

S^4 -PFC 에서 커플링 인덕터를 이용하여 DC 버스 스트레스를 저감시킨 AC/DC 컨버터

이 장 현, 김 태 웅, 이 성 백
광운 대학교 전자공학과

S^4 -PFC AC/DC Converter To Reduce DC Bus Stress With Coupling Inductor

Lee Jang Hyun, Kim Tai Woong, Lee Sung Paik
KwangWoon University Dept. of Electronic engineering

Abstract - In this paper we analysis DC bus voltage stress at high line voltage and light load in S^4 -PFC Isolated AC/DC converter with DC bus voltage feedback using coupling in transformer. In this converter, the principle of operation and the practical problems in the design are considered. Simulation and experimental results are presented to verify the operation and performance of the S^4 -PFC converter with DC bus voltage feedback. Experimental sets are performed in the conditions: switching frequency 100 kHz, output of 5 V, 60W, and universal line input voltage.

1. 서 론

최근 들어 국제적인 규제로 인해 역률보정과 고조파에 대한 관심이 커져가고 있는 상황에서 역률보정 기능을 갖는 전원 회로의 구성이 일반화되고 있다. 대개의 경우 이러한 역률보정 기능을 갖는 AC/DC 전정류기와 함께 정확한 출력전압의 제어를 위해 DC/DC 컨버터나 DC/AC 인버터로 이루어진 2단 방식이 일반화되고 있다. 그러나 비용이 중요한 저,중 전력응용분야에 있어서 이러한 이중단 방식은 몇 가지 단점을 갖게 된다. 우선 전정류기단의 역률보정을 위한 제어회로와 정확한 출력전압의 조정을 위한 제어회로가 필요하게 되어 제어회로의 증가, 두 번의 전력변환으로 인한 효율의 감소문제를 들 수 있다. 이러한 문제점들을 해결하기 위해 최근 역률보정과 출력전압의 정확한 조정기능을 결합한 단일단 방식에 대한 연구가 활발하게 이루어지고 있다. 역률보정을 위한 단으로 가장 일반적으로 이용되고 있는 부스터 컨버터에서 부스트 컨버터가 불연속 모드에서 동작하고, 라인 주기에 대하여 스위치의 일정한 듀티비를 유지할 경우, 역률보정 기능을 갖는다는 것은 잘 알려진 사실이다. 이러한 부스트 컨버터의 역률보정 기능과 함께 정확한 출력전압의 조정을 위한 DC/DC 컨버터단으로는 입력과 출력의 절연기능, 다중 출력의 가능성, 그리고 출력전압의 유연성을 고려하여, 플라이백 컨버터나, 포워드 컨버터 형태의 DC/DC단을 결합하는 방식을 살펴본다. 그림 1은 이러한 단일단 방식의 블록 다이어그램을 보여주고 있다. 이러한 단일단 방식의 경우 그림 1에서 보이는 것 처럼, 순시적인 입력전력과 일정한 출력전력간의 전력균형을 위한 내부에너지 저장소자를 필요로 하게 된다. 이러한 단일단 방식에서 경부하시, 그리고 높은 라인 입력조건에서 내부 에너지 저장 소자인 커패시터에서의 전압 스트레스를 간략하게 살펴본다. 본 문은 이러한 단일단 방식의 설계에 있어 문제가 되는 DC 버스 스트레스를 제거하기 위한 DC 버스 전압의 직접적인 제한에 의해 입력 전력을 제어하는 원리를 살펴본다. 다음으로 실제 설계과정을 통하여 제안된 방식의 타당성을 실험결과를 통해 확인하도록 한다.

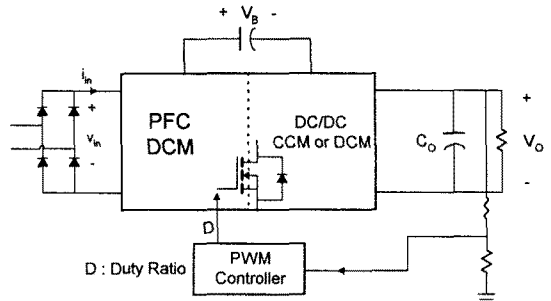


그림 1. 일반적인 단일단 AC/DC 컨버터의 블록 다이어그램

2. 제안한 회로

2.1 기존 S^4 -PFC

그림 2는 기존 방식의 단일단 AC/DC 컨버터의 구성회로도도를 나타낸다.

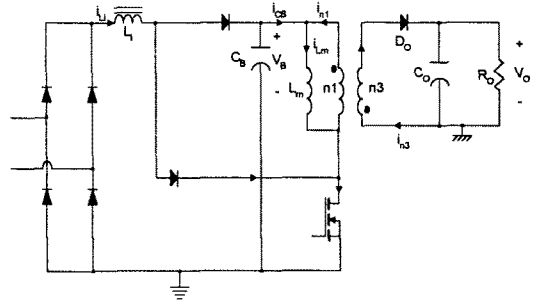


그림 2. 기존의 S^4 -PFC 회로

부스트 컨버터 형태의 역률보정단은 불연속 도통모드에서 동작하며, 다음 단의 플라이백 형태의 DC/DC 단은 연속도통모드 또는 불연속도통모드에서 동작하게 된다. 그림 2에서 인덕터 L_1 는 부스트 인덕터이며 커패시터 전압 V_b 는 부스트 컨버터의 출력단인 동시에 플라이백 컨버터의 입력으로써 동작하게 된다. 정상상태를 가정할 경우, 부스트 단은 역률보정을 얻기 위해 불연속 도통모드에서 동작하게 되고, 따라서 입력전력은 순시적인 값으로 변하게 된다. 부스트 단이 자동적인 역률보정 기능을 갖기 위해서는 항상 불연속 모드에서 동작해야 하기 때문에, 부스트 인덕터의 설계는 전부하상태, 그리고 최소 입력조건하에서 설계되어야 한다. 연속모드에서 동

작하는 플라이백 컨버터를 가정할 때 부하가 경부하가 될 경우 플라이백 컨버터의 입출력 변환비는 부하와 무관하기 때문에 듀티 비는 이진상태를 유지한다. 따라서 출력 전력의 감소에 대하여 입력전력은 이진상태를 유지하기 때문에 이러한 입력과 출력사이의 전력 불균형은 내부에너지 저장소자인 벌크 커패시터 C_B 에 저장되어 DC 버스 전압은 상승하게 된다. DC 버스 전압의 상승으로 인해 듀티비는 감소하여 새로운 입출력간의 전력균형을 얻게 된다. 이러한 DC 버스 전압 스트레스는 단일단 컨버터의 실질적인 구현에 있어서 주된 제한사항이 된다.

2.2 궤환을 갖는 S^4 -PFC

그림 3.은 그림 2의 컨버터에 플라이백 컨버터 트랜스 포머에 커플링 권선을 추가 시킴으로써 높은 라인 입력전압과 경부하 조건하에서 DC 버스 전압의 스트레스를 저감시키기 위한 회로를 보여준다. 정상상태 동작을 가정할 경우에 스위치 온-상태에서 부스트 인덕터 양단의 전압은 식 (1)과 같다.

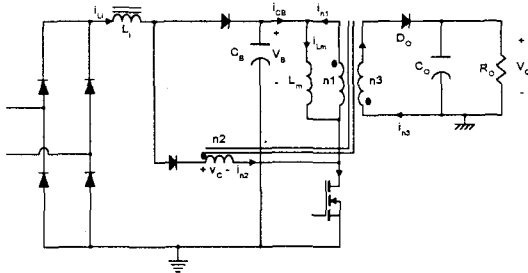


그림 3. DC 버스 궤환을 갖는 S^4 -PFC

$$v_{L1} = v_{in} - V_C \quad (1)$$

여기서, $V_C = \frac{n_2}{n_1} V_B$ 로 트랜스포머의 일차측 권선과 궤환 권선의 비에 의해서 결정됨을 알 수 있다. 위의 (1)에서 인덕터 전압은 궤환 전압 V_C 가 증가할수록 감소하게 되고, 따라서 불연속모드 동작에서 입력전류는 인덕터 양단전압에 의해 결정되기 때문에 경부하가 될 경우 V_B 의 상승에 대하여 궤환 권선에 의해 인덕터 양단전압을 감소시킴으로써 입력전력을 감소시키게 된다. 따라서 전력단에서의 직접적인 궤환에 의해 DC 버스 전압 스트레스를 제한 시키게 된다. 이 때 플라이백 컨버터단은 벌크 커패시터 C_B 에 의해 1차측에 에너지를 저장하게 되는 기존의 플라이백 컨버터와 동일한 방식으로 동작하게 된다.

스위치 오프-상태시 부스트 인덕터에 저장되었던 에너지는 벌크 커패시터와 부하단에 부분적으로 에너지를 전달하게 된다.

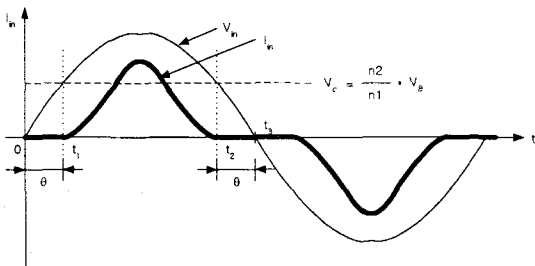


그림 4. 입력 전압-전류 파형

그림 4은 라인 싸이클에서 입력전압과 전류 파형을 보여주고 있다. 위의 그림에서 입력전압이 궤환 전압 V_C 보다 작을 경우인 $[0, t_1]$ 와 $[t_2, t_3]$ 에서 영이 된다. 이때의 영이 되는 구간은 아래 식과 같이 계산될 수 있다.

$$t_1 = \frac{\sin^{-1}(V_C/V_{in_peak})}{2\pi} \cdot T_{in} \quad (2)$$

여기에서 V_{in_peak} 는 입력전압의 첨두치이고, T_{in} 는 입력전압의 주기가 된다. 위 식으로부터 벌크 커패시터 전압이 증가함에 따라서 t_1 이 증가함을 알 수 있고, 따라서 입력전력이 감소함을 확인할 수 있다.

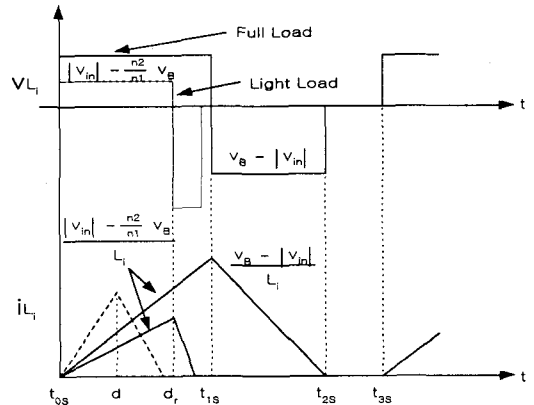


그림 5. 부스트 인덕터 L_1 에서의 전압 전류 파형

그림 5는 부스트 인덕터에서의 전압과 전류 파형을 보여준다. 경부하시에 벌크 커패시터 전압 V_B 가 증가할 때, 입력 전류가 감소하게 된다. 단일단 컨버터에서의 듀티비는 플라이백 컨버터의 입력과 출력변환비에 위해서 결정된다. 플라이백 컨버터의 변환비는 아래 식과 같이 된다.

$$D = \frac{n1/n3 \cdot V_O}{V_B + n1/n3 \cdot V_O} \quad (3)$$

그림 5와 식 (3)으로부터 궤환 권선을 가지고 있는 DC 버스 전압이 앞 절에서의 컨버터 보다 작게 된다. 즉, 그림 5에서의 경부하시의 궤환을 갖지 않는 점선의 전류 파형과 실선의 전류파형으로 부터, 동일한 전력 전달에 대하여 듀티비의 감소는 상당히 작게 됨을 알 수 있다.

3. 실험결과 및 고찰

실험은 위의 2.2절에서의 궤환을 갖는 단일단 회로를 구성하여 라인 입력전압은 110V, 스위칭 주파수는 100 kHz, 출력 5V, 60W의 조건하에서 이루어진다. 이때, 부스트 인덕터는 최대 부하조건하에서 불연속모드에서 동작할 수 있도록 설계하였으며, 벌크 커패시터는 순시적인 입력전력의 변화에 대하여 플라이 백 컨버터가 일정한 출력전력을 제공할 수 있을 정도로 충분히 큰 값을 선택한다. 실제 설계시에 누설인덕턴스는 스위치 턴-오프시에 큰 서지 전압을 유도하기 때문에 주의를 요한다. 본 실험에서는 수동 스너버를 이용하여 누설인덕턴스로 인한 전압 서지를 제거하였다. PWM제어부는 UC382을 이용하여 전압모드제어 방식을 이용하였으면, 제어기는 출력단에 위치하였으며, 스위치의 드라이브는 상용 옴토커플러를 이용하여 입력과 출력사이의 절연 구동을 하였다.

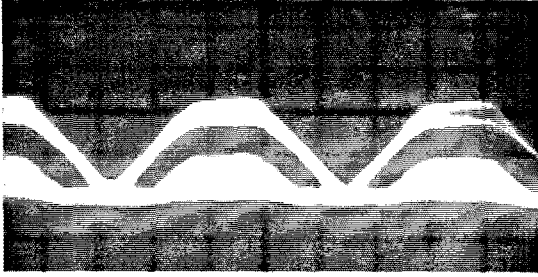


사진 1. 입력전압(상단)과 전류(하단) 파형
전압 : 50V/div, 0.6A/div 파형

위의 사진 1에서 보이는 바와 같이 역률보정을 확인할 수 있고, 입력전압이 궤환 전압보다 작은 영역에서의 영전류동작을 확인할 수 있다. 또한 경부하시에 DC 버스 전압이 특정 범위로 제한됨을 확인할 수 있었다.

4. 결 론

기존 단일단 역률보정방식의 동작원리를 분석함으로써 역률보정단인 부스트 컨버터를 불연속모드에서 동작시킴으로써 자동적인 역률보정을 확보할 수 있음을 확인하였다. 또한 이러한 컨버터에서 플라이백 단이 연속도통모드에서 동작할 경우 경부하시의 DC 버스 전압 스트레스를 제한하기 위한 궤환 권선을 이용하여 전압 스트레스 문제를 해결할 수 있음을 확인할 수 있었다. 그러나, 본 실험과정을 통하여 상용전원의 전범위에서 DC 버스 전압은 430V 까지 증가하게 된다. 이때 스위치 오프시에 스위치의 양단전압은 DC 버스 전압과 출력전압의 합으로 주어지기 때문에 큰 내압을 가진 스위칭 소자를 사용해야 한다. 또한 궤환 권선을 갖는 트랜스포머의 특성상 누설 인덕턴스 성분을 상당히 포함하기 때문에 오프시의 전압 써지까지 포함하게 된다면 내압이 상당히 높은 스위치를 사용해야 하는 제한을 받게 된다. 앞서 설명한 바와 같이 단일단 방식은 비용이 중요한 저, 중전력응용분야에서 주로 이용될 수 있기 때문에 큰 내압을 갖는 스위치의 이용은 실질적인 구현을 제한하는 중요한 요인이 될 것이다. 그러므로 스위치 오프시의 드레인 전압을 제한할 수 있는 방법을 연구하는 것이 다음 과제라 할 수 있다.

- [1] M. Madigan, R. Erickson, and E. Ismail, "Integrated high quality rectifier regulators," IEEE PESC, Vol 2, pp.1043-1051, 1992
- [2] R. Redl and L. Balogh, "Design consideration for single stage isolated power factor corrected power supplies with fast regulation of the output voltage", IEEE APEC Vol 1, pp. 454-458, 1995.
- [3] M. H. Kheraluwala, R. L. Steigerwald, and R. Gurumoorthy, "A fast response high power factor converter with a single power stage", IEEE PESC, Vol 2, pp. 769-779, 1991.
- [4] M. M. Jovanovic, D. M. Tsang, and F. C. Lee, "Reduction of voltage stress in integrated high-quality rectifier-regulators by variable frequency control," IEEE APEC, Vol 2, pp. 569-575, 1994
- [5] Jinrong Qian and Fred C. Lee, "A High Efficient Single Stage Single Switch High Power Factor AC/DC Converter With Universal Input," IEEE APEC, Vol 1, pp. 281-287, 1997.
- [6] Laszlo Huber and Milan M. Jovanovic, "Single-Stage, Single-Switch, Isolated Power Supply Technique with Input-Current Shaping and Fast Output-Voltage Regulation for Universal Input-Voltage-Range Applications," IEEE APEC, Vol 1, pp. 272-280, 1996.