

영전류 스위칭 계통 연계형 태양광 발전 인버터

최항석, 김주대, 조보형
서울대학교 전기공학부

Grid-Connected Photovoltaic Inverter with Zero-Current-Switching

Hang-seok Choi, J. D. Kim and B.H. Cho
School of Electrical Engineering, Seoul National University

Abstract - This paper presents a new zero current switching (ZCS) inverter for grid-connected photovoltaic single phase inverter system. The auxiliary circuit for the soft-switching consists of two resonant inductors and two resonant capacitors as well as two auxiliary switches rated at lower power. The proposed circuit provides zero current switching condition for all the switches, which reduces switching losses significantly. It is controlled to extract maximum power from the solar array and to provide sinusoidal current into the mains. The validity of the proposed system is verified by experimental results from the 1.2kW prototype inverter operating at 40kHz.

1. 서 론

최근 세계적으로 기후변화협약과 에너지자원의 고갈문제가 대두되면서 태양 에너지에 대한 관심이 고조되고 있다. 이에 따라 태양 에너지를 효율적으로 사용하기 위한 연구가 선진국을 중심으로 폭넓게 진행되고 있다.

특히 국내에서는 대체 에너지를 이용하여 발전된 전력을 상용계통에 공급할 수 있도록 하는 전기 사업법의 개정이 진행중에 있으며 이에 대한 연구가 진행되고 있다. 이러한 태양광 에너지를 이용한 계통 연계형 발전 시스템은 여름철 첨두 부하시 기존 화력 발전소의 부담을 감소시킬 수 있는 장점을 가지고 있다.

국외에서 개발되어 사용되고 있는 계통 연계형 인버터의 종류는 크게 저주파(60Hz) 변압기를 사용하는 방식과 고주파 변압기를 사용하는 고주파 링크 방식, 그리고 절연 변압기가 없는 방식으로 구분된다. 과거에는 저주파 변압기 방식이 많이 사용되었으나 저주파 변압기 때문에 전체 시스템의 크기와 무게가 커지는 단점이 있어 최근에는 고주파 링크 방식이나 [1] 절연 변압기가 없는 방식 [2-5]이 많이 사용되고 있다. 고주파 링크 방식은 고주파 변압기를 사용하여 계통 라인과 전기적으로 절연되어 있으나 스위칭 소자의 수가 많고, 승압과 동시에 인버팅을 하기 때문에 회로의 최적화가 어렵고 고주파 변압기의 누설 인덕턴스로 인해 변압기 2차측 정류단에 심한 전압 ringing이 생기는 단점을 가지고 있다. 변압기 없는 방식은 태양 전지의 출력 전압이 계통 라인 전압의 첨값 보다 낮을 경우 승압을 위한 DC/DC 컨버터가 추가로 요구되는 단점이 있으나 최대 전력 추적제어나 시스템 설계의 최적화에 있어 고주파 링크 방식에 비해 유리하여 대용량 태양광 발전 시스템에 많이 사용되고 있다.

본 논문에서는 절연 변압기 없는 방식에 적합한 영전류 스위칭 계통 연계형 태양광 발전 인버터를 제안한다. 제안된 인버터는 기존의 단상 인버터에 영전류 스위칭 PWM Switch Cell[6] 을 적용하여 구현되었으며 이 방식은 주 스위치와 보조 스위치 모두 영전류 스위칭을 하며 영전류 스위칭을 위한 공진전류가 보조 회로를 통해서만 흐르기 때문에 주 스위치의 도통 손실을 최소화 할

수 있다. 또한 공진 인덕터에 의해 전류의 변화속도가 제한되므로 다이오드의 역회복에 의한 문제를 경감시킬 수 있다. 또한 60Hz 로 교번하는 Buck 컨버터로 동작하므로 스위칭 손실 및 전류 리플을 최소화 할 수 있다. 제안된 시스템의 출력 전류는 계통 라인에 계통 전압과 동상으로 주입되도록 제어되며 태양광 발전 시스템 뿐만 아니라 계통 연계형 풍력발전 시스템에도 적용될 수 있다. 제안된 시스템의 타당성을 검증하기 위해 40kHz 스위칭의 1.2kW 인버터를 제작하여 실험하였다.

2. 본 론

제안된 인버터의 회로도가 그림 1에 나타나 있다. 그림에서 보는 바와 같이 제안된 회로는 기존의 full bridge 형태의 인버터에 두 개의 공진 공진 인덕터, 두 개의 공진 캐패시터 그리고 두 개의 보조 스위치가 추가되어 구성되어 있다. 제안된 회로의 주 스위치 (S1-S4) 의 기본 게이팅 신호와 개략적인 동작이 그림 2에 나타나 있다. 그림에서 보는 바와 같이 제안된 인버터는 교번하는 Buck 컨버터로 동작하는 것은 볼 수 있다. 하부 스위치 S3 와 S4 는 전류가 영이 될 때 60Hz로 스위칭하므로 스위칭 손실을 최소화 할 수 있다.

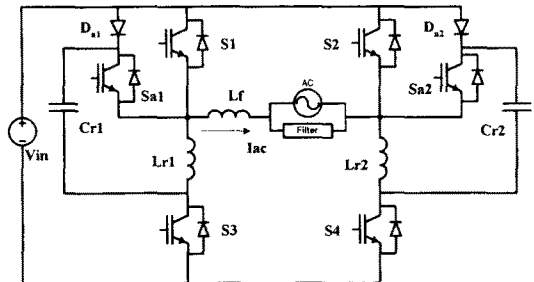


그림 1 제안된 영전류 스위칭 계통 연계형 태양광 발전 인버터

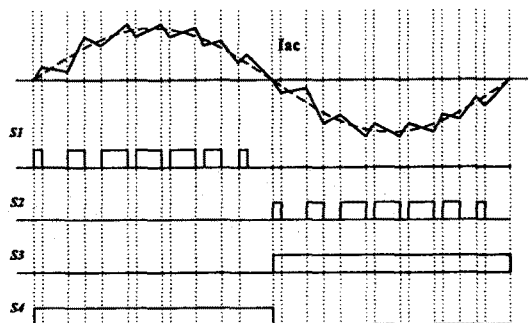


그림 2 제안된 인버터의 개략적인 동작 파형

2.1. 영전류 스위칭을 위한 보조회로의 동작원리

제한된 영전류 스위칭 인버터는 교번하는 Buck 컨버터로 동작하므로 S2는 OFF, S4는 ON 인 상태에서 S1이 PWM 하는 경우에 대해 설명한다. 이 경우 회로는 그림 3에서 보는 것처럼 간략화해서 Buck 컨버터로 표현할 수 있다. 먼저 정상 상태에서의 동작원리를 분석하기 위해 출력단 인덕터는 스위칭 한 주기 동안 정전류원으로 간주할 수 있을 정도로 크고 모든 소자는 이상적인 것으로 가정한다. 제한된 방식은 한 스위칭 주기동안 7개의 동작 모드를 가지며 각 모드의 동작회로와 기본 파형이 각각 그림 3과 4에 나타나 있다.

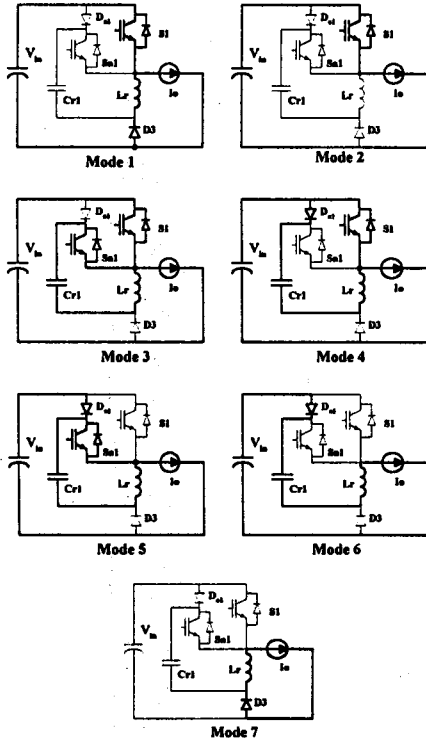


그림 3 동작모드

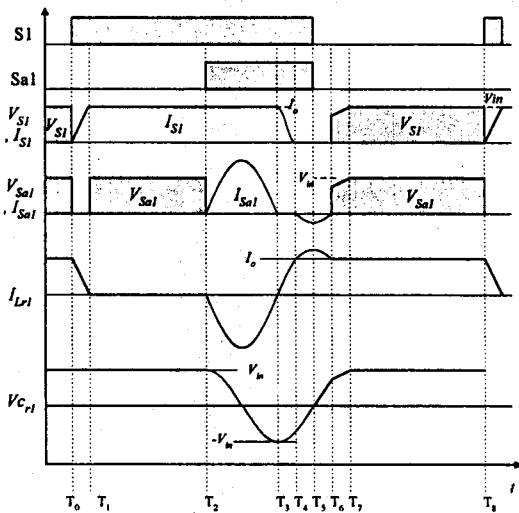


그림 4 제한된 인버터의 모드별 동작 파형

Mode1 (T_0 - T_1): T_0 이전에 출력 전류 I_o 가 S3의 역병렬 다이오드 D3을 통해 freewheeling 하고 있다가 T_0 에 스위치 S1이 켜지면 입력 전압이 공진 인덕터 $Lr1$ 에 가해져 주 스위치에 흐르는 전류는 선형적으로 I_o 가 될 때까지 증가한다.

Mode2 (T_1 - T_2): 이 구간에서는 I_o 가 S1을 통해 흐르고 D3는 오프 상태로 유지되며 $Cr1$ 의 전압은 입력단의 전압 V_{in} 으로 고정되어 유지된다.

Mode3 (T_2 - T_3): T_2 에서 보조 스위치 Sa1이 켜지고 $Cr1$ 은 $Lr1$ 과 공진하면서 V_{Cr1} 이 T_3 에서 $-V_{in}$ 가 될 때까지 방전한다.

Mode4 (T_3 - T_4): T_3 에서 Da1이 도통하고 $Cr1$ 은 Da1과 S1을 통해 충전된다. Sa1의 역병렬 다이오드를 통해서도 충전할 수 있는 회로가 구성되나 S1을 통한 회로의 전압강하와 다이오드 Da1을 통한 전압강하가 서로 상쇄되므로 전류는 S1을 통해 흐른다. S1을 통해 흐르는 전류가 T_4 에서 영이 될 때까지 이 동작모드는 지속된다.

Mode5 (T_4 - T_6): T_4 에서 S1을 통해 흐르던 전류가 영이 되면 Sa1의 병렬 다이오드를 통해 $Cr1$ 은 계속 충전되며 이 모드는 T_6 에서 Sa1의 역병렬 다이오드를 통해 흐르던 전류가 영이 될 때까지 계속된다. 이 모드 동안에 S1과 Sa1의 턴-오프 신호가 가해지고 영전류 스위칭이 이루어진다.

Mode6 (T_6 - T_7): 입력전류는 D2를 통해 흐르면서 $Cr1$ 을 충전하고 V_{Cr1} 은 T_7 에서 V_{in} 과 같아질 때까지 상승한다.

Mode7 (T_7 - T_8): V_{Cr1} 이 V_{in} 이 되면 Da1은 꺼지고 D3가 도통하여 I_o 가 D3를 통해 freewheeling 한다.

2.2 제어기

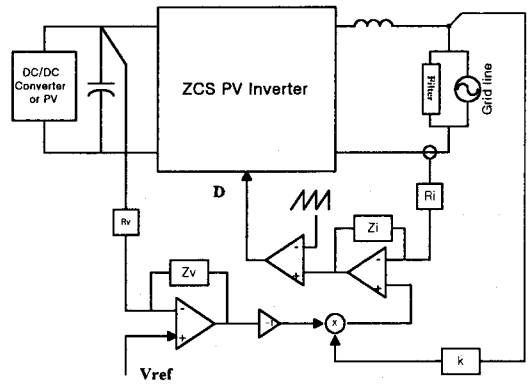


그림 5 제어 블록도

그림 5에서 보는 바와 같이 제안된 인버터 시스템의 제어는 입력 전압을 제어하는 전압 제어부와 출력 전류를 제어하는 전류 제어부로 구성된다. 인버터의 입력 전류는 정현파의 공급 형태가 되므로 입력 측의 캐패시터 전압에는 120 Hz 전압 리플이 나타나게 된다. 따라서 출력 전류의 지령치에 이 부분에 대한 영향이 나타나지 않도록 하기 위해서는 전압 제어부의 제어 대역폭을 120

Hz 에 비해 충분히 작게 설계하여야 한다. 제어기의 상세 회로도가 그림 6에 나타나 있다.

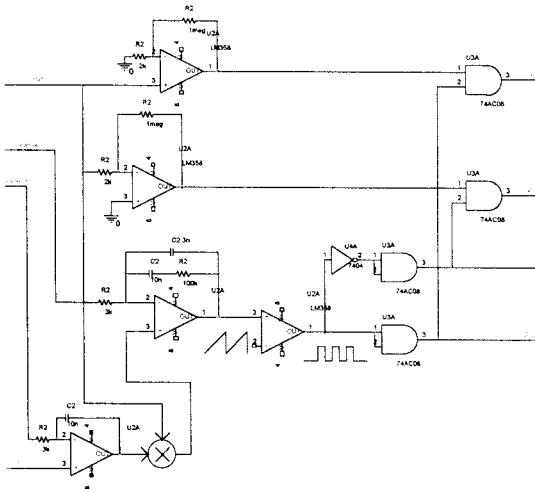


그림 6 제어기 회로도

2.3 실험 결과

그림 7은 주 스위치의 전압 및 전류 파형을 각각 보여 주고 있다. 주 스위치가 턴-온할 때 공진 인덕터에 의해 di/dt 가 제한되어 전압과 전류가 겹치는 부분이 없는 것을 볼 수 있다. 또한 스위치가 턴-오프하기 전에 스위치의 전류가 영이 되어 영전류 턴-오프 하는 것을 볼 수 있다. 그림 8은 S1과 S4의 게이팅 신호와 인버터의 출력단 인덕터 전류와 출력 전류를 각각 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 S4는 60Hz 로 스위칭 하며 S1은 고주파로 스위칭하며 출력 전류를 정현파의 형태로 제어하고 있는 것을 볼 수 있다. 그림 9는 측정 효율을 보여 주고 있다. 최대 효율은 전부하시 약 97.5% 였으며 하드 스위칭 경우에 비해 전부하시 2% 가량의 효율 향상이 있음을 볼 수 있다.

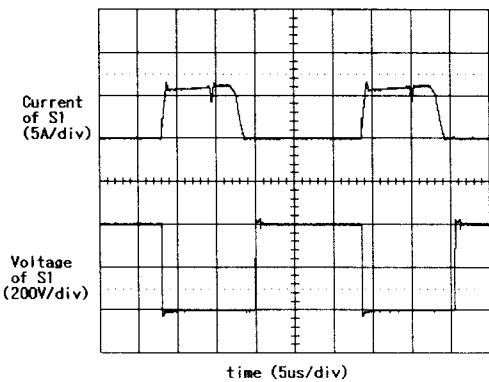


그림 7 주 스위치 전압 전류 파형

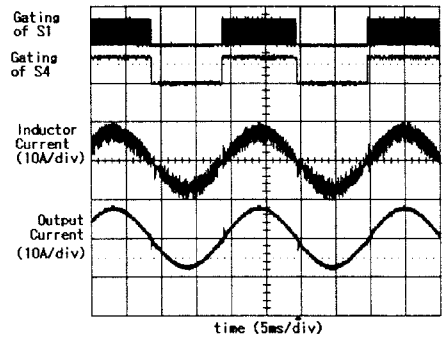


그림 8 출력 전류 파형

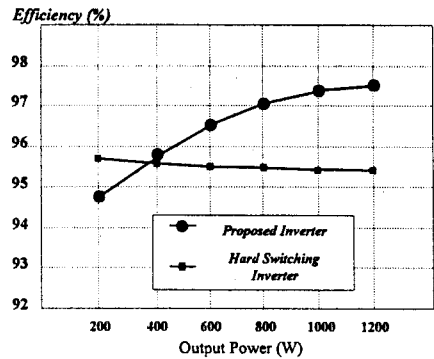


그림 9 측정 효율

3. 결론

영전류 스위칭 계통 연계형 태양광 발전 인버터를 제안하였다. 제안된 인버터는 기존의 단상 인버터에 영전류 스위칭 PWM Switch Cell [6] 을 적용하여 구현되었으며 이 방식은 주 스위치와 보조 스위치 모두 영전류 스위칭을 하며 영전류 스위칭을 위한 공진전류가 보조 회로를 통해서만 흐르기 때문에 주 스위치의 도통 손실을 최소화 할 수 있다. 제안된 인버터는 60Hz 로 교번하는 Buck 컨버터로 동작하므로 스위칭 손실 및 전류 리플을 최소화 할 수 있다. 제안된 시스템은 계통 라인에 계통 전압과 동상의 전류를 주입하도록 제어되며 태양광 발전시스템뿐 아니라 계통 연계형 풍력발전 시스템에도 적용될 수 있다.

참고 문헌

- [1] D. C. Martins, R. Demonti and I. Barbi, " Usage of the Solar Energy from the Photovoltaic Panels for the Generation of Electrical Energy", INTELEC 99', 17-3
- [2] N. Kasa, H. Ogawa and T. Iida, "A Transformer-Less Inverter using Buck-Boost Type Chopper Circuit for Photovoltaic Power System", PEDS 99', pp.653-658.
- [3] M. F. Rahman and L. Zhong, "A New, Transformerless, Photovoltaic Array to Utility Grid Interconnection", PEDS 97', pp.653-658.
- [4] T. Tawara, T. Aoki and Y. Kawagoe, "An Efficient Interactive Inverter for a Photovoltaic System", APEC 99', pp.1052-1056.
- [5] J. Rajagopalan and B.H. Cho, "Space-Vector Modulated PWM Converters for Photo-voltaic Interface Applications: Analysis, Control and Power Management Issues", IEEE APEC 1995, pp.814-820.
- [6] 최항식, 조보형, "추가적인 도통손실을 최소화 하는 영전류 스위칭 PWM 스위치 셀" 전력전자 추계학술대회, pp. 159-162