

◆ 특집 ◆ 직선·회전모터 구동 이송·회전체 연구 III

인터리빙 PFC 를 적용한 모터구동 인버터 시스템 설계

Design of the Inverter Motor Drive System Applied to PFC using Interleaving Method

윤성식^{1,✉}, 최현의¹, 김태우¹, 안호균¹, 박승규¹, 윤태성¹, 곽군평¹
Seong Sik Yoon^{1,✉}, Hyun Eui Choi¹, Tae Woo Kim¹, Ho Kyun Ahn¹, Seung Kyu Park¹, Tae Sung Yoon¹
and Gun Pyoung Kwak¹

¹ 창원대학교 전기공학과 (Department of Electrical Engineering, ChangWon Univ.)
✉ Corresponding author : yan@changwon.ac.kr, Tel: 010-4573-5208

Manuscript received: 2010.1.25 / Revised: 2010.2.23 / Accepted: 2010.2.25

In this paper, using interleaved power factor correction how to improve the inverter efficiency studied. Interleaved method can reduce the conduction losses and the inductor energy. Generally, critical conduction mode (CRM) boost PFC converter used low power level because of the high peak currents. if you use the interleaved mode, CRM PFC can be used medium or high power application. interleaved CRM PFC can reduce current ripple for higher system reliability and size of buck capacitor and EMI filter size. Interleaved CRM PFC that is installed in front of inverter can maintain the constant voltage regardless of the input voltage.

Key Words: Inverter (인버터), Power Factor Correction (역률개선회로), Harmonics (고조파), Boost Converter (승압형 컨버터), Interleaving (인터리빙), Critical Conduction Mode (임계동작모드)

1. 서론

최근 석유에너지 고갈에 대비하여 새로운 에너지 개발과 함께 에너지의 효율적 관리 또한 이에 못지않는 중요한 상황이다.

상용전원을 전파 정류하는 경우 전압은 정현파이지만 전류 쪽은 고조파 성분을 많이 포함한 펄스형태를 띄게 된다.

이러한 고조파 성분은 역률을 저하시켜 발전 효율을 떨어뜨리며, 전류의 실효값을 증가시켜 전력품질 저하 및 기기제품의 오동작과 같은 악영향을 주게된다.¹

이러한 고조파 성분을 줄이기 위하여 입력전류의 파형을 전압 파형의 형태인 정현파로 만드는 방식을 역률 개선 회로(Power Factor Correction: PFC)라 한다. 역률 개선 회로 중에서는 수동 필터

를 사용하는 수동 역률 개선 회로와 스위칭을 통한 능동 역률 개선 회로로 나눌 수 있다.

중·대형 기기에는 능동 역률 개선 회로 중에서도 피크전류가 낮은 연속도통모드(Continuous Conduction Mode : CCM)를 주로 사용하여 왔다. 하지만 연속 도통 모드 역률 개선 회로는 하드 스위칭 컨버터로 동작하기 때문에 출력 정류기에서의 스위칭 손실이 크고, 역회복 손실도 큰 단점을 가지고 있었다.

임계동작모드(Critical Conduction Mode : CRM)는 영전류 스위칭 동작을 하기 때문에 인터리빙 방식을 적용하여 피크전류를 낮추면 중·대형 기기에 적용 가능하다. 따라서 본 논문에서는 인터리빙 임계 동작 모드 역률 개선 회로를 300W 유도전동기에 적용하여 고조파 성분을 줄이고 효율을 높이는 방법에 대해 논의하고자 한다.

2. 역률개선회로

2.1 승압형 정류기

승압형 형태의 정류기는 입력전압을 다이오드 정류하고 DC/DC 컨버터 중 승압형 회로를 사용하는 것이다. 역률개선회로에서 승압형 컨버터회로를 사용하는 이유는 인덕터가 입력단에 위치하고 있어서 입력전류의 파형이 연속적이고 낮은 리플을 제공하여 제어에 용이하기 때문이다.

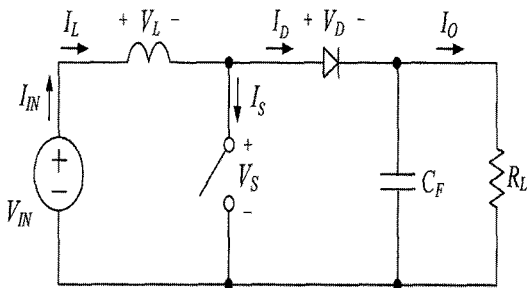


Fig. 1 Basic circuit of boost converter

승압형 컨버터는 스위치가 ON 되면 인덕터 L 에 입력전압이 걸리게 되어 입력 에너지가 인덕터 L 에 축적된다. 출력측에서는 다이오드 D 에 출력 전압이 걸리게 되고, 출력 측 캐패시터 C 의 전하가 부하측으로 방전된다. 스위치가 OFF 되면 인덕터 전류는 다이오드 D 를 통해서 출력측에 전달된다.

출력전압의 평균값 V_o 일 때, 인덕터 전압의 평균값은 식 (1)로 표현된다.

$$V_L = V_i \cdot DT + (V_i - V_o)(1 - D)T \quad (1)$$

여기서 D 는 시비율, T 는 스위치의 주기이다. 정상상태에서 인덕터 전압의 평균값은 0 이기 때문에 입력전압과 출력전압은 식 (2)로 나타내어지며 승압하는 것을 알 수 있다.

$$V_o = \frac{V_i}{1 - D} \quad (2)$$

2.2 임계모드동작

임계 모드 동작은 연속 도통 모드 동작과 불연

속 도통 모드 동작 사이의 제로 크로싱 경계부에서 동작하는 것으로, 가변 주파수 방식을 이용한 다.

불연속 도통 모드(Discontinuous Conduction Mode: DCM)의 경우 고정주파수 방식을 사용하여 일정 시비율로 제어하는 방식으로 입력전류나 입력전압을 검출할 필요없이 출력 피드백만을 받아 제어하므로 회로가 간단하지만 전류 리플이 크고, 전류파형이 연속적이지 못해 입력전압이 낮은 구간에서 불연속 구간이 발생 성능이 낮다. 현재는 대부분의 저용량기의 경우 DCM 방식보다는 임계모드 방식을 사용하고 있다.

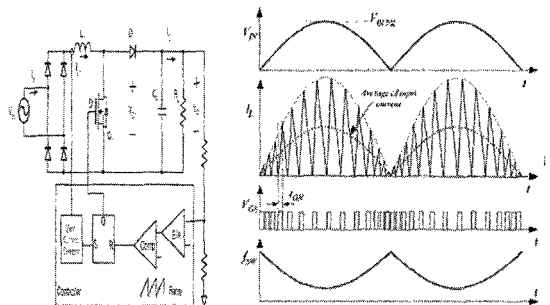


Fig. 2 Critical Conduction Mode

CRM 방식의 회로를 보면 인덕터 전류가 0 이 될 때 영전류 스위칭 회로를 통해 스위치를 ON 시키고 피드백 성분을 이용하여 일정전압을 유지하도록 스위치를 OFF 한다. 그 결과 듀티를 일정하게 두고 주파수가 가변되는 형태를 가지게 되는 것이다. Fig. 2 에서 보는 바와 같이 피크전류가 평균전류의 두배의 값을 가지는 것을 확인할 수 있다.

비록 피크 전류가 증가하는 단점이 있지만 승압 인덕터 전류가 각 스위칭 사이클 시작 전에 항상 0 으로 복귀하므로, 메인 스위치의 영전류 스위칭 조건 하에서 켜지는 순간 출력다이오드는 영전류 스위칭 하에서 꺼진다. 이경우 역회복과 관련된 손실을 최소화함으로써 가격이 낮은 출력 정류 다이오드를 사용할 수 있다. Fig. 3 은 CCM 회로와 CRM 회로의 전류 파형을 통해 역회복 전류를 나타내고 있다.

인터리빙 방식을 사용하여 CRM 회로를 구성하면 단상에서의 높은 피크 인덕터 전류를 극복가능하다.

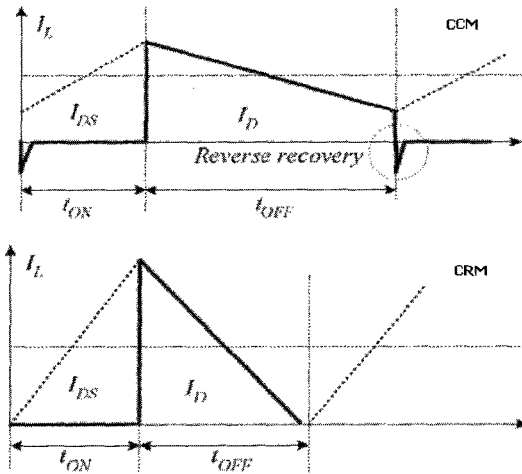


Fig. 3 CCM vs. CRM control

2.3 인터리빙 임계모드동작

인터리빙 방식을 이용하는 경우 출력되는 전류 및 입력전류는 각 상에 흐르는 전류의 합으로 나타내어진다. 상에 흐르는 전류를 180도의 역위상(out-of-phase)으로 동작시키면 인덕터 전류에 의해 생성된 입력 리플 전류를 감소시키며 서로 상쇄된다.

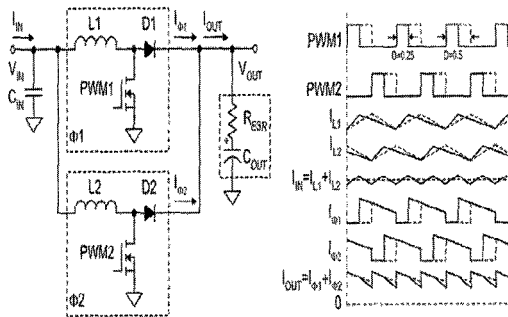


Fig. 4 Interleaving Boost Stage

Fig. 4 를 보면 DC 입력을 2 상 인터리빙 승압 컨버터로서 개별 승압 전원단을 사용하고 있다. 각 PWM 단을 통해 180도 위상차를 가지고 동작하는 것이다. 총 입력전압은 각 상에 흐르는 인덕터 전류의 합이 되므로 듀티사이클 D가 0.5 라면, 입력리플전류는 이상적으로 0 이된다. 듀티가 0.5 가 아니더라도 단상에 비해 양호한 전류 리플 감소를 가져올 수 있다.

다이오드와 커패시터에서 RMS 전류를 각 모

Table 1 Comparison of rated voltage

	Single phase CCM PFC	Single phase CRM PFC	Interleaved CRM PFC
$I_{D(rms)}$	$\frac{\sqrt{8\sqrt{2}} \left(\frac{P_{out}}{\eta}\right)^2}{\sqrt{3\pi \cdot V_{in(crm)} \cdot V_{or}}}$	$\frac{2}{\sqrt{3}} \frac{\sqrt{8\sqrt{2}} \left(\frac{P_{out}}{\eta}\right)^2}{\sqrt{3\pi \cdot V_{in(crm)} \cdot V_{or}}}$	$\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \frac{\sqrt{8\sqrt{2}} \left(\frac{P_{out}}{\eta}\right)^2}{\sqrt{3\pi \cdot V_{in(crm)} \cdot V_{or}}}$
$I_{C(rms)}$	$\frac{\sqrt{8\sqrt{2}} \left(\frac{P_{out}}{\eta}\right)^2}{\sqrt{3\pi \cdot V_{in(crm)} \cdot V_{or}} \left(\frac{P_{out}}{V_{or}}\right)}$	$\frac{3\sqrt{2}}{9\pi \cdot V_{in(crm)} \cdot V_{or}} \left(\frac{P_{out}}{V_{or}}\right)^2$	$\frac{16\sqrt{2}}{9\pi \cdot V_{in(crm)} \cdot V_{or}} \left(\frac{P_{out}}{V_{or}}\right)^2$

드의 전류를 비교하면 Table 1 과 같은 결과를 얻을 수 있다.

인터리빙 PFC 회로는 단일 스테이지 PFC 회로와 비교하여 설계 시 요구되는 총 인덕터 에너지를 감소시킬 수 있으며, 전도손실 또한 감소시킬 수 있다. 그리고 경부하에서 하나에 상만 선택 운전 시키면 소용량에서 하나의 CRM 운전시키는 것과 같은 형상을 일으켜 효율을 증가시킬 수 있다.

3. 회로설계

3.1 역률개선회로 설계

회로의 설계는 기본적인 승압회로를 기반으로 설계한다.

AC 전원 라인에 바리스터, NTC 그리고 퓨즈를 사용하여 서지 전압과 돌입 전류로부터 회로를 보호하고 커패시터를 이용하여 노이즈를 필터링한다.

정류 후에는 기본적인 승압형 회로에서 인덕터와 스위칭 소자, 다이오드를 병렬 접속시켜 회로를 제작하였다. 일반적인 회로보다 입력 리플이 작기 때문에 작은값의 입력 커패시터를 사용할 수 있었으며, 다이오드 및 스위칭소자들은 출력전압과 전류값을 정격으로 결정하였다.

설계한 인터리빙 방식 임계 모드 동작 역률 개선 회로의 파워부를 Fig. 5 에서 나타내었다.

회로에서 인덕턴스값은 입력 전압 중 가장 낮은 입력 전압의 듀티를 구하여 최소 주파수에 맞는 인덕턴스 값을 구하였다. 수식은 식 (3)과 같다.

$$L_1 = L_2 = \frac{\eta \times V_{in-min}^2 \times D_{peak-low}}{P_{out} \times f_{min}} \quad (3)$$

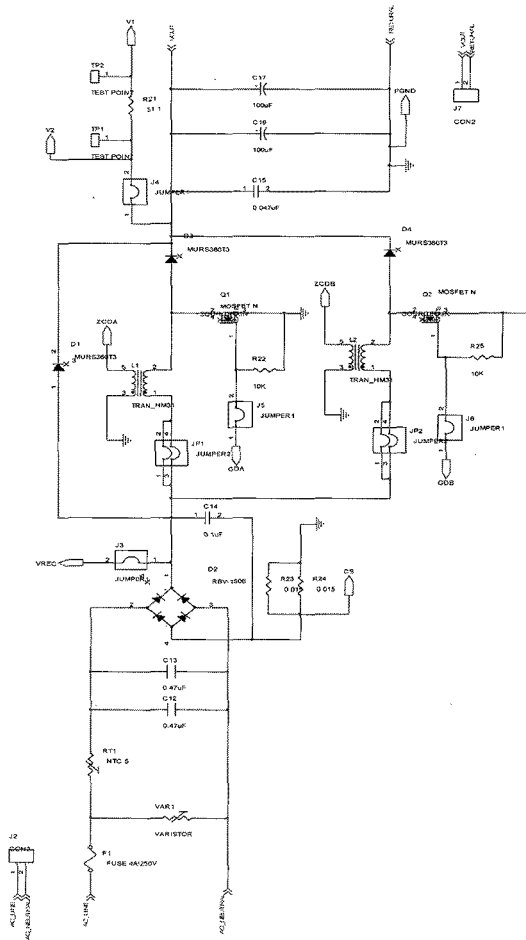


Fig. 5 Interleaving power stage

컨버터가 일정한 ON 타임을 가지기 위해 필요한 보조권선은 모든 사이클에서 검출 가능해야 하기 때문에 최대 입력전압에서 2V 를 검출하도록 권선비를 결정하면 식 (4)와 같다.

$$\frac{N_p}{N_s} = \frac{V_{out} - V_{in-max}}{2V} \sqrt{2} \quad (4)$$

다음 Fig. 6 은 역률 개선 회로의 제어 동작을 위한 제어 IC 의 주변회로를 나타내었다.

제어부 설계는 인터리빙 임계 모드 동작 역률 개선 회로 소자인 UCC28060 을 이용하여 설계하였다.

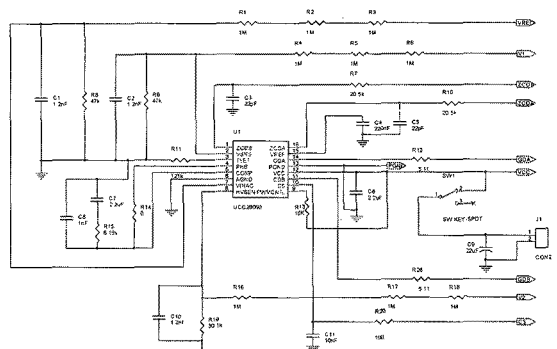


Fig. 6 Controller circuitry

3.2 인버터 회로 설계

인버터 회로의 설계는 IPM(Intelligent power module)중 V_{CES} 600V I_{pk} 15A 급 IRAMS10UP60A 을 이용하여 구성하였다. 다음 Fig. 7 은 설계한 회로도를 나타내었다.

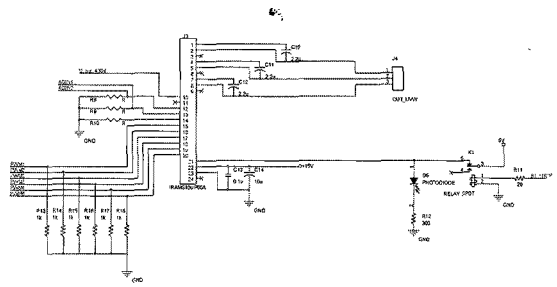


Fig. 7 Inverter circuitry

인버터의 제어 프로세서는 TI 사의 DSP TMS320F2812 를 이용하여 SV-PWM 방식을 적용하였다.

일반적인 커패시터 입력형 정류회로의 경우 입력전압의 변동을 고려해야 하지만 PFC 회로 사용시 전압은 항상 일정하므로 인버터에서는 전압 변동을 고려하지 않아도 되는 장점이 있다.

4. 실험 및 결과

인터리빙 임계 모드 동작 역률 개선 회로를 이용한 전압원에 대한 실험을 통해 역률개선 효과에 대해 살펴보고, SV-PWM 방식을 적용하여 유도전동기를 구동하여 보았다. 전체 시스템 설계 사양은 Table 2 와 같다.

Table 2 Design specification

Line input voltage	85~265VAC
Line Input frequency	60Hz
PFC output voltage	390VDC
Output power	300W
Efficiency	>90% at full load
PFC switching frequency	45KHz~540kHz
Max. ambi. temp. around PFC	70°C

전체 시스템은 Fig. 8 과 같이 PFC 회로 부분, Inverter 회로 부분 그리고 부하 모터로 구성하였 다.

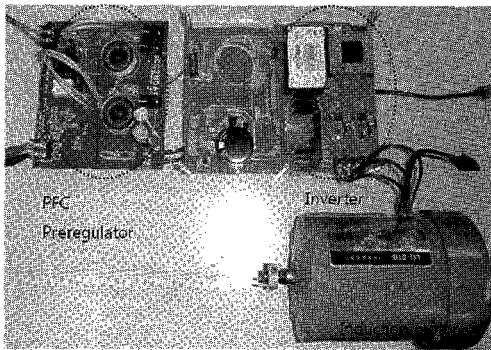


Fig. 8 System configuration

먼저 역률개선회로에 대해 살펴보면 Fig. 9 를 통해 입력 전류 파형의 고조파 성분을 분석해 보 았다.

역률 개선 회로 적용 전 입력 전류는 펄스성 전류가 흐르는 것을 Fig. 9(a)을 통해서 확인할 수 있다. 3 고조파에서 한계치 110 에 비해 581 을 포함 하는 등 모든 차수 고조파에서 많은 고조파 성분 이 포함되어 국제규격 IEC61000-3-2 를 만족시키지 못하는 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 9(b)는 역률 개선 회로를 적용한 입력 전류 파형으로써 부하가 증가하여 RMS 전류가 2.826A 에서도 모든 차수 고조파가 국제규격 IEC61000-3-2 에 만족하는 것을 볼 수 있다.

인터리빙 CRM PFC 회로의 출력전압 파형과 인덕터 전류 파형은 Fig. 10 에 나타내었다. 인덕터 하나에 흐르는 전류파형은 단일 CRM PFC 파형과 같지만 총 인덕터 전류는 CCM PFC 와 같

은 연속적인 파형모양을 가지는 것을 확인할 수 있었다.

공간 벡터 PWM 방식으로 인버터를 구동시킨 결과 Fig. 11 과 Fig. 12 로 나타내어 진다.

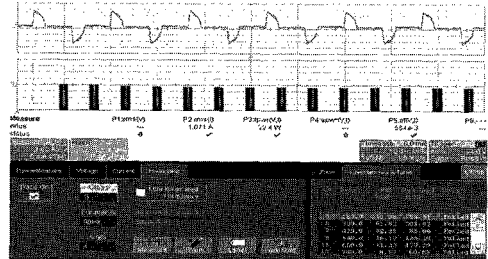


Fig. 9(a) Current and harmonic waveforms (without PFC)

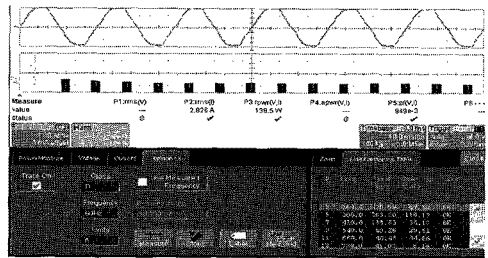


Fig. 9(b) Current and harmonic waveforms (with PFC)

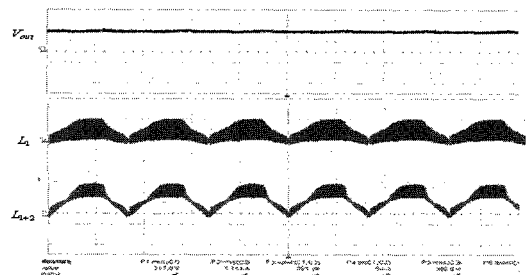


Fig. 10 Output voltage and Inductor current

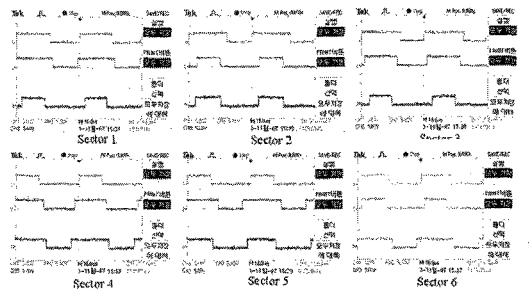


Fig. 11 Space Vector PWM

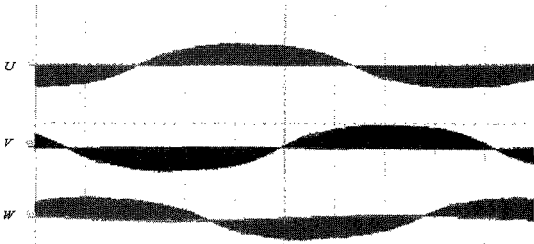


Fig. 12 Operation signal of inverter

Table 3 Input and Output efficiency

Input voltage	218V	Power factor	0.984
Input current	1.43A	Input power	311.74W
Output voltage	398V	Output power	298.9W
Output current	751mA	Efficiency	96%

실험결과 높은 효율의 인버터구동이 가능하다.

5. 결론

높은 피크전류로 인하여 중·대형 기기에 부적합한 CRM PFC 회로 방식을 인터리빙 방식을 사용하여 인덕터전류 파형을 CCM PFC 와 유사한 연속전류파형으로 만들 수 있다.

인터리빙 CRM PFC 방식의 사용은 단일 CCM PFC 방식과는 달리 영전류 스위칭을 통해 다이오드 회복손실이 없으므로 효율이 증대된다. 그리고 낮은 전력레벨에서 단일 CRM 회로동작을 통해 경부하 시 효율을 증대시킬 수 있다.

일반 정류회로에서 역률개선회로를 첨가하면 인버터 전압의 DC 링크 전원단의 전압을 안정시킬 수 있고, DC 링크 전원단이 승압되어 전류정격이 줄어드는 장점을 가져온다. 그리고 기기의 과열, 효율의 저하 기기의 수명단축을 유발하는 고조파성분을 제거할 수 있기 때문에 회로의 신뢰성이 보장된다.

역률의 저하는 발전소에서 발생된 전력중의 많은 부분이 무효전력으로 생산하게 되므로 역률개선회로를 통해 에너지를 효율적으로 사용하는 방법이 중요하다.

본 논문은 역률개선회로 중 인터리빙 CRM 방식을 사용하여 인버터 구동시스템의 효율을 보다 높일 수 있는 방법에 대해 논의하였다.

후 기

본 연구는 2008 년도 창원대학교 연구비와 지방기술혁신사업(RTI04-01-03) 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. Miwa, B. A., Otten, D. M. and Schlecht, M. F., "High Efficiency Power Factor Correction using Interleaving Techniques," Proc. IEEE Applied Power Electronics Conf., pp. 557-568, 1992.
2. Elmore, M. S., "Input Current Rippled Cancellation in Synchronized, Parallel Connected Critically Continuous Boost Converters," Proc. IEEE Applied Power Electronics Conf., Vol. 1, pp. 152-158, 1996.
3. Ishii, T. and Mizutani, Y., "Power Factor Correction using Interleaving Technique for Critical Mode Switching Converters," Proc. IEEE Applied Power Electronics Specialists Conf., pp. 905-910, 1998.
4. Michael, O. L., "An Interleaving PFC Pre-Regulator for High-Power Converters," Texas Instruments Power Supply Design Seminar, SEM-1500, 2003.
5. Tripathi, R. K., Das, S. P. and Dubey, G. K., "Mixed-mode operation of boost switch mode rectifier for wide range of load variations," IEEE Trans. Power Electron., Vol. 17, No. 6, pp. 999-1009, 2002.