https://doi.org/10.6113/TKPE.2019.24.1.56

3레벨 태양광 PCS에서의 누설전류 저감기법 개발

한성은[1], 조종민[1], 안현성[1], 차한주†

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

Seongeun Han[1], Jongmin Jo[1], Hyunsung An[1], and Hanju Cha†

Abstract

In this study, a reduction method of leakage current in a three-level photovoltaic power-conditioning system (PCS) is proposed and verified by simulation and experiment. Leakage current generation is analyzed through an equivalent model of the common mode voltage considering a significant parasitic capacitance existing between the photovoltaic array and ground. A leakage current reduction method using pulse-width modulation (PWM) method is also proposed, and a 10-kW three-level photovoltaic PCS simulation and experiment is performed with a 1 μF parasitic capacitor based on 100 nF/kW. The proposed method using the PWM method is verified to reduce the leakage current by 73% compared with the conventional PWM method.

Key words: Leakage current, Photovoltaic PCS, 3-level inverter, Common mode voltage

1. 서 론

최근 전 세계적으로 계속되는 에너지 소비의 증가 및 환경 문제로 인해 풍력, 태양광 그리고 연료전지 등과 같은 신재생에너지에 관심이 증가되고 있다. 특히 원자력 발전소 고리 1호기가 발전 영구 중단되는 등 탈원전을 시도함에 따라 신재생에너지에 대한 관심은 요즘 급증하고 있다. 이 중에서 태양광 에너지는 보수가 용이하고, 장기간 사용 가능하다는 점에서 산업사회나 가정에서 많이 사용되고 있는 추세이다[1]. 이러한 태양광 에너지를 사용하기 위해서는 태양전지에서 얻는 DC 전원을 AC 전원으로 변환해주는 태양광 PCS(Power Conditioning System)가 반드시 필요하다. 태양광 PCS에서는 태양전지 어레이의 기계적인 구조와 설치로 인해 태양광 모듈과 접지 사이에 기생 커패시턴스가 생기게 된다. 기생 커패시턴스 C_{PV}의 크기는 태양광 패널 및 프레임 구조, 기후 조건, 습도, 셀 간 거리 등에 영향을 받아 수 nF에서 수 μF까지 가변된다. PCS의 스위칭에 의한 공통모드전압이 기생 커패시터 양단에 인가되며, 공통모드전압의 크기 및 주파수 성분과 기생 커패시턴스 값의 영향에 따라 PV와 계통 사이에 누설전류가 발생하게 된다. 이러한 누설 전류는 작업자의 안전문제와 보호계전기 및 주변기기들의 오동작 문제를 야기하기 때문에 반드시 저감이 필요하다[2]. 일반적인 태양광 PCS 토폴로지에서는 누설전류를 저감하기 위해 패널과 계통사이에 변압기를 이용한 절연이 사용된다[3]. 하지만 변압기를 이용하게 되면 시스템의 크기가 커지고 비용과 무게가 증가한다는 단점이 있다[4]-[5]. 이러한 단점을 피하기 위한 변압기가 제외된 누설전류 저감기법이 개발되고 있다[6]. 변압기를 이용하지 않는 누설전류 저감기법으로는 일반적으로 PWM 기법을 이용한 방법과 토폴로지적인 방법 두 가지로 고려된다[7]-[8]. 본 논문에서는 PWM 기법을 이용한 3레벨 NPC(Neutral Point Clamped) - 타입 태양광 PCS에서의 누설전류 저감기법을 제안하였다. PWM 기법을 이용하여 누설전류를 감소 또는 제거시키는 방법으로는 인버터의 공통모드전압의 변동을 최대한 감소 또는 제거시키는 것이다. PWM 기법을 이용한 누설전류 저감 기법으로는 Medium-vector만을 이용하여 공통모드전압 변동을 '0'으로 만들어 누설전류를 저감하는 기법이 연구되어있다[9]. 하지만 Medium-vector만을 이용한 누설전류 저감기법을 이용

Paper number: TKPE-2019-24-1-8
Print ISSN: 1229-2214 Online ISSN: 2288-6281
† Corresponding author: hjcha@cnu.ac.kr, Dept. of Electrical Engineering, Chungnam National University
Tel: +82-42-821-7006 Fax: +82-42-821-8895
[1] Dept. of Electrical Engineering, Chungnam National University
Manuscript received Sep. 18, 2018; revised Oct. 6, 2018; accepted Oct. 26, 2018
— 본 논문은 2018년 전력전자학술대회 태양광논문상 수상논문임

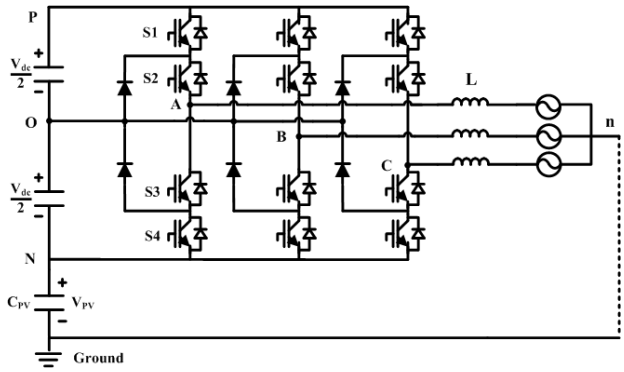


Fig. 1. Configuration of the 3-phase 3-level NPC-type inverter system.

하게 되면 동일한 직류전압을 사용할 경우 기존의 PWM에 비해 전압이용률이 86%로 감소되는 단점이 발생한다. 이러한 단점을 피하기 위해 본 논문에서는 Large vector, Medium vector, Small vector를 모두 사용하며 전압이용률이 100%인 누설 전류를 저감하는 기법을 제안하였다. 일반적으로 태양광 PCS에는 2레벨 또는 3레벨 인버터가 사용되며, 3레벨은 2레벨에 비해 높은 직류단 전압을 사용할 수 있어서 대용량 시스템에 좀 더 유리하다. 또한 3레벨 인버터는 동일한 스위칭 주파수에서 2레벨 인버터보다 리플 저감 측면에 있어 더욱 우수한 모습을 보인다. 3레벨 인버터에는 NPC-타입과 T-타입이 존재하는데 NPC-타입은 T-타입에 비해 높은 DC링크 전압에 적용할 수 있는 장점이 있다. 본 논문은 3레벨 NPC-타입 인버터에서의 PWM을 이용한 누설전류 저감기법에 대하여 서술하였으며 실험과 시뮬레이션을 진행하였다.

2. 누설전류 발생원인 및 등가회로 해석

그림 1은 무변압기형 3상 3레벨 NPC-타입 인버터 시스템의 회로를 보여준다. 3레벨 NPC-타입 인버터는 2레벨 구조에 비해 동일한 스위칭 주파수에서 리플 저감 측면에서 우수하며 2레벨, 3레벨 T-타입에 비해 높은 DC링크전압을 적용할 수 있다는 장점이 있다. C_{PV}는 태양전지 어레이의 기계적인 구조와 설치로 인해 태양광 모듈과 접지 간에 존재하는 기생 커패시턴스 성분을 나타낸다. 기생 커패시턴스는 주변의 온도 및 습도에 따라서 수 nF에서 수 μF까지 크기가 변하지만 본 논문에서는 100nF/kW 기준으로 1μF으로 고려하였다. 변압기를 이용하지 않은 태양광 PCS에서는 태양광 패널과 계통 사이가 절연되어있지 않기 때문에 누설전류가 발생할 수 있다. 이러한 누설전류는 작업자의 안전문제와 보호계전기 및 주변기기들의 오동작 문제를 야기하기 때문에 반드시 저감이 필요하다.

그림 2는 3상 인버터시스템을 공통모드전압관점에서의 등가화한 회로이다. V_{CM}은 공통모드전압, C_{PV}는 기생

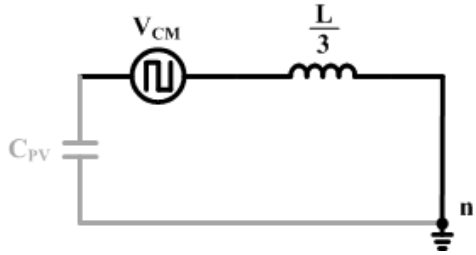


Fig. 2. Common mode voltage equivalent circuit.

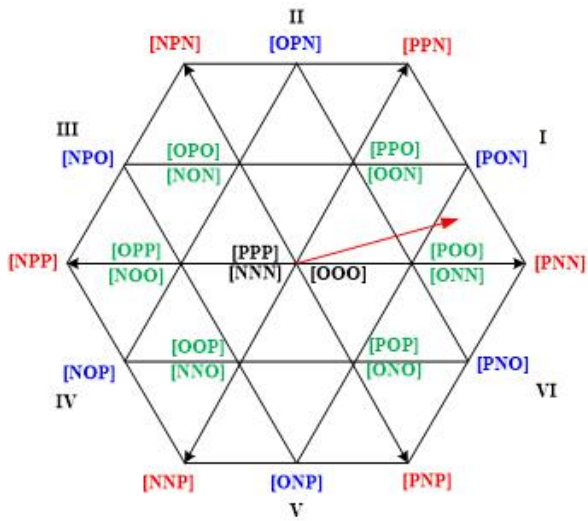


Fig. 3. Space vector diagram of 3-level inverter.

커패시턴스 성분을 나타내며 $\frac{L}{3}$은 병렬로 존재하는 3개의 L필터를 나타낸다. PCS의 스위칭에 의해 발생하는 공통모드전압은 DC링크의 중성점 O점을 기준으로 인버터 각 출력 상전압 간 합의 평균으로 정의되며 식 (1)과 같이 도출된다. 누설전류는 기생 커패시턴스 성분 C_{PV} 양단에 인가되는 공통모드 전압 V_{CM}과 주파수 성분에 의해 결정된다. 기생 커패시턴스 C_{PV}에 흐르는 전류는 식 (2)와 같으며 누설전류를 감소 또는 제거시키는 방법으로는 인버터의 공통모드전압의 변동을 최대한 저감하는 것이다.

$$V_{CM} = \frac{V_{AO} + V_{BO} + V_{CO}}{3} \tag{1}$$

$$i_{C_{PV}} = C_{PV}\frac{dV_{PV}}{dt} \tag{2}$$

3. PWM 기법을 이용한 누설전류저감

그림 3은 3상 3레벨 인버터의 전압 벡터도를 보여주며 총 27개의 벡터가 존재한다. 유효벡터 24개(6개의 Large vector, 6개의 Medium vector, 12개의 Small vector)와 3개의 Zero vector로 이루어지며 사용되는 전압 벡터에 따라 공통모드전압 V_{CM}이 변동하게 된다.

TABLE I
COMMON MODE VOLTAGE ACCORDING TO VOLTAGE VECTOR

Large Vector	V_{CM}	Medium Vector	V_{CM}	Small Vector	V_{CM}	Small Vector	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	$-V_{DC}/2$	PPP	$+V_{DC}/2$		

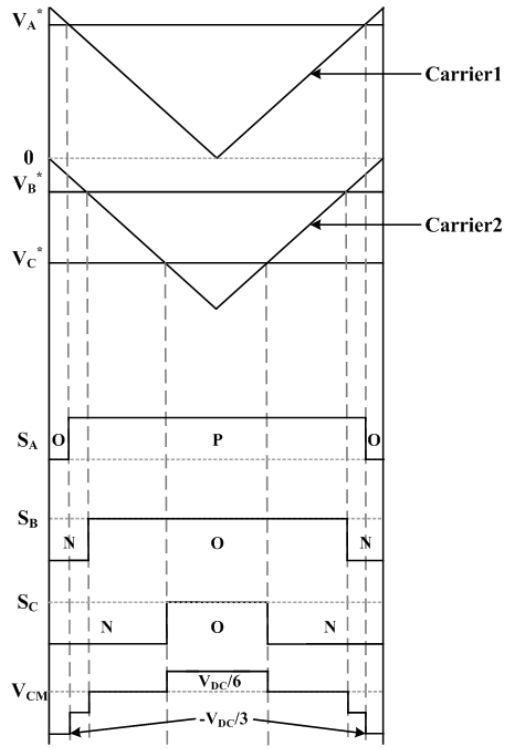
표 1은 전압 벡터에 따른 공통모드전압을 나타내며 공통모드전압 값으로는 0, $\pm V_{DC}/6$, $\pm V_{DC}/3$, $\pm V_{DC}/2$로 구성되며 사용되는 벡터에 따라 누설전류가 증감하게 된다. 표 1에서 보이는 바와 같이 Small vector에서는 $\pm V_{DC}/6$, $\pm V_{DC}/3$의 공통모드전압을 가짐으로써 다른 벡터에서보다 전압을 크게 변동시킨다.

일반적으로 3레벨 인버터의 PWM 동작은 동일한 위상의 2개 캐리어와 각 상의 전압 지령치를 비교하여 이루어진다. 위의 0과 1사이의 캐리어와 전압 지령치를 비교하여 그림 1의 1번, 3번의 스위치가 상보적으로 동작하며 아래의 0과 -1사이의 캐리어와 전압 지령치를 비교하여 2번, 4번의 스위치가 상보적으로 동작하게 된다.

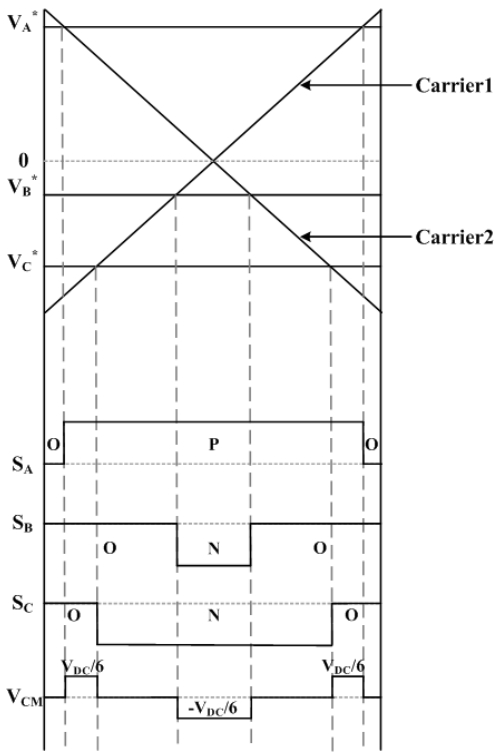
그림 4는 그림 3에서 15°의 위상을 갖을 때 기존의 PWM과 제안한 PWM 기법의 비교를 나타내고 있다. 그림 4(a)는 기존의 PWM의 동작을 나타내며 3상의 전압지령치와 동상의 캐리어가 비교되어 동작한다. 그림 4(b)는 제안한 PWM의 동작을 나타내며 3상의 전압지령치와 180°의 위상차를 갖는 캐리어가 비교되어 동작한다. 3상의 전압지령치는 15°의 위상일 때의 값으로 V_{a_ref} = 0.96, V_{b_ref} = −0.26, V_{c_ref} = −0.7 이다. 두 방식 모두 (PNN), (PON)의 동일한 Large vector와 Medium vector를 사용하지만 다른 Small vector를 사용한다.

기존의 PWM에서는 Small vector (POO), (ONN)를 사용하여 $+V_{DC}/6$, $-V_{DC}/3$의 공통모드전압을 갖는 반면 제안한 PWM 기법에서는 Small vector (POO)만을 사용하여 $+V_{DC}/6$의 공통모드전압만을 갖는다. 결과적으로 기존의 PWM의 공통모드전압은 0, $\pm V_{DC}/6$, $\pm V_{DC}/3$의 값을 갖게되며 제안한 PWM 기법의 공통모드전압은 0, $\pm V_{DC}/6$의 값만 존재하게 된다. 제안한 PWM 기법에서의 공통모드전압 변동이 보다 작기 때문에 누설전류 역시 제안한 PWM 방식에서 저감된다.

기존의 PWM과 제안한 PWM에서는 Zero vector에서도 다른 모습을 보인다. 기존의 PWM에서는 Zero vector



(a) Conventional PWM



(b) Proposed PWM

Fig. 4. Comparison of PWM method.

를 사용하지 않는 반면 제안한 PWM에서는 Zero vector(OOO)를 사용한다. 일반적으로 공간벡터 PWM을 사용시 지령치에 인접한 벡터들을 인가하는데 제안한 방법에서는 기존의 PWM에 비해 덜 인접한 벡터가 인가

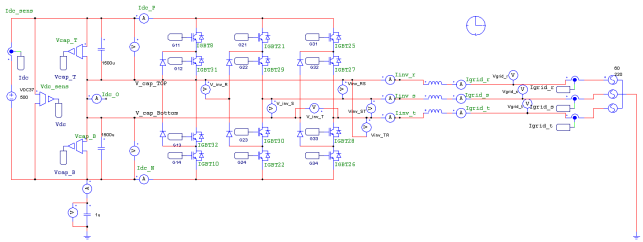
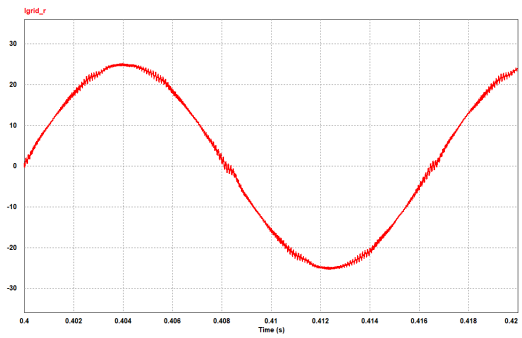


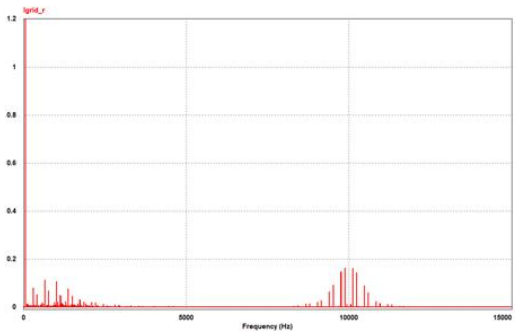
Fig. 5. PSIM simulation.

TABLE II
SYSTEM PARAMETER

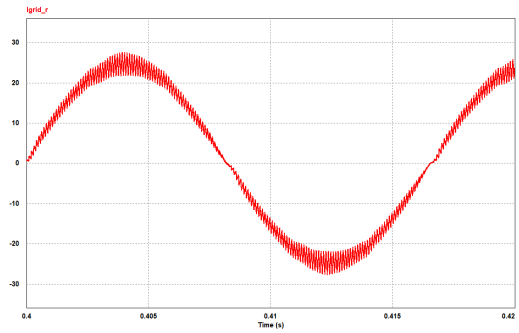
Parameter	Symbol	Value
DC Link	V	500V
Switching frequency	f	10kHz
L filter	L	1.43mH
Parasitic capacitance	C	1μF
Grid Voltage	V_G	$220V_{RMS}$



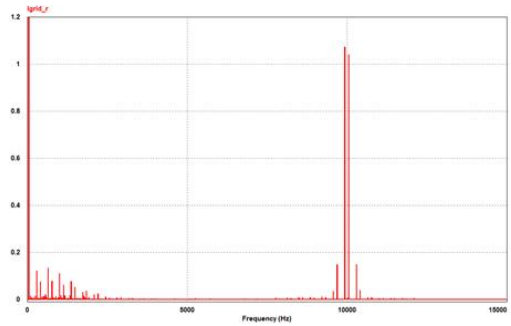
(a) Conventional PWM phase-a current



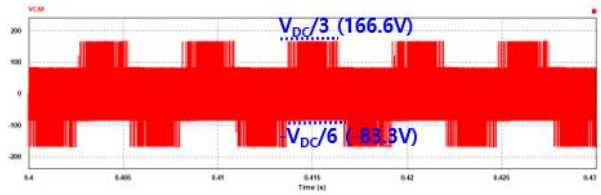
(b) Conventional PWM a-phase-a current FFT



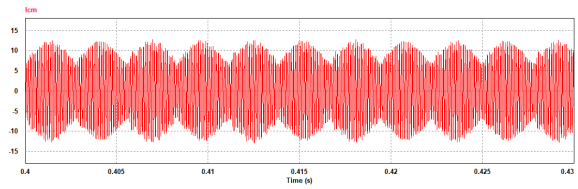
(c) Proposed PWM phase-a current



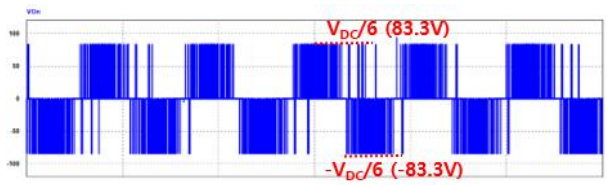
(d) Proposed PWM phase-a current FFT



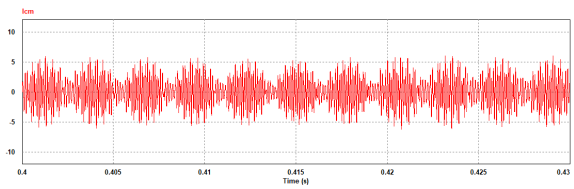
(e) Conventional PWM common mode voltage



(f) Conventional PWM leakage current



(g) Proposed PWM common mode voltage



(h) Proposed PWM leakage current

Fig. 6. Simulation result for comparison of conventional PWM with proposed PWM.

되기 때문에 스위칭 주파수 대역의 전류 리플이 증가하는 문제가 발생한지만, 태양광 발전 시스템에서 제안한 PWM을 이용하면 공통모드전압 및 누설전류의 크기를 저감할 수 있다.

4. 시뮬레이션 결과

그림 5는 3상 3레벨 NPC-타입 인버터 PSIM 시뮬레이션의 구성을 나타내고 있으며 누설전류 저감기법 실험을 진행하기에 앞서 PSIM을 통해 시뮬레이션을 진행

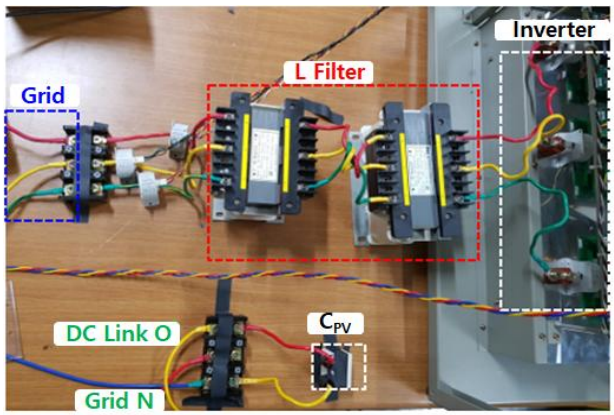


Fig. 7. Configuration of experiment.

하였다. 시뮬레이션과 실험에서의 기생 커패시터는 100nF/kW 기준으로 1μF으로 선정하였다. 표 2는 시뮬레이션과 실험의 파라미터들을 나타낸다.

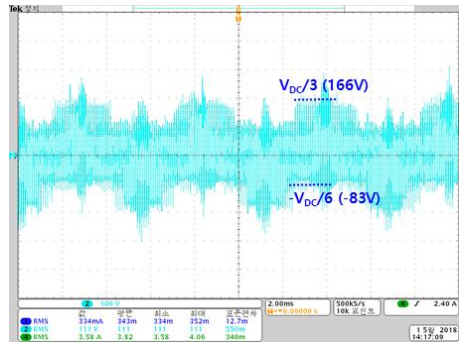
그림 6은 기존의 PWM과 제안한 PWM 기법을 비교한 파형이다. 그림 6(a), (b), (c), (d)는 기생 커패시턴스가 존재하지 않을 때 기존의 PWM과 제안한 PWM의 a상 전류를 비교한 파형이다. 기존의 PWM 방식에 비해 제안한 PWM 방식의 파형에서 전류 리플이 증가하는 문제가 발생하였으며, FFT결과 기존의 PWM 방식에 비해 제안한 PWM 방식의 파형에서 스위칭 주파수인 10kHz 부근에서 1A정도 큰 것을 확인할 수 있다. 하지만 제안한 PWM을 이용하면 태양광 발전 시스템에서 문제가 되는 누설전류 및 공통모드전압의 크기를 저감할 수 있다.

그림 6(e), (f), (g), (h) 기존의 PWM 방식에서 공통모드전압은 ±83.3V(±V_{DC}/6), ±166.6V(±V_{DC}/3), 0V로 이루어져있는 반면 제안한 PWM 기법에서의 공통모드전압은 ±83.3V(±V_{DC}/6), 0V로 이루어져있음을 확인하였다. 누설전류는 기존의 PWM에서 7.0A(rms)가 발생하였으며 제안한 PWM 기법에서는 기존의 PWM 기준 73%로 저감됨을 확인할 수 있다.

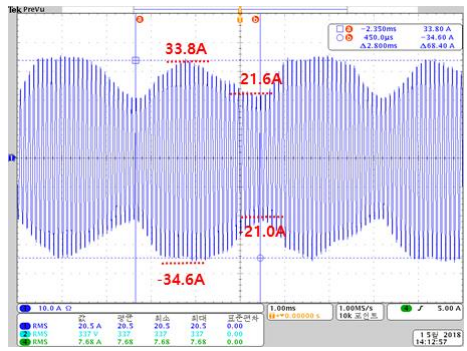
5. 실험 결과

그림 7은 3상 3레벨 태양광 PCS 구성을 보여주며 인버터 출력, L필터, 계통, DC링크 O단과 계통사이의 기생 커패시턴스로 구성된다. 시뮬레이션과 동일한 파라미터를 적용하여 진행하였으며 시뮬레이션 결과와 비교하여 검증하였다.

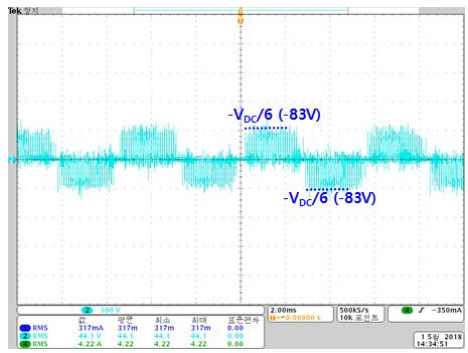
그림 8은 실험결과 파형으로 기존의 PWM 방식과 제안한 PWM 기법의 공통모드전압과 누설전류를 보여준다. 기존의 PWM 방식에서의 공통모드전압은 ±83.3V(±V_{DC}/6), ±166.6V(±V_{DC}/3), 0V로 구성되는 반면 제안한 PWM 기법에서의 공통모드전압은 ±83.3V(±V_{DC}/6), 0V로 구성되는 것을 확인하였다. 누설전류는 기존의 PWM



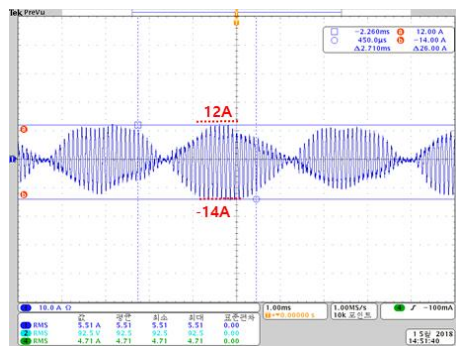
(a) Conventional PWM common mode voltage



(b) Conventional PWM leakage current



(c) Proposed PWM common mode voltage



(d) Proposed PWM leakage current

Fig. 8. Experiment result for comparison of conventional PWM with proposed PWM.

에서 20.5A(rms)가 발생하였으며 제안한 PWM 기법에서는 기존의 PWM 기준 약 73%로 저감됨을 확인할 수 있다.

6. 결 론

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 1μF 기생 커패시터를 고려한 10kW급 3레벨 태양광 PCS 시뮬레이션 및 실험을 수행하였으며 누설전류가 기존의 PWM 기준 약 73%로 저감됨을 확인하여 제안한 저감기법을 검증하였다.

이 연구는 충남대학교 학술연구비에 의해 지원되었음.

References

[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,” in *Conf. Record on ICPE 2015*, Seoul, Korea, Jun. 2015.

[2] J. C. Giaconmini, L. Michels, H. Pinheiro, and C. Rech, “Active damping scheme for leakage current reduction in transformerless three-phase grid-connected PV inverters,” *IEEE Trans. Power Electronics*, Vol. 33, No. 5, May 2018.

[3] 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. Power Electronics*, Vol. 29, No. 15, pp. 1720-1732, Apr. 2014.

[4] 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. Power Electronics*, Vol. 28, No. 6, pp. 2635-2657, Jun. 2013.

[5] N. Vazques, M. Rosas, C. Hernandez, and F. Prerez-Pinal, “A new common mode transformerless photovoltaic inverter,” *IEEE Trans. Industrial Electronics*, Vol. 62, No. 10, Oct. 2015

[6] A. Ansari and H. J. Kim, “A simplified SVPWM three level inverters to eliminate leakage currents in transformerless photovoltaic systems,” *The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers*, Vol. 65, No. 2, pp. 319-328, Feb. 2016.

[7] W. Chen, X. Yang, W. Zhang, and X. Song, “Leakage current calculation for PV inverter system based on a parasitic capacitor model,” *IEEE Trans. Power Electronics*, Vol. 31, No. 12, Dec. 2016.

[8] J. C. Giacomini, L. Michels, H. Pinheiro, and C. Rech, “Design methodology of a passive damped modified LCL filter for leakage current reduction in grid-connected transformerless three-phase PV inverters,” *IET The Institution of Engineering and Technology*, Vol. 11, pp. 1769-1777, Oct. 2017.

[9] E. C. Lee, N. S. Choi, and K. S. Ahn, “Overmodulation characteristics of carried based MVPWM for eliminating the leakage currents in three-level inverter,” *The Transactions of the Korean Institute of Power Electronics*, Vol. 20, No. 6, Dec. 2015.

한성은(韓聖恩)

1991년 11월 26일생. 2017년 한밭대 전기공학과 졸업. 2017년～현재 충남대 전기공학과 석사과정.

조종민(趙鍾珉)

1987년 4월 1일생. 2013년 충남대 전기공학과 졸업. 2015년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2015년～현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.

안현성(安賢聖)

1985년 1월 25일생. 2010년 충북대 물리학과 졸업. 2013년 충남대 전기공학과 졸업(석사). 2013년～현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.

차한주(車翰周)

1988년 서울대 전기공학과 졸업. 1990년 포항공대 전자전기공학과 졸업(석사). 2004년 미국 Texas A&M University, College station(공박). 1990년～2001년 LG산전연구소 책임연구원. 2009년 미국 United Technology Research Center 방문교수. 2005년～현재 충남대 전기공학과 교수. 당 학회 총무이사.