

# PWM 방식에 따른 계통연계 양방향 인버터의 손실양상 비교 및 분석

허성준<sup>1</sup>, 안효민<sup>1</sup>, 변종은<sup>1</sup>, 이병국<sup>†</sup>

## Loss Analysis and Comparison of Grid-connected Bidirectional Inverter with Different Types of PWM Schemes

Sung-Jun Heo<sup>1</sup>, Hyo-Min Ahn<sup>1</sup>, Jong-Eun Byun<sup>1</sup>, and Byoung-Kuk Lee<sup>†</sup>

### Abstract

This paper presents a loss analysis and compares three pulse width modulation (PWM) methods applied in a three-phase grid-connected bidirectional inverter for an energy storage system. The losses in switching devices and output low pass filters are theoretically analyzed by using PWM control techniques. Grid-connected bidirectional inverters are designed by using PWM techniques, and the designed inverters are simulated to verify the analysis results.

**Key words:** Discontinuous pulse width modulation, Energy storage system, Grid connected bidirectional inverter, Space vector pulse width modulation

### 1. 서 론

에너지 저장 장치 (Energy storage system, ESS)에서 전력 변환 장치 (Power conversion system, PCS)와 배터리의 충·방전 효율향상을 위해 다양한 전압 변조 (Pulse width modulation, PWM) 제어기법이 연구 되었다<sup>[1]</sup>. 주요 PWM 방식으로는 정현과 전압 변조 (Sinusoidal pulse width modulation, SPWM), 공간 벡터 전압 변조 (Space vector pulse width modulation, SVPWM), 불연속 전압 변조 (Discontinuous pulse width modulation, DPWM) 방식 등이 있다. 각 PWM 제어기법에 따른 시스템의 손실 비교·분석을 위하여 많은 연구가 진행 되었는데, 그중 DPWM 제어기법은 주로 단방향 인버터의 모터부하들과 같은 유도성 부하에 적용되었고 전류 품질과 전압 이용률 상승을 중요하게 다룬 ESS에는 적용되지 않았다. 따라서 ESS에 다양한

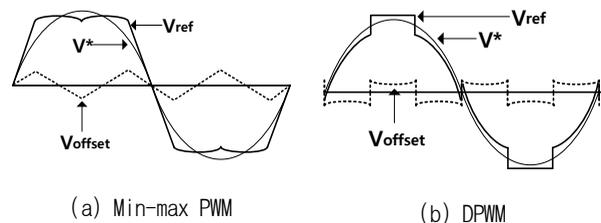


Fig. 1. Scheme of the PWM strategies.

PWM 제어기법을 적용하였을 때 나타나는 손실에 대해 비교·분석을 진행할 필요가 있다<sup>[2]</sup>.

본 논문에서는 PWM 제어기법에 따른 전력반도체 소자와 필터에서 발생하는 손실 및 계통 전류 품질 양상을 ESS용 계통연계 양방향 인버터에 적용하여 비교·분석한다. 각 PWM 제어기법에 따라 계통연계 양방향 인버터를 설계하고, 계통연계 양방향 인버터 충·방전 동작 조건에 따라 발생하는 손실양상을 이론적으로 분석한다. 이론적 결과를 검증하기 위해 10kW급 양방향 계통연계 인버터 PSIM 시뮬레이션을 수행한다.

### 2. PWM 제어기법의 종류

SPWM은 제어기 구성이 간단하여 구현이 용이하지만

Paper number: TKPE-2017-22-6-11

Print ISSN: 1229-2214 Online ISSN: 2288-6281

<sup>†</sup> Corresponding author: bkleeskk@skku.edu, Dept. of Electrical and Computer Eng., Sungkyunkwan University  
Tel: +82-31-299-4964 Fax: +82-31-299-4638

<sup>1</sup> Dept. of Electrical and Computer Eng., Sungkyunkwan University

Manuscript received Aug. 31, 2017; revised Sep. 6, 2017; accepted Sep. 28, 2017

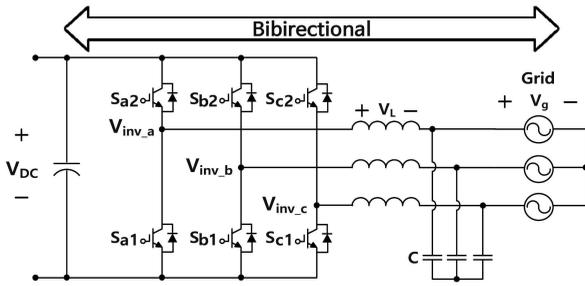


Fig. 2. Grid-connected bidirectional inverter.

TABLE I  
SELECTED DC LINK VOLTAGE ACCORDING TO PWM CONTROL TECHNIQUE

DC link voltage	
SPWM	800 [V]
Min-max PWM	700 [V]
DPWM	700 [V]

TABLE II  
SPECIFICATION OF THE 3-PHASE GRID CONNECTED INVERTER

System specifications			
DC link voltage	700-800 [V]	Grid voltage	380 [V]
Power	2-10 [kW]	Phase current	15 [A <sub>rms</sub> ]
Switching frequency	10 [kHz]	Amplitude modulation index	0.8
Power Semiconductor switch	Infineon 社 IGBT module FS35R12W1T4		
LC filter design parameter			
Core	High flux core CH740125		
Inductance	3.4 [mH]	Capacitance	7.7 [uF]
Wire diameter	2.3 [mm]	No. of turns	93 [turn]

DC 링크 전압이용률이 50%로 낮다는 단점이 있다. SVPWM은 이런 단점을 보완한 방식으로 연속 변조 방식과 불연속 변조 방식이 있다. 대표적인 연속 변조 방식에는 SVPWM과 동일한 효과를 간단하게 구현한 Min-max PWM, 불연속 변조 방식에는 DPWM 기법이 있다. Min-max PWM 기법은 그림 1 (a)와 같이 지령 전압에 3고조파를 주입하는 방식으로 DC 링크 전압을 일정하게 유지하면서 SPWM 기법보다 7.7% 더 큰 DC 링크 전압이용률을 갖는 장점이 있다. DPWM 기법은 3상의 모든 소자가 스위칭 하는 방식이 아닌 3상 중 두 상의 스위치만이 상태를 전환하게 되어 스위칭 횟수를 줄이는 방식으로 그림 1 (b)와 같이 최대 전압 혹은 전류가 도통하는 구간에서 지령 값을 최대로 함으로써 스위칭을 하지 않고 최대 듀티비로 동작 한다<sup>[1,2]</sup>.

### 3. 계통연계 인버터 설계

#### 3.1 필터 설계

그림 2는 본 논문에서 사용하는 양방향 계통연계 인버터 시스템을 나타낸다. 그림 2의 출력 필터는 높은 에너지 저장 능력을 갖는 창성 High flux 코어를 선택하여 스위칭 주파수의 0.1배 차단 주파수를 갖는 출력단 지역통과 필터를 설계를 하였다. 3상 계통연계 양방향 인버터에 적용하기 위해 설계한 필터 및 시스템 사양은 표 2에 나타내었다.

#### 3.2 PWM 제어방식에 따른 DC 링크 전압 선정

동일한 조건의 분석을 위해 PWM 제어기법에 따라 최대 부하에서의 진폭 변조 계수 (Amplitude modulation index)가 0.8이 되도록 DC링크 전압을 선정하였다. DC 링크 전압은 기본과 전압의 최대치 ( $V_{inv}$ ), 계통전압 ( $V_g$ )과 인덕터 전압 ( $V_L$ )의 관계를 통하여 계산할 수 있으며, 그 수식은 (1)-(3)과 같다. 표 1은 수식 (1)-(3)을 통해 계산하여 선정한 DC 링크 전압 값을 나타낸다.

$$V_{inv.spwm} = \frac{1}{2} \cdot m_a \cdot V_{DC} \quad (1)$$

$$V_{inv.svpwm} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot m_a \cdot V_{DC} \quad (2)$$

$$V_{inv.} = \sqrt{V_L^2 + V_g^2} \quad (3)$$

## 4. 이론적 손실 분석

#### 4.1 IGBT & 다이오드 손실분석

시스템을 구성하기 위한 전력 반도체 스위치로 절연 게이트 양극성 트랜지스터 (Insulated gate bipolar transistor; IGBT)를 선정하였다. IGBT에서 발생하는 손실 요인으로는 크게 스위칭 손실, 도통 손실이 있다. 스위칭 손실은 수식 (4)-(6)을 통해 계산할 수 있다<sup>[3]</sup>. DPWM 기법은 수식 (4)-(6)에 추가로 비스위칭 구간을 고려하여 계산한다<sup>[4]</sup>. 아래 수식에서  $P_{cond.}$ 은 IGBT 도통 손실,  $P_{on}$ 와  $P_{off}$ 은 온/오프 손실,  $T$ 는 스위칭 주기,  $I_{nom.}$ 과  $V_{nom.}$ 는 컬렉터 전류와 컬렉터-에미터 전압이다.

$$P_{avg.IGBT} = P_{cond.} + P_{on} + P_{off} \quad (4)$$

$$P_{avg.cond.} = \frac{1}{T} \int_0^T [V_{CE}(t) \cdot I_{CE}(t)] dt \quad (5)$$

$$P_{sw.IGBT} = \frac{(E_{on} + E_{off}) \cdot I_{peak} \cdot f_{sw} \cdot V_{DC}}{\pi \cdot I_{nom.} \cdot V_{nom.}} \quad (6)$$

다이오드 손실은 크게 도통 손실과 역회복 손실로 구분할 수 있다. 도통 손실은 다이오드가 순방향 도통 중 발생하는 손실이고, 역회복 손실은 턴온 동작과 턴오프 동작으로 인한 손실이며 스위칭 주파수에 따라 반복적으로 발생하기 때문에 스위칭 손실이라고 말할 수 있다.

손실계산을 위한 수식은 (7)-(9)와 같다. 여기서  $R_D$  값은 다이오드의 온 상태 저항이다<sup>[3]</sup>.

$$P_{avg,Diode} = P_{cond,Diode} + P_{rec,Diode} \quad (7)$$

$$P_{cond,Diode} = V_{TH} \cdot I_{F,avg} + R_D \cdot I_{F,S}^2 \quad (8)$$

$$P_{rec,Diode} = \frac{(E_{rec} \cdot V_{dc} \cdot I_{peak} \cdot f_{sw})}{(\pi \cdot I_{nom} \cdot V_{nom})} \quad (9)$$

부하가 증가함에 따라 상전류의 크기도 증가하기 때문에 손실은 증가할 것이다. DC 링크 전압을 크게 갖는 SPWM은 손실이 가장 크게 발생할 것이며, Min-max PWM은 SPWM보다 작은 손실 값을 갖는다.

DPWM은 최대 전압 혹은 전류 크기를 갖는 구간에서 스위칭을 하지 않기 때문에 가장 낮은 손실이 나타난다. 같은 DC 링크 전압에서 SPWM과 Min-max PWM은 비슷한 계통 전류 품질 값을 갖는다. 하지만 본 논문에서 동일한 조건의 분석을 위해 계산된 SPWM의 DC 링크 전압 크기가 Min-max PWM 보다 더 크기 때문에 필터로 동작하는 인덕터 양단에 인가되는 전압이 증가하게 된다. 이로 인해 전류의 변화율이 더 크게 나타나고 SPWM이 Min-max PWM 보다 더 높은 계통 전류 고조파 함유율을 갖게 된다. DPWM은 비스위칭 구간동안 IGBT가 스위칭을 하지 않기 때문에 전류왜곡이 다른 기법에 비해 상대적으로 많아진다. 때문에 계통 전류 품질이 가장 낮게 나타날 것이다.

### 4.2 필터 손실

필터에서 발생하는 손실은 크게 동손과 철손이 있다. 필터의 손실은 구리선과 코어의 상수를 계산 후 상전류와 전류 리플의 크기를 수식 (10)-(12)을 이용하여 계산한다<sup>[5]</sup>.

$$R = \rho \cdot \frac{l}{A} \quad (10)$$

$$P_{Copper,loss} = i^2 \cdot R \quad (11)$$

$$P_{Coreloss} = \frac{P[mW/cm^3] \cdot V[cm^3]}{1000} [W] \quad (12)$$

여기서 동손의  $\rho$ 는 구리의 비저항,  $l$ 은 동선의 길이,  $A$ 는 동선의 유효면적을 말하며, 수식 (12)는 코어의 단위부피당 전력손실을 전체 부피와의 관계를 통하여 계산가능하며 전류의 리플은 연속적인 크기를 갖고 변화하기 때문에 주기동안 리플 값들의 평균을 적용하였다.

## 5. 시뮬레이션 검증

앞에서 이루어진 이론적인 분석을 검증하기 위하여 PSIM 시뮬레이션을 통하여 인버터 모드와 컨버터 모드에 따른 손실 양상을 비교 및 분석을 한다. 인버터 동작

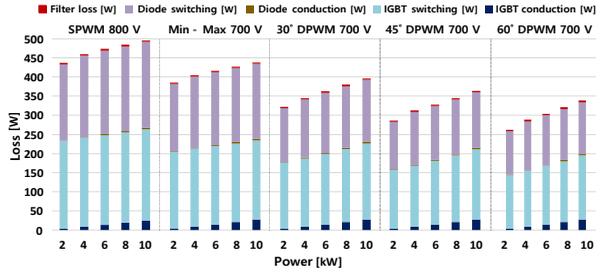


Fig. 3. Power losses in inverter mode.

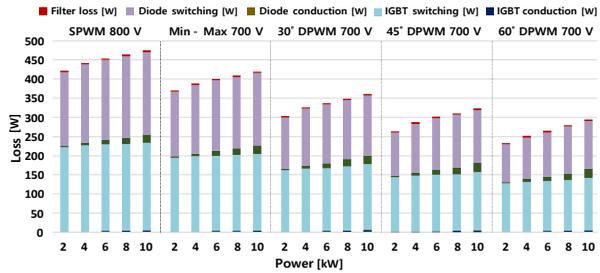


Fig. 4. Power losses in converter mode.

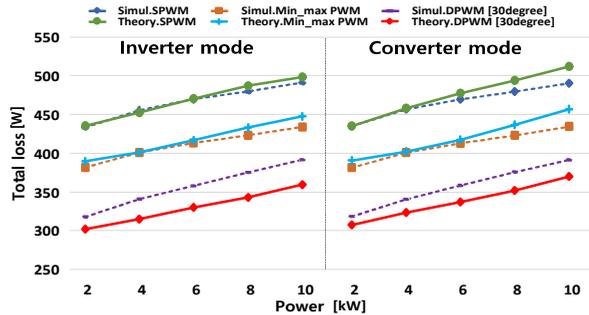


Fig. 5. Total losses of the switches.

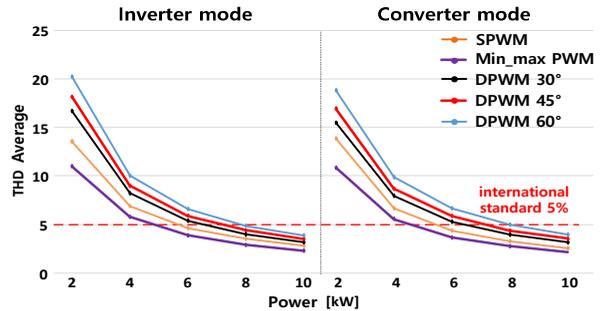


Fig. 6. Average of THD in inverter and converter mode.

모드는 방전 모드로 DC 링크에서 계통으로 에너지를 전달하는 구간이고 컨버터 모드는 계통을 이용하여 DC 링크를 충전하는 구간이다. 그림 3은 인버터 모드에서 발생하는 손실을 부하의 크기에 따라 SPWM, Min-max PWM, DPWM을 PSIM 시뮬레이션을 통해 비교·분석한 결과이다. 전류는 IGBT로 도통되는 구간이 다이오드로 도통되는 구간보다 길기 때문에, IGBT에서의 도통 손실

이 다이오드의 도통 손실 보다 크게 나타나며 동일한 출력전력으로 PWM 제어를 수행하기 때문에 스위치에 도통되는 전류 rms값이 같아 PWM 제어 방식에 따른 차이는 크지 않다. 하지만 스위칭 손실의 경우 SPWM, Min-max PWM, DPWM 순서로 크게 나타난다. 그림 3의 그래프는 이론적 분석과 동일한 양상을 보이는 것을 확인할 수 있으며, SPWM의 DC 링크 전압이 크기 때문에 Min-max PWM 보다 큰 스위칭 손실을 갖는다. DPWM은 최대 전압 혹은 전류 구간에서 스위칭을 하지 않기 때문에 상대적으로 SPWM, Min-max PWM 기법 보다 스위칭 손실이 작게 나타나며, 비스위칭 구간이 길어질수록 스위칭 손실이 감소한다.

필터 손실은 부하의 크기 증가에 따라 증가하는 경향을 보인다. 하지만 상전류의 크기는 PWM 제어기법에 관계없이 비슷한 크기를 갖고, 전류 리플은 PWM 제어기법마다 고주파 함유율이 다르기 때문에 차이가 있지만 전체 코어손실 중 큰 비중을 차지하지 않는다. 따라서 필터 손실은 전체 손실에서 차지하는 비중이 상대적으로 작다.

그림 4는 컨버터 동작 모드에서 인버터 모드와 같은 조건으로 손실양상을 분석한 그래프이다. 컨버터 동작 모드에서는 계통에서 DC 링크로 에너지를 전달하는 구간이기 때문에 인버터 동작모드와는 반대로 다이오드에서 도통손실이 더 크게 나타나며 IGBT와 다이오드에서의 스위칭 손실과 필터에서 발생하는 손실은 인버터 모드와 같은 경향을 보인다.

그림 5는 각 PWM 방식에 따라 스위치에서 발생하는 손실을 논문에서 언급한 이론적 손실을 통해 계산한 후 시뮬레이션과 비교하였다. 인버터 동작모드와 컨버터 동작모드로 구분되어 있으며 부하의 증가에 따른 손실이 시뮬레이션과 유사하게 나타나는 것을 확인할 수 있다.

그림 6은 부하 크기에 따른 인버터 동작모드와 컨버터 동작모드에서의 계통 전류 품질을 나타낸 그래프이다. Min-max PWM, SPWM, DPWM 순서로 높은 계통 전류 품질을 갖는다. Min-max PWM과 SPWM은 이론적으로 비슷한 계통 전류 품질 값을 갖지만, SPWM의 DC 링크 전압이 더 크기 때문에 계통 전류 품질은 낮아진다. DPWM 기법은 비스위칭에 의하여 고조파 함유율이 많아지기 때문에 비스위칭 구간이 길어질수록 계통 전류 품질이 낮다. 하지만 DPWM의 계통 전류 품질이 낮더라도 스위칭 손실에서 이점이 있기 때문에 국제표준을 만족하는 부하 영역에서는 사용 가능하다. 시뮬레이션 검증 결과 SPWM과 Min-max PWM은 계통 전류 품질 특성에서 DPWM보다 유리함이 있지만 스위칭 손실은 불리하다. DPWM 기법은 SPWM, Min-max PWM 제어기법보다 계통 전류 품질은 낮아지는 경향이 있지만 국제표준을 만족하는 부하 영역에서는 스위칭 손실이 줄어든다<sup>[6]</sup>. 따라서 계통 전류 품질이 우선시 되는 경우 Min-max PWM이 손실이 우선시 되는 경우

DPWM 기법이 유리하다<sup>[7]</sup>.

## 6. 결 론

본 논문은 양방향 계통연계 인버터의 PWM 제어기법에 따른 손실양상을 비교·분석하였다. 손실 분석을 위해 PWM 제어기법에 따라 같은 진폭 변조 계수에서 동일한 출력을 낼 수 있는 DC 링크 전압을 선정하였다. PWM 제어기법에 따라 설계된 조건에서 시스템 손실을 이론적 수식을 통해 분석하였다. 분석한 내용을 검증하기 위해 10kW급 계통연계 인버터 시뮬레이션을 수행하였고, 이론적 손실을 계산하여 시뮬레이션 결과와 비교하여 검증하였다. 따라서 여러 PWM 방식에 따른 손실 분석에 대한 이론적 기반을 제시하였고, 계통연계 양방향 인버터에 계통 전류 품질 기준을 만족하는 부하 범위에서 DPWM 적용 가능성을 확인하였다.

본 연구는 2016년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 에너지인력양성 사업으로 지원받아 수행한 인력양성 성과입니다.  
(No. 20164030200980)

## References

- [1] N. Mohan and R. K. Nema, "Performance analysis and comparison of pulse width modulation techniques for two level inverter based induction motor drives," AICERA-iCMMD International Conference on Magnetics, Machines & Drives, July 2014.
- [2] F. A. M. Al-Qrimli and H. T. Kadhum, "A study of harmonics in pulse width modulation power inverter as a motor drive," *IEEE Transaction on Industry Applications*, 32(5):1220-1221 · October 1996.
- [3] Dynex. [Online] Available: [www.dynexsemi.com/assets/downloads/DNX\\_AN6156.pdf](http://www.dynexsemi.com/assets/downloads/DNX_AN6156.pdf)
- [4] A. M. Hava, R. J. Kerkman and T. A. Lipo, "A high-performance generalized discontinuous PWM algorithm," *IEEE Transaction on Industry Applications*, Vol. 34, No. 5, Sep. 1998.
- [5] Changsung, [Online] Available: [http://www.changsung.com/\\_eng/download/mgnetic\\_power\\_cores.pdf](http://www.changsung.com/_eng/download/mgnetic_power_cores.pdf)
- [6] *IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems*, IEEE standard 519-2014
- [7] S. J. Heo, H. M. Ahn, J. E. Byeon and B. K. Lee, "Analysis and comparison of grid-connected bidirectional inverter with different types of PWM schemes," *The Transactions of the Korean Institute of Power Electronics*, pp. 124-125, Jul. 2017.