

3레벨 태양광 PCS에서의 누설전류 저감기법 개발

한성은, 조종민, 신창훈, 차한주
충남대학교 전기공학과

Development of Leakage Current Reduction Method in 3-Level Photovoltaic PCS

Seongeun Han, Jongmin Jo, Changhoon Shin, Hanju Cha
Department of Electrical Engineering, Chungnam National University

ABSTRACT

본 논문은 3레벨 태양광 PCS에서 누설전류의 분석 및 저감 기법을 제안하였으며 시뮬레이션 및 실험을 통해 검증하였다. 태양전지 어레이의 기계적인 구조와 설치로 인해 태양광 모듈과 접지 간에 존재하는 기생 커패시터 성분을 고려하여 공통모드 전압관점의 등가회로를 통해 누설전류 발생 원인을 분석하였다. 100nF/kW 기준으로 1 μ F 기생 커패시터를 고려한 10kW 급 3레벨 태양광 PCS 시뮬레이션 및 실험을 수행하였으며, 누설전류의 크기가 이상적인 SVPWM에서의 누설전류기준 27%로 감소하는 모습을 검증하였다.

1. 서론

최근 전 세계적으로 계속되는 에너지 소비의 증가 및 환경 문제로 인해 풍력, 태양광 그리고 연료전지등과 같은 신재생에너지에 관심이 증가되고 있다. 이 중에서 태양광 에너지는 보수가 용이하고, 장기간 사용 가능하다는 점에서 산업사회나 가정에서 많이 사용되고 있는 추세이다.^[1] 태양광 PCS에서는 태양전지 어레이의 기계적인 구조와 설치로 인해 태양광 모듈과 접지 사이에 기생 커패시턴스가 생기게 된다. 이에 따라 스위칭에 의한 공통모드전압에 의해 PV와 계통 사이에 누설전류가 발생하게 된다. 이러한 누설 전류는 작업자의 안전문제와 보호계전기 및 주변기기들의 오동작 문제를 야기하기 때문에 저감이 필요하다. 일반적인 태양광 PCS 토폴로지에서는 누설전류를 저감하기 위해 패널과 계통사이에 변압기를 이용한 절연이 사용된다.^[2] 하지만 변압기를 이용하게 되면 시스템의 크기가 커지고 비용과 무게가 증가한다는 단점이 있다.^[3] 이러한 단점을 피하기 위한 변압기가 제외된 누설전류 저감기법에는 일반적으로 PWM기법을 이용한 방법과 토폴로지적인 방법 두 가지로 고려될 수 있는데 본 논문에서는 PWM 기법을 이용한 3레벨 NPC 타입 태양광 PCS에서의 누설전류 저감기법을 제안하였으며 시뮬레이션과 실험을 통해 제안한 누설전류 저감기법을 검증하였다.

2. 누설전류 발생원인 및 등가회로 해석

그림 1은 무변압기형 3상 3레벨 NPC 타입 인버터 시스템의 회로를 보여주며 C_{PV} 는 태양전지 어레이의 기계적인 구조와 설치로 인해 태양광 모듈과 접지 간에 존재하는 기생 커패시터

성분을 나타낸다. 주변의 온도 및 습도에 따라서 크기가 변하지만 본 논문에서는 100nF/kW 기준으로 1 μ F로 고려하였다. 변압기를 이용하지 않은 태양광 PCS에서는 태양광 패널과 계통사이가 절연되어 있지 않기 때문에 누설전류가 발생할 수 있다.

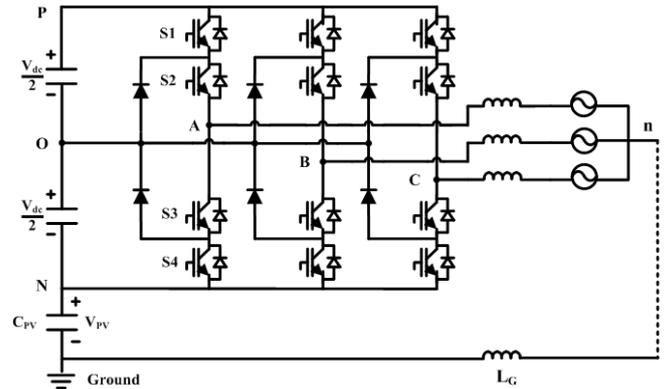


그림 1 3상 3레벨 NPC타입 인버터시스템 구성
Fig. 1 Configuration of the 3-phase 3-level NPC-type inverter system

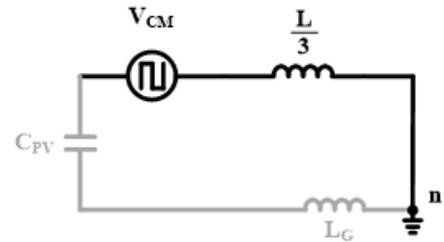


그림 2 공통모드전압 등가회로
Fig. 2 Common mode voltage equivalent circuit

$$V_{CM} = \frac{V_{AO} + V_{BO} + V_{CO}}{3} \quad (1)$$

그림 2는 3상 인버터시스템을 공통모드전압관점에서의 등가회로이다. 공통모드전압은 DC링크의 중성점 O점을 기준으로 인버터 각 상 추력 전압들 간의 합의 평균으로 정의되며 식 (1)과 같이 도출된다. 누설전류는 기생 커패시턴스 성분 C_{PV} 양단에 인가되는 공통모드 전압 V_{CM} 에 의해 결정되게 되며 커

패시터 C_{PV} 에 흐르는 전류는 식 (2)와 같기 때문에 공통모드 전압 변동이 적을수록 누설전류 역시 줄어들게 된다. 본 논문에서는 새로운 SVPWM기법을 제안하여 공통모드전압의 변동을 줄임으로서 누설전류를 저감하였다.

$$i_{C_{PV}} = C_{PV} \frac{dV_{PV}}{dt} \quad (2)$$

3. PWM기법을 이용한 누설전류저감

그림 3은 3상 3레벨 인버터의 전압 벡터도를 보여주는 것으로 총 27개의 벡터가 존재한다. 유효벡터(6개의 Large vector, 6개의 Medium vector, 12개의 Small vector) 24개와 3개의 Zero vector로 이루어지며 사용되는 전압 벡터에 따라 공통모드전압 V_{CM} 이 변동하게 된다. 전압 벡터에 따른 공통모드전압은 표 1에 표현되어있다.

이상적인 3레벨 인버터의 SVPWM 동작은 동일한 위상의 2개 캐리어와 전압 지령치를 비교하여 이루어진다. 위의 캐리어와 전압 지령치를 비교하여 그림 1의 1번, 3번의 스위치가 상보적으로 동작하며 아래의 캐리어와 전압 지령치를 비교하여 2번, 4번의 스위치가 상보적으로 동작하게 된다.

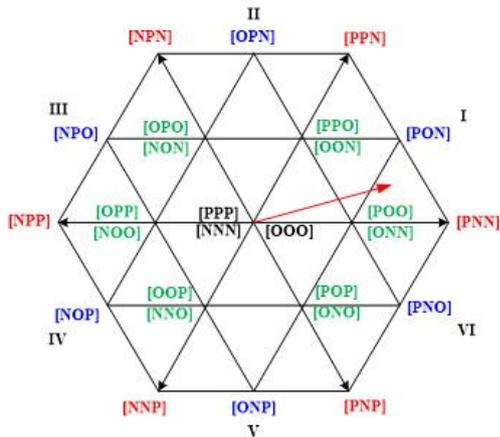


그림 3 3레벨 인버터의 공간벡터도

Fig. 3 Space vector diagram of 3-level inverter

표 1 전압 벡터에 따른 공통모드전압

Table 1 Common mode voltage according to Voltage vector

L-V	V_{CM}	M-V	V_{CM}	S-V	V_{CM}	S-V	V_{CM}
PNN	$-V_{DC}/6$	PON	0	POO	$+V_{DC}/6$	ONN	$-V_{DC}/3$
PPN	$+V_{DC}/6$	OPN	0	OON	$-V_{DC}/6$	PPO	$+V_{DC}/3$
NPN	$-V_{DC}/6$	NPO	0	OPO	$+V_{DC}/6$	NON	$-V_{DC}/3$
NPP	$+V_{DC}/6$	NOP	0	NOO	$-V_{DC}/6$	OPP	$+V_{DC}/3$
NNP	$-V_{DC}/6$	ONP	0	OOP	$+V_{DC}/6$	NNO	$-V_{DC}/3$
PNP	$+V_{DC}/6$	PNO	0	ONO	$-V_{DC}/6$	POP	$+V_{DC}/3$
OOO	0	NNN	0	PPP	0		

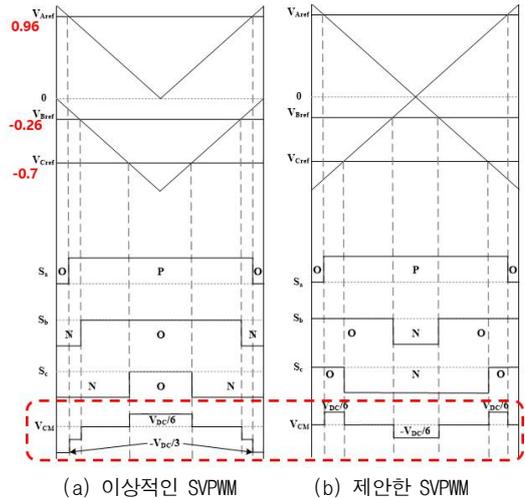


그림 4 PWM비교

Fig. 4 Comparison of PWM

그림 4는 그림 3에서 SVPWM이 15°의 위상을 갖을 때 이상적인 SVPWM과 제안한 PWM 기법의 비교를 나타내고 있다. 제안한 PWM 기법에서의 두 캐리어는 동일한 위상을 갖는 SVPWM의 캐리어와 달리 180°의 위상차를 갖는다. Reference는 15°의 위상일 때의 값으로 $V_{a_ref} = 0.96$, $V_{b_ref} = 0.26$, $V_{c_ref} = 0.7$ 이다. 두 방식 모두 (PNN), (PON)의 동일한 Large vector와 Medium vector를 사용하지만 Small vector사용에서는 다른 모습을 보인다.

이상적인 SVPWM에서는 $\pm V_{DC}/6$, $\pm V_{DC}/3$ 의 공통모드전압을 갖는 Small vector (POO), (ONN)을 사용하는 반면 제안한 PWM 기법에서는 $\pm V_{DC}/6$ 의 공통모드전압을 갖는 Small vector (POO)만을 사용한다. 결과적으로 이상적인 SVPWM의 공통모드전압은 0, $\pm V_{DC}/6$, $\pm V_{DC}/3$ 의 값을 갖게 되며 제안한 PWM 기법의 공통모드전압은 0, $\pm V_{DC}/6$ 의 값만 존재하게 된다. 제안한 SVPWM 기법에서의 공통모드전압 변동이 보다 작기 때문에 누설전류 역시 제안한 SVPWM 방식에서 저감된다.

4. 시뮬레이션 결과

그림 5는 3상 3레벨 NPC 타입 인버터 PSIM 시뮬레이션의 구성을 나타내고 있으며 누설전류 저감기법 실험을 진행하기 위해 PSIM을 통해 시뮬레이션을 진행하였다. 시뮬레이션과 실험에서의 기생 커패시터는 100nF/kW 기준으로 1uF으로 선정하였다. 표 2는 시뮬레이션과 실험의 파라미터들을 나타낸다. 그림 6은 이상적인 SVPWM과 제안한 SVPWM기법의 공통모드전압과 누설전류를 비교한 파형이다.

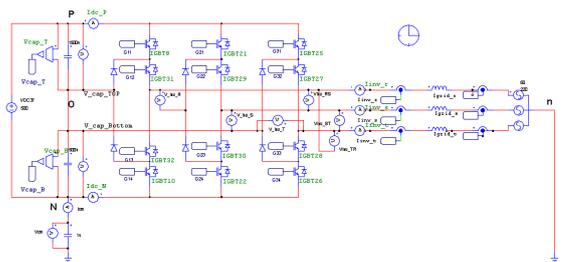


그림 5 PSIM 시뮬레이션

Fig. 5 PSIM simulation

표 2 시스템 파라미터
Table 2 System parameter

파라미터	기호	값
DC전압	V	500V
스위칭 주파수	f	10kHz
L 필터	L	1.43mH
기생 커패시턴스	C	1uF

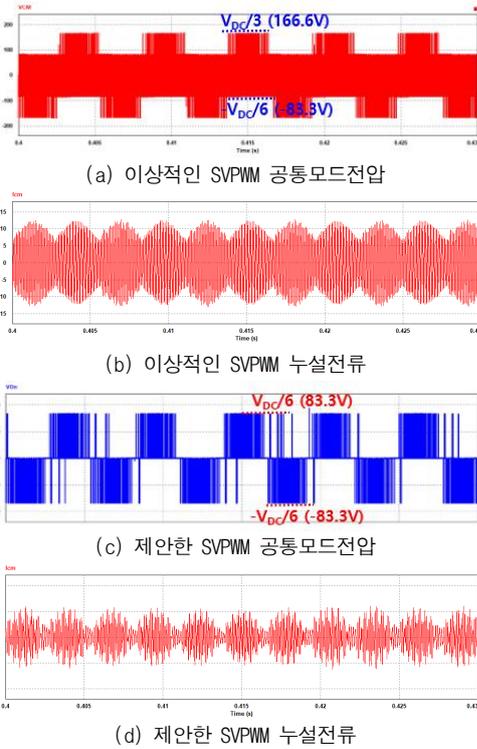


그림 6 시뮬레이션 결과
Fig. 6 simulation result

이상적인 SVPWM 방식에서 공통모드전압은 $\pm 83.3V(\pm V_{DC}/6)$, $\pm 166.6V(\pm V_{DC}/3)$, $0V$ 로 이루어져있는 반면 제한한 SVPWM기법에서의 공통모드전압은 $\pm 83.3V(\pm V_{DC}/6)$, $0V$ 로 이루어져있음을 확인하였다. 누설전류는 이상적인 SVPWM에서 7.0A가 발생하였으며 제한한 SVPWM 기법에서는 33%로 저감됨을 확인할 수 있다.

5. 실험 결과

그림 7은 3상 3레벨 태양광 PCS 구성을 보여주며, 시뮬레이션과 동일한 파라미터를 적용하여 진행하였다. 시뮬레이션 결과와 비교하여 검증하였다.

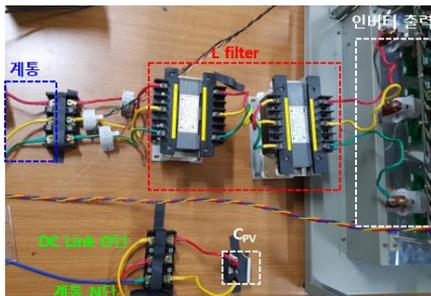


그림 7 실험구성
Fig. 7 Experiment setting

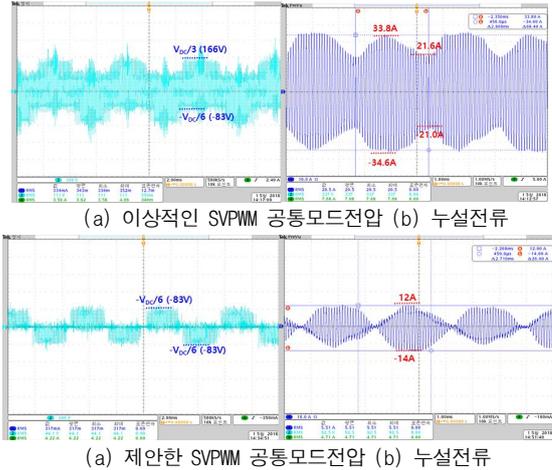


그림 8 실험 결과
Fig. 8 Experiment result

그림 8은 실험결과과정으로 이상적인 SVPWM 방식과 제한한 PWM 기법의 공통모드전압과 누설전류를 보여준다. 이상적인 SVPWM 방식에서의 공통모드전압은 $\pm 83.3V$, $\pm 166.6V$, $0V$ 로 이루어져있는 반면 제한한 SVPWM기법에서의 공통모드전압은 $\pm 83.3V$, $0V$ 로 이루어져있음을 확인하였다. 누설전류는 이상적인 SVPWM에서 20.5A가 발생하였으며 제한한 SVPWM 기법에서는 27%로 저감됨을 확인할 수 있다.

6. 결론

본 논문은 3레벨 태양광 PCS에서 누설전류의 분석 및 저감 기법에 대해 서술하였으며 시뮬레이션 및 실험을 통해 검증하였다. 태양전지 어레이의 기계적인 구조와 설치로 인해 태양광 모듈과 접지 간에 존재하는 기생 커패시터 성분을 고려하여 공통모드 전압관점의 등가모델을 통해 누설전류 발생 원인을 분석하였다. $100nF/kW$ 기준으로 $1uF$ 기생 커패시터를 고려한 $10kW$ 급 3레벨 태양광 PCS 시뮬레이션 및 실험을 수행하였으며 누설전류가 27%로 저감됨을 확인하여 제한한 저감기법을 검증하였다.

참고 문헌

- [1] N. S. Choi, E. C. Lee, and K. S. Ahn, "A carrier based medium vector PWM strategy for three level inverters in transformerless photovoltaic systems," Conf. Record on ICPE 2015, Jun 16, Seoul, Korea
- [2] J. S. Lee and K. B. Lee, "New modulation techniques for a leakage current reduction and a neutral point voltage balance in transformerless photovoltaic systems using a three level inverter," IEEE Trans. on Power Electronics, Vol. 29, No. 15, pp. 1720-1732, Apr. 2014
- [3] X. Guo, M. C. Cavalcanti, A. M. Farias, and J. M. Guerrero, "Single carrier modulation for neutral point clamped inverters in three phase transformerless photovoltaic systems," IEEE Trans. on Power Electronics, Vol. 28, No. 6, pp. 2635-2657, June 2013.