

역률제어 기능을 갖는 고효율 공진형 컨버터를 이용한 3상 BLDC 전동기 구동 시스템

이희준* 박상훈*, 박소리*, 원충연*, 정용채**, 김영렬***
성균관대학교*, 남서울대학교**, 안양대학교***

Three Phase BLDC Motor Drive System using High Efficiency Resonant Boost Converter with Power Factor Correction

Hee-Jun Lee*, Sang-Hoon Park*, So-Ri Park*,
Chung-Yuen Won, Yong-Chae Jung**, Young-Real Kim***
Sungkyunkwan University, Namseoul University, Anyang University

ABSTRACT

This paper presents soft-switching boost converter adding to auxiliary switch and resonant circuit in conventional boost converter. This approach features a two power stage which implements both conventional BLDC motor speed control and input power factor correction. This converter is especially useful in application such as home appliance. Theoretical analysis and simulation results are presented.

1. 서론

가전제품의 성능을 향상시키고 효율을 증가시키려면 인버터 회로가 필수적이다. 이러한 인버터에 필요한 전원을 확보하기 위해서 일반적으로 상용교류전원을 정류하여 사용한다. 이러한 일반적인 전원부의 정류회로는 다이오드와 평활용 커패시터를 사용한다. 이와 같은 일반적인 정류회로는 입력전류가 입력전압의 최대값에서 순간적으로 흐르는 펄스 형태의 파형이 되므로 역률이 저하되게 된다.[1] 또한, 입력전류에는 많은 고조파 성분들이 포함되어 되고 전체 시스템에 고조파로 인한 많은 문제를 발생 시킬 수 있다. 따라서 기존에는 입력전류 파형을 개선하기 위해 역률제어용 부스트 컨버터 회로가 추가적으로 사용되었다. 하지만 이러한 방법은 입력전류의 고조파를 저감시키는 반면 부스트 컨버터의 스위칭으로 인한 스위칭 손실이 증가하게 된다.[2][3] 일반적으로 하드 스위칭 방식의 전력변환장치는 스위칭 소자의 턴-온과 턴-오프 시에 주기적으로 스위칭 손실이 발생하게 된다. 이는 시스템의 전체 효율을 감소시키는 가장 큰 원인으로 작용한다. 이러한 이유로 최근에는 공진을 이용하여 스위칭 손실을 저감시키는 방법에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 이와 같은 이유로 본 논문에서는 가정용 진공청소기에 사용되는 3상 BLDC 전동기 구동을 위한 인버터 DC-Link 전압용 전원부에 역률제어가 가능한 소프트 스위칭 부스트 컨버터를 사용하였다.

제안된 컨버터의 회로는 입력단 전압과 전류를 단위역률로 제어하기 위한 역률제어부와 일반 부스트 컨버터에 공진회로를 부가한 소프트 스위칭 부스트 컨버터이다. 구체적으로 주 스위치, 보조 스위치, 2개의 공진 커패시터, 공진 인덕터 그리고 2개의 다이오드로 구성되어 있다.[4] 제안한 소프트 스위칭 부스트 컨버터는 일반적인 부스트 컨버터에 보조 공진 회로를 추가하여 보조 스위치 및 승압용 주 스위치가 모두 영전압 부근에서 부분 공진을 통해 소프트 스위칭을 한다. 그러므로 일반적인 부스트 컨버터

에 비해 스위칭 손실을 줄일 수 있다.

본 논문에서는 입력단 역률제어 기능과 새로운 소프트 스위칭 부스트 컨버터를 이용하여 전원부 시스템의 고조파 성분과 스위칭 손실을 저감한 새로운 컨버터를 제안하였다.

2. 본론

2.1 소프트 스위칭 역률 제어

그림 1의 좌측 상단에 있는 PI 제어기1은 제안된 공진형 출력전압을 제어한다. 이 제어기는 출력전압을 검출하여 전압의 기준값과 실제값의 차로 인한 오차값이 입력이 된다. 제어기의 출력은 입력전류의 순시치가 된다. 입력 전류의 순시치는 직류레벨이기 때문에 역률제어를 하기 위한 위상각 역시 직류레벨이어야 한다. 따라서 입력전압은 절대값 회로를 걸친 후 입력전압의 최대값으로 나누어 입력전압의 위상을 검출하게 된다. 검출된 위상값은 전압제어기의 입력전류 순시치와 곱해서 입력전류의 기준값이 된다. 정류기 출력전류를 검출하여 전류 기준값과 오차값을 구한다. 이 오차값이 PI 제어기 2의 입력이 되고, 제어기의 출력이 PWM을 만들기 위한 기준파가 된다. 이 기준파는 톱니파와 비교하여 PWM 신호가 만들어지고 스위칭 신호가 된다.

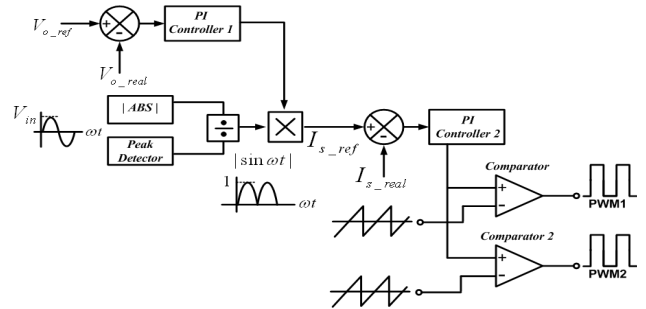


그림 1. 제안된 소프트 스위칭 부스트 컨버터의 역률제어 블록도.
Fig 1 FFC control block diagram of proposed soft switching boost converter.

2.2 역률제어 기능을 갖는 소프트 스위칭 부스트 컨버터

제안된 컨버터에서 역률제어를 하기위해 입력단 상용교류전원과 다이오드 정류기 사이에 별도의 리액터를 추가하지 않고 컨버터의 주 인덕터가 역률제어용 리액터 및 승압용 인덕터로 사용된다.

이때, 그림 1과 같은 방법으로 역률제어를 하게 되면 그림 2의

주 인덕터 L_1 에 흐르는 전류는 입력전압과 위상이 동일한 단위역률로 제어되며 불연속 모드로 전류가 흐르게 된다. 이 컨버터는 기본적인 승압형 컨버터에 보조 스위치와 공진 커패시터 2개, 공진 인덕터와 다이오드 두 개가 더해져 주 스위치 및 보조 스위치의 소프트 스위칭을 가능하게 한다.

주스위치가 영전압 스위칭을 하기 위해 보조 회로의 소자들의 공진을 이용한다.

보조 스위치 또한 공진 회로에 의해 소프트 스위칭을 한다. 따라서 기존의 스위칭 컨버터에 비하여 스위칭 손실을 줄여 같은 주파수에서 전체 시스템 효율을 향상시킬 수 있다.

기존의 역률 개선회로는 스위칭 전원부의 정류부분에 해당하는 평활용 커패시터를 사용하였으나 그림 2에서 주 스위치 S_1 , 보조 스위치 S_2 와 공진회로를 포함한 승압형 컨버터를 사용하여 역률 개선 및 스위칭 손실을 줄였다.

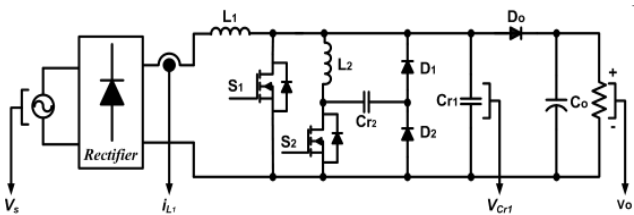


그림 2. 제안된 역률 개선용 소프트 스위칭 부스트 컨버터
Fig 2 Proposed soft switching boost converter for PFC

2.4 제안된 회로의 동작 모드

그림 3은 제안된 컨버터의 9가지의 동작모드를 나타내었다. 정상상태에서의 동작원리를 분석하였고 모든 소자는 이상적인 것으로 가정한다.

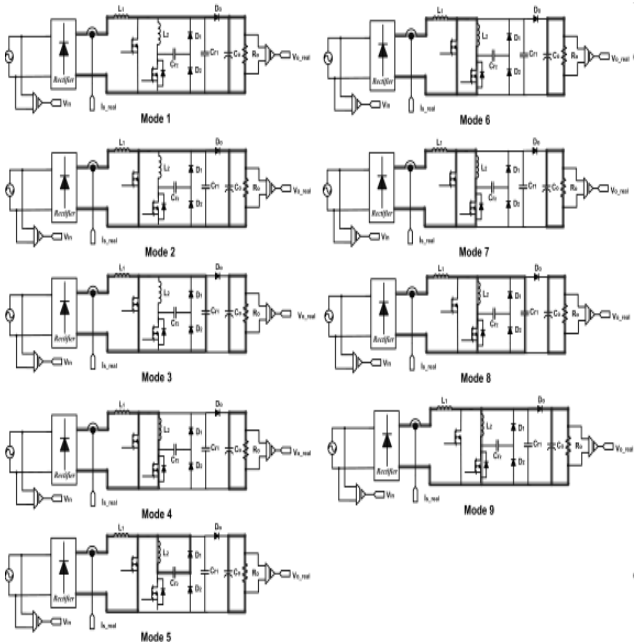


그림 3. 제안된 소프트 스위칭 부스트 컨버터의 동작 모드
Fig 3 Operation mode of proposed soft switching boost converter.

Mode 1 ($t_0 \sim t_1$) : 모든 스위치가 턴-오프되어 승압용 인덕터에 축적된 에너지가 주 다이오드 D_0 을 통해 부하단으로 전

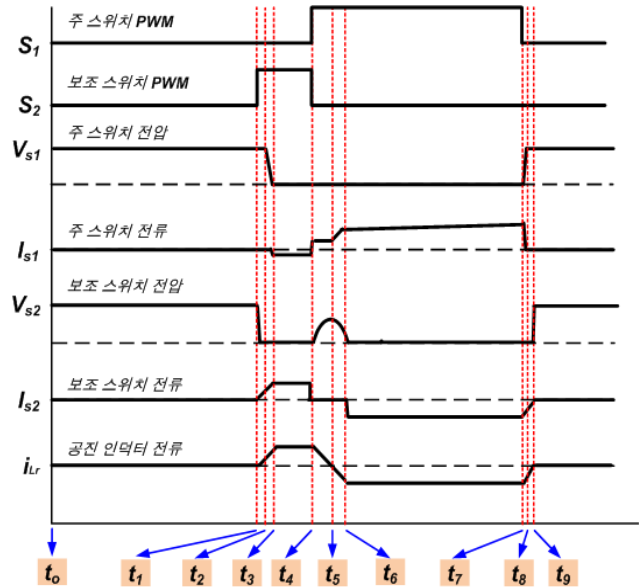


그림 4. 제안된 소프트 스위치 부스트 컨버터의 주요 파형

Fig 4 Key waveforms of proposed soft switching boost converter. 달된다. 이때 보조 스위치가 턴-온하며 모드 2가 시작된다.

Mode 2 ($t_1 \sim t_2$) : 보조 스위치가 턴-온되면 공진 인덕터 L_r 을 통해 전류가 흐르고 공진 인덕터에 흐르는 전류는 선형적으로 증가하게 된다.

Mode 3 ($t_2 \sim t_3$) : 공진인덕터와 승압용 인덕터에 흐르는 전류의 양이 같아지는 순간에 시작된다. 이때 주 다이오드는 차단되며 공진 커패시터 C_r 과 공진인덕터는 공진하게 된다.

Mode 4 ($t_3 \sim t_4$) : 공진 커패시터 C_r 과 공진 인덕터 L_r 이 공진을 하여 C_r 의 전압이 0이 되면 주 스위치의 역병렬 다이오드가 도통하며 이 모드가 시작된다. 역병렬 다이오드가 도통을 하게 되면 주 스위치에 걸리는 전압은 0이 되고 이 상태에서 스위치 On신호를 인가하면 주 스위치는 영전압 구간에서 스위칭을 하는 것이 된다.

Mode 5 ($t_4 \sim t_5$) : 전류가 다이오드를 통해 환류하게 되면 커패시터 C_r 의 전압이 0이 되는 동시에 주 스위치는 영전압 조건에서 턴-온하게 된다. 이때 보조 스위치가 영전압 조건에서 턴-오프되면 이 모드가 시작된다. 이 모드에서 공진 인덕터 L_r 과 C_{r2} 가 공진을 시작한다. 커패시터와 인덕터가 반주기 공진 후 공진 L_r 의 공진 전류가 0이 되면 종료된다.

Mode 6 ($t_5 \sim t_6$) : C_{r2} 가 충전되어 있는 상태에서 주 스위치와 D_2 를 통해 모드 5와의 반대방향으로 공진이 시작된다. 이때 커패시터 C_{r2} 는 공진이 되면서 충전되어있던 전압이 0으로 떨어진다.

Mode 7 ($t_6 \sim t_7$) : 모드 6이 끝나면 공진 커패시터 C_{r2} 의 전압이 0이 되고 보조 스위치의 역병렬 다이오드가 도통할 수 있는 조건이 된다. 이때 전류는 보조 스위치의 역병렬 다이오드와 공진 인덕터 그리고 주 스위치를 통해서 환류 된다.

Mode 8 ($t_7 \sim t_8$) : 주 스위치가 영전압 조건에서 Off되면 모드 8이 시작된다. 보조 스위치의 역병렬 다이오드에 흐르던 전류가 회복되는 구간으로 이 전류는 승압용 인덕터에 흐르는 전류와 함께 공진 커패시터 C_r 을 충전시키고 이 전압이 출력전압과 같아지면 모드 8은 종료된다.

Mode 9 ($t_8 \sim t_9$) : 공진 커패시터의 충전이 끝나면 주 다이오드가 도통하는 구간이다. 보조 스위치에 흐르는 전류가 완전히 회복된 후 이 모드는 끝나게 되고 다시 모드 1로 돌아가게 된다.

2.5 3상 BLDC 전동기 모델링 및 히스테리시스

전류제어기법

본 논문에서 사용한 가정용 진공청소기에 사용되는 3상 BLDC 전동기 구동 방법은 그림 5와 같다.

전동기 내부에 부착된 3개의 홀센서 신호는 전동기의 회전자 위치 및 전동기 속도를 계산하는데 사용된다. 전동기 실제속도와 기준속도 사이의 오차가 속도 PI제어기의 입력으로 사용되고, 이 제어기의 출력은 전동기 각 상의 기준전류값이 된다. 각 상의 실제 전류는 기준전류값을 이용한 히스테리시스 밴드와 비교되어 발생된 PWM 신호로 인버터를 구동한다.

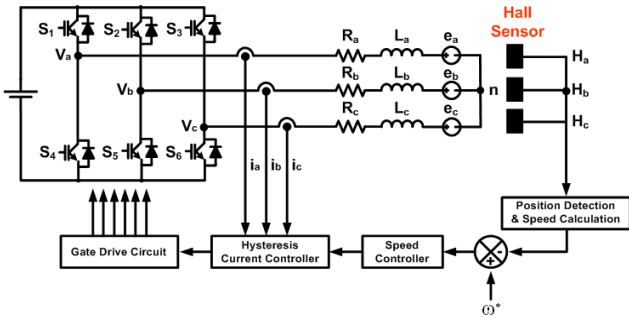


그림 5. 3상 BLDC 전동기의 전체 제어블록도
Fig 5 Overall control block diagram of 3-phase BLDC motor.

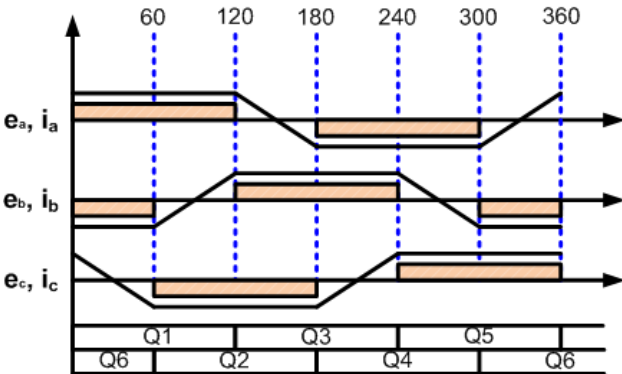


그림 6. 3상 BLDC 전동기의 역기전력과 상전류 파형
Fig 6 Back-EMF and phase current waveforms of 3-phase BLDC motor.

그림 6은 브러시리스 직류전동기의 사다리꼴 형태는 역기전력과 상전류파형을 나타낸다. 역기전력은 사다리꼴 형태로 그 크기는 회전자의 속도에 비례한다.

또한 3상 브러시리스 직류전동기의 상호 인덕턴스 성분을 무시하고, 키르히호프의 전류법칙에 의해 각 상 전류의 합이 0인 조건을 만족할 때 전압방정식은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a & 0 & 0 \\ 0 & R_b & 0 \\ 0 & 0 & R_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_a & 0 & 0 \\ 0 & L_b & 0 \\ 0 & 0 & L_c \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (6)$$

식(6)에서 R_a, R_b, R_c 는 고정자저항, L_a, L_b, L_c 는 고정자 상 인덕턴스, e_a, e_b, e_c 는 각 상의 역기전력이다. 그리고 i_a, i_b, i_c 는 각 상의 전류이다.

토크와 회전속도, 출력전력 간의 관계는 다음 식으로 표현된다.

$$P_e = e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c$$

(7)

$$P_m = T_e \times \omega_m$$

(8)

$$T_e = \frac{P_e}{\omega_m} = \frac{e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c}{\omega_m}$$

(9)

위 식(7), (8), (9)에서 P_e 는 전기적인 출력, P_m 은 기계적인 출력, T_e 는 전기적인 출력토크이고, ω_m 은 전동기 회전 각속도이다.

이때, 전동기 출력토크는 다음과 같다.

$$T_m = J_m \frac{d\omega_m}{dt} + B_m \omega_m = T_L$$

(10)

식(10)에서 J_m 은 회전관성 모멘트, B_m 은 점성마찰계수이고, T_L 은 부하토크이다.

3. 시뮬레이션

표1은 본 논문에서 제안한 소프트 스위칭 부스트 컨버터에 사용되는 각종 소자의 정격 및 스위칭 주파수 등을 나타낸다. 그리고 표 2는 본 논문에서 사용한 가정용 진공청소기 3상 BLDC 전동기의 내부 파라미터를 보여준다.

표 1. 제안된 소프트 스위칭 부스트 컨버터의 파라미터
Table 1 Parameters of proposed soft switching boost converter.

입력전압	V_{in}	220 [V_{rms}]
출력전압	V_o	380 [V]
스위칭 주파수	f_s	32 [kHz]
공진 캐패시터 1	C_{r1}	3.3 [nF]
공진 캐패시터 2	C_{r2}	30 [nF]
승압용 인덕터	L_1	2.2 [mH]
공진 인덕터	L_2	20 [μ H]
입력 리액터	L_s	30 [μ H]

표 2. 가정용 진공청소기 3상 BLDC 전동기의 파라미터
Table 2 3-phase BLDC Motor parameters of vacuum cleaner for household.

고정자 저항	0.88 [Ω]
정격 입력 전력	1 [kW]
정격 출력 전력	0.9 [kW]
정격 속도	33,000 [rpm]
정격 전류	3.6 [A] / 250 [V_{dc}]
극수	2

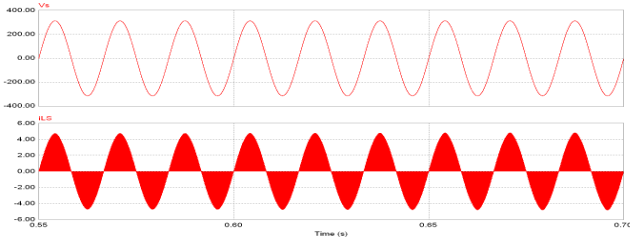


그림 7. 제안된 컨버터의 입력 전압과 전류 파형
Fig 7 Input voltage and current waveforms of proposed converter.

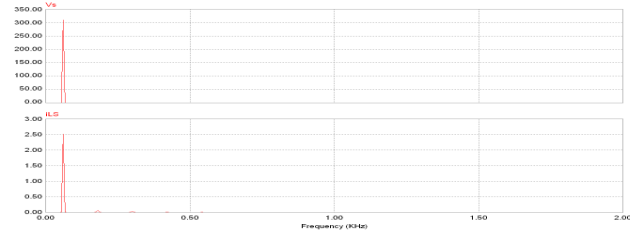


그림 8. 입력 전압과 전류의 주파수 스펙트럼
Fig 8 Frequency spectrum of input voltage and current.

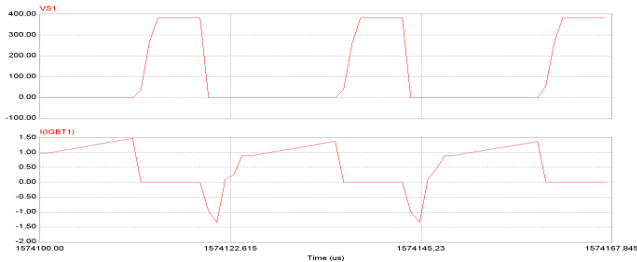


그림 9. 주 스위치의 전압과 전류 파형
Fig 9 Main switch of voltage and current waveforms.

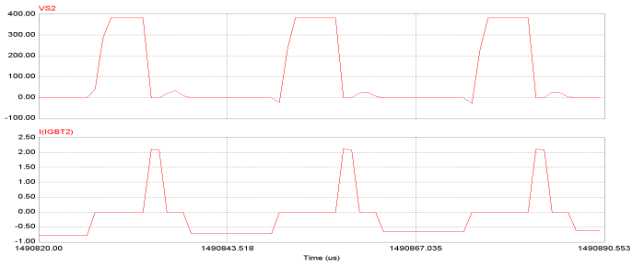


그림 10. 보조스위치의 전압과 전류 파형
Fig 10 Auxiliary switch of voltage and current waveforms.

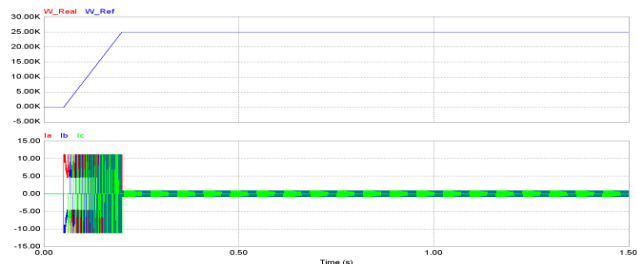


그림 11. 3상 BLDC 속도 응답과 각 상 전류 파형
Fig 11 Speed response and phase current of 3-phase BLDC motor.

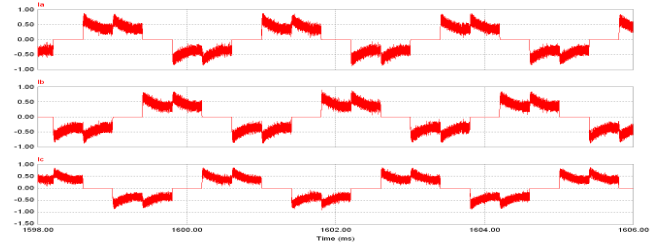


그림 12. 3상 BLDC 전동기의 각 상전류 파형
Fig 12 Each phase current waveforms of 3-phase BLDC motor.

그림 7은 역률제어기능을 가진 제안된 컨버터를 사용한 경우에 입력전압과 입력전류 파형이다. 그림 8은 입력전압과 전류의 주파수 스펙트럼 파형이다. 그림 9, 그림 10은 주 스위치와 보조 스위치의 전류와 전압파형이다. 주 스위치가 영전압 구간에서 턴-온, 턴-오프하는 것을 확인 할 수 있다. 그림 11은 3상 BLDC 속도응답과 전류파형이다. 그림 12는 그림 11의 정상상태 일부구간을 확대한 전류파형이다.

4. 결 론

제안된 컨버터에서 역률제어를 하기위해 입력단 상용교류전원과 다이오드 정류기 사이에 별도의 리액터를 추가하지 않고 컨버터의 주 인덕터가 승압용 인덕터로 사용되고, 주 스위치와 보조 공진회로의 스위칭 소자에 의해 주 인덕터 L_1 에 흐르는 전류는 입력전압과 위상이 동일한 단위역률로 제어되며 불연속 모드로 전류가 흐르게 된다.

소프트 스위칭 부스트 컨버터는 일반적인 부스트 컨버터에 보조 공진 회로를 추가하여 보조 스위치 및 승압용 주 스위치가 모두 영전압 부근에서 부분 공진을 통해 소프트 스위칭을 한다. 그러므로 일반적인 부스트 컨버터에 비해 스위칭 손실을 줄일 수 있다.

본 논문에서는 입력단 역률제어 기능과 새로운 소프트 스위칭 부스트 컨버터를 이용하여 전원부 시스템의 고조파 성분과 스위칭 손실을 저감한 새로운 컨버터를 제안하였다.

참 고 문 헌

- [1] 광동걸, "소프트 스위칭형 PFC 백-부스트 AC-DC 컨버터에 관한 연구", 전력전자학회 논문지 제12권 제6호, pp. 465~471, 2007. 12,
- [2] 정용채, 정윤철, 권경안, "재료비 절감을 위한 병렬구조를 갖는 인버터 에어컨용 역률제어회로", 하계전력 전자학술대회 논문집, pp.150~154, 2000. 07
- [3] 이상훈, 박한웅, 김광태, 김철우, "동기 정류기를 이용한 고효율 역률보상형 AC/DC 컨버터", 하계전력 전자학술대회 논문집, pp.266~269, 2000, 7.19~22
- [4] So-Ri Park, Sang-Hoon Park, Chung-Yuen Won, Yong-Chae Jung, "Low Loss Soft Switching Boost Converter", 2008 13th International Power Electronics and Motion Control Conference (EPE-PEMC 2008), pp. 181~186, 2008