

단방향 보조 스위치를 갖는 개선된 소프트 스위칭 인버터

손세진, 이귀준, 김래영, 현동석
한양대학교

An Improved Soft-Switching Inverter with An Unidirectional Auxiliary Switch

Se-Jin Sohn, Kui-Jun Lee, Rae-Young Kim, Dong-Seok Hyun
Hanyang University

ABSTRACT

In this paper, novel unidirectional auxiliary resonant commutated pole is proposed to improve the performance of zero-voltage soft-switching inverter. The proposed circuit keeps the advantages of the original soft-switching inverter, while providing more effective resetting capability in magnetizing current. Based on the advanced reset mechanism, auxiliary switches operate under a complete zero-current condition. The operating principle and steady-state analysis are presented theoretically, according to its operating modes. Accordingly, it proves the fact that the proposed unidirectional auxiliary resonant commutated pole breaks an unwanted magnetizing current loop effectively. The performance of the proposed circuit is verified by several simulation results.

1. 서론

보조 공진 전환 폴 (Auxiliary resonant commutated pole)을 사용하는 소프트 스위칭 인버터에서, ZVS를 달성하기 위해서는 Split capacitor나 결합 인덕터를 사용한다. Split capacitor의 경우 capacitor 간에 전압 불균형 문제와 스위치에 걸리는 역전압이 높은 문제점이 있다^[1]. 이를 개선하기 위해 그림 1과 같이 결합 인덕터 타입의 소프트 스위칭 인버터가 제안되었는데, 이 방식의 특징은 (1) Capacitor 충전 불균형 문제가 없으며, (2) Half bridge module를 사용할 수 있어 경제적이고, (3) 공진 전류가 결합 인덕터의 1차측과 2차측를 통해 분배되어 흐르므로 보조 스위치의 전류를 줄일 수 있고, (4) 결합 인덕터의 턴비를 조절하여 게이트 제어를 간단하게 할 수 있는 장점이 있다^{[2]-[4]}. 하지만, 결합 인덕터의 자화 전류가 리셋되지 않는 단점이 있어 이를 개선하기 위해 여러 가지 방법이 제안되었다. 첫 번째가 포화 인덕터를 사용하는 방법으로, 자화 전류를 작게 하기 위해서는 인덕터의 부피가 커져야 하고 방열에 어려움이 있다. 두 번째가 다이오드를 사용하여 자화 전류 리셋 경로를 만들어 주는 방법이 있는데, 공진 전류가 다이오드에는 흐르지 않고 보조 스위치를 통해 흘러 스위치의 전류 스트레스가 증가하는 문제가 있다^[3]. 그리고 최근에 제안된 방법은 공진 폴에 결합 인덕터를 추가하여 리셋 경로를 만든 것인데, 자화 인덕턴스를 작게 할 수 있고, 보조 스위치에 흐르는 전류는 감소하나, 결합 인덕터의 추가로 가격 상승이 크고 자화 전류가

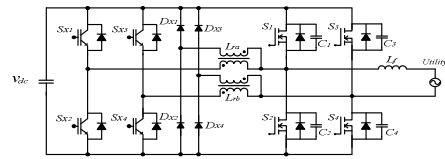


그림 1 계통 연계형 단상 결합 인덕터 타입 소프트 스위칭 인버터 회로 구성

Fig. 1 Circuit configuration of a single-phase coupled magnetics type soft-switching inverter for grid-connected applications

리셋되기 전에 보조 스위치를 턴오프하여 ZCS 로 동작하지 않는 문제가 있다^[4].

본 논문에서는 새로운 단방향 보조 공진 전환 폴을 사용한 소프트 스위칭 인버터를 제안한다. 이것은 기존의 결합 인덕터 타입의 장점을 유지하면서 저비용으로 자화 전류를 리셋하여 보조 스위치의 ZCS 동작을 확실하게 할 수 있다. 모드에 따른 동작 원리가 제공되며, 3kW 급 부하 조건에서의 시뮬레이션 결과를 통해 제안된 논문의 유효성을 증명하였다.

2. 제안된 회로 토폴로지와 동작 원리

결합 인덕터를 사용한 소프트 스위칭 인버터는 자화 전류의 리셋을 방해하는 원치 않는 루프들이 발생한다. 그림 2에 자화 전류를 효과적으로 제거하는 제안된 회로를 나타내었으며, 기존 방법들은 그림 2 (a) Loop A를 제거한 반면에 제안 회로는 그림 2 (b) Loop B를 제거한다. 그림 2. (c)는 제안된 회로를 하나의 leg에서 트랜스포머 등가 회로를 이용해 나타내었다. 초기 상태는 부하 전류는 (+)이며, 아래쪽 메인 스위치의 역병렬 다이오드 D_{S2} 를 통해 부하 전류가 환류되고 있다고 가정한다. 그림 3와 같이 회로 토폴로지의 변화는 8단계로 나눌 수 있다.

Stage1 [t_0, t_1]: t_0 에서 S_2 의 역병렬 다이오드 D_{S2} 를 통해 전류가 환류되고, S_2 가 ZVS 조건에서 꺼진다.

Stage2 [t_1, t_2]: t_1 에서 보조 스위치 S_{X1} 가 켜진다. 공진 전류 i_r 은 부하 전류 i_L 과 같아질 때까지 증가한다.

Stage3 [t_2, t_3]: t_2 에서 i_r 이 i_L 보다 커지기 시작하면 결합 인덕터와 C_1, C_2 간에 공진이 발생한다. C_1 전압은 0으로 방전하기 시작하고, C_2 전압은 DC bus 전압까지 충전하기 시작한다.

Stage4 [t_3, t_4]: t_3 에서 C_1 과 C_2 의 방전과 충전이 완료된다. C_1 전압이 0이 되면 S_1 는 ZVS 조건에서 켜진다.

Stage5 [t_4, t_5]: t_4 에서 D_{X2} 가 꺼지고, 자화 전류에 의한 순환 전류가 발생한다. S_{X1} 에 흐르는 전류는 0이므로 ZCS 조건에서 S_{X1} 는 꺼진다.

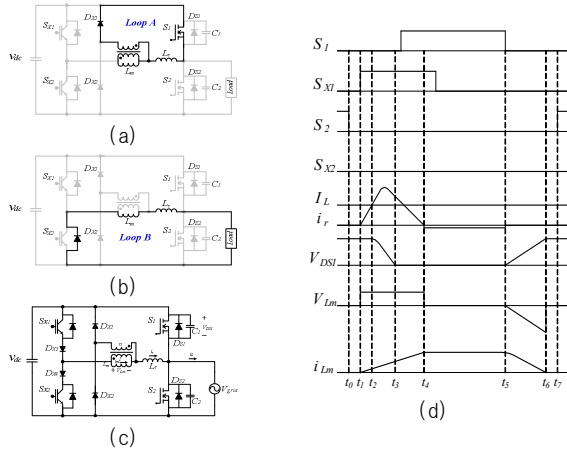


그림 2 제안된 자화전류 리셋 방법 (a)상단 순환전류 (b)하단 순환전류 (c)제안된 회로 (d)timing diagram과 주요 파형
 Fig. 2 Proposed method of the reset operation of the magnetizing current (a)the upper path of freewheeling current (b)the lower path (c)the proposed circuit configuration (d)the timing diagram and key waveforms

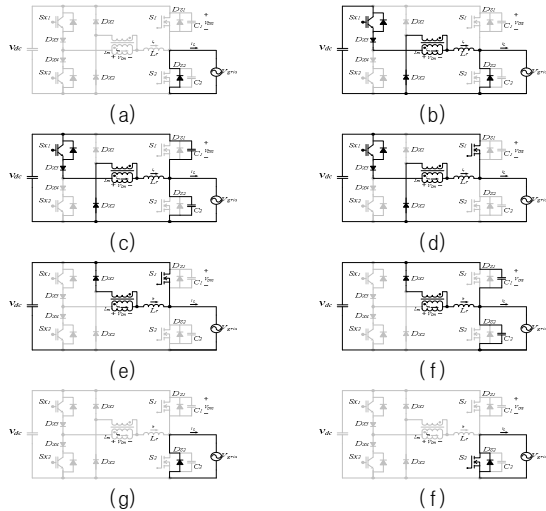


그림 3 제안된 소프트 스위칭 인버터의 동작 stage (a)Stage1 (b)Stage2 (c)Stage3 (d)Stage4 (e)Stage5 (f)Stage6 (g)Stage7 (h)Stage8
 Fig. 3 Operation stages of the proposed soft-switching inverter.

Stage6 [t_5, t_6]: t_5 에서 S_1 이 꺼지고, S_1 에 흐르던 전류는 C_1 을 충전시키고, C_2 를 방전시키기 시작한다. C_1 전압이 상승하면서 결합 인덕터에 역전압이 걸려 자화 전류는 리셋된다.

Stage7 [t_6, t_7]: t_6 에서 자화전류는 리셋이 완료된다. 부하전류는 D_{S2} 를 통해 환류한다.

Stage8 [t_7, t_0]: t_7 에서 S_2 가 ZVS 상태에서 켜진다.

3. Simulation 결과

시뮬레이션은 PSIM 소프트웨어를 이용하여 수행되었으며, 그림 4에 제안된 계통 연계형 단상 소프트 스위칭 인버터를 나타내었다. 설계 사양은 $V_{DC}=370V$: 출력 Power $P_o=3kW$, 출력 전압 $V_{o,rms}=220V$, 스위칭 주파수 $f_s=15kHz$ 이며, 회로의 Parameter값들은 기존 문헌^[2]을 참조하였다. 그림 5은 결합 인덕터의 자화 전류가 리셋되는 파형이며, 부하 전류 모든 영역에서 리셋되고 있는 것을 알 수 있다.

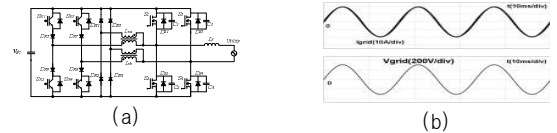


그림 4 제안된 단상 소프트 스위칭 인버터 (a)계통 연계형 인버터 (b) 출력 전압 및 전류 파형

Fig. 4 Circuit configuration of the proposed single-phase inverter (a)the inverter for grid-connected applications (b)The output voltage and current waveforms

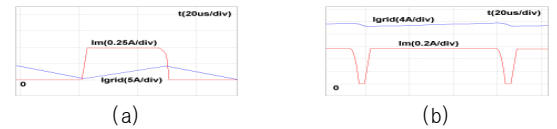


그림 5 부하전류에 따른 자화전류 리셋파형 (a)경부하(b)정격부하
 Fig. 5 The magnetizing current reset waveforms

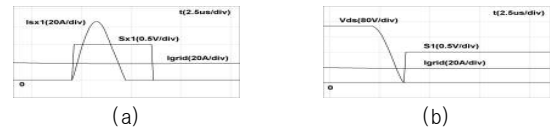


그림 6 스위치들의 ZCS, ZVS 파형(a)보조 스위치 ZCS 파형 (b)메인 스위치 ZVS 파형

Fig. 6 The ZCS and ZVS waveforms (a)the ZCS waveforms of the auxiliary switch (b) the ZVS waveforms of the main switch

그림 6 (a)은 보조 스위치의 ZCS 파형이고, (b)는 메인 스위치의 ZVS 파형이다.

4. 결론

본 논문에서는 새로운 단방향 보조 공진 전환 폴을 이용하여 기존의 결합 인덕터 타입의 소프트 스위칭 인버터의 장점은 유지하면서 자화 전류를 리셋시키는 방법을 제안하였다. 보조 스위치는 확실하게 ZCS 조건에서 턴오프가 가능하다. 제안된 회로는 시뮬레이션을 통해 부하를 경부하에서 정격부하까지 모든 동작 영역에서 자화 전류가 리셋됨을 확인하였다.

본 논문은 에너지기술평가원(2008-N-PV02-J-03-0-000) 지원에 의하여 연구되었음.

참고 문헌

[1] D. M. Divan, G. Venkataramanan, R. W. DeDoncker, "Design Methodologies for Soft Switched Inverters," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. 29, no. 3, Jan./Feb. 1993, pp.126-135.
 [2] J.-S. Lai, J. Zhang, H. Yu, and H. E. Kouns, "Source and Load Adaptive Design for a High-Power Soft-Switching Inverter," *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 21, no. 6, Nov. 2006, pp. 1667-1675.
 [3] X. Yuan and I. Barbi, "Analysis, designing, and experimentation of a transformer-assisted PWM zero-voltage switching pole inverter," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 15, no. 1, Jan. 2000, pp. 72-82.
 [4] W. Yu, J.-S. Lai, S.-Y. Park, "An Improved Zero-Voltage-Switching Inverter Using Two Coupled Magnetics in One Resonant Pole," *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 25, no. 4, Apr. 2010, pp. 952-961.