

보조 부분 공진 회로를 이용한 삼상 PWM 인버터의 고조파 제거

徐基永* · 李鉉雨* · 金永文** · 文相弼**
 경남대학교 전기공학과* 마산대학**

Elimination of harmonics in three-phase PWM inverter using auxiliary partial resonant circuit

(Ki-Young Suh*, Hyun-Woo Lee*, Young-Mun Kim**, sang-pil Mun**)
 Kyung-Nam University*, masan College**

Abstract - A new SPWM inverter using three-phase boost converter by auxiliary partial resonant with high power factor and high efficiency is proposed. The proposed boost converter is constructed by using a resonant network in parallel with the switch of the conventional boost converter. The devices are switched at zero voltage or zero current eliminating the switching loss. A new partial resonant boost converter achieves zero-voltage switching (ZVS) or zero-current switching (ZCS) for all switch devices without increasing their voltage and current stresses. This paper introduces elimination of low-order harmonics compared with conventional SPWM inverter and SPWM inverter using three-phase boost converter by auxiliary partial resonant.

Key Words : auxiliary partial resonant boost converter, ZCS, ZVS, SPWM inverter

1. 서 론

최근에 전력전자소자와 마이크로 프로세서를 이용한 제어기의 개발로 가변속 전동기 분야에서도 제어향상, 효율향상, 신뢰성향상 및 저가격화가 이룩되고 있으며, 이에 따라 유도 전동기의 가변속 운전이 용이하게 되어 일반 산업계에 각광을 받고 있으며, 이에 대한 연구가 계속 진보되고 있다. 유도 전동기를 가변속 운전할 때 전압형 또는 전류형 인버터를 사용하고 있는데, 이들 인버터의 삼상 교류의 출력파형이 비정현파이기 때문에 이를 개선하기 위하여 여러 가지 방법이 연구되고 있다.

PWM제어에 의해 샘플 펄스열의 출력파형을 얻으면, 파형 개선의 보상으로서 그 기본파 성분은 구형파의 경우보다 반드시 적게 된다. 따라서 PWM제어방식은 불필요한 주파수 성분의 발생이 적어지고 기본파 성분의 감소 비율이 될 수록 적은 제어방식이 바람직하다. 또한 PWM인버터의 출력파형에 포함된 불필요한 저차 고조파 성분을 적게하는데는 삼각파 반송신호와 정현파 변조신호와의 비교출력으로 인버터를 동작시킨 경우가 일반적으로 사용되고 있으나 출력기본파 성분이 직류 전원 전압에 대한 비율이 최대 0.866으로 적은 결점이 있다.

본 논문에서는 이들을 해결하기 위하여 새로운 보조 부분 공진회로를 이용한 삼상 SPWM 인버터 회로를 제안하고, 제안된 보조 부분 공진 3상 부스트 컨버터와 3상 SPWM 인버터로 구성하여, 스너버에 축적된 에너지를 전원으로 회생시켜 고효율화를 실현하며, 또한 입력 전류를 불연속적으로 동작하게 함으로써 입력 전류를 정현파로 만들어 고역율화를 시도하여, SPWM인버터의 출력 기본파 성분을 증가시키고, 또 출력 필터를 이용하여 출력 선간전압 파형을 정현파화하여 저차 고조파를 제거하고자 한다. 보조 부분 공진에 의한 ZCS, ZVS

동작때의 하드 스위칭시의 손실과 소프트 스위칭시의 손실, 출력전압의 증대와 고조파 감소를 분석하기 위하여 시뮬레이션을 통하여 그 타당성을 입증하고자 한다.

2. 회로 구성과 동작 원리

그림 1에 제안한 보조 부분 공진회로를 이용한 삼상 SPWM 인버터의 주 회로를 나타낸다. 보조 부분 공진 회로 S_1 의 제어에 의해서 입력 전류 I_1 의 고조파를 감소하고, 고역율을 얻는다. 보조 회로의 S_2 은 주 스위치 S_1 의 ZCS, ZVS를 실현하기 위하여 S_1 과 똑같은 주파수로 스위칭을 행한다.

그림 2에 보조 부분 공진 회로의 동작 모드별 등가 회로를 나타낸다. 다이오드 D_0 에는 입력 전류 I_1 가 흐르고, 콘덴서 C_3 은 출력 전압 V_0 로 충전된다. S_2 가 턴-온되어 $t = t_0$ 에서 동작을 시작한다.

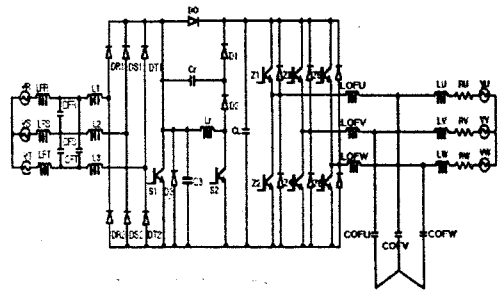


그림 1. 보조 부분 공진회로를 이용한 삼상 SPWM 인버터
 Fig.1 Three-phase SPWM inverter using auxiliary partial resonant circuit

모드 1 [$t_0 \leq t \leq t_1$] : 인버터 전류 I_L 은 콘덴서 C_3 의 전압이 V_0 가 될 때 까지 직선적으로 증가한다.

다이오드 D_0 에 흐르는 전류 I_D 는 직선적으로 감소하고, I_L 가 I_1 와 같을 때, D_0 가 턴-오프하고, 이 모드는 끝난다.

모드 2 [$t_1 \leq t \leq t_2$] : 이 모드 동안에 L 과 C_3 은 공진하며, e_{a3} 은 제로까지 공진하고 감소하여 D_3 가 턴-온해서 이 모드는 끝난다.

모드 3 [$t_2 \leq t \leq t_3$] : 이 모드 동안 e_{a3} 은 제로를 유지하고, I_1 에 모드 2 사이의 I_L 의 증가분을 더한 전류는 $D_3 - L_r - S_2, L_r - D_2 - C, C$ 로 흘러서 순환한다.

이 모드의 사이에 S_1 을 턴-온시키면, 제로 전압 (ZVS) 턴-온을 실현할 수 있다. 같은 모양으로 이 상태

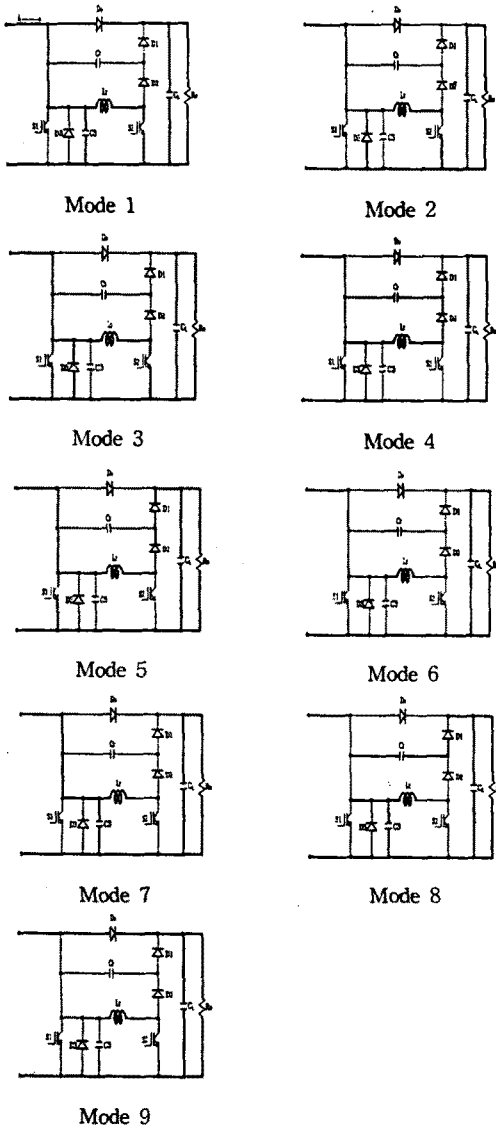


그림 2 보조 부분 공진 회로의 동작 모드별 등가 회로
Fig.2 Auxiliary partial resonant circuit of equivalent circuit operating modes

에서 S_2 를 턴-오프 시키면, 제로 전압(ZVS) 턴-오프를 실현할 수 있다. S_2 를 턴-오프하는 것에 의해 이 모드는 끝난다.

모드 4 ($t_3 \leq t \leq t_4$) : 이 모드 동안에 L 과 C 은 공진하며, e_{a3} 은 제로를 유지하고, e_c 는 공진해서 증가한다. e_c 가 V_0 로 될 때, D_2 와 D_1 는 턴-온하고 이 모드는 끝난다.

모드 5 ($t_4 \leq t \leq t_5$) : I_L 은 D_2-D_1 를 통해서 출력측으로 흐르며 직선적으로 감소하고, 이 모드 동안 e_{a3} 은 제로이고, I_L 가 I_1 와 같을 경우 이 모드는 끝난다. $I_L(T_5) = I_1$ 에서 이 모드의 기간 T_5 은 다음 식으로 주어진다.

모드 6 ($t_5 \leq t \leq t_6$) : I_L 은 감소를 계속하고, I_1 와 I_L 차이의 전류 I_{S1} 는 스위치 S_1 로 흐르기 시작하여, 이 모드 동안 e_{a3} 은 제로이고, 이 모드는 I_L 가 0으로 될 때 끝난다.

모드 7 ($t_6 \leq t \leq t_7$) : 이 모드에서는 S_1 의 턴-온 기간에서 S_1 를 턴-오프 시키는 것으로 끝난다. 이 때 $e_{a3} = 0$ 이므로 S_1 는 제로 전압(ZVS) 턴-오프를 실현한다.

모드 8 ($t_7 \leq t \leq t_8$) : S_1 이 턴-오프 상태에서, I_1 는 C_3 를 V_0 로 충전하기 시작하고, 이 모드는 e_{a3} 이 V_0 로 되었을 때 끝난다.

모드 9 ($t_8 \leq t \leq t_9$) : 이 모드의 사이에 보조 회로의 제어는 이루어지지 않으며, 다이오드 D_0 가 도통되어 I_1 를 출력측으로 흐르게 한다. S_2 가 제로 전류(ZCS) 상태에서 동시에 턴-온할 때 이 모드는 끝나고, 1사이클의 스위칭 주기는 S_2 를 다시 턴-온 시키는 것으로 다음의 스위칭 주기가 시작된다.

3. 시뮬레이션 결과 및 검토

제안된 보조 부분 공진 회로를 이용한 삼상 SPWM 인버터의 제어 스위치는 가변 저항 스위치로 가정하고 그의 소자는 이상적인 소자로 하여 PSpice에 의한 시뮬레이션을 하였다. 시뮬레이션에 사용된 회로 정수들을 표 1에 나타내었다.

표 1 시뮬레이션에 사용된 회로 정수
Table 1 Parameters of simulated circuit

입력 전압 V_1	50[V]
필터 LFR,LFS,LFT	100[uH]
필터 CFR,CFS,CFT	10[uF]
인덕터 L1,L2,L3	50[uH]
공진 인덕터 L_r	120[uH]
공진 콘덴서 C_r	0.01[uF]
평활용 콘덴서 C_L	2000[uF]
스위칭 주파수 f_s	20[kHz]
튜타율 D	50[%]
캐리어 주파수 f_c	2160[Hz]
변조도 M	0.9
삼상 부하 R	8.2[Ω]
삼상 부하 L	88.37[mH]

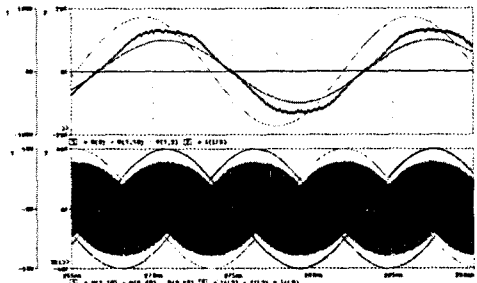


그림 3. 제안된 회로의 입력 선간전압, 상전압, 상전류 및 L1, L2, L3의 불연속 전류파형
Fig.3 Input line voltage, phase voltage, phase current and discontinuous current waveforms of proposed circuit

제안된 보조 부분 공진 회로를 이용한 삼상 SPWM 인버터의 입력 선간전압, 상전압과 상전류 및 L1, L2, L3의 불연속 전류의 시뮬레이션 파형을 그림 3에 나타낸다.

제안된 보조 부분 공진 회로의 스위칭 동작에 대한 각 부 동작 시뮬레이션 파형을 그림 4에 나타낸다.

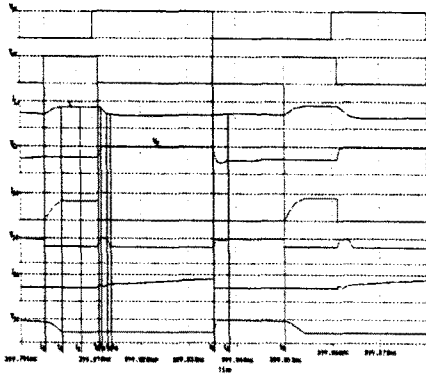


그림 4 스위칭 동작에 대한 시뮬레이션 파형
Fig. 4 Simulation waveform for switching operation

그림 5에는 변조도 $M=0.9$, 기준파 $f=60[\text{Hz}]$, $f_c=2160[\text{Hz}]$ 일 때의 제안된 보조 부분 공진 회로를 이용한 삼상 SPWM 인버터의 출력 상전압, 선간전압, 선간전류, 상전류 파형을 나타내고 있다.

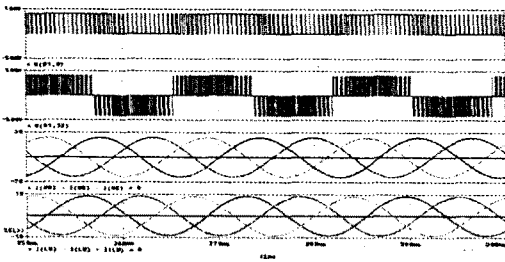


그림 5. 제안된 인버터 출력의 상전압, 선간전압, 선간전류, 상전류 파형
Fig. 5 Phase voltage, line voltage, phase current waveforms of proposed inverter output

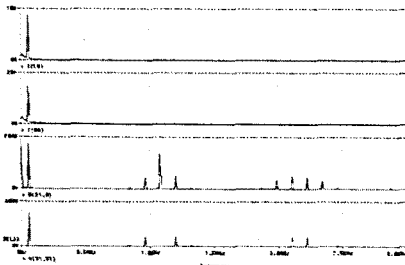


그림 6. 삼상 전압형 SPWM 인버터의 고조파
Fig. 6 Harmonics of three-phase voltage-fed SPWM inverter

그림 6과 7에는 변조도 $M=0.9$, 기준파 $f=60[\text{Hz}]$, $f_c=2160[\text{Hz}]$ 일 때의 기존의 삼상 전압형 SPWM 인버터와 제안된 보조 부분 공진 회로를 이용한 삼상 SPWM 인버터의 상전류, 선간전류, 상전압, 선간전압의 고조파 분석을 나타내고 있다.

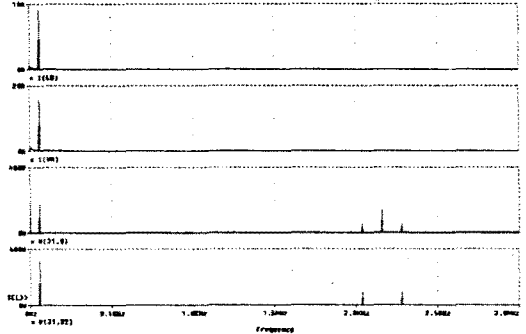


그림 7. 보조 부분 공진 회로를 이용한 삼상 SPWM 인버터의 고조파
Fig. 7 Harmonics of three-phase SPWM inverter using auxiliary partial resonant circuit

그림 8에는 변조도 $M=0.9$, 기준파 $f=60[\text{Hz}]$, $f_c=2160[\text{Hz}]$, 출력필터($L=1.92[\text{mH}]$, $C=30[\mu\text{F}]$)일 때의 제안된 보조 부분 공진 회로를 이용한 삼상 SPWM 인버터의 상전압, 선간전압 상전류, 선간전류의 파형과 고조파 분석을 나타내고 있다.

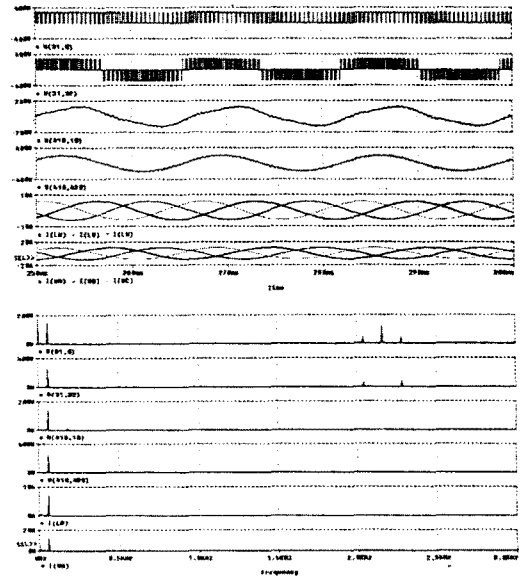


그림 8. 제안된 회로를 이용한 삼상 SPWM 인버터의 출력 파형과 고조파(필터포함)
Fig. 8 Output voltage and harmonics of three-phase SPWM inverter using proposed circuit(Low pass filter)

4. 결 론

본 논문에서는 회로가 간단하면서도 부분 공진 스위칭이 되는 "보조 부분 공진 회로를 이용한 삼상 SPWM 인버터"를 제안하였다. 사용된 스위치들의 동작은 스위치 동작 시에만 공진 회로를 형성시키는 부분 공진의 기법이 적용되어 스위치들의 스위칭 손실을 저감시키며, 부분 공진으로 인하여 공진 회로의 손실 및 공진용 소자들의 스트레스를 감소시켜 주었다. 그리고 본 회로의 부분 공진 회로는 구조적으로 일반적인 부스트 컨버터에 사용되는 승압용 인덕터와 스위칭 모드 전력변환기에 이용되는 스너버 회로의 스너버 콘덴서를 이용하여 실현되었다. 그러므로 제안 회로에서 인덕터는 승압과 공진용으로 이용되고 스너버 콘덴서가 공진용 소자로 이용됨으로써 회로 구조가 간단하다. 또한 스너버 콘덴서는 공진 회로의 동작에 의해 콘덴서에 축적된 에너지를 전원측으로 회생시켜 무손실 스너버 콘덴서로 되고, 회생된 에너지는 승압용 소자에 부여되어 같은 전력 용량하에서 하드 스위칭 동작과 비교하여 스위칭의 듀티율이 적게 되어 변환기의 효율을 더욱 증대시키는 장점이 부여되었다. 또한 제안된 부스트 컨버터를 이용함으로써 출력전압의 기본파 성분을 올 증대시킬수 있었으며, 한편 스위칭 주파수를 증가시키고, 출력측에 필터를 연결하여 저차 고조파를 제거할 수 있었다.

(참고 문헌)

- [1] P. N. Enjeti, P. D. Ziogas and J. F. Lindsay, "Programmed PWM techniques to eliminate harmonics : a critical evaluation", IEEE Trans. Ind. App. vol. 26. Mar/Apr. 1990.
- [2] H. S. Patel and R. G. Hoft, "Generalized technique of harmonic elimination and voltage control in thyristor inverter: Part 1 harmonic elimination", IEEE Trans. Ind. App. vol. IA-9. no.3, pp.310-317, May/June. 1973.
- [3] D. M. Divan and G. L. Skibinski, "Zero switching loss inverters for high power applications", IEEE IAS, Rec., pp. 517-634. 1987.
- [4] J. S. Lai and B. K. Bose, "An improved resonant DC-link inverter for induction motor drives", IEEE IAS, Rec., pp. 742-748. 1988.
- [5] Guihao Hua, Ching-Shan Leu, F. C. Lee, "Novel Zero-Voltage-Transition PWM Converters", IEEE PESC, pp. 55-61, 1992.
- [6] G. H. CHO, "New group of ZVS PWM Converters operable on Constant Frequency and its application to Power Factor Correction Circuit", IEEE PESC, pp. 1441-1446, 1992.
- [7] F. C. Lee, "High-Frequency Quasi-Resonant Converters Technologies", Proc. IEEE, 76, 377, 1988.
- [8] J. He, N. Mohan, "Parallel Resonant DC Link Circuit - A Novel Zero Switching Loss Topology with Minimum Voltage Stresses, "IEEE PESC Record, pp. 1006-1012, 1983.