

브리지형 공진 AC 링크 스너버 방식을 이용한 3상 정현파 소프트 스위칭 PWM 인버터

Three Phase Sinewave Soft-switching PWM Inverter using Bridge Type Resonant AC Link Snubber

김 정 식* · 문 상 필** · 박 한 석†
 (Jeong-Sik Kim · Sang-Pil Mun · Han-Seok Park)

Abstract - This paper presents a novel prototype of the resonant AC link snubber circuit for the three-phase sinewave soft-switching PWM inverter. In principle, its operating principle is described, and the performance evaluations of the specific instantaneous space voltage modulated three-phase sinewave soft switching PWM inverter incorporating a resonant AC link snubber is illustrated, and evaluated, introducing the specific space voltage vector modulation implementation. It is conferred that the validity of three-phase soft-switching inverter treated here in setup experiment.

Key Words : Bridge type resonant, AC link snubber circuit, Soft-switching, Three-phase sinewave inverter, Specific instantaneous space vector modulation, PWM inverter

1. 서 론

최근 정현파 PWM 전압형 인버터와 사인파 고역률 PFC 정류기, UPS, 양방향 컨버터의 고성능화 실현에 소프트 스위칭에 의한 고주파 스위칭 PWM 전력 변환 회로 기술과 응용 기술의 연구 개발이 활발하게 이루어지고 있다. 액티브 보조 공진 스너버를 이용한 고주파 소프트 스위칭 정현파 PWM 전력 변환 회로 토폴로지로 보조 공진 DC 링크 방식, 보조 공진 AC 링크 방식, 또한 보조 공진 정류(轉流) 링크 방식, 보조 공진 압 링크 방식으로 분류된다. 그 중에서도 6in1 지능형 전력용반도체 모듈(IPM : Intelligent Power Module)을 이용한 반도체 전력 변환 회로에 적합한 보조 공진 DC 링크 방식, 보조 공진 AC 링크 방식이 있다. 그 중에서도 보조 공진 AC 링크 방식은 중용량, 고용량에 적합하다[1-6].

본 논문에서는 양방향 스위치형 공진 AC 링크 스너버 회로의 확장 형태로의 브리지형 공진 AC 링크 스너버 방식 3상 전압형 정현파 소프트 스위칭 PWM 인버터를 제안하고 새로운 순간 공간 벡터 변조법을 적용한 시스템을 구축하고 이를 이용한 3상 전압형 소프트 스위칭 PWM 인버터를 실험을 통하여 성능 및 효과에 대해 서술하였다.

2. 제안한 회로 구성과 동작원리

2.1 브리지형 공진 DC 링크 스너버 회로

그림 1은 양방향 스위치형 공진 AC 링크 스너버 회로의 구성을 나타낸 것이다. 그림 1에서 단상 전압형 인버터 브리지 암의 주 스위치 $Q_1 \sim Q_4$ 와 병렬로 ZVS 무손실 스너버 커패시터 $C_{r1} \sim C_{r4}$ 를 가지며, 출력 부분은 공진 인덕터 인덕터 L_r , 보조 스위치 S_{a1}, S_{a2} 로 이루어진 부분 공진 펄스 정류(轉流) 보조 회로부로 구성되어 있다. 그리고 부분 공진 펄스 정류(轉流) 보조 회로를 작동시킴으로써 주 스위치와 병렬로 연결된 무손실 스너버 커패시터를 제로 전압에서 V_s 까지 충전하여 ZVS 턴-오프하며, 온 하려고하는 주 스위치에 병렬로 연결한 무손실 스너버 커패시터를 V_s 에서 영전압 방전한다.

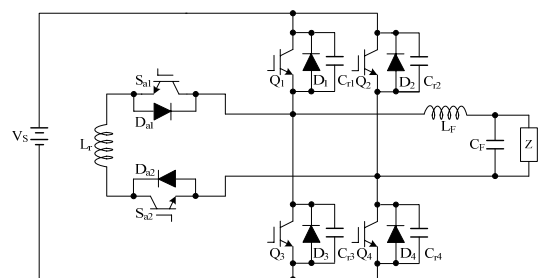


그림 1 양방향 스위치형 공진 AC 링크 스너버의 회로 구성
 Fig. 1 Circuit diagram of bidirectional switch type resonant AC link snubber

주 스위치의 전류는 IGBT의 역병렬 다이오드에 자연 정류(自然轉流)하기 위해 ZVS하고, ZCS 턴-온이 가능하다. 또한, 보조 스위치 S_{a1}, S_{a2} 와 직렬로 연결된 보조 공진 인덕터 L_r

† Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering, Pukyong National University, Korea
 E-mail : phanseok@pknu.ac.kr

* Busan Transportation Corporation, Korea

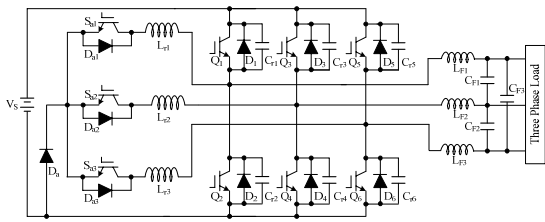
** Dept. of Electrical Engineering, Masan University, Korea

접수일자 : 2017년 3월 30일

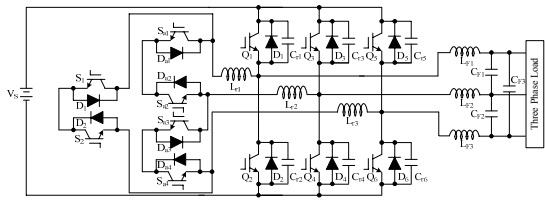
최종완료 : 2017년 4월 25일

동작에서 ZCS 턴-온, ZCS 턴-오프가 가능하다.

그림 2는 양방향 스위칭형 공진 AC 링크 스너버 회로를 이용한 3상 전압형 인버터의 종류를 나타낸 것이다. 그림 2에 나타낸 바와 같은 (a)는 스타형 공진 AC 링크 스너버 방식이며, (b)는 델타형 공진 AC 링크 스너버 방식을 나타낸 것이다. 스타형 공진 AC 링크 방식은 간단한 회로 구성이지만, 주 스위치의 스위칭시에 보조 스위치와 역병렬로 도통 다이오드에 흐르는 전류의 경로가 각 상의 부하 전류값에 따라 3상 전압형 인버터에 순환 전류(Circulating Current)가 흐르는 등의 단점이 있다. 그러나 델타형 공진 AC 링크 스너버 방식은 스타형 공진 AC 링크 스너버 방식의 단점을 해결하고 보조 공진 스너버 회로에 흐르는 전류의 경로는 각 상의 부하 전류의 크기에 의존하지 않고 완전히 제어 할 수 있어 순환 전류가 없어지는 이점이 있다.



(a) Star type resonant AC link snubber circuit topology



(b) Delta type resonant AC link snubber circuit topology

그림 2 각 종 공진 DC 링크 스너버를 이용한 3상 전압형 인버터

Fig. 2 Two types of resonant AC link snubber-assisted three-phase voltage source inverter

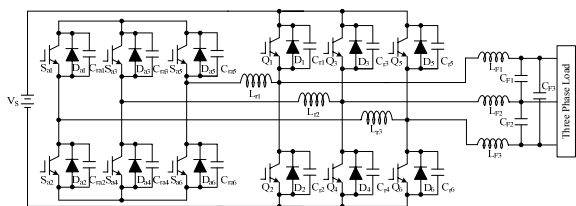


그림 3 제안한 브리지형 공진 AC 링크 스너버 방식을 이용한 3상 전압형 소프트 스위칭 인버터

Fig. 3 Three-phase voltage source soft-switching inverter using proposed bridge type resonant AC link snubber-assisted

그림 3은 제안한 브리지형 공진 AC 링크 스너버 방식을 3상 전압형 소프트 스위칭 인버터를 나타낸 것이다. 그림 3에서 제안한 브리지형 공진 AC 링크 스너버 방식은 기본적인 회로 동작은 그림 2에 나타낸 델타형과 다르지 않지만 보조

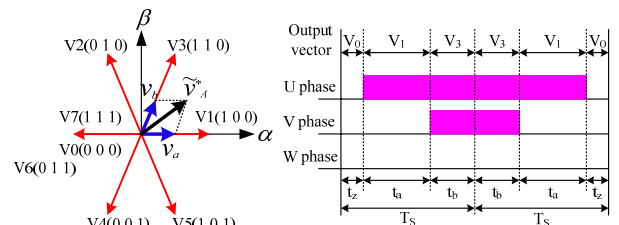
공진 스너버 회로의 스위치가 브리지 구성되어 있기 때문에, 2in1과 6in1 타입의 전력 반도체 모듈을 사용할 수 있으며, 회로 구성이 단순하며, 안정성면에서 장점이 있다.

2.2 제안한 순간 공간 벡터 변조

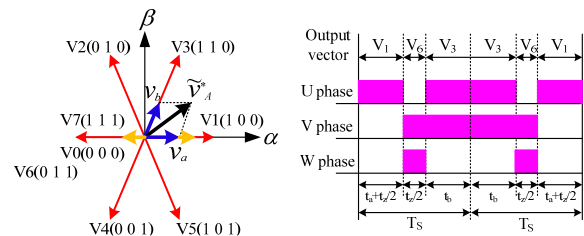
일반적으로 순간 공간 벡터는 다상 교류에서 임의의 시간에서의 각 상(u, v, w)의 전압 또는 전류의 순시값을 벡터 합성한 것이다. 제안한 공진 AC 링크 스너버 회로를 이용한 3상 전압형 인버터에서 소프트 스위칭을 실현시키기 위해서는 부분 공진 소프트 정류(轉流)회로로 액티브 보조 공진 스너버 회로를 스위치 전환 포인트에서 매번 정확하게 동작시킬 필요성이 있다. 그러나 영전압 벡터를 출력하고 있는 상태에서는 어떤 보조 스위치를 턴-온하고도 삼상 전압형 인버터 브리지 회로의 각 상 전압이 모두 같기 때문에 공진 인덕터에 전류를 흐르게 하기 위해서는 전압을 액티브 보조 공진 스너버 회로에 인가 할 수 없다.

또한, 단상만 스위칭하도록 스위칭 공간 전압 벡터 선택 지령이 있었을 경우는 액티브 보조 공진 스너버 회로에서 공진 인덕터에 전류를 흐르게 하기 위해서 페루프를 만들 수 있으나 스위칭 동작이 종료된 후 공진 인덕터의 전압은 직류 전원 전압 Vs를 통해 페루프가 존재하지 않고, 공진 인덕터에 전류가 흐르지 않는 문제점이 있다.

그림 4는 기존 방식과 제안 방식의 샘플링 시분할 벡터법과 지령 전압 벡터를 실현하는 방법을 나타낸 것이다. 그림 4에서 알 수 있듯이 제안한 방식의 영전압 벡터는 α - β 정좌표 평면에서 서로 반대 방향의 스위칭 공간 전압 벡터를 기존 영전압 벡터 출력 시간의 1/2 출력 시간을 가진 출력을 등가적인 영전압 벡터를 합성하는 방법을 이용하였다.



(a) Conventional time sharing-based vector and command voltage vector



(b) Proposed zero-voltage vector and the command voltage vector

그림 4 샘플링 시분할 벡터와 지령 전압 벡터

Fig. 4 Sampling time sharing-based vector and command voltage vector

3. 실험결과 및 검토

그림 5는 제안한 공진 AC 링크 스너버를 이용한 삼상 전압형 인버터와 제어 시스템을 포함한 토탈 시스템 구성을 나타낸 것이다. 그림 5에서 순간 공간 벡터법에 의해 정현파 PWM 변조는 Myway사의 DSP 시스템(PE-ExpertII)를 사용하였다. 표 1은 실험 시스템의 설계 사양과 각 회로 매개변수 및 부하부의 사양 및 파워 디바이스를 나타낸 것이다.

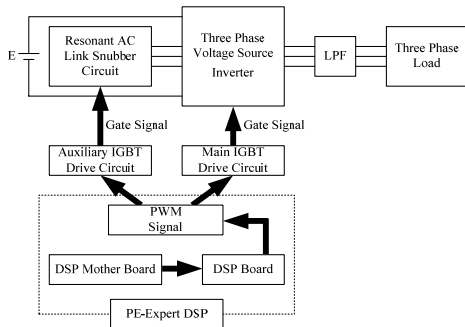


그림 5 3상 전압형 인버터의 시스템 구성
Fig. 5 System configuration of three-phase voltage inverter

표 1 설계 사양 및 실험 회로 파라미터

Table 1 Design specifications and experimental circuit parameters

Parameter	Symbol	Value
DC Source Voltage	V_S	200.0[V]
Sampling Frequency	f_S	16.0[kHz]
Resonant Inductor	L_r	2.0[mH]
Lossless Snubber Capacitor	C_r	56.0[nF]
Output Voltage(RMS)	V_0	100.0[V]
Output Frequency	f_0	60.0[Hz]
Filter Inductor	L_f	928.4[mH]
Filter Capacitor	C_f	6.82[mF]
Resistive Load	R_l	10.0[W]
Main Power Switch Devices	$Q_1 \sim Q_6$	CM100-DU24E(MITSUBISHI)
Auxiliary Power Switch Devices	$S_{a1} \sim S_{a6}$	GT50J325(TOSHIBA)

그림 6는 제안한 실험 장치의 외관을 나타낸 것이며, 그림 7은 제안한 인버터 시스템의 U상 상부와 하부의 주 스위치 Q_1 의 턴-온시(그림 7(a))와 턴-오프시(그림 7(b))의 전압과 전류 파형을 나타낸 것이다. 그림 7에서 주 스위치 Q_1 의 턴-온 파형은 전압이 완만하게 감소하고 있으며, 전압이 제로 크로스 포인트를 따라 전류가 증가하고 있다. 즉, 주 스위치 Q_1 은 ZVZCS 턴-온되는 것을 알 수 있다. 또한, 주 스위치 Q_1 의 턴-오프 파형은 전압이 처음부터 완만하게 증가하고 있기 때문에 ZVS 턴-오프 되는 것을 알 수 있다.

그림 8은 제안한 인버터 시스템의 U상 상부와 하부의 보조 스위치 S_{a1} 의 턴-온시(그림 8(a))와 턴-오프시(그림 8(b))

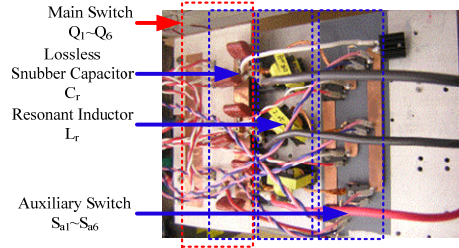
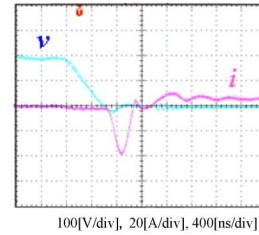
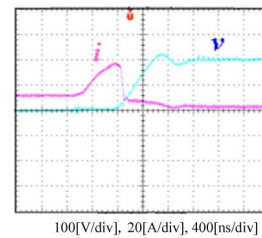


그림 6 실험장치의 외관
Fig. 6 Appearance of experimental setup



(a) Switching waveforms at a turn-on transition



(b) Switching waveforms at a turn-off transition

그림 7 주 스위치의 스위칭 전압과 전류 파형

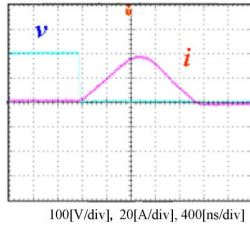
Fig. 7 Switching voltage and current waveforms of main switch

의 전압과 전류 파형을 나타낸 것이다. 그림 8에서 보조 스위치 S_{a1} 의 턴-온시 파형은 전류가 제로에서 완만하게 증가하고 있다. 즉, 보조 스위치 S_{a1} 은 ZCS 턴-온되는 것을 알 수 있다. 또한 보조 스위치 S_{a1} 의 턴-오프 파형은 전류가 제로까지 완만하게 감소하고 있기 때문에 ZCS 턴-오프되는 것을 알 수 있다.

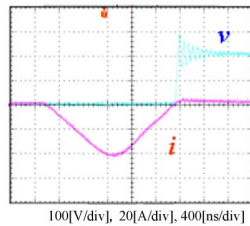
그림 7과 그림 8에서 알 수 있듯이 IGBT의 폴 전류 및 테일 전류와 스위치 전압의 중복이 약간 발생하고 있지만, 무손실 스너버 커패시터 C_r 의 값은 겹치는 부분을 줄일 수 있다.

그림 9는 3상 출력 선간 전압의 파형을 나타낸 것이다. 그림 9에서 알 수 있듯이 개루프 제어 시스템에서 3상 정현파 전압 출력이 이루어지고 있다는 점에서 제안한 출력 벡터 패턴의 유효성을 확인할 수 있으며, 출력 파형에서 약간의 왜곡이 발생하는데 이러한 출력 파형의 왜곡은 지령 전압 벡터의 출력 시간에 영향을 주고 있다. 그러므로 소프트 스위칭을 하기 위해서는 각 지령 전압 벡터의 출력 시간은 보조 공진 AC 링크 스너버 회로의 동작 시간을 t_0 이상이어야 하며, 그 이하의 지령 전압 벡터의 출력 시간이 있는 경우에는 그 지령 전압 벡터 출력 시간을 t_0 이상으로 보정해야 한다.

각 구간의 전환 부근에서 지령 전압 벡터의 출력 시간이



(a) Switching waveforms at a turn-on transition



(b) Switching waveforms at a turn-off transition

그림 8 보조 스위치의 스위칭 전압과 전류 파형

Fig. 8 Switching voltage and current waveforms of auxiliary switch

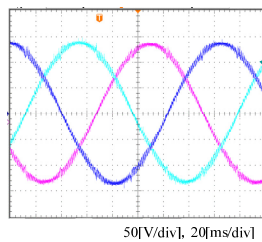


그림 9 출력선간전압의 파형

Fig. 9 Line to line output voltage waveforms

t_0 이하가 되기 때문에, 일반적 벡터 패턴 보정이 더해진다. 이 보정이 출력 전압 파형의 왜곡의 원인이 된다. 이 출력 선간 전압 파형의 왜곡은 출력 전압 및 출력 전류 피드백 제어를 이용함으로써 개선 할 수 있다.

그림 10은 제안한 인버터 시스템의 출력 전압의 왜형률(THD)특성을 나타낸 것이며, 그림 11은 효율 특성을 나타낸 것이다.

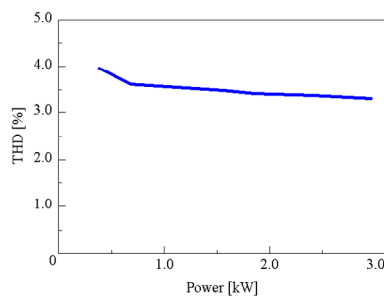


그림 10 출력 전압의 왜형률(THD)특성

Fig. 10 Distortion characteristics of output Voltage

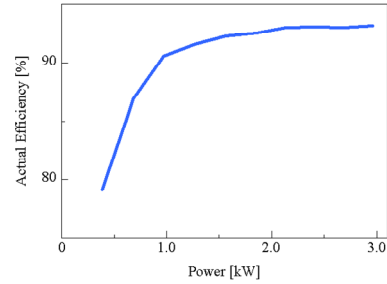


그림 11 효율특성

Fig. 11 Efficiency characteristics

4. 결 론

본 논문에서는 양방향 스위치형 공진 AC 링크 스너버 회로의 확장 형태로의 브리지형 공진 AC 링크 스너버를 이용한 3상 전압형 정현파 소프트 스위칭 PWM 인버터를 제안 하였으며, 새로운 순간 전압 벡터법을 적용하여 인버터 시스템의 동작 및 특성을 분석하여 서술하였다. 제안한 공진 AC 링크 스너버 회로의 보조 스위치뿐만 아니라 주 스위치가 소프트 스위칭 정류(轉流)할 수 있는 것을 확인하였으며, 인버터 시스템의 3상 정현파 출력 전압의 THD와 효율이 개선 되는 것을 알 수 있다.

References

- [1] J. S. Lai, R. W. Young, G. W. Ott, J. W. Mckeever, and F. Z. Peng, "A Delta configured auxiliary resonant snubber inverter", *IEEE Trans. on Ind. Appl.*, vol. 32, no. 3, pp. 518-525, 1996
- [2] C. Chan, K. Chau, D.Chan, J. Yao, J. S. Lai and Y. Li, "Switching Characteristics and Efficiency Improvement with Auxiliary Resonant Snubber Based Soft-switching Inverters", *Conf. Records of IEEE PESC*, vol. 1, pp. 429-435, 1998
- [3] O. Kiyoshi, O. Hideki, Y. Hidekazu, I. Kiyoshi "Quasi-Resonant Zero voltage Soft Switching PWM High Frequency Inverter and its Computer Aided Analysis of Characteristics", *Technical report of IEICE. Energy engineering in electronics and communications* 97(366), pp. 49-56, 1997.
- [4] T. Aoki, Y. Nozaki, Y. Kuwata, and T. Koyashiki, "A Quasi-Resonant DC Link PWM Inverter", *Proceedings of IPEC Yokohama*, pp. 1203-1208, 1995.
- [5] N. Hoshi, K. Oguchi, "Considerations on Control Strategy and Efficiency of Three-Phase Resonant Snubber Inverter", *Proceedings of Semiconductor Power Conversion (SPC) Seminar*, SPC-00-88, pp. 77-82, 2000
- [6] S. Nagai, S. Sato, "Resonant Three-Phase Inverter", *Proceedings of the 2001 Japan Industry Applications Society Conference*, vol. III, pp. 1365-1368, 2001

저 자 소 개



김 정 식 (金正植)

2012년 건축전기설비기술사 취득, 2013년 국가평생교육진흥원 전기공학사 졸업. 2015년 부경대 산업대학원 전기공학과 졸업(석사). 2016년 동 대학원 전기공학과 졸업수료. 1997년~현재 부산교통공사 전기사업소 근무. 현 본 학회 대한전기학회정회원



문 상 필 (文相弼)

1997년 부경대 전기공학과 졸업. 1999년 경남대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2003년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 2010년 8월~현재 마산대학교 전기과 조교수. 2009년 7월 IEEE ISIE Bsst Paper Award 수상. 2010년 12월 한국조명전기설비학회 학술상 수상. 현 본 학회 산업전기위원회 편집위원 겸 정회원



박 한 식 (朴瀚錫)

1981년 중앙대학교 전기공학과 졸업. 1983년 중앙대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 한국해양대학교 대학원 졸업(박사). 1986년 3월 ~현재 부경대학교 공과대학 전기공학과 교수. 현 본 학회 정회원