

새로운 Zero-Current-Transition 기법을 이용한 계통 연계형 태양광 발전 인버터 시스템

최영덕, 이동윤, 현동석
한양대학교 전기공학과

Grid Connected Photovoltaic Inverter System Using a New Zero-Current-Transition Scheme

Young-Deok Choi, Dong-Yun Lee, Dong-Seok Hyun
Dept. of Electrical Engineering, Hanyang University

Abstract - This paper presents grid connected photovoltaic inverter system using a new Zero-Current-Transition (ZCT) technique. The main switches of the proposed grid connected inverter are turned off under the zero current condition by operating the auxiliary circuit and also all semiconductor devices, switches and diodes, are applied to low rated voltage regardless of the load condition. In additionally, the proposed ZCT scheme has advantages, which are without the additional current stresses and the conduction losses on the main switches during the resonance period of the auxiliary circuit. The simulation was performed to verify the validity of the proposed grid connected photovoltaic ZCT inverter system.

1. 서 론

태양광 에너지는 환경 친화적이고 저 연료비용이며 그 에너지원이 무한하다는 장점으로 인해 세계적인 관심의 대상으로 떠오르고 있다. 국내에서도 대체에너지의 중요성의 인식으로 80년대 말부터 정부와 학계에서 많은 정책적인 지원과 활발한 연구가 추진되어지고 있다. 현재까지 태양광을 이용하여 가정이나 빌딩 등에서 계통과 연계하여 전원 공급원으로 사용하도록 하는 연구가 진행되어지고 있는데 이러한 계통 연계형 시스템은 에너지 자원의 다양화, 분산화, 그리고 지역 편중성 및 설치 규모나 장소 선정에 자유롭다는 장점을 가지고 있다 [1]~[4].

이러한 계통 연계형 태양광 발전 시스템은 크게 라인에 변압기를 사용하는 경우와 변압기를 사용하지 않는 경우로 구분한다. 먼저 변압기를 사용하는 경우는 라인을 전기적으로 절연할 수 있고 승압이 가능하다 [1], [2]. 그러나 저주파수용 (60Hz) 변압기를 사용하는 경우에는 크기와 무게에 제약을 받는다는 단점을 가지고 있다. 또한 고주파수용 변압기를 사용하는 경우는 변압기의 소형화를 위해 추가적인 스위칭 소자가 첨가 되어야 하고 회로의 최적화가 어렵다는 것과 변압기의 누설 인덕턴스에 의한 2차측 정류단에 링잉이 발생하는 단점을 가지고 있다 [4]. 뿐만 아니라 고주파 변압기의 손실로 인해 효율이 감소되는 문제점과 2차측의 다이오드 정류기에 과전압 보호를 위한 부파적인 보호회로가 필요하게 된다 [1]. 이러한 제약을 때문에 변압기를 사용하지 않는 방법이 현재 많이 사용되어지고 있는 추세이다. 그러나 변압기를 사용하지 않는 경우는 어레이측의 출력 전압이 utility 전압의 침투치 보다 낮을 경우 어레이측으로 역류되는 현상이 있기 때문에 승압용 컨버터를 사용해야 한다. 하지만 변압기를 사용하지 않는 경우는 가격, 크기, 무게와 손실이 저감되는 장점이 있다.

최근 계통 연계형 태양광 발전 시스템의 인버터 시스템은 다음과 같은 특징들로 인하여 그 개발과 연구의 중요성이 새롭게 인식되어지고 있다. 태양광 발전 인버터 시스템은 저가이어야 하며 부피가 작아야 하고 고조파를 포함하지 않고서 utility에 동상의 전류를 주입해야 한다 [3], [4]. 또한 비록 최대 전력점 제어를 수행하였다 할지라도 태양광이 array를 통해 실제 에너지로 변환되어지는 비율은 약 18%로서 매우 낮기 때문에 부하나 utility에 에너지를 전달 할 때는 최대한으로 손실을 줄여야 한다. 그러므로 계통 연계형 태양광 발전 시스템에서 인버터 시스템의 효율은 매우 중요하다고 할 수 있다.

따라서 본 논문에서는 이러한 조건을 만족시키는 새로운 Zero-Current-Transition (ZCT) 기법의 계통 연계형 태양광 발전 인버터 시스템을 제안 하고자 한다. 그림 1은 제안한 인버터 시스템을 나타내었다. 제안한 인버터 시스템의 진상 레그 스위치는 영전류 턴-오프 (ZCS)를 통해 스위칭 손실을 감소시켰다. 보조 스위치는 턴-온시 공진 전류가 보조 스위치로만 흐르게 되어 주 스위치의 전류 스트레스를 제거 하였다. 이때 공진 인덕터, L_r 은 그림 1에서 보여지는 것처럼 전력이 흐르는 주 회로 경로에 없으므로 환류시에 도통손실이 발생하지 않고 IGBT의 모듈화가 가능하게 되어 부피를 감소시킨다. 뿐만 아니라 제안된 인버터 시스템의 공진 커패시터, C_r 은 입력전압 만큼만 충전되기 때문에 각 소자는 기존의 ZCT 인버터와 달리 부하에 관계없이 항상 입력전압정격을 가지게 되어 저가의 시스템을 구현 가능하게 하고 고전압 응용이 가능하다는 장점을 가진다. 이러한 특징은 부하 가변성이 높은 계통 연계형 태양광 발전 시스템에 적합한 특징이 된다. 본 논문에서 제안한 계통 연계형 태양광 발전 인버터 시스템의 타당성을 증명하기 위하여 시뮬레이션을 수행하였다.

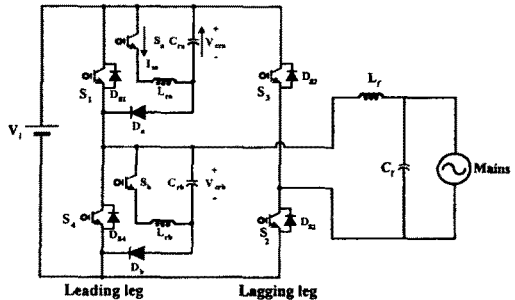


그림 1. 제안한 계통 연계형 태양광 발전 인버터 시스템.

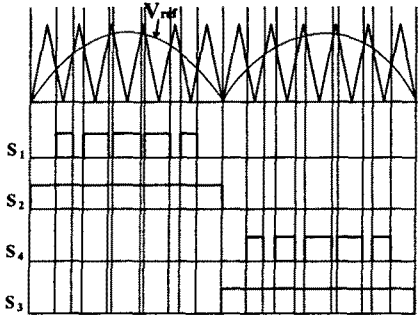


그림 2. 제안한 태양광 발전 인버터 시스템의 PWM 원리.

2. 본 문

그림 1은 제안한 ZCT 태양광 인버터의 전체 시스템을 보여주고 있다. 기존 풀-브릿지 인버터 회로의 진상 레그에 있는 위, 아래 주 스위치에 병렬로 보조 스위치 (S_a, S_b), 보조 인덕터 (L_{ra}, L_{rb}), 보조 커패시터 (C_{ra}, C_{rb}), 보조 다이오드 (D_a, D_b)로 구성된 보조 회로를 추가 하였다. 회로 해석의 편의상 각 소자들은 이상적인 특성을 지니고 있고, 출력 인덕터 L_f 는 충분히 커서 출력 전류 I_o 는 일정하다고 가정한다.

2.1 이론적인 동작 모드와 동작 파형

주 스위치의 PWM 원리는 그림 2에서 나타내었으며 지상 레그 스위치, S_2, S_3 는 60Hz로 스위칭 하여 손실을 최소화 하도록 제어 하였다. 또한 120Hz로 교번하는 V_{ref} 가 Zero-crossing 하는 부근에서 주 스위치의 스위칭 신호의 펄스폭이 너무 짧기 때문에 보조 스위치의 스위칭이 안정적으로 이루어 질 수가 없다. 따라서 보조 스위치가 안정적인 스위칭을 하도록 하기 위하여 V_{ref} 가 일정한 크기 이상에서만 스위칭을 하도록 하였다. 제안한 ZCT 태양광 인버터는 한 주기 동안 7개의 동작 모드를 가지고 있으며 그림 3과 4는 이론적인 동작 파형과 동작 모드를 나타내고 있다.

1) Mode 1 (t_0-t_1): t_0 에서 주 스위치, S_1 이 턴-온 되고 전력은 입력측에서 부하측으로 전달된다. 이때 각 소자는 입력 전압, V_i 로 충전되어 있다.

2) Mode 2 (t_1-t_2): t_1 에서 보조 스위치, S_a 의 턴-온에 의해 공진 인덕터, L_{ra} 와 공진 커패시터, C_{ra} 사이의 공진이 시작된다. t_2 에서 공진 커패시터는 영전압까지 방전된다. 공진 전류의 경로에 주 스위치, S_1 이 포함되지 않기 때문에, S_1 은 보조 회로의 공진 전류에 의한 부가적인 공진 전류의 스트레스를 받지 않게 된다. 이 모드에서 공진 인덕터 전류와 공진 커패시터 전압은 각각 다음과 같다.

$$V_{Cra}(t) = V_i \cdot \cos \omega_o t \quad (1)$$

$$I_{Lra}(t) = \frac{V_i}{Z_o} \cdot \sin \omega_o t \quad (2)$$

여기서 $\omega_o = 1/\sqrt{L_{ra} \cdot C_{ra}}$: 공진 각주파수

$Z_o = \sqrt{L_{ra}/C_{ra}}$: 공진탱크의 특성 임피던스

3) Mode 3 (t_2-t_3): t_2 에서 보조 다이오드, D_a 는 이전 모드의 공진에 의해 일어난 ZVS조건에서 턴-온하고 공진 전류가 정현적으로 증가함에 따라 주 스위치 전류, I_{S1} 은 감소하게 되며 이때 주 스위치 전류, I_{S2} 는 I_o 로 일정하다. 이 모드에서 주 스위치 전류, $I_{S1}(t)$ 는 식 (3)과 같이 표현된다.

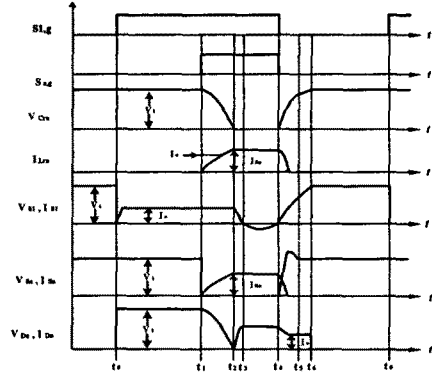


그림 3. 제안된 ZCT 기법이 적용된 태양광 발전 인버터 시스템의 동작 파형.

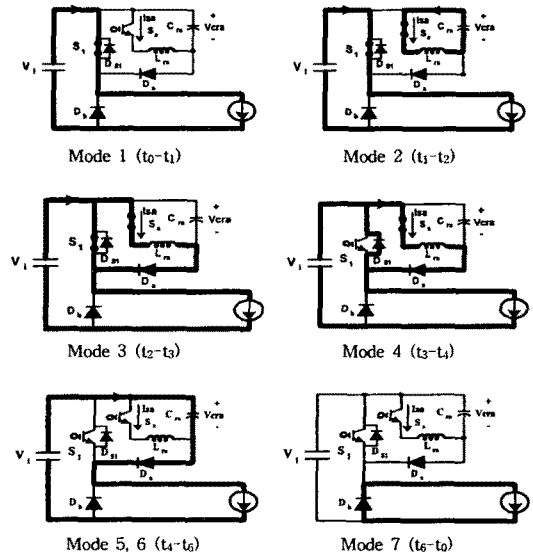


그림 4. 제안된 ZCT 기법이 적용된 태양광 발전 인버터 시스템의 동작 모드.

$$I_{S1}(t) = I_o - \frac{V_i}{Z_o} \cdot \sin \omega_o t \quad (3)$$

4) Mode 4 (t_3-t_4): t_3 에서 $I_{S1}(t)$ 는 영전류로 되고 주 스위치의 역병렬 다이오드, D_{S1} 이 턴-온하기 시작한다. 이 시간동안 주스위치, S_1 은 ZCS조건을 확보하게 된다.

5) Mode 5 (t_4-t_5): t_4 에서 두 스위치는 제어의 용이성을 위해 동시에 턴-오프 한다. 주 스위치, S_1 은 ZCS조건 하에서 턴-오프 하고 보조 스위치, S_a 는 하드 턴-오프 한다. 이때 부하 전류는 보조 다이오드, D_a 를 통하여 공진 커패시터, C_{ra} 를 충전하기 시작한다.

6) Mode 6 (t_5-t_6): t_5 이후 공진 커패시터, C_{ra} 가 입력 전압, V_i 로 충전되어감에 따라 주 스위치와 보조 스위치도 V_i 가 된다.

7) Mode 7 (t_6-t_0): t_6 에서 공진 커패시터, C_{ra} 는 입력 전압, V_i 로 충전되었으므로 보조 다이오드, D_a 는 영전압이 되고 모든 스위치는 오프 상태이며 부하전류는 D_{S4} 로만 환류하게 된다.

이로써 한주기동안의 동작 모드를 마치게 되고 다음 주기는 Mode 1에서 Mode 7의 동작을 반복하게 된다.

2.2 보조회로의 설계 방법

제한한 태양광 발전 인버터 시스템의 ZCT를 위한 보조 회로의 설계 절차는 참고문헌을 근거로 하여 다음과 같이 계산하였다 [5]. 스위칭 주파수 40kHz와 입력 전압 200V_{DC}를 이용하여 1kW를 출력하기 위해 부하 전류를 약 14A로 하였다. 공진 전류의 첨두치를 식 (4)에 의거하여 16.8A로 되었다. 식 (5)에 따라서 특성임피던스를 약 11.9로 계산하였다. 따라서 식 (6)과 식 (7)에 의해 계산된 공진 인덕터의 인덕턴스는 9.3μH이고 공진 커패시터의 커패시턴스는 66nF이다. 그러나 실제 회로 제작 시 정확한 값을 구현하기에 한계가 있으며 회로의 누설 저항에 의한 공진 에너지 손실 등 여러 요인에 의해 실제 시뮬레이션 파라미터는 각각 6μH와 70nF로 결정하였다.

$$I_{Lr,peak} = KI_{Load,peak} \quad (4)$$

여기서 $K = 1.2$

$$Z_o = \frac{V_{Cr}}{I_{Lr,peak}} = \sqrt{\frac{L_r}{C_r}}, \quad V_{Cr} = V_i \quad (5)$$

$$C_r = \frac{T_r}{2\pi \cdot Z_o} \quad (6)$$

$$L_r = Z_o^2 \cdot C_r \quad (7)$$

2.3 시뮬레이션 결과

다음은 제안된 ZCT기법이 적용된 계통 연계형 태양광 발전 인버터 시스템의 타당성을 검증하기 위해 2.2절의 파라미터들을 이용하여 수행되어진 시뮬레이션 결과이다.

그림 5는 IGBT의 스위칭 신호와 인버터 출력 전압 및 부하 전류의 전주기 파형을 보여준다. 지상 레그 스위치, S₂는 60Hz로 스위칭 되고 있는 모습을 파형을 통해 알 수 있다. 또한 2.1절에서 언급한 것처럼 보조 스위치가 안정적인 스위칭을 하도록 하기 위하여 V_{ref}가 일정한 크기 이상에서만 보조 스위칭이 이루어지고 있음을 파형을 통해 알 수 있다. 이러한 스위칭 제어를 통해 인버터의 출력 전압과 부하 전류는 동상이 이루어 졌음을 확인할 수 있다.

그림 6은 진상 레그의 스위치의 전압, 전류 파형을 나타내고 있다. 그림 6(a)는 주 스위치 S₁의 전압, 전류의 파형으로써 공진 전류의 경로에 주 스위치가 포함되지 않기 때문에 전류 스트레스가 없으며 영전류 턴-오프가 이루어짐을 확인할 수 있다. 그림 6(b)는 보조 스위치 Sa의 전압, 전류의 파형으로 공진 전류에 의해 소프트 턴-온을 이루지만 턴-오프시에는 약간의 손실이 발생함을 알 수 있다.

그림 7은 제안한 태양광 발전 인버터 시스템의 보조 소자들의 전압과 전류의 파형이다. 그림 7(a)는 공진 커패시터의 전압과 공진 인덕터의 전류의 파형으로서 공진 커패시터 전압이 입력 전압과 동일한 크기로 충전되어 있음을 보여준다. 그림 7(b)는 보조 다이오드, Da의 전압, 전류의 파형이다. 파형으로부터 알 수 있듯이 영전류 턴-오프가 이루어 졌음을 알 수 있다. 또한 보조 다이오드, Da에 인가된 전압이 입력 전압과 동일함을 알 수 있다.

이상과 같이 앞서 제안한 이론들이 모두 시뮬레이션의 결과와 동일함을 알 수 있다.

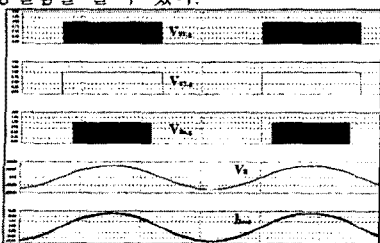


그림 5. 제안한 태양광 발전 인버터 시스템의 게이트 신호와 출력 전압과 부하 전류.

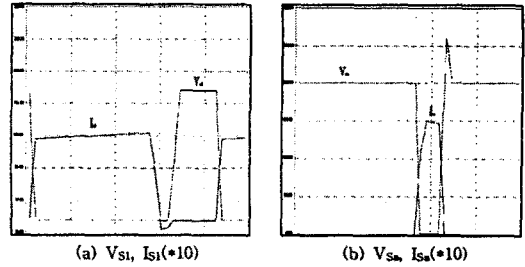


그림 6. 제안한 태양광 발전 인버터 시스템의 각 스위치 파형.

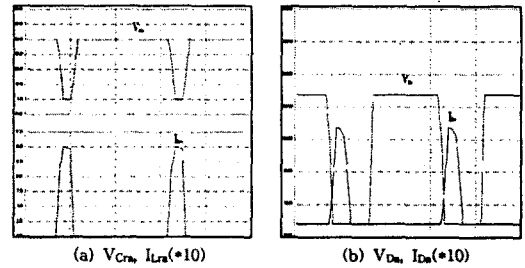


그림 7. 제안한 태양광 발전 인버터 시스템의 보조 소자들의 파형.

3. 결 론

본 논문에서는 변압기를 사용하지 않는 방식의 새로운 계통 연계형 태양광 발전 인버터 시스템에 대해 고찰하였고 이를 시뮬레이션을 통해 검증 하였다. 따라서 제안한 계통 연계형 태양광 발전 ZCT 인버터 시스템은 다음과 같은 특징을 지닌다.

- 진상 레그 주 스위치, S₁, S₂의 ZCS 턴-오프로 인한 스위칭 손실 감소
- 전력 회로 외부에 공진 인덕터를 위치시킴으로써 도통손실 감소
- IGBT의 모듈화에 따른 부피 감소
- 부하에 영향을 받지 않는 입력전압정격 크기의 보조 소자로 인한 저가의 시스템 구현과 고전압 응용 가능
- 고주파수의 동작으로 인한 부하전류의 고조파 감소

[참 고 문 헌]

- [1] Isao Takahashi, Takashi Sakurai, Itaru Andoh, "Development of Simple Photovoltaic System for Interconnection of Utility Power System" Power Electronics, Drives and Energy Systems for Industrial Growth, Proceedings of the 1996 International Conference on , Volume: 1, 1995, Page(s): 88-93 vol.1, 1996.
- [2] Chiang, S.J.; Chang, K.T.; Yen, C.Y. "Residential photovoltaic energy storage system" Industrial Electronics, IEEE Transactions on , Volume: 45, Page (s): 385-394, 3, June 1998.
- [3] Kasa, N.; Ogawa, H.; Iida, T.; Iwamoto, H. "A transformer-less inverter using buck-boost type chopper circuit for photovoltaic power system", PEDS '99. Proceedings of the IEEE 1999 International Conference on , Volume: 2, 1999, Page(s): 653-658 vol.2, 1999.
- [4] Tawara, T.; Aoki, T.; Kawagoe, Y. "An efficient interactive inverter for a photovoltaic system", APEC '99. Fourteenth Annual , Volume: 2, 1999, Page(s): 1052-1056 vol.2, 1999.
- [5] Min-Kwang Lee; Dong-Yun Lee; Dong-Seok Hyun, 'New zero-current-transition PWM DC/DC converters without current stress', PESC. 2001 IEEE 32nd Annual , Volume: 2, 2001, Page(s): 1069-1074 vol.2, 2001.