

단위 역률을 갖는 BIFRED 컨버터를 이용한 새로운 120Hz DC 출력 리플-전압 저감 제어 기법

김정범, 박남주, 이동윤, 현동석
한양대학교 전기공학과

A New 120Hz DC Output Ripple-Voltage Suppression Scheme Using BIFRED Converter with Unity Power Factor

Jung-Bum Kim, Nam-Ju Park, Dong-Yun Lee, and Dong-Seok Hyun
Department of Electrical Engineering, HanYang University

ABSTRACT

This paper presents a technique to reduce the low frequency ripple voltage of the dc output in a BIFRED converter with a small-sized energy storage capacitor. The proposed pulse width control method can be effectively used to suppress the low frequency ripple appeared in the dc output and still shows generally good performance such as low THD of input line current and high power factor. Using the small-sized energy storage capacitor, it has better merits of low cost and small size than a conventional BIFRED converter. The proposed technique is illustrated its validity and effectiveness through simulations.

1. 서 론

최근, IEC-555-2^[1]와 같은 고조파 규제를 만족하기 위해 거의 정현적인 입력전류 갖는 AC-DC 정류기의 역률 개선에 많은 관심과 연구가 이루어지고 있다. 이런 정류기들 중에서, BIFRED 컨버터(boost integrated flyback rectifier energy storage dc-dc converter)는 역률 개선을 위한 Boost 컨버터^[2]와 DC 출력전압을 조정하기 위한 Flyback 컨버터^{[3]-[5]}로 구성된 단일 방식의 컨버터이다. 이 시스템에서 역률 개선과 출력전압 제어 기법은 펄스 폭 변조 방식에 의해 이루어진다. 이때 출력 전압은 입력 전원에 따른 저주파 리플-전압을 갖게 되고 이에 따른 리플 전류가 발생하게 된다. 이런 리플 전류는 출력 측에 연결된 DC 출력 커패시터를 통하여 흐르게 된다. 이것은 커패시터의 동작 온도를 상승시키며 커패시터의 전기적인 수명을 단축시키게 되는 문제점을 가지고 있다. 뿐만 아니라, 이런 저주파 리플-전압은 전압제어기에 피드백 되고 입력전류의 파형 왜곡을 유발한다. 따라서, 이런 저주파 리플-전압을 줄이기 위해서 큰 에너지 저장

커패시터를 사용하며, 그것으로 인해 출력전압은 전 주기에서 일정하게 유지된다. 이것은 큰 에너지 저장 커패시터가 입력측의 저주파 리플을 흡수하고 출력측으로의 일정한 전압을 공급하기 때문에 출력 전압에는 저주파 리플이 존재하지 않게 된다. 따라서 출력 전압은 일정하게 유지 된다.

본 논문에서는 부가적인 회로나 소자를 추가하지 않고 작은 크기의 에너지 저장 커패시터를 사용하여 DC 출력 전압의 저주파 리플을 줄이기 위한 제어 기법을 제안한다. 제안한 제어 기법의 자세한 원리 및 그 타당성을 시뮬레이션을 통해 검증한다.

2. 기존의 BIFRED 컨버터

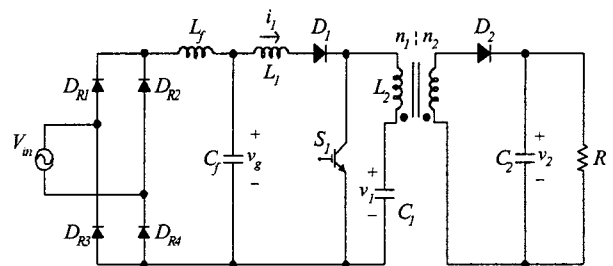


그림 1 BIFRED 컨버터
Fig. 1 The BIFRED Converter

그림 1 은 BIFRED 컨버터를 나타내고 있다. 이 시스템은 경부하시 에너지 저장 커패시터의 전압 스트레스가 증가하는 문제점 발생하여 이를 해결하기 위해 DC-DC 컨버터 단을 전 부하 영역에서 불연속으로 동작시킨다.^{[7],[9]}

그림 2 는 Boost와 Flyback 컨버터 모두 불연속으로 동작하는 BIFRED 컨버터의 이상적인 파형을 보여준다. 이때 입력 측 인덕터의 전류(i_1)은 변압기의 자화 인덕터의 전류(i_2)보다 먼저 방전되도록 설계되어야 한다. 만약 이 상태가 만족되지 않는다

면, i_1 은 입력 전압의 최고점에서 연속모드로 동작하게 된다. 그 결과 과전류를 발생시키고, 입력전류의 전 고조파 왜곡은 증가하게 된다. 동작모드는 그림 2에서 보여지는 것처럼 4개의 모드로 나누어진다.

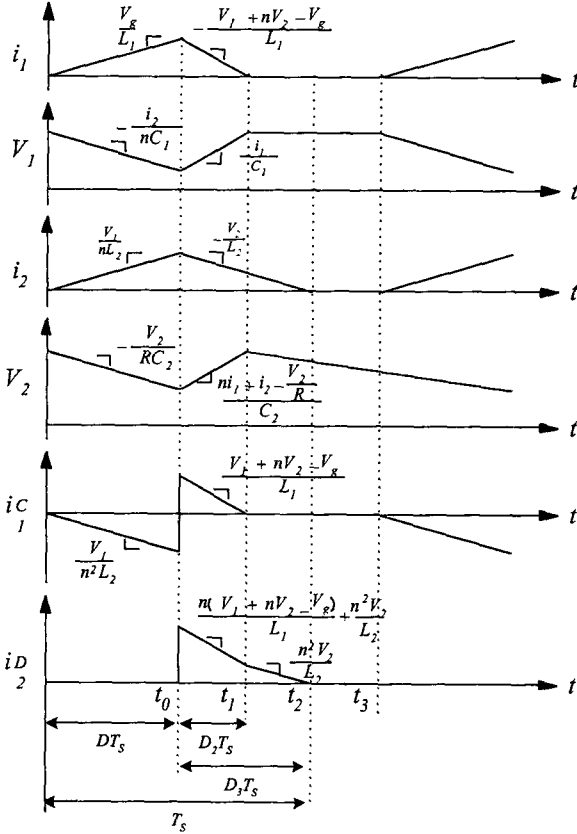


그림 2 불연속 모드로 동작하는 BIFRED 컨버터의 파형
Fig. 2 Discontinuous conduction mode waveform

2.1 정상상태 해석^[9]

불연속 모드로 동작하는 BIFRED 컨버터의 large signal model은 식 (1)~(3)과 같이 나타난다.

$$(iL_1)_{av} = \frac{D^2 T_s}{2L_1} (v_{in}(v_1 + nv_2)) \quad (1)$$

$$\left(C_1 \frac{dv_1}{dt} \right)_{av} = \frac{D^2 T_s}{2} \left\{ \frac{1}{L_1} \left(\frac{v_{in}^2}{v_1 + nv_2 - v_{in}} \right) - \frac{v_1}{L_2} \right\} \quad (2)$$

$$\left(C_2 \frac{dv_2}{dt} \right)_{av} = \frac{D^2 T_s n}{2} \left(\frac{1}{L_1} \frac{v_{in}^2}{v_1 + nv_2 - v_{in}} + \frac{1}{L_2} \frac{v_1^2}{nv_2} \right) - \frac{v_2}{R} \quad (3)$$

여기서, L_1 은 입력 측 인덕턴스, L_2 는 Flyback 컨버터 변압기의 자화 인덕턴스, T_2 는 스위칭 주기, D 는 스위칭 듀티비, n 은 Flyback 변압기의 턴비, R 은 부하 저항이다.

식 (2)로부터,

$$V_1 = \frac{V_{in peak} L_2}{L_1} \left\{ -\frac{2}{\pi} - M + \frac{2}{\pi} \frac{M^2}{\sqrt{M^2 - 1}} \left(\frac{\pi}{2} + \tan^{-1} \frac{1}{\sqrt{M^2 - 1}} \right) \right\} \quad (4)$$

여기서, $M = \frac{V_1 + nV_2}{V_{in peak}}$ 이다. 이 수식으로부터 에너지 저장 커패시터의 전압은 부하와 무관함을 알 수 있다.

식 (3)과 (4)를 사용하여 정상상태에서의 듀티비는 다음과 같이 나타난다.

$$D = \sqrt{\frac{2L_2}{RT_s} \frac{V_2^2}{V_1(V_1 + nV_2)}} \quad (5)$$

2.2 DCM 조건^[9]

불연속 모드에서의 동작을 만족시키기 위해 다음과 같은 조건을 만족시켜야 한다.

$$\frac{D_2}{D_2 + D_3} \leq 1 \quad (6)$$

$$\frac{V_1}{V_{in peak}} \geq 1 \quad (7)$$

$$L_{1max} = \frac{\left(\frac{V_{1min} n V_2}{V_{1min} + n V_2} \right)^2 T_s}{2 P_{out max}} \quad (8)$$

3. 리플-전압 저감 기법

에너지 저장 커패시터의 전압 스트레스를 줄이기 위해서 Boost와 Flyback 컨버터는 각각 불연속 모드로 동작한다. 불연속 모드에서 에너지 저장 커패시터의 전압 스트레스를 줄이는 것은 가능하지만 출력전압의 저주파 리플과 도통손실이 증가되는 문제점을 가지게 된다. 그러므로 큰 에너지 저장 커패시터와 같은 추가적인 소자를 공급해야 된다.

그러나 작은 에너지 저장 커패시터를 가지는 BIFRED 컨버터의 저주파 DC 리플-전압은 전력회로에 어떤 전력 반도체 소자의 사용이나 전기적으로 큰 용량의 커패시터 사용 없이 기존의 펄스 폭 변조 기법에 제안한 리플 저감 회로를 추가하여 쉽게 감소될 수 있다. 그림 3은 제안한 기법의 제어 블록도를 나타낸다. 이 제어 방식은 두개의 제어루프로 구성되어 있다. 하나의 제어 루프는 출력전압을 조절하기 위한 것이고 다른 하나는 DC 출력전압에서의 저주파 리플-전압 저감을 이루기 위해 제안한 제어루프이다. 제안한 리플-저감 기법은 에너지 저장 커패시터 전압의 저주파 리플 성분만을 필터링하여 제어 회로에 피드포워드 함으로써 이루어진다.

그림 4는 리플-전압 저감을 위한 자세한 제어기법을 나타낸다. 리플-전압 저감을 위한 제어 신호는 측정된 에너지 저장 커패시터 전압으로부터 고역 통과 필터와 역 이득을 통하여 쉽게 얻어진다. 여기서 고역 통과 필터의 차단 주파수는 120Hz의 저주파 리플-전

압의 AC 성분만을 고려하기 위한 필터 값으로 선택된다. 그림 5는 리플-저감을 이루기 위한 제어 신호가 실제 DC 리플-전압 파형으로부터 얻어지는 것을 보여준다. 제안한 DC 리플-전압 저감 기법은 불연속 모드 동작뿐만 아니라 연속 모드에서도 적용 가능하다.

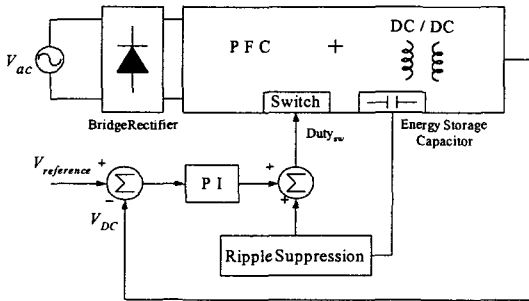


그림 3 제어 블록도
Fig. 3 Control block diagram

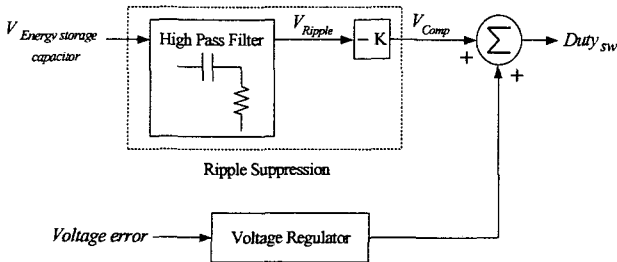


그림 4 듀티비 결정을 위한 자세한 블록도
Fig. 4 Determination of the duty signal

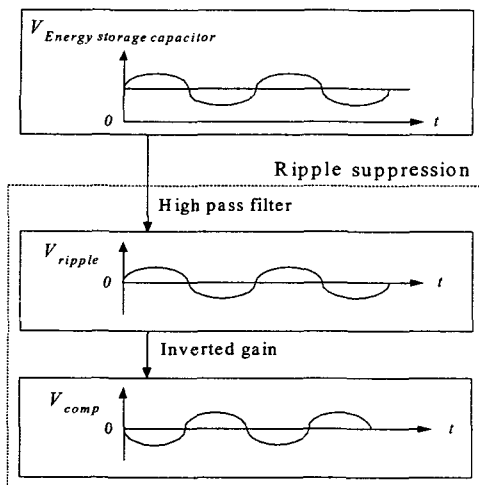


그림 5 리플-전압 저감 회로의 파형
Fig. 5 Waveforms in the ripple-voltage suppression circuit

4. 시뮬레이션

BIFRED 컨버터의 저주파 리플-전압 감소를 이루기 위한 제안한 제어기법의 타당성을 검증하기 위해 시뮬

레이션을 수행하였다. 시뮬레이션은 다음과 같은 조건하에서 동일하게 이루어졌다. 입력전압 : 단상 60Hz 220Vac, 출력 전압 : 48Vdc, 300W 컨버터를 제작하였으며 각 파라미터 값은 표 1에 나타난다.

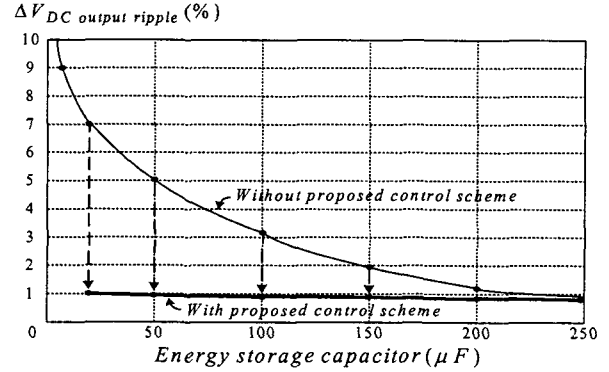


그림 6 에너지 저장 커패시터와 출력전압과의 관계
Fig. 6 Energy storage capacitor versus DC output ripple voltage

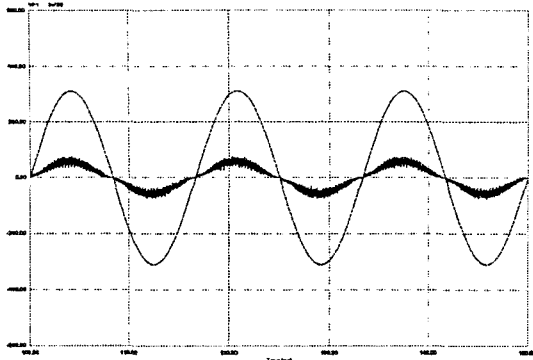
표 1 BIFRED 컨버터의 파라미터
TABLE 1 Parameters of the BIFRED Converter

Parameter	Value
L_1	260 μ H
C_1	20 μ ~ 220 μ F
n	2
L_2	350 μ H
C_2	250 μ F
R	8 Ω
L_f	262 μ H
C_f	1 μ F
f_s	30kHz

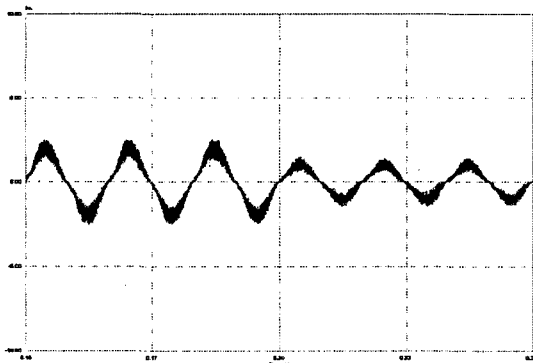
그림 6은 바이프레드 컨버터에서 에너지 저장 커패시터와 DC 출력 리플-전압과의 상관관계를 보여준다. 이 그림으로부터 알 수 있듯이 DC 출력 리플-전압은 에너지 저장 커패시터를 220 μ F에서 20 μ F로 줄임으로써 증가되어진다. 그때 DC 출력 전압의 리플은 1%에서 7%로 증가되는 것을 알 수 있다. 그러나 제안한 제어기법을 사용하였을 경우 DC 출력 리플-전압은 에너지 저장 커패시터가 작아짐에도 불구하고 약 1%로 제어되어진다.

4.1 불연속 도통 모드

그림 7(a)는 제안한 제어 기법을 사용한 불연속 모드로 동작하는 BIFRED 컨버터의 입력전압과 전류를 나타내고 있다. 그림 7(b)는 200ms에서 부하를 8 Ω -12 Ω 으로 부하를 가변 하였을 경우 입력전류의 파형을 나타낸다. 그림 7에서 보는 바와 같이 입력전류의 파형은 입력전압과 동상인 고품질의 정현파 형태로 나타나며 단위역률을 유지한다.

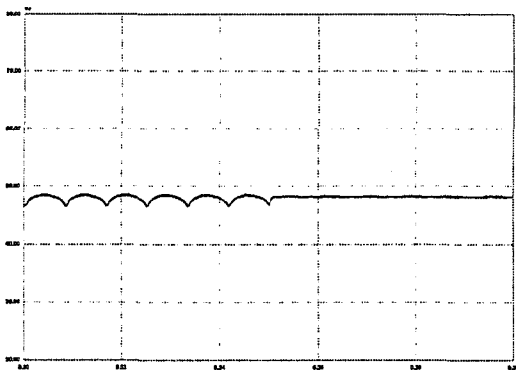


(a) 입력전압과 입력전류 파형($\times 30$)

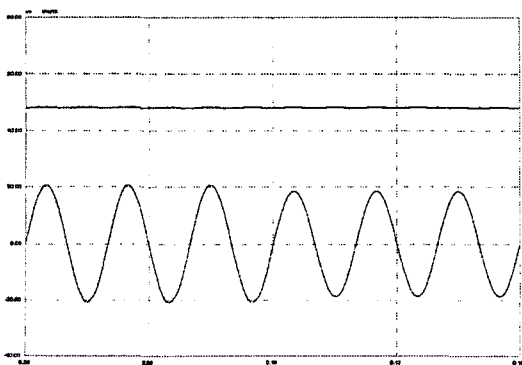


(b) 부하가변시 입력 전류 파형 (200ms에서)

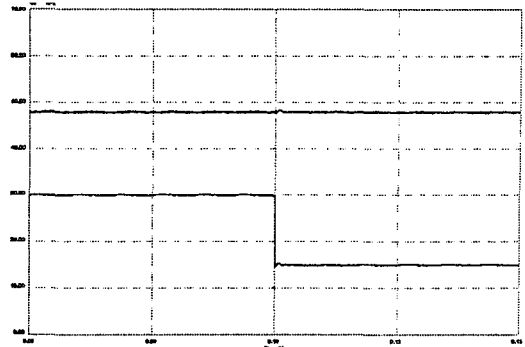
그림 7 불연속 모드 BIFRED 컨버터의 입력 전류 파형
Fig. 7 Input current waveform in DCM BIFRED converter



(a) 제안한 제어방식 적용 시 출력전압 파형(250ms에서)



(b) 입력전압 가변 시 출력전압과 입력전압($\times 15$) 파형 (100ms에서)



(c) 부하 가변 시 출력전압과 입력 전류($\times 5$) 파형 (100ms에서)

그림 8 불연속 모드 BIFRED 컨버터의 출력전압 파형
Fig. 8 Output voltage waveform in DCM BIFRED converter

그림 8(a)는 DC 출력 전압 파형의 시뮬레이션 결과이다. 파형에서 알 수 있듯이 리플-저감 기법을 사용하지 않았을 경우 저주파 즉 120Hz 리플이 출력전압에 포함되어 있다. 하지만 250ms에서 제안한 리플-전압 저감 제어기법을 적용하였을 경우 출력전압의 저주파 리플-전압이 현저히 감소함을 알 수 있다. 그림 8(b)는 100ms에서 311V-350V로 부하를 가변 하였을 경우 입력전압과 출력전압 파형의 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 그림 8(c)는 100ms에서 부하를 8 Ω -12 Ω 으로 가변 시 출력전압과 출력전류의 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 이 파형들로부터 출력전압은 일정하게 제어됨을 알 수 있다.

4.2 연속 도통 모드

그림 9는 제안한 제어 기법을 사용한 연속 모드로 동작하는 BIFRED Converter의 입력전압과 입력전류를 나타내고 있다.

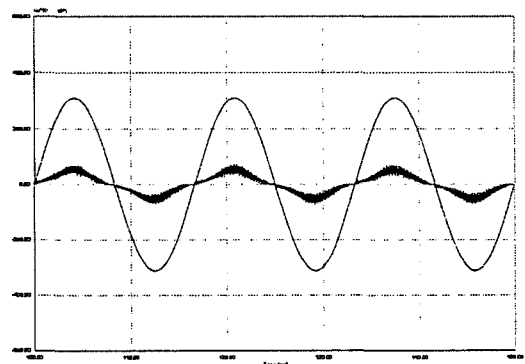


그림 9 연속 모드로 동작하는 BIFRED Converter의 입력전압과 입력전류 파형

Fig. 9 Input voltage and input current($\times 30$) waveform in CCM BIFRED converter

그림 10은 제안한 리플-전압 저감 기법을 사용

하였을 경우 DC 출력전압 파형의 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 이 파형에서 보여주는 바와 같이 저주파 리플 성분은 현저히 감소되었다. 그림 7-10으로부터 알 수 있듯이 본 논문에서 제안된 제어기법의 타당성을 시뮬레이션 결과를 통하여 검증할 수 있다.

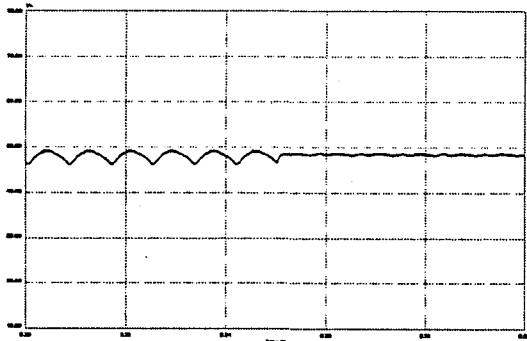


그림 10 연속 모드로 동작하는 BIFRED 컨버터에 제안한 제어 방식 적용 시 출력전압 파형(250ms에서)
Fig. 10 With the proposed control method(at 250ms) in CCM BIFRED converter

표 2 BIFRED 컨버터의 비교
TABLE 2 Comparison of the BIFRED Converter

BIFRED	Power factor correction	Energy storage capacitor	Output ripple voltage
Conventional	High	220u	1%
With small-sized energy storage capacitor	High	20u	7%
Using proposed control method	High	20u	1%

표 2는 기존 제어를 갖는 BIFRED 컨버터와 본 논문에서 제안된 제어기법을 이용한 BIFRED 컨버터의 출력 리플-전압의 크기 및 역률 그리고 에너지 저장 커패시터를 각각 비교하였다. 표 2로부터 알 수 있듯이 본 논문에서 제안된 제어기법을 갖는 컨버터는 기존의 컨버터와 거의 유사한 결과를 얻었으며 출력전압의 저주파 리플이 현저히 감소된 특성을 갖음을 알 수 있다. 이러한 특성이 본 논문에서 제안된 제어기법의 우수한 결과이다.

5. 결 론

본 논문에서는 단위역률을 갖는 BIFRED 컨버터를 이용한 새로운 120Hz DC 출력 리플-전압 저감 제어 기법을 제안하였다. 또한, 제안한 제어기법의

타당성을 검증하기 위해 시뮬레이션을 수행하였다. 제안한 제어기법의 장점은 다음과 같다.

- 단위역률과 일정한 출력전압을 가진다.
- 간단한 제어기법에 의해 DC 출력 전압의 120Hz 저주파 리플이 현저히 감소하였다.
- 리플-전압의 감소에 따른 에너지 저장 커패시터의 전기적인 용량을 감소시킬 수 있다.

따라서, 이와 같은 특성을 갖는 제안한 제어기법을 사용한 BIFRED 컨버터는 각종 정류기 분야에 단위역률로 안정적인 전원을 공급하는 전원장치로 더욱 더 적합할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- [1] International Electrotechnical Commission, Subcommittee 77A, "Equipment Connection to the public Low Voltage System," Draft-Revision of IEC publication 555-2, July 1989.
- [2] C.P. Henze and N. Mohan, "A digitally controlled ac to dc power conditioner that draws sinusoidal input current," in Proc. IEEE PESC'86, pp.531-540, 1986.
- [3] R. Erickson, M. Madigan and S. Singer, "Design of a Simple High-Power-Factor Rectifier Based on the Flyback Converter." IEEE Applied Power Electronics Conference, Conference Proceedings, pp. 792-80, 1990.
- [4] M. J. Willers, M. G. Egan, J. M. D. Murphy, and S. Daly, "An ac-dc converter with low input distortion and near unity power factor," in Proc. EPE'93, VOL. 4, pp. 1-7, 1993.
- [5] S. Freeland, "Input Current Shaping for single Phase AC-DC Power Converters." Ph. D. thesis, part 2, California Intitute of Technology, October 1987.
- [6] M. Madigan, R. Erickson and E. Ismail, "Integrated high quality rectifier-regulators," in Proc. IEEE. PESC'92, PP. 1043-105, 1992.
- [7] M. J. Willers, M. G. Egan, J. M. D. Murphy, S. Daly, "A BIFRED converter with a wide load range," in Proc. IEEE IECON'94, bologna, Italy, pp.226-231, 1994.
- [8] D. Y. Lee, I. Choy, D. S. Hyun, "DC Voltage-ripple Suppression in Three-phase Buck Diode Rectifiers with Unity Power Factor," inProc. IEEE. EPE'99, 1999.
- [9] M. J. Willers, M.G.Egan, S.Delay and J.M.D.Murphy, "Analysis and design of a practical discontinuous conduction-mode BIFRED converter", Industrial Electronics, IEEE Transactions on, Volume: 46 Issue:4, pp.724-733, Aug.1999.