

# SHE-PWM을 적용한 STATCOM에 의한 저차고조파 제거 방법

최순호<sup>†</sup>, 김찬기<sup>1</sup>, 이성두<sup>1</sup>

## Elimination of Low Order Harmonics from STATCOM using SHE-PWM

Soon-Ho Choi<sup>†</sup>, Chan-Ki Kim<sup>1</sup>, and Seong-Doo Lee<sup>1</sup>

### Abstract

In HVDC converters that employ a line-commutated control, reactive power is absorbed by the rectifier and inverter terminals during AC/DC conversion. An AC filter usually consists of filters and large shunt capacitors to supply reactive power to the HVDC station. When STATCOM is used to supply reactive power to the HVDC system with AC filter, the low-order harmonics generated from STATCOM can result in a resonance between the shunt capacitor and AC network. Therefore, a control strategy based on selective harmonic elimination is adopted to minimize the low-order harmonics from STATCOM. The cancellation of harmonic instabilities is verified through simulations in PSCAD/EMTDC.

**Key words:** STATCOM, Harmonic instability, Selective harmonic elimination(SHE)-PWM, HVDC transmission

### 1. 서 론

전력수요의 지속적인 증가와 기후변화 문제에 대한 사회의 인식은 전력산업에 직접적인 영향을 미친다. 더 많은 지속가능한 에너지원을 수용함으로써 공급자의 다양성을 확보하고 에너지 융합을 증가시킬 필요가 있다. 동시에 효율, 신뢰성, 에너지 안보, 전력 품질을 만족해야 하는 등 전력기반 산업은 전력계통을 관리하고 운영하는 방법을 바꾸려는 압력에 직면해 있다. 무효전력의 제어를 통한 송전용량의 증대, 계통의 안정도 여유 확보, 장거리 전압 프로파일 유지를 통해 전력계통의 효율적 운용이 가능하며, 유연 교류 송전 시스템(FACTS), 전압원 HVDC 시스템과 같은 진보한 기술은 전력계통의 재구성성을 통해 자동화 및 전자적으로 제어되는 스마트 그리드에 필수적이다<sup>[1]-[3]</sup>.

고전압 고전력용 반도체 기술의 진보에 따라 계통의 최적인전과 효율적인 관리를 가능하게 하는 전력전자장치가 발전하였으며, 수kW급의 소용량 컨버터에서부터 수GW급의 대용량 컨버터를 개발하기에 이르렀다. 전력

변환기술은 기본적으로 AC전력을 다른 형태의 AC전력으로 직접 변환하는 기술과 AC전력을 DC전력을 통하여 AC전력으로 변환하는 기술로 구분할 수 있으며, 전력원(Power Source)의 형태에 따라 전압원 컨버터(Voltage Source Converter)와 전류원 컨버터(Current Source Converter)로 구분할 수 있다<sup>[4]</sup>.

전압원 컨버터에 해당하는 STATCOM은 무효전력의 제어를 통해 AC전압을 제어하는 장치로서 HVDC 또는 분로 커패시터 연계 모선에 설치한다. STATCOM과 같은 전압원 컨버터는 사이리스터 기반의 전류원 컨버터와 비교하여 정현파의 교류전압을 얻기 위해 더 높은 주파수의 PWM 파형을 발생하는 것이 바람직하다. 그러나, 설비의 운전 주파수가 상승함에 따라 스위칭 손실이 증가하고 이에 따른 냉각 설계가 필요하므로, 전압원 컨버터 기반 고전력 분야에서 다루어져야 할 가장 중요하고 도전적인 이슈 중 하나이다. 전압원 컨버터를 높은 주파수에서 운전함으로써 발생하는 또다른 단점으로는 전자환경적합성/전자파 방해(EMC/EMI), 변압기 절연스트레스, 고주파 공진 등이 있으며, 이를 해소하기 위해 추가적인 필터를 필요로 한다.

HVDC 시스템은 송전전력의 50~60%에 해당하는 무효전력을 필요로 하며, 이를 보상하기 위해 AC필터가 레กติ파이어와 인버터측에 각각 설치된다. 따라서, AC필터의 높은 커패시턴스와 전력계통의 인덕턴스 성분으로 인해 LC 공진회로가 형성된다. 공진주파수가 높다면, 시스템내의 충분한 감쇄로 인해 공진현상으로 인한 부작용

Paper number: TKPE-2014-19-5-8

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

<sup>†</sup> Corresponding author: shchoi@kepco.co.kr, KEPCO Research Institute

Tel: +82-42-865-5842 Fax: +82-42-865-5814

<sup>1</sup> KEPCO Research Institute

Manuscript received May. 12, 2014; accepted Aug. 26, 2014

이 발생하지 않는다. 그러나, 공진주파수가 기본파에 가까울수록, AC 계통 임피던스는 HVDC 시스템의 AC필터, 인근의 발전기, 분로리액터, 분로커패시터 등을 포함하여 병렬 공진 회로를 구성할 수 있고, 저차고조파를 증폭하여 허용치를 초과하고 계통에 불안정을 야기할 수 있다.

전압원 컨버터에서 PWM의 스위칭 주파수를 낮추는 동시에 고조파 발생량을 저감하는 기법으로 SHE (Selected Harmonic Elimination) PWM이 있다.<sup>[5][6]</sup> SHE-PWM 기법은 사전에 고조파를 제거할 수 있는 제어각의 해집합을 구하고 모듈레이션 인덱스에 따라 PWM 신호를 출력함으로써, 고조파를 선택하여 제거할 수 있다. 또한 최소의 스위칭 변환동작을 통해 고조파 발생을 최저로 하며, 부가적으로 스위칭 손실 감소 등의 장점이 있다. 이와 같은 방법은 컨버터의 레벨이 낮은 경우에 효과가 높기 때문에 STATCOM을 포함한 FACTS 장치와 같이 상대적으로 낮은 전압정격을 갖는 전력전자장치에 적용하기에 적합하다. 배전계통에서 산업용 부하의 빠른 무효전력 수급을 목적으로 D-STATCOM에 SHE-PWM이 적용되어 고조파를 제거하였다.<sup>[7]</sup>

이 논문에서는 HVDC 시스템의 무효전력공급을 위해 STATCOM이 적용된 경우에 공진의 발생가능성이 있는 저차고조파를 원천적으로 제거하기 위해 SHE-PWM을 STATCOM에 적용하기 위한 방법을 연구하고, 6개의 고조파를 선택하여 제어각의 해집합을 구하고, 모듈레이션 방법에 적용하였다. PSCAD/EMTDC에서의 구현 및 모의시험을 통해 제한한 방식의 타당성을 확인하였다.

## 2. HVDC/AC 계통에서 저차고조파 공진검토

HVDC 시스템은 DC전력을 제어하기 위해 사이리스터 밸브의 점호각을 지연시킴으로써, AC전압과 전류간에 위상차가 발생하게 되며, 결과적으로 송전전력의 50~60%에 해당하는 무효전력을 필요로 한다. 이를 보상하기 위해 AC필터가 렉티파이어와 인버터측에 각각 설치되는데, AC필터의 높은 커패시턴스와 전력계통의 인덕턴스 성분에 의해 LC 공진회로가 형성된다. AC 계통의 고조파 공진점을 찾기 위해서는 계통의 단락용량을 이용하여 개략적으로 찾는 방법이 있으며, PSCAD/EMTDC에 실제 계통자료를 입력하여 정확한 고조파 공진점을 찾는 방법이 있다.

### 2.1 단락비

HVDC 시스템이 연계된 AC 계통의 강도를 나타내는 SCR지표는 컨버터 모선에 연계된 등가 AC 계통의 테브난 임피던스로 결정된다. 테브난 임피던스가 낮은 경우, 강한 계통을 의미하며, ac 계통 전압의 변동은 상대적으로 작아지고, DC 시스템에서 정류실패는 적게 발생

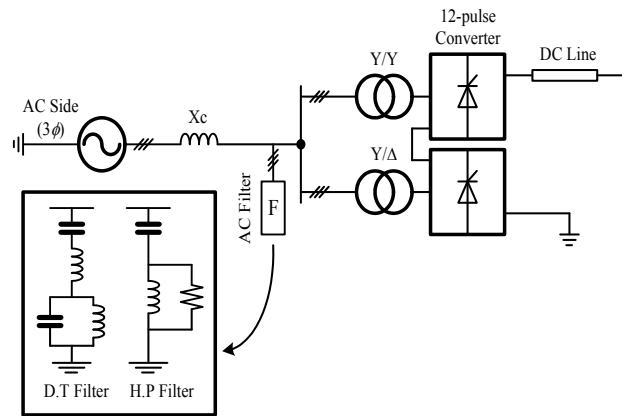


Fig. 1. LCC HVDC system configuration.

한다. 테브난 임피던스가 높다면, 약한 계통을 의미하며, 고조파 공진, 불안정, 빈번한 정류 실패 등의 문제가 발생할 수 있다. 테브난 임피던스에 관계된 ac 계통의 강도는 단락비(SCR)의 용어로 표현할 수 있다. 단락비는 DC 시스템의 정격에 대한 AC 계통의 단락 레벨의 비로 정의된다.

$$SCL = \frac{E_{ac}^2}{Z_{ac}} \quad (1)$$

$$SCR = \frac{\text{Short Circuit Level, } SCL(MVA)}{DC \text{ Power, } P_d(MW)} \quad (2)$$

### 2.2 HVDC와 AC계통 간의 상호작용

전력계통은 수많은 커패시턴스와 인덕턴스로 구성되며, 이로 인해 L-C 공진회로가 형성된다. 공진주파수가 높은 경우에는 충분한 감쇄로 인해 공진현상으로 인한 고조파불안정 문제가 발생하지 않는다. 그러나, HVDC 변환소는 AC 필터, 커패시터 뱅크, 분로 리액터 등으로 구성된 무효전력 보상설비가 있으며, HVDC 시스템 정격의 약 50~60%에 해당하는 무효전력을 공급한다. 이와 같은 높은 커패시턴스로 인해 공진주파수는 상당히 낮아질 수 있다. 변환용 변압기 포화에 의한 고조파 전류의 발생은 공진에 의한 결과를 더욱 악화시킬 수 있다. 따라서, 공진주파수가 기본파의 7차 이내의 저차인 경우, 고조파에 의한 공진을 고려해야 한다.

AC 계통 임피던스는 인근의 발전기를 포함하여 병렬 공진 회로를 구성할 수 있고, 저차고조파를 증폭하여 허용치를 초과할 수 있다. 공진주파수  $w_r$ 를 구하는 수식은 아래와 같다.

$$w_r = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (3)$$

공진주파수를 SCR로 표현하기 위해, (1)과 (2)를 정리하여 (3)에 대입하면 다음 식을 얻을 수 있다.

$$w_r = w_0 \sqrt{\frac{SCR \cdot P_d}{Q_c}} \quad (4)$$

여기서  $Q_c$ 는 HVDC 연계 모선에 투입된 전체 용량성 무효전력이다.

용량성 무효전력을 DC전력의 60%인 것으로 가정하면 다음과 같다.

$$\frac{w_r}{w_0} = \sqrt{\frac{SCR}{0.6}} \quad (5)$$

식 (5)에 의해, SCR이 2.5인 경우 공진주파수는 2차 고조파가 되고, SCR이 15인 경우 공진주파수는 5차 고조파가 되며, 낮은 주파수에서의 공진 가능성으로 인해 계통에 주입되는 저차고조파를 제거할 필요가 있다.

### 3. STATCOM 시스템

STATCOM은 무효전력의 공급, 흡수를 통해 모선전압을 유지하는 장치이다. STATCOM은 출력 전압의 크기를 제어하며, STATCOM 출력전압이 AC계통 전압보다 높은 경우,  $90^\circ$  앞서는 진상 전류가 흘러 계통에 무효전력을 공급하고 AC계통 전압을 상승시킨다. 반대로 STATCOM 출력 전압이 AC 전압보다 낮은 경우,  $90^\circ$  뒤지는 지상 전류가 흘러 계통에서 무효전력을 흡수하고 AC계통 전압을 감소시킨다. 그림 2에 STATCOM의 회로도도를 나타내었으며, 2-레벨 전압원 컨버터, DC 링크 커패시터, 입력 필터로 구성된다.

STATCOM에서 유효전력과 무효전력의 수식은 다음과 같다.<sup>[7]</sup>

$$P_c = \frac{V_s V_c}{X} \sin \delta \quad (6)$$

$$Q_c = V_s \frac{V_s - V_c \cos \delta}{X} \quad (7)$$

여기서,  $V_s$  : STATCOM 연계 AC모선 전압

$V_c$  : STATCOM 출력 상전압

$\delta$  : STATCOM과 AC 계통 전압의 위상차

$X$  : 전원, 변압기, 입력 필터의 등가 리액턴스

모듈레이션 인덱스  $m$ 을 정의하면 다음과 같다.

$$\hat{V}_c = m \frac{V_d}{2} \quad (8)$$

여기서,  $V_d$  : dc 링크 평균 전압

$\hat{V}_c$  : STATCOM 출력 상전압  $V_c$ 의 첨두치

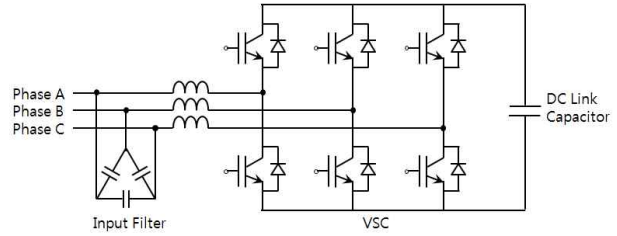


Fig. 2. 3-phase 2-level STATCOM configuration.

그러므로,  $P_c$ 와  $Q_c$ 는 모듈레이션 인덱스와 dc 링크 전압으로 표현할 수 있다.

$$P_c = \frac{0.35 V_s}{X} m V_d \sin \delta \quad (9)$$

$$Q_c = \frac{V_s}{X} (V_s - 0.35 m V_d \cos \delta) \quad (10)$$

STATCOM이 이상적인 시스템이라면,  $P_c$ 와  $\delta$ 는 0이 될 것이고,  $Q_c$ 의 공급/흡수 제어를 통해  $V_s$ 를 유지할 것이다. 그러나, 실제 시스템에서는 손실이 발생하며  $\delta$ 를 매우 작은 값으로 유지하여 손실분을 공급하고,  $Q_c$ 를 제어한다. 그러므로 일정한 무효전력 제어 모드에서 STATCOM을 운전하는 경우  $\cos \delta$ 는 1로 근사된다. 무효전력은 다음의 방법을 통해 제어될 수 있다.

- 1) dc 링크 전압  $V_d$ 를 일정하게 유지한 상태에서 모듈레이션 인덱스  $m$ 을 변화시킴
- 2)  $m$ 을 일정하게 유지하는 동안  $V_d$ 를 변화시킴
- 3)  $m$ 과  $V_d$ 를 변화시킴

일정한 dc-링크 전압제어모드에서, dc 링크 전압은  $\delta$ 의 작은 변화에 의해 일정하게 유지되고, 무효전력 제어는 모듈레이션 인덱스를 제어함으로써 이루어진다.  $V_c$ 는  $V_s$ 보다 크며 정상상태에서 용량성 모드로 운전하고, STATCOM은 계통에 무효전력을 공급한다. 반면에  $V_c$ 가  $V_s$ 보다 작으면, STATCOM은 유도성 영역에서 운전하며 AC 계통으로부터 무효전력을 흡수한다.

### 4. SHE-PWM 제어기 설계

#### 4.1 SPWM 제어 방법

일반적으로 STATCOM에 적용되는 VSC 토폴로지는 그림 2에 나타난 2-레벨 3상 컨버터이다. 일반적으로 컨버터의 전압 정격을 높이기 위해 다수의 IGBT를 직렬 접속하여 사용하며, 컨버터의 dc 모선 전압 레벨을 증가시킨다.

컨버터는 일반적으로 정현 PWM(SPWM)을 사용하여 제어되며, 고조파는 각 컨버터 레그의 스위칭 주파수와 직접적으로 관련된다. 그림 3에 SPWM의 기본 파형과

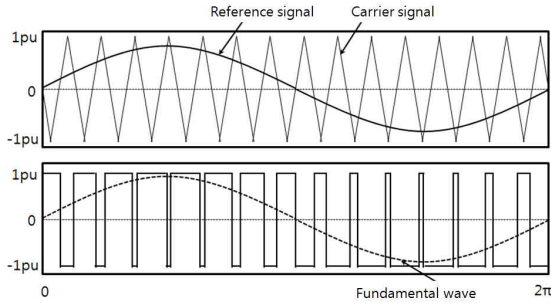


Fig. 3. 2-level SPWM method.

2-레벨 컨버터의 상전압 파형을 제시하였다. 컨버터 각 상의 레그는 리액터를 통해 AC 계통과 연계된다.<sup>[8],[9]</sup>

#### 4.2 SHE-PWM 제어 방법

STATCOM에 SHE-PWM 기법을 사용하는 것은 고조파를 제거하기 위한 효과적인 방법이다. SHE-PWM 기법을 전압형 STATCOM에 적용하는 것의 장점은 다음과 같다.

- 1) SPWM과 비교하여 STATCOM의 상전류에서 동일한 고조파 스펙트럼을 갖는 스위칭 주파수가 거의 1/2이며, 따라서 스위칭 손실 및 고조파 발생을 최소로 한다.
- 2) SHE-PWM 은 최적화되고 고정된 PWM 패턴을 갖기 때문에 구현과정이 훨씬 용이하다.

이것은 AC계통에 주입되는 고조파를 상쇄하는 제어각의 해집합을 사전에 구한 후, STATCOM의 무효전력 제어기에서 출력되는 모듈레이션 인덱스에 따라 IGBT에 PWM 신호를 입력하는 방식이다. SPWM 방식이 높은 주파수로 일정하게 IGBT를 스위칭하는 것과 달리, SHE-PWM 방식은 최소한의 정해진 제어각으로만 컨버터를 제어함으로써, 스위칭 손실 및 고조파의 발생을 최소로 한다.

2-레벨 SHE-PWM의 출력 전압을 그림 4에 나타내었다.  $6N \pm 1$  ( $N=1,2,3$ )차의 저차고조파를 제거하기 위해서 SHE-PWM에서 1/4주기당 7개의 스위칭을 사용하였으며, 5차, 7차, 11차, 13차, 17차, 19차 고조파를 제거할 수 있다. 평형부하의 경우, 3상 컨버터 스위칭 함수의  $120^\circ$  주기성으로 인해 3의 배수에 해당하는 고조파가 제거되며, 모듈레이션 인덱스에 따른 7개의 위상제어각의 해집합을 다음과 같이 구하였다.

SHE-PWM에서 전력 반도체의 스위칭 주파수  $f_s$ 는  $N$ 개의 제거되어야 할 고조파 개수와 직접적으로 연관되며, 다음과 같다.

$$f_s = (2N+1)f_1 \quad (11)$$

여기서  $f_1$  : AC 계통 주파수 (기본파 주파수)

SHE-PWM 기법은 2-레벨 3상 VSC에서 최소한의

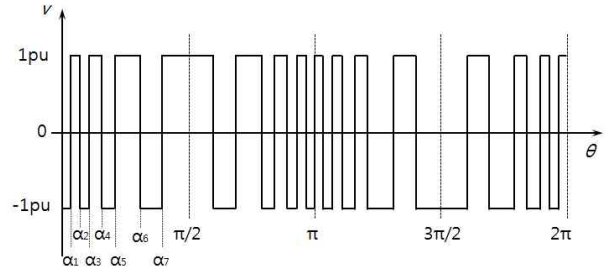


Fig. 4. 2-level SHE-PWM switching patterns with 7 switching transitions for 1/4 cycle.

스위칭으로 고조파를 선택하여 제거할 수 있도록 하며, 기본 주파수와 첫 번째로 큰 고조파 사이의 대역폭을 증가시킨다. 이 기법을 STATCOM에 적용함으로써 AC 측에 발생할 수 있는 모든 저차고조파를 제거할 수 있다. 즉, STATCOM에서 특정 고조파가 발생하는 것을 원천적으로 억제하여 계통의 고조파 불안정(Harmonic Instability) 문제를 해소할 수 있다.

STATCOM이 연계된 AC 계통의 상전압 파형은 다음과 같이 표현할 수 있다.<sup>[10]</sup>

$$V_{LN} = \begin{bmatrix} V_{AN} \\ V_{BN} \\ V_{CN} \end{bmatrix} = V_{dc} \begin{bmatrix} \sum_{n=1}^{\infty} A_n \sin n\omega_o t \\ \sum_{n=1}^{\infty} A_n \sin \left( \omega_o t - \frac{2\pi}{3} \right) \\ \sum_{n=1}^{\infty} A_n \sin \left( \omega_o t + \frac{2\pi}{3} \right) \end{bmatrix} \quad (12)$$

여기서,  $\omega_o$  : AC계통 운전 주파수

$V_{dc}$  : dc 링크 전압

그러므로, 선간전압은 다음과 같다.

$$V_{LL} = \begin{bmatrix} V_{AB} \\ V_{BC} \\ V_{CA} \end{bmatrix} = \sqrt{3} V_{dc} \begin{bmatrix} \sum_{n=1}^{\infty} A_n \sin \left( \omega_o t + \frac{\pi}{6} \right) \\ \sum_{n=1}^{\infty} A_n \sin \left( \omega_o t - \frac{\pi}{2} \right) \\ \sum_{n=1}^{\infty} A_n \sin \left( \omega_o t + \frac{5\pi}{6} \right) \end{bmatrix} \quad (13)$$

SHE-PWM 기법에 사용될 제어각을 구하기 위해 파형을 푸리에 급수 변환하고 수치해를 구한다.<sup>[11]</sup>

$$M = 1 + 2 \sum_{i=1,2,3 \dots}^{N+1} (-1)^i \cos(\alpha_i) \quad (14)$$

$$0 = 1 + 2 \sum_{i=1,2,3 \dots}^{N+1} (-1)^i \cos(k\alpha_i) \quad (15)$$

여기서,  $N+1$  : 구해야 하는 각의 개수

$\alpha_i$  : 모듈레이션 인덱스와 고조파 제거를 만족하는 제어각

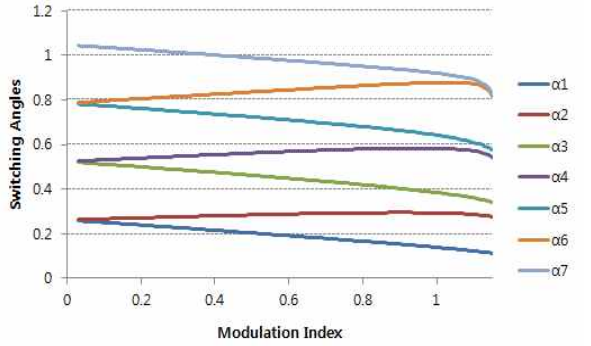


Fig. 5. SHE-STATCOM switching angles related to modulation index.

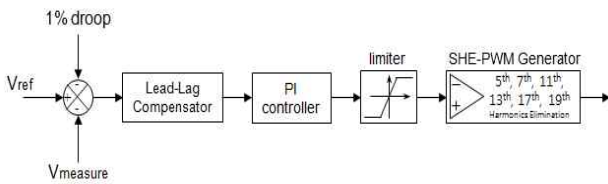


Fig. 6. Control diagram of SHE-STATCOM.

180° 대칭에 의해 2n 고조파가 제거되며, 마지막으로 다음의 제약조건을 적용한다.

$$0 < \alpha_1 < \alpha_2 < \dots < \alpha_{N+1} < \pi/2 \quad (16)$$

(14)~(16)의 식을 통해 제어각의 해집합을 구하였으며, 그림 5에 나타내었다. 각각의 제어각은 모듈레이션 인덱스의 증감에 따라 모듈레이션 인덱스와 고조파의 제거를 동시에 만족하는 제어각으로 변화한다.

### 4.3 STATCOM 제어기 설계

제어 시스템의 블록도를 그림 6에 나타내었다. STATCOM 제어기에서는 AC계통 전압을 일정하게 유지하기 위해서, AC계통 전압 측정값을 기준전압과 비교하여 오차를 계산함으로써 계통의 무효전력 수요를 구하고, PI제어기를 통해 무효전력 공급/흡수를 제어한다. 제어기에서는 기준전압  $V_{ref}$ 와 측정전압  $V_{measure}$ 를 입력받아 오차를 계산하며, 이 때 무효전력 보상속도를 증가시키기 위해 1%의 droop를 적용하였다. 전압 오차는 주파수 응답 성능을 향상시키기 위해 진상-지상 보상기를 거쳐 PI제어기에 입력된다. 진상-지상 보상기는 피드백 제어 시스템에서 주파수 응답성을 향상시키며, 과도상태에서 제어기의 수렴시간이 빨라지며, 오버슈트가 작게 제어된다. 제어시스템에서 전류 피드백은 없으며, STATCOM의 무효전력 출력은  $V_{ar}$  정격으로 제한된다.

제어기에서는 AC계통 전압 변동에 따라서 무효전력을 제어하고, 제어기에서 출력되는 무효전력 지령값이 SHE-PWM 발생기에 입력되어 모듈레이션 인덱스 조건에 따라 그림 5의 해집합에서 7개의 제어각을 출력한다.

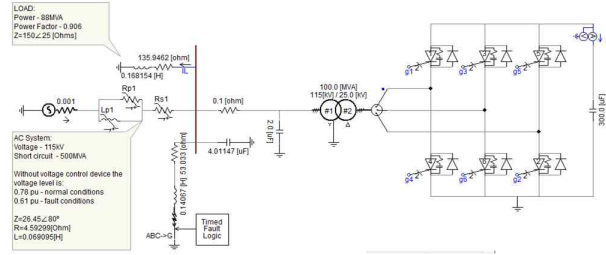


Fig. 7. 6-pulse STATCOM PSCAD/EMTDC model.

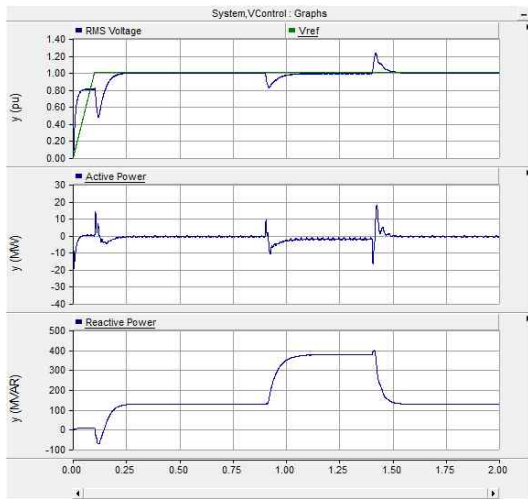
TABLE I  
SYSTEM PARAMETER USED IN SIMULATION

Parameter	rated value
AC voltage	115 [kV]
short circuit level	500[MVA <sub>sc</sub> ]
load	88[MVA]
transformer	100[MVA]
STATCOM	300[MVAR]
HVDC Filter	4.01147[uF]

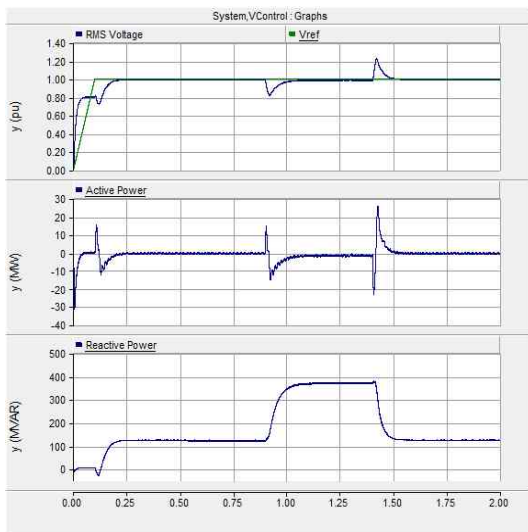
## 5. PSCAD/EMTDC 모의시험

SHE-PWM을 적용한 STATCOM의 고조파 특성을 모의하기 위해서 PSCAD/EMTDC를 사용하여 2-레벨 전압원 컨버터 STATCOM을 그림 7과 같이 구성하였다. PWM 방식에 따른 고조파 특성을 비교할 수 있도록 SHE-PWM과 1980Hz의 캐리어 주파수를 갖는 SPWM을 비교 대상으로 하였다. 왼쪽에는 AC 등가 계통과 부하를, 오른쪽에는 변압기와 2-레벨 STATCOM으로 구성되어 있으며, HVDC 시스템에서 AC계통의 리액턴스와 공진회로를 구성할 수 있는 분로 커패시터를 모델링하였다. 모의시험에 사용된 시스템 파라미터를 표 1에 나타내었다.

그림 8에서 STATCOM 모델에 캐리어 주파수 방식의 PWM을 적용한 경우와 SHE-PWM을 적용한 경우의 모의시험 결과를 비교하였다. STATCOM이 정상상태에 도달한 후, 0.9[s]에 AC계통에 3상 고장을 발생하였으며, 1.4[s]에 해소한다. 그림 8(a)에서 AC 계통 전압의 기준 전압은  $V_{ref}$ 이며, 고장 발생 후 전압이 0.82pu까지 감소하며, STATCOM에 의해 무효전력이 공급되면서 전압이 회복된다. 유사하게 계통의 고장이 해소된 후에는 전압이 1.22pu까지 증가하며, STATCOM의 무효전력 공급량이 감소함으로써 전압이 회복된다. 정상상태에서 STATCOM은 126[MVAR]의 무효전력을 계통에 공급하며, 고장구간에서는 계통전압의 유지를 위해 무효전력공급량을 375[MVAR]까지 증가시킨다. SHE-PWM을 적용한 경우에 무효전력 제어기의 출력은 모듈레이션 인덱스이며, 그림 5의 미리 계산된 제어각을 출력한다. 그림 8(b)에서 고장 전후 무효전력의 제어를 통해 AC 계통



(a)



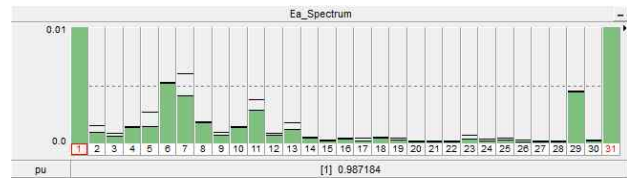
(b)

Fig. 8. AC voltage, active power, reactive power of SPWM(a) and SHE-PWM(b).

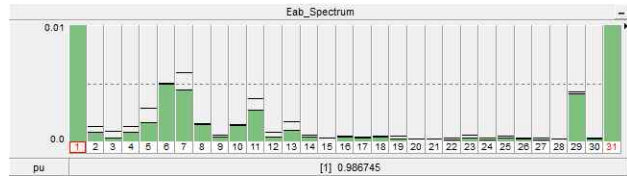
전압이 기준 전압인  $V_{ref}$ 를 정확하게 추종하고 있음을 확인할 수 있다.

그림 9에 캐리어 주파수 방식의 PWM을 적용한 STATCOM의 모의시험 결과 AC계통에 주입되는 전압 및 전류의 고조파 스펙트럼을 나타내었다. 6펄스 컨버터의 특성으로  $6n \pm 1$ 차에 해당하는 고조파의 크기가 높으며, 상전압 기준 6차 고조파의 크기가 0.5%로 가장 높고, 7차 고조파(0.4%), 11차 고조파(0.3%)의 값을 갖는다. HVDC 시스템과 같이 대용량의 분포 커패시턴스를 필요로 하는 시스템의 경우, 이와 같은 높은 크기의 저차고조파가 계통에 주입되어 고조파 불안정현상이 야기될 가능성이 존재한다.

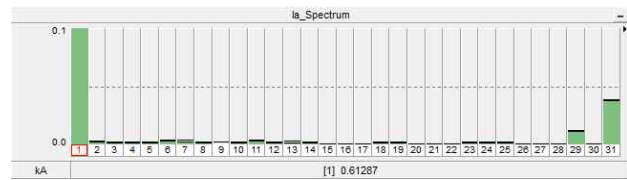
그림 10에 SHE-PWM 기법을 적용한 STATCOM 모델의 고조파 스펙트럼을 나타내었다. AC계통에 주입되는 전압 및 전류를 관측한 결과  $6N \pm 1$ ( $N=1,2,3$ )차의 고조파가 제거되었으며, 고조파의 크기는 최대 0.2%(7차



(a)

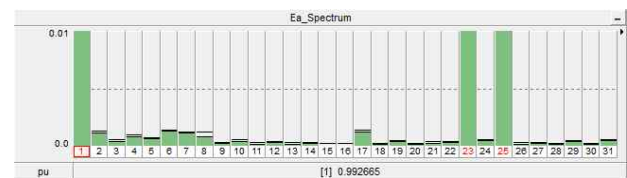


(b)

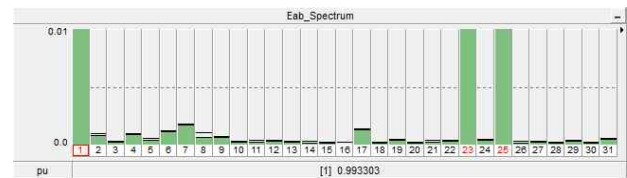


(c)

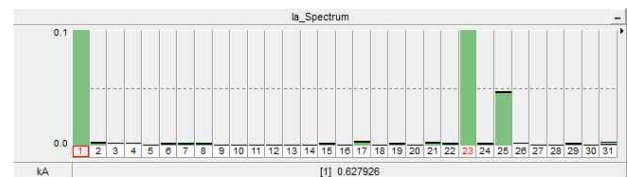
Fig. 9. Harmonic spectrum injected to AC system with SPWM (a)phase voltage, (b)line-to-line voltage, (c)AC current.



(a)



(b)



(c)

Fig. 10. Harmonic spectrum injected to AC system with SHE-PWM (a)phase voltage, (b)line-to-line voltage, (c)AC current.

고조파)이다. 본 논문에서 사용된 모델에서는 저차고조파를 제거하고자 하는 목적에 부합하도록 6개의 고조파가 순차적으로 제거되었고, 23차와 25차에서부터 처음 고조파가 발생하는데, 높은 대역의 고조파는 AC필터에 의해서 쉽게 제거가 가능하다.

## 6. 결 론

HVDC 시스템이 연계된 AC 계통에서는 AC/DC 변환 과정에서 필요한 무효전력을 공급하기 위해 AC필터와 STATCOM 등을 설치하는데, 이 때, STATCOM에서 발생하는 고조파로 인해 고조파 불안정 문제가 발생할 수 있다. 본 논문에서는 STATCOM에서 스위칭 손실은 줄이면서 고조파를 제거하기 위해 SHE-PWM 방식을 적용하였다.  $6N\pm 1$  ( $N=1,2,3$ )차의 저차고조파를 제거하기 위해 모듈레이션 인덱스에 따른 7개의 위상제어각의 해를 구하였으며, 제어기에서는 AC계통 전압의 변동에 따른 무효전력 공급/흡수량을 제어하고 모듈레이션 인덱스에 따라 지정된 7개의 제어각을 출력한다. PSCAD/EMTDC를 이용하여 2-레벨 STATCOM을 모의시험하였으며, 출력전압 및 전류의 고조파 스펙트럼 분석을 통해 제안한 방식의 고조파 발생량을 측정하였다. 기존의 PWM 방식으로 제어되는 STATCOM과 비교하여 제어범위 이내의 고조파 발생량이 감소하였으며, 제안한 방법의 유효성을 검증하였다.

## References

- [1] J. McDonald, "Leader or follower [The business scene]," *IEEE Power Energy Mag.*, Vol. 6, No. 6, Nov. 2008.
- [2] N. Hingorani, L. Gyugyu, *Understanding FACTS, concepts and technology of flexible AC transmission systems*, IEEE Press, New York, 2000.
- [3] J. Dixon, L. Moran, and J. Pontt, "Reactive power compensation Technologies," *Proc. IEEE*, Vol. 93, No. 12, pp. 2144-2164, Dec. 2005.
- [4] S. Kouro, M. Malinowski, K. Gopakumar, J. Pou, L. G. Franquelo, B. Wu, J. Rodriguez, M. A. Perez, and J. I. Leon, "Recent advances and industrial applications of multilevel converters," *IEEE Transactions of Industrial Electronics*, Vol. 57, No. 8, pp. 2553-2580, Aug. 2010.
- [5] N. Mohan, T. M. Undeland, and W. P. Robbins, *Power electronics: converters, applications, and design*, John Wiley & Sons, New York, 1995.
- [6] P. N. Enjeti, P. D. Ziogas, and J. F. Lindsay, "Programmed PWM techniques to eliminate harmonics: a critical evaluation," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. 26, No. 2, pp. 302-316, Mar./Apr. 1990.
- [7] A. Cetin and M. Ermis, "VSC-based D-Statcom with selective harmonic elimination," *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 45, No. 3, pp. 1000-1015, May/June. 2009.
- [8] N. Flourentzou, V. G. Agelidis, and G. D. Demetriades, "VSC-based HVDC power transmission systems: An overview," *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 24, No. 3, pp. 592-602, Mar. 2009.
- [9] P. G. Gonzalez and A. G. Cerrada, "Control system for a PWM-based statcom," *IEEE Transactions on Power*

*Delivery*, Vol. 15, No. 4, pp. 1252-1257, Oct. 2000.

- [10] N. Flourentzou and V. G. Agelidis, "Optimized modulation for AC-DC harmonic immunity in VSC HVDC transmission," *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 25, No. 3, pp. 1713-1720, Jul. 2010.
- [11] V. G. Agelidis, A. Balouktsis, I. Balouktsis, and C. Cossar, "Multiple sets of solutions for harmonic elimination PWM bipolar waveforms: Analysis and experimental verification," *IEEE Transactions on Power Electron.*, Vol. 21, No. 2, pp. 415-421, Mar. 2006.
- [12] C. K. Kim, V. K. Sood, G. S. Jang, S. J. Lim, and S. J. Lee, HVDC Transmission : Power conversion applications in power systems, *John Wiley & Sons*, 2009.



### 최순호(崔淳浩)

2007년 충남대 전기공학과 졸업. 2009년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2010년~현재 한전 전력연구원 일반연구원.



### 김찬기(金燦起)

1991년 서울산업대 전기공학과 졸업. 1993년 중앙대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 1996년~현재 한전 전력연구원 책임연구원.



### 이성두(李性斗)

1998년 부산대 전기공학과 졸업(석사). 1999년~현재 한전 전력연구원 선임연구원.