전압, 아래 : 전류)



50V/div, 5A/div, 2ms/div

그림 11. 입력전압과 전류 파형

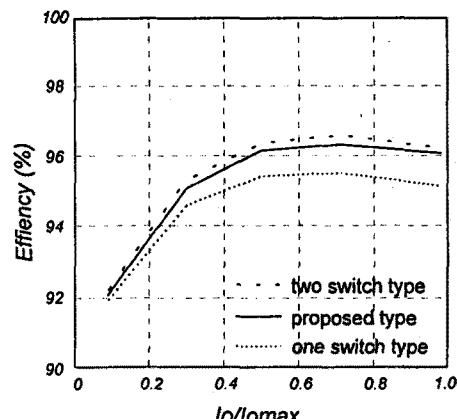


그림 12. 효율 비교도

VI. 결론

본 논문에서는 저가이고, 도통손실이 낮은 역률 보상 회로를 제시하였다. 더욱기, ZVT회로를 부가함으로써 능동 스위치의 전압 스트레스와 손실을 최소화할 수 있었다. 제안한 회로의 장점을 요약하면 다음과 같다.

- 낮은 도통 손실
- 저가의 시스템 구성
- 작은 전압 스트레스 및 스위칭 손실

이와 같은 점으로 비추어, 제안한 회로는 향후 역률보상회로의 용용에 있어서 매우 유용하게 이용되리라 판단된다.

참고문헌

- [1] G. Hua, C. S. Leu, and F. C. Lee, "Novel zero-voltage-transition PWM converters," in IEEE PESC Records, pp.55-61,1992.
- [2] A. Souza, I. Barbi, "A New ZVS-PWM Unity Power Factor Rectifier with Reduced Conduction Losses", IEEE Trans. on Power Electronics, VOL. 10, NO. 6, November 1995.
- [3] C. S. Silvia, "Power factor correction with the UC3854," Unitrode Application Note.