https://doi.org/10.6113/TKPE.2023.28.1.1

공통 모드 전압 및 THD를 고려한 계통연계형 3레벨 NPC 인버터의 운용 알고리즘 연구

김혜천[1], 박정욱†

A Study on Operation Algorithm of Grid-Connected 3-Level NPC Inverter Considering Common-Mode Voltage and THD

Hye-Cheon Kim[1] and Jung-Wook Park†

Abstract

A grid-connected 3-level NPC inverter is a power conversion device that connects renewable energy generators, such as photovoltaic or wind turbines to the grid. Although many studies have focused on this inverter, commercializing it requires strictly satisfying various safety and power quality-related standards. Among many standards, leakage current and grid current total harmonic distortion(THD) can be affected by external factors such as installation environment, aging, and grid conditions. Hence, inverter operations that can satisfy these standards need to be explored. In this study a 3-level NPC inverter operation algorithm using the Phase Opposition Disposition-PWM method that can effectively reduce leakage current and switching frequency adjustment to reduce THD effectively has been proposed.

Key words: Grid-connected, NPC inverter, Common-mode voltage, THD, Renewable energy

1. 서 론

태양광, 풍력 발전과 같은 신재생 에너지원을 통해 생산된 전력을 계통으로 전달하기 위해서는 계통연계형 인버터와 같은 전력변환장치가 필요하며, 이와 관련된 많은 연구 개발이 수행되고 있다. 그중 그림 1과 같은 계통연계형 3레벨 NPC 인버터는 대용량의 전력변환장치로써 기존 2레벨 인버터와 비교하여 높은 효율과 낮은 계통 전류 전고조파 왜율(THD) 등의 장점을 가져 이미 다양한 분야의 상용 제품에 적용되어 있다[1].

기본적으로 계통연계형 인버터는 안전과 관련된 다양한 기준들을 가지고 있으며, 누설 전류 기준은 그중 하나다. 여기서 누설 전류는 3레벨 NPC 인버터의 공통 모드 전압(CMV)의 변동에 의해 인버터 DC 전원 측에서 접지로 흐르는 전류이다. KS 인증 시험 중 KS C 8567:2021 시험 규격에 따르면 정격으로 인버터가 동작할 때 인버터의 기체와 대지와의 사이에 흐르는 누설 전류를 측정하여 누설 전류가 5 mA 이하를 만족해야 한다. 이 기준을 초과하지 않도록 인버터가 설계되지만, 인버터 주변의 습도, 자연 열화, 절연 손상 등 여러 외부 요인에 의해 누설 전류가 기준값을 초과하는 상황이 발생할 수 있으며, 이는 전기 재해의 원인이 될 수 있다[2]. 이를 방지하기 위하여 누설 전류가 기준값을 넘는 상황이 발생하면 인버터를 정지하고 원인을 찾아 보수를 해야 한다. 하지만 인버터 운전 중단은 전력 생산자에게 경제적인 피해가 될 수 있다. 따라서 사고 발생 시 누설 전류 상승의 원인을 찾아 보수하기 전까지 누설 전류 기준을 넘지 않도록 인버터를 운용할 수 있다면 이러한 피해를 최소화할 수 있다.

누설 전류를 저감하기 위한 다양한 방법 중 한 방법으로 CMV를 저감하는 방법이 있다[3]-[5]. CMV 저감을 위한 다양한 방법 중 본 논문에서는 펄스폭 변조(Pulse-Width Modulation: PWM) 방법의 변화를 활용하였다. 이론적으로는 누설 전류를 완전히 제거할 수 있는 Medium Vector PWM과 같은 CMV 저감을 위한 다

Paper number: TKPE-2023-28-1-1
Print ISSN: 1229-2214 Online ISSN: 2288-6281
† Corresponding author: jungpark@yonsei.ac.kr, School of Electrical and Electronic Eng., Yonsei University, Korea
Tel: +82-2-2123-5867
[1] School of Electrical and Electronic Eng., Yonsei University, Korea
Manuscript received Sep. 27, 2022; revised Oct. 5, 2022; accepted Oct. 19, 2022
- 본 논문은 2022년 전력전자학술대회 태양광논문상 수상논문임

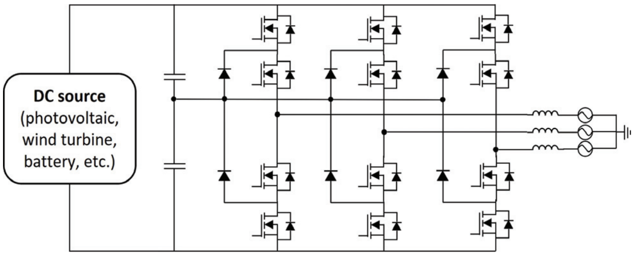


Fig. 1. 3-level NPC inverter circuit diagram

양한 PWM 방법이 있다[5]-[6]. 하지만 본 논문에서는 CMV 저감에 가장 기본이 되고 구현이 쉬운 PWM 방법인 Phase Opposition Disposition(POD) PWM 방법을 선정하여 일반적으로 3레벨 NPC 인버터에 가장 널리 사용되는 Phase Disposition(PD) PWM 방법과 비교 분석하고 누설 전류 크기에 따라 선택적으로 인버터 구동에 적용하였다. 이를 통해 정상 운전 중 예기치 못한 누설 전류의 상승을 억제할 수 있었다. 단, POD PWM 방법을 PD PWM 방법에 비해 계통 측 전력 품질이 저하되는 단점이 있다. 이를 해결하기 위해 스위칭 주파수를 조절하여 계통 전류 THD의 상승을 조절하는 방안을 고려하여 인버터 운용 알고리즘 설계에 반영하였다.

위의 연구 동기와 선행 연구를 바탕으로 본 논문에서는 인버터의 누설 전류를 조절할 수 있는 효과적인 인버터 운용 방법에 관한 연구를 수행하였다. 또한, 비용적인 측면을 고려하여 인버터에 기본적으로 사용되는 계통 전류 센서와 지락 보호를 위해 사용되는 Zero-sequence Current Transformer(ZCT), Insulation Monitoring Device(IMD), Residual Current Monitor(RCM) 등에서 제공되는 누설 전류를 활용하거나 해당 장치가 없다면 누설 전류 센서만 추가하여 최소한의 설비만 추가하고 인버터 운용 알고리즘의 개선만을 통해 위의 문제를 해결할 수 있도록 연구를 수행하였다.

2. CMV와 THD를 고려한 인버터 운용 알고리즘

2.1 PD 및 POD PWM 방법 비교 분석

3레벨 NPC 인버터를 구동하는 PWM 방법은 캐리어 신호 파형의 생성 방법에 따라 다양한 PWM 방법으로 구현이 가능하다. 그 중 출력 전압과 전류의 전고조파 왜율(THD)에 우수하여 가장 널리 사용되는 PD PWM 방법과 CMV 저감에 유리하지만, 계통 측 전력 품질이 저하되는 POD PWM 방법을 활용하여 연구를 수행하였다[7]. PD PWM 방법에 비해 POD PWM 방법은 하단 캐리어 신호의 위상을 180° 반전시켜 출력 전압 벡터를 구성하는 벡터의 조합을 다르게 가져간다. 이때 사용되는 벡터의 조합에 따라 CMV의 크기가 결정되며, POD PWM 방법을 적용하면 CMV의 크기가 작은 벡터의 조합을 사용할 수 있다. 벡터의 조합은 3상의 각 상별 스위칭 소자의 상태와 같으며, 스위치 상태에 따른 CMV

TABLE I
MAGNITUDE OF CMV DEPENDING ON SWITCHES STATES

	Voltage vector combination	Amplitude of CMV
Medium voltage vector	(1,0,-1) (0,1,-1) (-1,1,0) (-1,0,1) (0,-1,1) (1,-1,0)	0
Large voltage vector	(1,-1,-1) (1,1,-1) (-1,1,-1) (-1,1,1) (-1,-1,1) (1,-1,1)	$V_{dc}/6$
Small voltage vector	(1,0,0) (0,1,0) (0,0,1) (-1,0,0) (0,-1,0) (0,0,-1)	$V_{dc}/6$
	(1,1,0) (1,0,1) (0,1,1) (-1,-1,0) (-1,0,-1) (0,-1,-1)	$V_{dc}/3$
Zero voltage vector	(0,0,0)	0
	(1,1,1) (-1,-1,-1)	$V_{dc}/2$

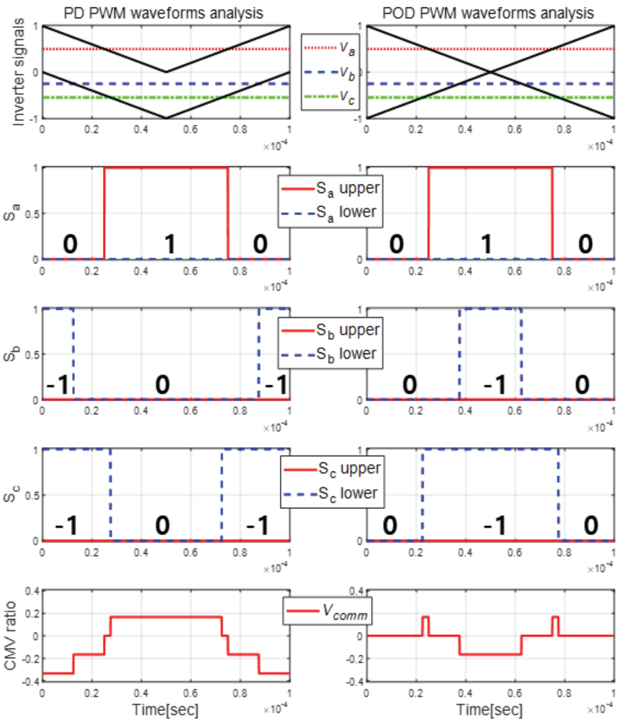


Fig. 2. Switching and CMV waveforms of PD PWM and POD PWM strategy

의 절댓값의 크기를 정리하면 표 1과 같다[8]. 여기서 V_{dc}는 DC 측 전압을 의미한다. 전압 벡터 조합란의 1은 상단 스위치는 ON이면서 하단 스위치는 OFF인 경우를 의미하며, 0은 상단 및 하단 스위치 모두 OFF인 경우를 의미한다. 그리고 -1은 상단 스위치는 OFF이면서 하단 스위치는 ON인 경우를 의미한다.

이를 바탕으로 동일한 전압 벡터를 PD 및 POD PWM 방법으로 동작시켜 DC 측 전압 대비 CMV의 크기를 분석한 예시 파형이 그림 2와 같다. 그림에서 볼 수 있듯이 POD PWM 방법을 적용하면 Medium

voltage vector를 사용하여 CMV가 0인 구간을 많이 사용하고, CMV의 크기가 $V_{dc}/3$인 Small voltage vector를 사용하지 않아 CMV의 첨두값을 줄일 수 있다.

앞서 언급한 바와 같이 POD PWM 방법은 CMV 저감에는 유리하지만, 계통 전류 THD가 상승하는 단점을 가진다. 계통연계형 인버터 운용에 있어 계통 전류 THD가 기준치를 초과하는 경우엔 스위칭 주파수를 올려서 계통 전류 THD를 낮출 수 있다. 단, 스위칭 주파수가 상승하면 인버터의 여러 소자에 걸리는 스트레스 및 스위칭 손실이 상승하는 문제가 발생할 수 있다. 이를 해결하기 위해 섭동 및 관측(Perturbation and Observation: P&O) 방법을 통해 스위칭 주파수 상승을 최소화하면서 계통 전류 THD 기준을 만족하는 방법을 고려하여 누설 전류와 계통 전류 THD를 동시에 효과적으로 개선하는 알고리즘을 설계하였다. 즉, 누설 전류를 저감하기 위해 POD PWM 방법을 적용하고, 이후 계통 전류 THD 개선이 필요한 상황에서는 스위칭 주파수를 조금씩 변화시켜 계통 전류 THD 기준값 아래에서 인버터가 운전하도록 스위칭 주파수의 상승을 최소화하는 방법의 인버터 운용 알고리즘을 설계하였다.

2.2 인버터 운용 알고리즘 설계

계통연계형 3레벨 NPC 인버터의 제어 구조를 간략히 표현하면 그림 3과 같다. 누설 전류 측정부(Leakage current measuring part)에서 얻는 누설 전류값($I_{leakage}$)과 계통 전류 측정부(Grid current measuring part) 및 전류 THD 연산부(Current THD calculation part)를 통해 획득되는 계통 전류 THD 값(I_{THD})을 통해 PWM 방법 판단부(PWM method decision part)에서 인버터 운용에 적합한 PWM 방법을 판단하게 된다. 전류 THD 연산부에서는 계통 전류의 Root Mean Square(RMS) 값과 계통 전류의 기본파 성분의 RMS 값을 통해 THD를 계산하며, 이를 수식으로 나타내면 식 (1)과 같다.

$$THD = \frac{\sqrt{I_{RMS,ph}^2 - I_{fund,ph}^2}}{I_{fund,ph}} \quad (1)$$

그림 4에 나타난 것과 같이 PWM 방법 판단부에서는 현재 사용 중인 PWM 방법이 PD PWM 방법인 경우, 누설 전류 기준값($Leak_{STD1}$)을 기준으로 $I_{leakage}$ 와 비교하여 PD PWM 방법을 유지할지 POD PWM 방법으로 변경할지를 결정한다. POD PWM 방법으로 변경 시 계통 전류 THD 기준값(THD_{STD})을 기준으로 스위칭 주파수 조절을 위한 P&O 방법을 POD PWM 방법과 같이 사용할지 여부를 판단하게 된다. 다시 현재 사용 중인 PWM 방법이 PD PWM 방법이 아닌 경우에는 새로운 누설 전류 기준값($Leak_{STD2}$)을 기준으로 PWM 방법을 결정하게 된다. 여기서 새로운 $Leak_{STD2}$ 는 직전에 PD PWM 방법에서 POD PWM 방법으로 변경될 때 감소하는 누설 전류의 비를 이용하며, 이를 수식으로 나타내면 식 (2)와 같다.

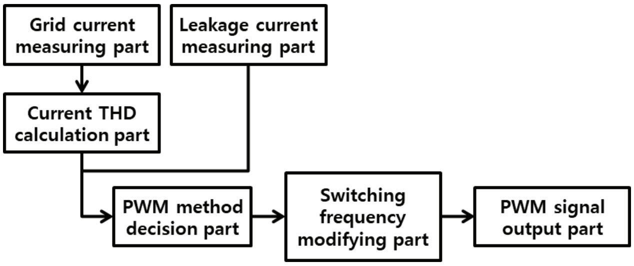


Fig. 3. Grid-connected 3-level NPC inverter control diagram

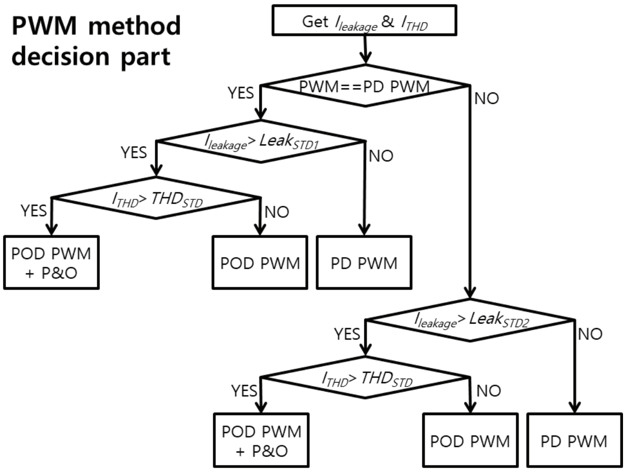


Fig. 4. Algorithm of PWM method decision part

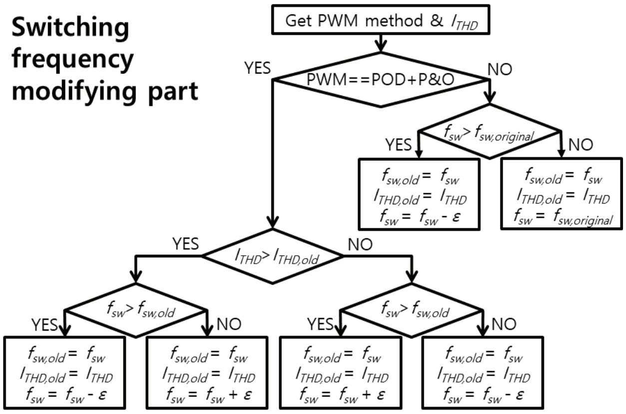


Fig. 5. Algorithm of switching frequency modifying part

$$Leak_{STD2} = Leak_{STD1} \times \frac{I_{leak,PODPWM}}{I_{leak,PDPWM}} \quad (2)$$

이어서 그림 5에 나타난 것과 같이 현재 스위칭 주파수값(f_{sw}) 변조가 필요한 경우 PWM 방법 판단부에서 판단된 PWM 방법과 앞서 구해진 I_{THD}를 획득하여 스위칭 주파수 변조부(Switching frequency modifying part)에서 P&O 방법을 바탕으로 스위칭 주파수 변조를 진행한다. 현재 사용 중인 PWM 방법이 POD PWM + P&O

방법인 경우, 직전 계통 전류 THD 값($I_{THD,old}$)과 I_{THD}를 비교하여 f_{sw}를 일정량(ε) 감소 또는 증가시키며 THD를 조절한다. 스위칭 주파수 조절이 필요 없는 상황에서는 f_{sw}가 인버터의 최초 스위칭 주파수($f_{sw,original}$)보다 큰 경우에는 ε만큼 감소시키면서 불필요하게 높은 스위칭 주파수로 인해 생기는 문제점을 해소한다. f_{sw}가 감소하여 $f_{sw,original}$과 크기가 같거나 작아지게 되면 f_{sw}를 $f_{sw,original}$로 고정하여 인버터가 운전되도록 한다.

이후 결정되는 PWM 방법과 스위칭 주파수를 바탕으로 PWM 신호 출력부(PWM signal output part)에서 스위칭에 필요한 PWM 신호를 출력한다.

일련의 과정을 위한 PWM 방법 변경 주기, 스위칭 주파수 변경 주기, 스위칭 주파수 변경량(ε), 누설 전류 및 계통 전류 THD 기준값은 인버터 사양이나 사용 분야 등에 의해 변경될 수 있다.

3. 시뮬레이션

앞서 설계한 인버터 운용 알고리즘을 시뮬레이션을 통해 검증을 진행하였다. 시뮬레이션은 PSIM을 사용하여 진행하였으며, PSIM에서 설계한 3레벨 NPC 인버터의 회로도는 그림 6과 같다. DC 측 음극과 접지 사이에 절연 저항값을 조절하여 누설 전류를 조절하였다. 시뮬레이션 시스템 사양은 Table 2와 같으며, 2가지 시나리오를 바탕으로 운용 알고리즘을 검증하였다.

PWM 방법 및 스위칭 주파수 변경은 0.5초 주기로 변경되도록 설정하였으며, PSIM에서 제공하는 THD 계산 툴을 활용하여 계통 전류 THD를 획득하였다. PSIM에서 제공하는 THD 계산 툴의 편차를 줄이기 위해 0.5초 동안의 THD 계산값을 적분하고 이를 시간으로 나누어 얻은 값을 이용하여 계통 전류 THD를 계산하였다. 이를 각 상별로 적용하여 3상의 평균 계통 전류 THD 값을 구하고 이를 바탕으로 PWM 방법을 판단하였다. 사고 전에는 누설 전류가 약 0.002 Arms로 흐르도록 그림 6 하단에 기생 커패시턴스를 1 μF 및 절연 저항을 80 kΩ으로 설계하였으며, 사고 발생 시 똑같은 크기의 기생 임피던스 및 절연 저항을 병렬로 추가하여 누설 전류가 0.004 Arms를 초과하도록 사고를 규정하였다.

3.1 시나리오 1 시뮬레이션

첫 번째 시나리오는 0.25초에 사고로 인해 누설 전류가 증가하여 누설 전류 기준치($Leak_{STD1}$)를 초과하는 상황이 발생하는 것이며, 이러한 상황에서 인버터 운용 알고리즘이 동작한 시뮬레이션 결과는 그림 7과 같다. 여기서 Mode 값이 0 일 때는 PD PWM 방법을 사용하는 것을 의미하고 1 일 때는 POD PWM 방법을 사용하는 것을 의미한다.

시뮬레이션 결과를 보면 누설 전류가 $Leak_{STD1}$을 초과하고 나서 POD PWM 방법을 사용하였고, 이로 인해

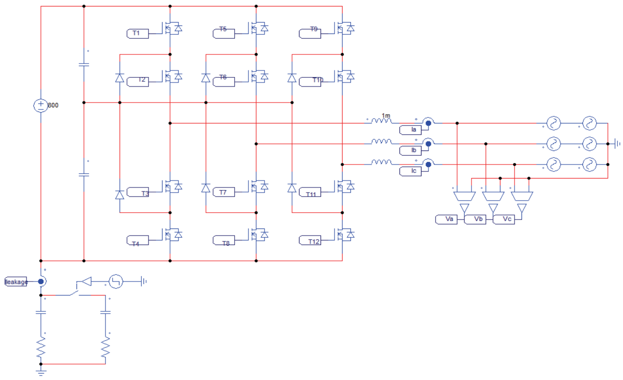


Fig. 6. Power circuit diagram on PSIM simulation

TABLE II
SPECIFICATION FOR PSIM SIMULATION

Parameter	Value
Rated power	50 [kW]
DC voltage	800 [Vdc]
DC filter capacitance(each)	3300 [μF]
AC voltage	380 [Vac] (3 phase 4 wire)
AC frequency	50 [Hz]
Switching frequency	10 [kHz]
AC filter inductance(each)	1 [mH]
Leakage current standard($Leak_{STD1}$)	0.004 [Arms]
Grid current THD standard(THD_{STD})	3.5 [%]

계통 전류 THD가 어느 정도 상승하였지만 기준값(THD_{STD})을 넘지 않아 계속해서 POD PWM 방법으로 인버터가 운용되는 것을 확인할 수 있다.

계통 전류 THD 값은 매 0.5초 동안 적분을 한 뒤에 갱신되기 때문에 그래프에서는 0.5초의 지연 시간을 가지는 것처럼 나타나게 된다. 따라서 그림 7의 그래프에서 0.5초에 POD PWM 방법으로 변경되었지만, 계통 전류 THD는 1초에 상승하는 결과로 나타난다.

3.2 시나리오 2 시뮬레이션

두 번째 시나리오는 계통 전압에 150 Hz의 전압 성분을 더해 계통 전류 THD가 시나리오 1에서보다 높은 상태에서 0.25초에 사고로 인해 누설 전류가 증가하여 기준치($Leak_{STD1}$)를 초과하는 상황이 발생하는 것이며, 이러한 상황에서 인버터 운용 알고리즘이 동작한 시뮬레이션 결과는 그림 9와 같다. 여기서 Mode 값이 2~5일 때는 POD PWM + P&O 방법이 사용되는 경우이며, Mode 값이 클수록 높은 스위칭 주파수를 사용하는 것을 의미한다. Mode 값이 1 증가 할수록 스위칭 주파수는 1 kHz가 증가하도록 ε 값을 설정하였다.

시뮬레이션 결과를 보면 누설 전류가 $Leak_{STD1}$을 넘는 사고로 인해 PD PWM 방법에서 POD PWM + P&O 방법으로 0.5초에 변경이 되었다. 이후 계통 전류 THD

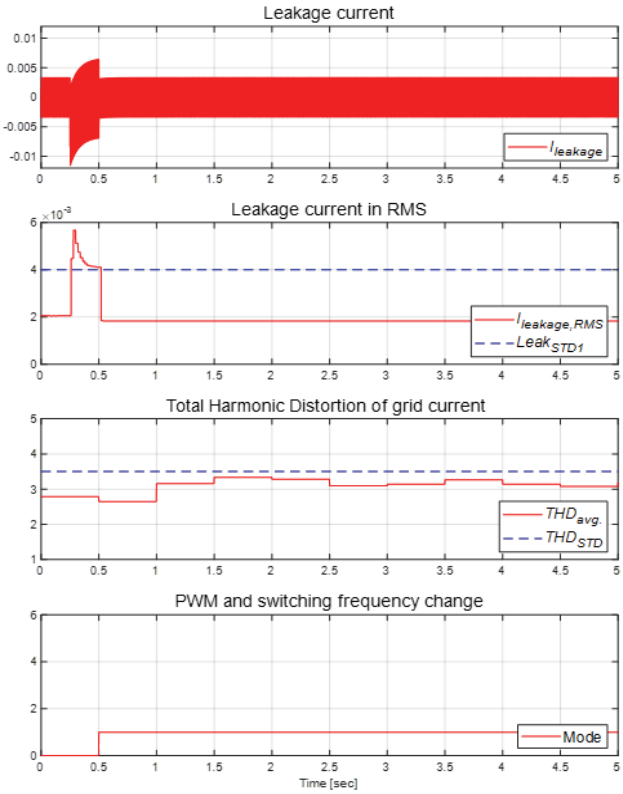


Fig. 7. Simulation result of scenario 1

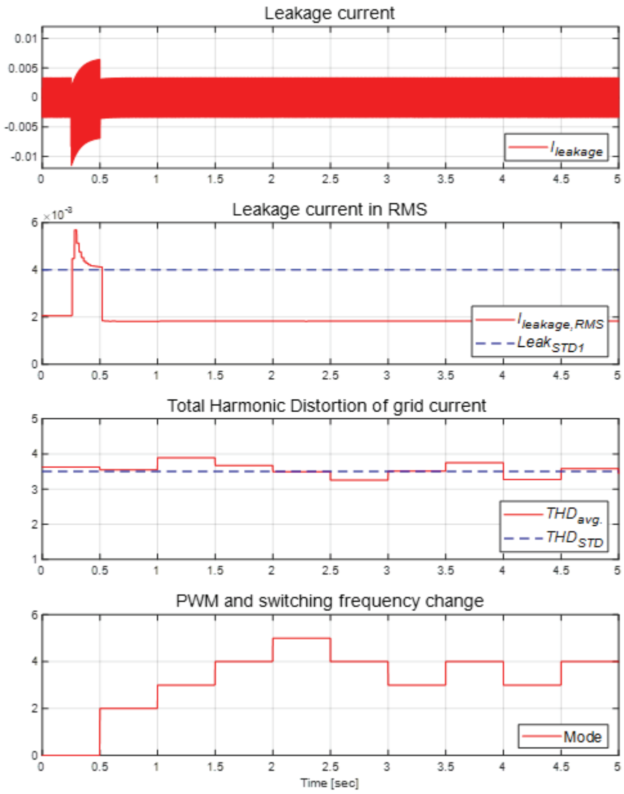


Fig. 9. Simulation result of scenario 2

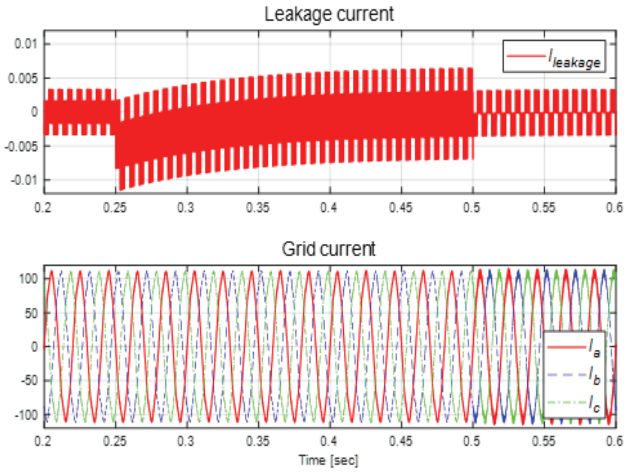


Fig. 8. Leakage and grid current change by PWM method change

Fig. 10. Hardware set-up for experimental test

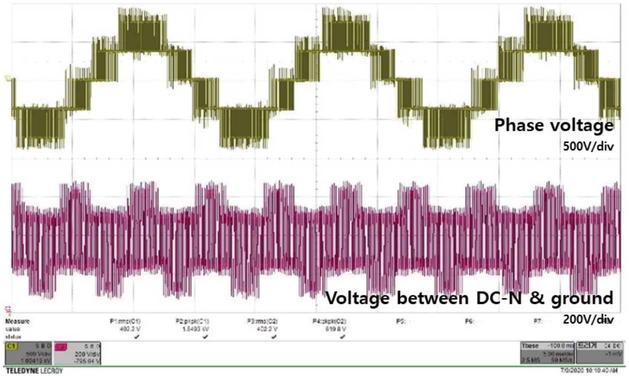
가 THD_{STD}를 넘는 상황이기에 기준치를 만족시키기 위해 주파수를 조금씩 상승시킨다. 이후에는 THD_{STD} 근처에서 스위칭 주파수를 조절하도록 PWM 방법이 수렴하게 된다. 본 시뮬레이션에서는 Mode 값이 3과 4로 수렴하여 인버터가 운전하게 되었다.

두 가지의 시나리오를 바탕으로 수행한 시뮬레이션 결과를 통해 제안하는 인버터 운용 알고리즘이 누설 전류와 계통 전류 THD가 기준치 아래의 값을 가지도록 인버터를 제어할 수 있음을 확인할 수 있었다.

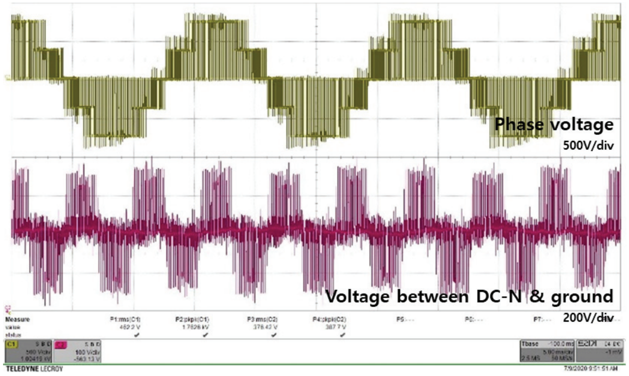
4. 실 험

제안하는 인버터 운용 알고리즘의 효과를 검증하기 위하여 하드웨어 실험을 진행하였다. 그림 10에 나타나 있는 시중에 판매 중인 (주)디아이케이의 100 kW급 3레벨 NPC 인버터 타입의 제품을 활용하여 실험을 진행하였다. DC 전원으로는 배터리를 사용하였다.

우선 PD PWM 방법과 POD PWM 방법을 적용하여 DC 측 음극(DC-N)과 접지 간의 전압을 비교하였으며

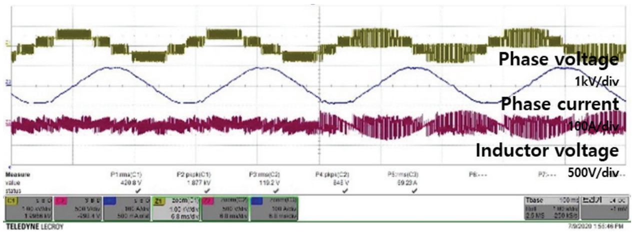


(a)

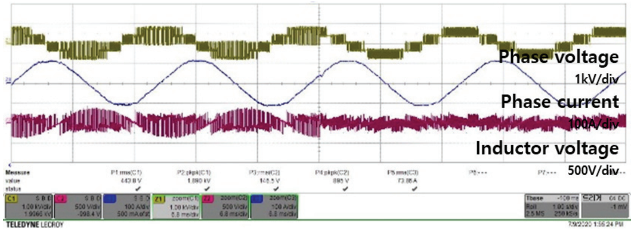


(b)

Fig. 11. Experiment results of (a) PD PWM and (b) POD PWM



(a)



(b)

Fig. 12. Experiment results of PWM method change: (a) PD PWM to POD PWM and (b) POD PWM to PD PWM

이에 대한 실험 결과가 그림 11에 나타나 있다. 실험 결과 DC-N과 접지 간의 전압의 첨두값이 PD PWM 방법 적용 시 619.8 V에서 POD PWM 방법을 적용하면 387.7 V로 PD PWM 방법 대비 약 62.6% 크기로 저감되는 것을 확인할 수 있었다. 그림 8의 시뮬레이션 결과처럼 DC-N과 접지 간의 전압이 50% 수준으로 첨두값이 줄어들지는 못하였지만 실험 결과를 통해 POD PWM 방법을 적용하면 누설 전류 개선에 효과가 있음을 검증할 수 있었다.

또한 본 논문에서 제안하는 인버터 운용 알고리즘을 적용하기 위해서는 인버터 운전 중에 PWM 방법 변경이 계속해서 일어난다. 이러한 인버터 운전 중에 발생하는 PWM 방법 변경에도 인버터가 안정적으로 운전하는지를 하드웨어 실험을 통해 검증하였으며, 이에 대한 실험 결과가 그림 12에 나타나 있다. PD PWM 방법에서 POD PWM 방법으로 변경하는 경우와 POD PWM 방법에서 PD PWM 방법으로 변경하는 경우 모두 문제없이 PWM 방법 변경이 가능함을 확인할 수 있었다. 계통 상전류 파형을 보면 POD PWM 방법 적용 중에도 크게 왜곡이 일어나지 않아 THD 상승이 높지 않을 것으로 예상된다. 하지만 실험 중 소음과 인버터 효율 저하가 발생하여 원인을 분석한 결과, 계통 측 인덕터에 걸리는 전압이 상승하여 인덕터에서 발생하는 소음과 발열이 상승하는 것을 확인할 수 있었다.

시뮬레이션과 같은 모의실험을 수행하지는 못했지만 POD PWM 방법 적용 시 CMV 저감을 바탕으로 누설 전류 저감이 가능함을 확인할 수 있었으며, 인버터 운전 중 PWM 방법이 변경될 때 문제 사항이 없는 것을 통해 본 논문에서 제안하는 인버터 운용 알고리즘 적용이 가능함을 확인할 수 있었다.

5. 결 론

본 논문에서는 계통연계형 3레벨 NPC 인버터의 누설 전류와 계통 전류 THD를 고려한 운용 알고리즘을 제안하였다. 계통연계형 인버터는 누설 전류와 계통 전류 THD가 기준값을 만족하지 못하면 운전이 중단되어 전력 생산자에게 경제적인 피해를 주게 된다. 이에 따라 제안하는 인버터 운용 알고리즘을 통해 예상치 못한 사고 시에도 인버터 운전이 중단되지 않도록 가능한 누설 전류와 계통 전류 THD 기준을 만족시켜 피해를 최소화 할 수 있다. 또한, 기존에 설치된 계통 전류 센서 및 지락 보호 장치에서 제공되는 누설 전류 정보를 활용하거나 누설 전류 센서만을 추가하여 최소한의 비용으로 상용 제품 및 기존에 설치된 제품에 알고리즘 적용이 가능하다. 본 논문에서 제안한 인버터 운용 알고리즘은 시뮬레이션을 통해 기대 효과를 확인하였으며, 하드웨어 실험을 통해 실제로 제품에 적용이 가능함을 확인하였다.

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단(리더연구)의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2020R1A3B2079407)

References

[1] J. H Choi and U. M. Choi, "Comparative analysis of pulse width modulation methods for improving the lifetime of DC-link capacitors of NPC Inverters," *Transactions of Korea Institute of Power Electronics*, Vol. 27, No. 4, pp. 291 - 296, Aug. 2022.
[2] K. C. Han and Y. S. Choi, "Study on leakage current and insulation resistance effect of temperature and humidity," *Journal of Institute of Korean Electrical and Electronics Engineers*, Vol. 23, No. 2, pp. 370 - 374, Jun. 2019.
[3] S. Han, J. Jo, H. An and H. Cha, "Development of leakage current reduction method in 3-level photovoltaic PCS," *Transactions of Korea Institute of Power Electronics*, Vol. 24, No. 1, pp. 56 - 61, Feb. 2019.
[4] 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. 14, Apr. 2014.
[5] E. C. Lee, N. S. Choi and H. J. Kim, "Space vector PWM method for leakage current reduction and NP current control in 3-phase 3-level converter used in bipolar DC distribution system," *Transactions of Korea Institute of Power Electronics*, Vol. 23, No. 5, pp. 336 - 344, Oct. 2018.
[6] K. S. Ahn, N. S. Choi, E. C. Lee and H. J. Kim, "A study on a carrier based PWM having constant common mode voltage and minimized switching frequency in three-level inverter," *Journal of Electrical Engineering & Technology*, Vol. 11, No. 2, pp. 393 - 404, Mar. 2016.
[7] T. D. Nguyen, D. Q. Phan, D. N. Dao and H. H. Lee, "Carrier phase-shift PWM to reduce common-mode voltage for three-level t-type NPC inverters," *Journal of Power Electronics*, Vol. 14, No. 6, pp. 1197 - 1207, Nov. 2014.
[8] H. J. Kim, H. D. Lee and S. K. Sul, "A new PWM strategy for common-mode voltage reduction in neutral-point-clamped inverter-fed AC motor drives," *IEEE Trans. on Industry Applications*, Vol. 37, No. 6, pp. 1840 - 1845, Nov./Dec. 2001.

김혜천(金惠天)

1989년 4월 4일생. 2014년 숭실대 전기공학부 졸업. 2014년~현재 연세대 전기전자공학과 석·박사통합과정.

박정욱(朴正旭)

1973년 7월 18일생. 1999년 연세대 전기공학과 졸업. 2000년 미국 Georgia Institute of Technology 전기컴퓨터공학과 졸업(석사). 2003년 동 대학원 전기컴퓨터 공학과 졸업(공박). 2003년~2004년 미국 Univ. of Wisconsin-Madison 박사 후 전임연구원. 2005년~현재 연세대 전기전자공학부 교수.