

단일 전력단 역률개선 기술

문 건 우

(한국과학기술원 전자전산학과 교수)

1. 서 론

재래식 다이오드 정류기는 라인전류에 많은 고조파를 포함하고 있어 라인 전압의 왜곡을 가져올 뿐만 아니라 전도성 전자파 장애를 일으키며 전원 용량의 활용도를 저감시키는 문제점이 있다.^[1] 최근에 이러한 정류기의 고조파 문제를 해결하기 위하여 IEC1000-3-2와 같은 고조파 규제와 역률개선 정류기 개발에 많은 관심과 연구가 있어왔다. 단상 전원장치의 고역률 및 저 고조파 왜곡을 갖는 정류기단으로 수동형 필터, 능동형 전력필터 및 2단방식의 역률개선 방식이 주로 사용되고 있다. 수동형 필터는 높은 효율을 보이며 저가로 제작이 가능하나 라인 주파수의 인덕터와 커패시터는 부피가 크고 무겁다는 단점을 갖고 있다. 2단 역률개선방식은 역률개선을 위한 승압형 컨버터와 DC-DC 컨버터단을 사용한다. 두 개의 전력단은 입력전압과 동상인 고품질의 정현파 형태의 입력전류를 만들고 출력전압 조절을 위하여 각각의 제어를 사용하고 있다. 이러한 2단 방식은 고역률, 낮은 고조파 왜곡, 충분한 지지시간(hold-up time) 및 DC-DC 컨버터의 최적 설계 가능 등 많은 장점을 가지고 있지만 별도의 전력용 반도체 스위치 및 역률개선을 위한 제어를 부가적으로 사용해야 하므로 소용량 적용에는 많은 부담이 있다. 단일전력단 역률개선방식에서는 단일전력단으로 고역률, 전기적 절연 및 빠른 전압조정이 가능하다. 일반적으로 단일전력단 역률개선 정류기는 스위치 및 제어를 공유하는 방식으로 역률개선단과 DC-DC 컨버터단을 결합한 형태로 필요한 지지시간 또한 제공한다. 역률개선을 위한 수동형 필터 방식, 2단 방식 및 단일전력단 방식 중 단일전력단 방식이 200W 미만의 소용량 전원 장치로 가격 면에서 가장 유리한 것으로 알려져 있다.^{[2],[3]}

단일전력단 역률개선 정류기에서는 효율, 지지시간, 소자

수, 소자의 전압과 전류 스트레스, 입력전류 품질 등과 같은 성능은 회로의 토폴로지에 의해서 전적으로 결정된다. 최근 이러한 단일전력단 방식의 토폴로지 개발에 학계와 산업계에서 많은 관심과 수많은 토폴로지를 개발하여 소용량 전원장치에 적용하고 있다. 본 고에서는 최근의 단일전력단 역률개선회로의 추세와 주요한 토폴로지의 동작원리 및 특징을 요약하여 소개하고자 한다.

2. 단일전력단 역률개선 회로

Integrated PWM 단일전력단 역률개선 컨버터의 개념도를 그림 1에 도시하였다. 그림에서 보듯이 역률개선단과 DC-DC 컨버터단을 스위치 및 에너지 저장 커패시터를 공유하는 방식으로 결합하여 PWM 방식에 의한 출력전압 조절과 자연적인 역률개선을 한다. 역률개선을 위한 별도의 제어기 없이 자연적인 역률개선을 설명하기 위하여 불연속 모드로 동작하는 부스터 컨버터를 그림 2에 나타내었다. 부스터 컨버터의 스위치를 일정한 도통시간으로 제어하면 입력전류의 첨두치는 항상 입력전압의 모양을 추종하므로 이러한 불연속 전류를 필터링 하면 입력전압과 동상이며 고조파가 작은 입력전류를 얻을 수 있어 단위역률을 얻는 것이 가능하다. 이때의 입력전류의 첨두치와 평균값은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$i_{Li}^{pk} = \frac{|Vin|}{L_i} T_{on} \quad (1)$$

$$\langle i_{Li}^{avg} \rangle = K \frac{|\sin \omega_L t|}{M - |\sin \omega_L t|}, \quad M = V_B / Vin \quad (2)$$

그러나 단일전력단 역률개선 개념은 부스터 컨버터의 불연속 모드 제어 방식이 아닌 승압형 공진 컨버터를 이용하여 처

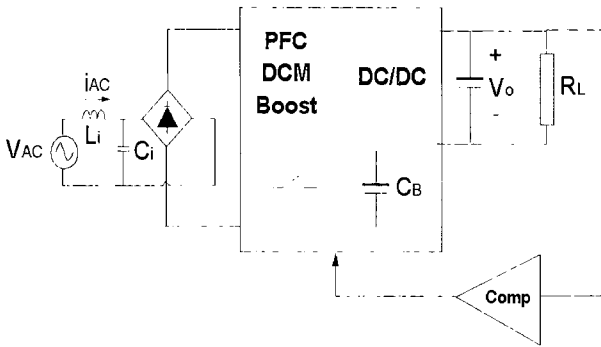


그림 1 Integrated PWM 단일전력단 역률개선 컨버터의 개념도

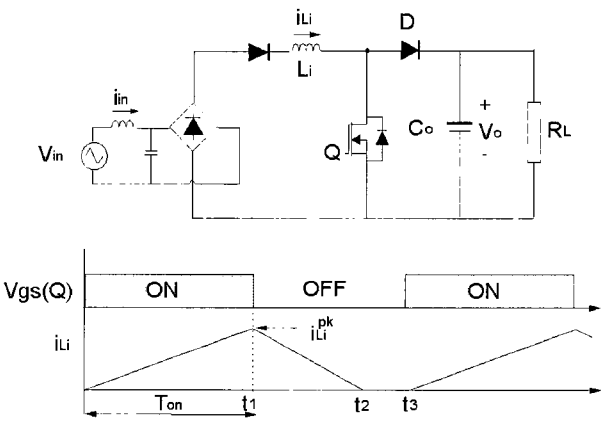


그림 2 불연속 모드로 동작하는 부스터 컨버터

음 도입되었으며, 원하는 DC 출력 및 입력과 직렬로 승압형 전원을 만드는 두 개의 출력을 갖는 단일전력단으로 구성되어 있다.^{[4],[5]} 승압형 공진회로의 자연적인 이득 특성에 의하여 제어 없이 승압형 출력이 조정되어 높은 입력역률을 얻을 수 있다. 그러나 이러한 회로는 단일전력단 역률개선이 가능하게 한 첫번째 토폴로지이지만 많은 소자가 필요하다는 단점이 있다. 단일 스위치를 사용하며 역률개선단과 DC-DC 컨버터단을 결합하여 단일전력단 역률개선이 가능한 다른 방식의 회로 및 주요 파형을 제시하였다. 이 방식은 펄스폭변조와 주파수변조를 사용하여 높은 역률을 보이나 넓은 주파수 변화와 과도한 전압 스트레스를 보인다는 단점을 갖고 있으며 역률개선을 위한 승압단과 DC-DC 컨버터단을 결합한 단일전력단 방식의 초기 토폴로지로 인정된다. 승압형 역률개선단과 플라이백 또는 포워드 DC-DC 컨버터의 시스템적인 결합에 의하여 그림 3에 보인 BIFRED와 BIBRED로 이름 지어진 새로운 단일전력단 역률개선회로가 소개되었다.^[6] 이러한 정류기의 특징은 에너지 저장 커패시터가 에너지 전달 통로

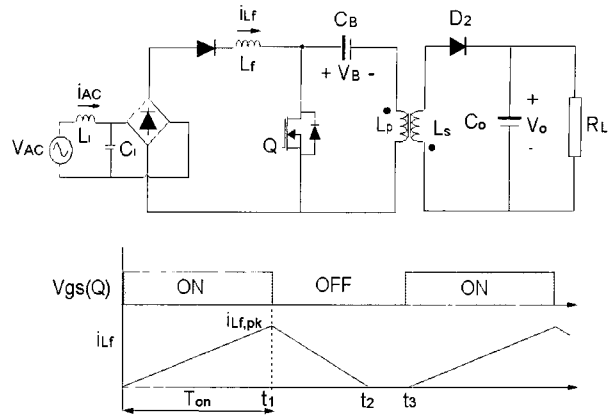


그림 3 BIFRED 및 BIBRED 단일전력단 역률개선 컨버터

에 직렬형태로 있다는 것이며 Cuk 및 Sepic 컨버터에 입력측에 다이오드를 추가한 형태의 토폴로지와 유사하다.

BIFRED와 BIBRED에서는 별도의 제어 없이 고역률을 얻기 위하여 승압형 역률개선단을 불연속 모드로 동작하며 출력 전압 조정을 위한 DC-DC 컨버터단은 연속 모드로 동작한다. 이런 경우 직렬결합 커패시터 전압은 부하의 크기에 의해 결정되며, 특히 universal 입력에서 경부하시에 직렬결합 커패시터 전압 스트레스가 과도하게 증가한다. 경부하시 직렬결합 커패시터 전압 스트레스 문제를 해결하기 위하여 주파수변조 방식을 적용한 경우도 있다.^{[7],[9]} 또한 직렬결합 커패시터 전압을 감소시키며 높은 역률을 얻을 수 있게 하기 위하여 승압형 역률개선단과 DC-DC 컨버터단을 모두 불연속 모드로 동작시키는 연구도 있었다.^[8] 그림 4에서와 같이 직렬결합 커패시터를 전력 흐름에 병렬형태의 구조를 갖는 역률개선단과 DC-DC 컨버터단을 결합한 회로들이 소개되었다.^[10] [10]에서 소개하는 모든 역률개선컨버터는 입력 역률개선을 자동적으로 하기 위하여 불연속모드로 동작하며 DC-DC 컨버터단은 불연속 또는 연속모드로 동작한다. 그러나 DC-DC 컨버터단이 연속모드로 동작하면 universal 입력에서 경부하시에 직렬결합 커패시터 전압 스트레스 문제가 발생하여 고가의 커패시터가 필요하며 스위치 전압 스트레스를 증가시킨다.

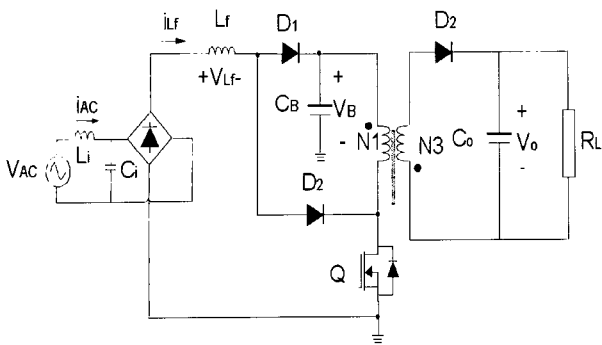


그림 4 스위치 결합형 단일전력단 역률개선 컨버터

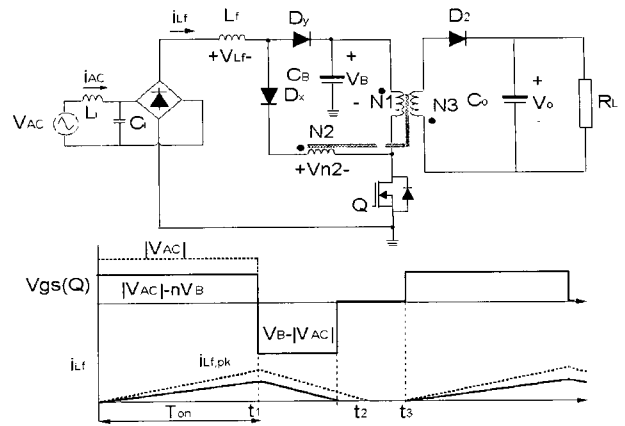


그림 7 자기 부궤환 단일전력단 역률개선 컨버터

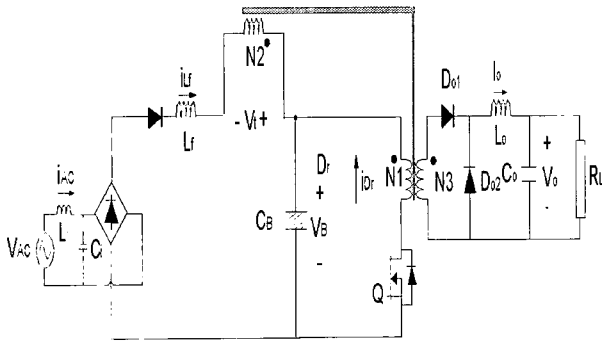


그림 5 magnetic 스위치를 이용한 단일전력단 역률개선 컨버터

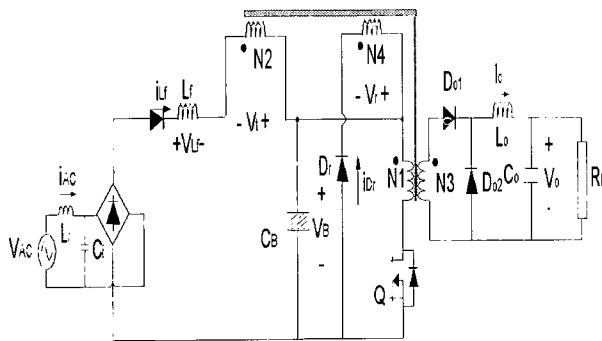


그림 6 변압기 리셋 권선을 이용한 자기 에너지 궤환 단일전력단 컨버터

이러한 직렬결합 커패시터 전압 스트레스 문제는 승압형 역률개선단과 DC-DC 컨버터단을 cascade 형태로 결합한 정류기에서 고유하게 나타나는 문제이다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 주파수변조 방식을 적용한 경우도 있었으나 직렬결합 커패시터 전압을 450V 이하로 제한하기 위하여 전 부하 영역에서 스위칭 주파수가 약 10배 정도 변함으로 변압기 및

필터 설계에 바람직하지 않다. 직렬결합 커패시터 전압 스트레스를 저감시키기 위한 또 다른 방법은 DC-DC 컨버터단을 전 부하 영역에서 불연속 모드로 동작시키는 것이다.^{[11][12][13]} 불연속 모드에서 직렬결합 커패시터 전압은 부하와 무관하므로 전압 스트레스를 저감시키는 것이 가능하지만 전도 손실의 증가와 출력전압 맥동성분이 증가하는 문제가 발생된다.

그림 5에서는 magnetic 스위치 개념을 단일전력단 역률개선에 적용한 회로로 스위치 도통시 입력이 직렬로 인가된 보조권선을 통하여 직렬결합 커패시터 전압이 인가되어 부스터 인덕터 L_f에는 입력전압만이 인가되어 부스터 컨버터의 자연적인 역률개선과 같은 동작을 한다.^[14] 그러나 BIFRED나 BIBRED와 같이 입력의 120Hz 맥동성분이 출력 측으로 넘어가는 모드가 발생하여 출력전압에 120Hz의 맥동성분이 존재하는 문제점이 있다. 그림 6에서는 스위치 소호 기간중 변압기 리셋 구간 동안 직렬결합 커패시터 전압을 변압기 보조권선을 통하여 궤환하는 방식으로 부스터 컨버터의 불연속 모드 동작에 의한 자연적인 역률개선과 같은 동작을 한다.^[15] 이 회로는 스위치 소호 기간 중에 역률개선을 위한 자기 에너지를 궤환하므로 120Hz의 맥동성분이 출력 측에 나타나지 않으나 자화전류가 커지는 단점이 있다. 그림 7에서와 같이 변압기 보조권선을 입력 측에 인가하여 스위치 도통시 자기 에너지 부궤환의 개념을 적용하여 THD(Total Harmonic Distortion)와 전압 스트레스 문제를 절충한 회로가 소개되었다.^[16] 자기 에너지 부궤환으로 입력 전류의 도통구간이 감소하지만 높은 역률로 고조파 규제를 충분히 만족하며 DC-DC 컨버터단의 연속모드 동작이 가능하여 낮은 출력전압 맥동과 450V 이하의 직렬결합 커패시터 전압을 얻는 것이 가능하다.

그림 8에서는 스위치 도통시 및 차단시 모두 자기 에너지 부궤환이 가능한 이중 자기궤환 단일전력단 컨버터를 소개한다.^[17] 이러한 방법 또한 직렬결합 커패시터 전압을 450V 이

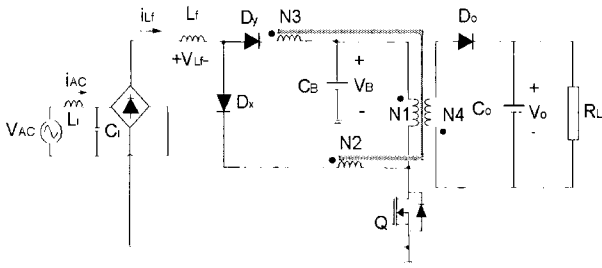


그림 8 이중 자기계한 단일전력단 역률개선 컨버터

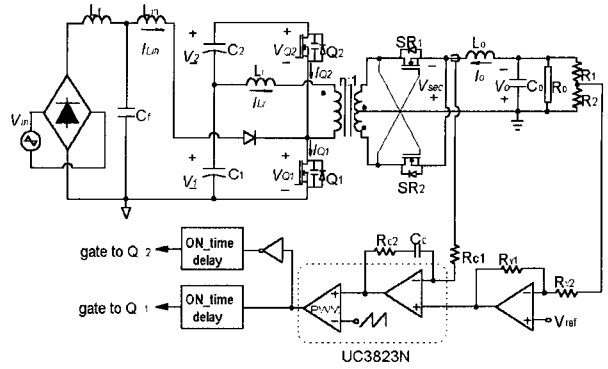


그림 11 영전압 스위칭 하프브리지 단일전력단 역률개선 컨버터

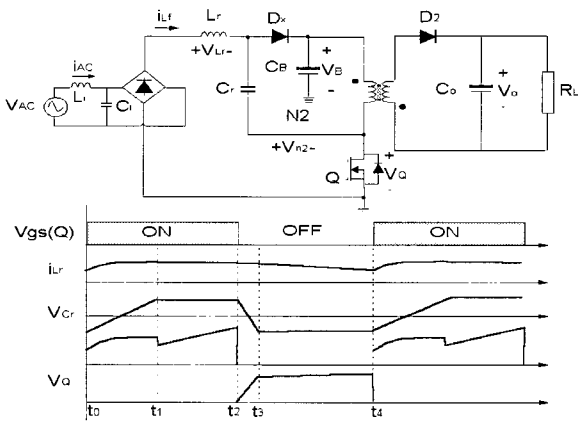


그림 9 charge pump 단일전력단 역률개선 컨버터

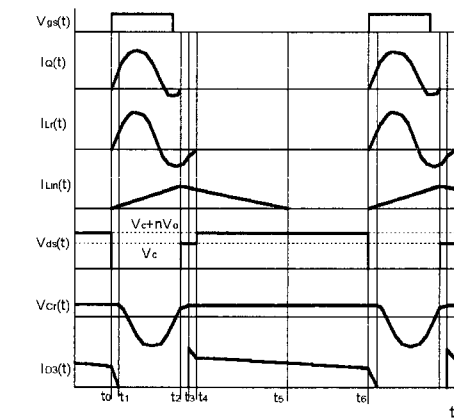
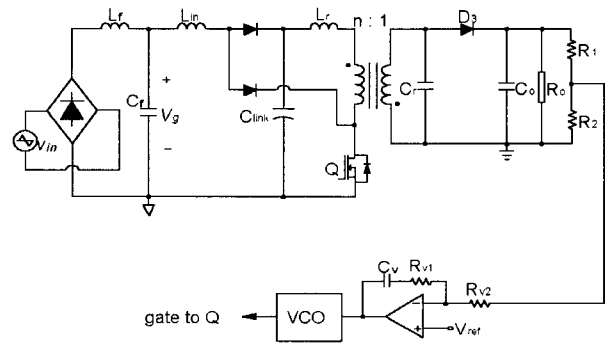


그림 12 영전류 준공진형 단일전력단 역률개선 컨버터

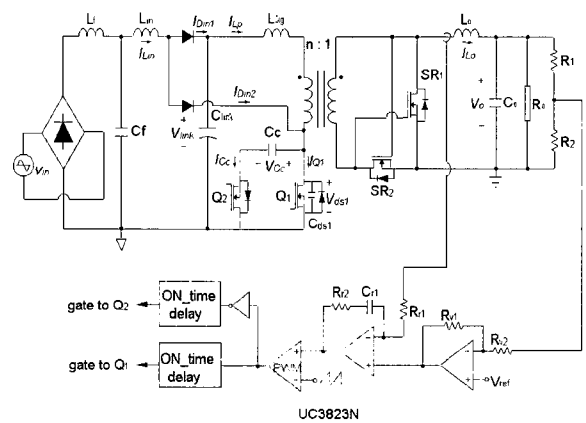


그림 10 영전압 스위칭 능동형 클램프 파워드 단일전력단 역률개선 컨버터

하로 제한하며 역률개선단 및 DC-DC 컨버터단의 연속모드 제어가 가능하며, 이 경우 입력전류 고조파는 Class D Standard를 만족한다. 최근 도통손실과 입력전류 고조파 저감을 위하여 연속모드로 동작하는 역률개선단을 갖는 정류기를 그림 9에 소개한다.^[18] 그림 9는 charge pump 개념을 적

용한 컨버터로서 낮은 전류 스트레스 및 낮은 직렬결합 커패시터 전압을 보이는 특징이 있으며, 형광등 전자식 안정기에 많은 적용 사례가 있다.

위에서 소개한 회로는 모두 전력 스위칭 소자가 하드 스위칭 동작하므로 도통 손실 외에도 과도한 스위칭 손실을 갖고 있어 단일전력단 컨버터를 소형화하기 어려운 문제점이 있다. 이러한 스위칭 손실을 저감시킴으로써 높은 스위칭 주파

수를 갖는 compact한 전원장치를 만들기 위하여 소프트 스위칭을 적용한 단일전력단 컨버터를 그림 10-12에서 소개한다.^{[19][20][21]} 그림 10은 능동형 클램프 파워드 컨버터와 부스트 컨버터를 스위치 결합한 형태로 주 스위치 및 보조 스위치의 영전압 스위칭이 가능하며 또한 출력 정류기단에서의 쇼트키 다이오드에 의한 도통손실 저감을 위하여 self driven MOSFET 동기 정류를 적용하여 낮은 출력전압을 갖는 단일전력단 컨버터의 고효율을 가능하게 하였다.^[19] 그림 11은 영전압 스위칭을 하기 위하여 상보(complementary) 제어되는 하프 브리지 컨버터와 부스트 컨버터를 결합하여 고효율화 하였다.^[20] 그림 12의 컨버터는 영전류 준공진형 컨버터와 부스트 컨버터를 결합하여 고효율과 고역률을 갖는 단일전력단 역률개선 방식이다.^[21]

3. 맺음말

200W 이하의 소용량 전원장치에서 낮은 맥동 성분을 갖는 출력전압을 갖으며 역률개선을 부가적인 제어기 없이 자연적으로 역률개선을 하기 위하여 여러 형태의 토폴로지들이 개발되었다. 이러한 토폴로지의 형태를 그림 13에 요약하였다. 그림에서 보듯이 프라이백 컨버터를 이용한 절연형 방식, BIFRED와 같이 스위치를 공유하고 직류결합 커패시터를 전력 흐름에 직렬형태로 보이는 방식, 부스트 컨버터와 기존 컨버터에서 스위치 결합에 의한 방식, 자기 결합에 의한 방식 및 charge pump 개념을 적용한 방식으로 분류 할 수 있다.

최근에는 학계와 산업계에서 직류결합 커패시터 전압 스트레스 문제를 해결하여 universal 라인에 적용 가능한 단일전력단 방식과 소프트 스위칭을 적용하여 고효율 및 고전력밀도를 갖는 단일전력단 컨버터 개발에 많은 관심을 보이고 있다.

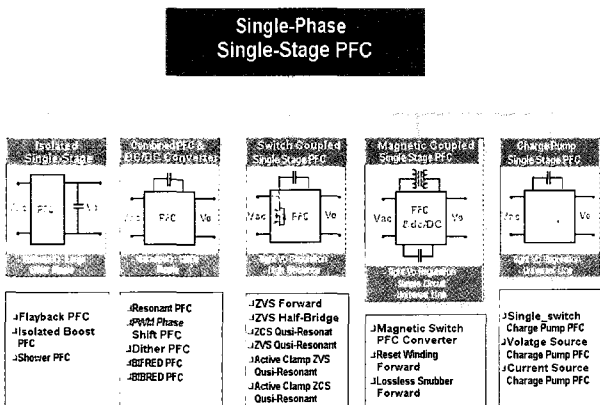


그림 13 단일전력단 역률개선 컨버터를 위한 여러 토폴로지의 요약

참고 문헌

- [1] S Freeland, "Input Current Shaping for Single-Phase AC-DC Power Converters", Part II of Ph.D. Thesis Caltech, 1988.
- [2] B Sharifipour, J. S. Huang, P. Liao, L. Huber, M. M. Jovanovic, "Manufacturing and Cost Analysis of Power-Factor-Correction Circuits", IEEE Applied Power Electronics Conf.(APEC), vol. 1, pp.490~494, 1998.
- [3] Zhang Jindong, M. M. Jovanovic, F. C. Lee, "Comparison between CCM Single-Stage and Two-Stage Boost PFC Converter", IEEE Applied Power Electronics Conf.(APEC), pp. 335-341, 1999.
- [4] M. H. Kheraluwala, R. L. Steigerwald, R. Gurumothy, "A Fast Response High Power Factor Converter with a Single Power Stage", PESC '91, 1991.
- [5] I. Takahashi, R. Y. Igarashi, "A Switching Power Supply of 99% Power Factor by the Dither Rectifier", Thirteen International Telecommunication Energy Conference (INTELEC '91), 1991.
- [6] M. Madiga, R. Erickson, E. Ismail, "Integrated High Quality Rectifier-Regulator", PESC'92, pp. 1043~1051, 1992.
- [7] M. Brkovic, S. Cuk, "Automatic Current Shaper with Fast Output Regulation and soft Switching", INTELEC'93, 1993.
- [8] K. Schenk, S. Cuk, "A Single-Switch Single-Stage Active Power Factor Corrector with High Quality Input and Output", PESC'97, 1997.
- [9] 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, pp.569~575, 1994.
- [10] R. Redl, L. Balogh and N. O. Sokal, "A New Family of Single-Stage Isolated Power Factor Correctors with Fast Regulation of the Output Voltage", PESC'94, pp.1137~1144, 1994.
- [11] R. Redl and L. Balogh, "Design Considerations for Single-Stage Isolated Power Factor Corrected Power Supplies with Fast Regulation of the Output Voltage", IEEE APEC, pp.454~458,

- 1995.
- [12] Qui Mei, G. Moschopoulos, H. Pinheiro and P. Jain, "Analysis and Design of a Single-Stage Power Factor Corrected Full-Bridge Converter", APEC'99, pp.119~125, 1999.
- [13] E. Rodriguez, F. Canales, P. Najera and J. Arau, "A Novel Isolated High Quality Rectifier with Fast Dynamic Output Response", PESC'97, pp. 550~555, 1997.
- [14] H. Watanabe, Y. Kobayashi, Y. Sekine, M. Morikawa and T. Ishii, "The Suppressing Harmonic Current MS(Magnetic Switch) Power Supply", INTELEC'95, pp.783~790, 1995.
- [15] G. W. Moon, "Novel Single-Stage, Single-Switch, Ac/DC Converter with Magnetic Energy Feedback Technique for Power Factor Correction", IEE Proceedings-Electric Power Applications, vol. 146, no. 1, pp.111~116, 1999.
- [16] F. S. Tsai, P. Markowski and E. Whitcomb, "Off-line Flyback Converter with Input Harmonic Current Correction", INTELEC'96, pp.120~124, 1996.
- [17] Qian Jinrong, Zhao Qun and F. C. Lee, "Single-Stage Single-Switch Power-Factor-Correction AC/DC Converters with DC-Bus Voltage Feedback for Universal Line Applications", IEEE Transaction on Power Electronics, vol. 13, no. 6, pp.1079~1088, 1998.
- [18] Qian Jinrong and F. C. Lee, "A High-Efficiency single-Stage Single-Switch High-Power-Factor AC/DC Converter with Universal Input", IEEE Transaction on Power Electronics, vol. 13, no. 4, pp.699~705, 1998.
- [19] J. Y. Lee, G. W. Moon and M. J. Youn, "Design of a single-stage a.c./d.c. converter for low power level application" EPE Journal, Vol. 9, No. 3-4, pp.17~25, Jan., 2000.
- [20] J. Y. Lee, G. W. Moon and M. J. Youn, "Design of Power-Factor-Correction Converter Based On Half-Bridge Topology" IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol. 46, No. 4, pp.710~723, Aug., 1999.
- [21] J. Y. Lee, G. W. Moon, Y. S. Jung and M. J. Youn, "Integrated ZCS Quasi-Resonant Single-Stage High Power Factor Converter" Electronics Letters, Vol. 35, No. 7, pp.526~527, April, 1999.

〈 저 자 소 개 〉



문건우(文建又)

1966년 10월생. 1990년 2월 한양대학교 공대 전자공학과 졸업. 1992년 2월 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(석사). 1996년 2월 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(박사). 1996년~1998년 한전 전력연구원 전력계통연구실 선임연구원. 1998년~2000년 (주)키테크놀로지 대표이사. 2000년 3월~2000년 8월 세종대학교 전자공학과 조교수. 2000년 9월~현재 한국과학기술원 전자전산학과 전기 및 전자공학전공 조교수.