

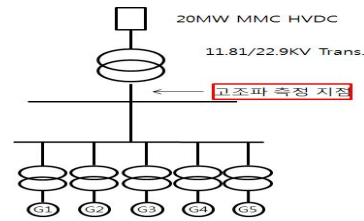
## 해상풍력 연계용 20MW급 전압형 HVDC시스템의 고조파 필터 분석

김지훈\*, 정종규\*, 김준성\*, 정홍주\*  
(주) 효성\*

### Harmonic Filter analysis of 20MW VSC HVDC for offshore wind-farm interconnection

Jihun Kim\*, Jong-Kyou Jeong\*, June-Sung Kim\*, Hong-Ju Jung\*  
Hyosung Corporation\*

**Abstract** - Thyristor, IGBT와 같은 전력용 반도체 소자를 사용하여 고소 스위칭을 하는 HVDC는 출력 전원에 고조파를 많이 포함하기 때문에 전력 품질을 하락시킨다. 그러므로, 고조파 국제 기준인 IEEE 512-1992를 만족시키기 위하여 HVDC 연계 측에 고조파 필터의 연결이 필수적이다. 본 논문에서는 실제 HVDC를 연계할 한경풍력단지의 전압, 전류 고조파 분석을 하고 이를 PSCAD/EMTDC상의 HVDC 모델에 등가화하여 반영하였다. 출력 전원 측에 고조파 분석을 하여 적절한 양의 고조파 필터를 설계하고 이의 효과를 검토하였다.



〈그림 1〉 HVDC를 통한 한경 풍력단지-제주 계통 연계

## 1. 서 론

HVDC는 Thyristor나 IGBT와 같은 전력용 반도체 소자를 사용하여 고속으로 스위칭을 하기 때문에, 출력 전원에 고조파가 많이 포함되어 있어 전력 품질에 안 좋은 영향을 미친다. 이러한 고조파는 연계된 계통의 기기 오동작 및 장비 수명을 단축시키기 때문에 IEEE 519규정에서는 전고조파왜형률(Total Harmonic Distribution, THD)을 다음과 같이 제한하고 있다. [1]

〈표 1〉 IEEE 519-2014 고조파 관리 기준

연계 전압	THD
69kV 이하	5%
69~161kV	2.5%
161kV 이상	1.5%

전압형 HVDC는 독립적으로 유효전력 제어가 가능하기 때문에 필터 자체에서 무효전력 보상을 할 필요가 없고, 주로 고차 고조파 성분만을 제거하는 필터만 필요하기 때문에 고조파 필터의 용량 및 크기가 전류형 HVDC에 비해서 매우 작다. 특히, 모듈형 멀티레벨 컨버터(Modular Multilevel Converter, MMC)는 기존의 전압형 HVDC에 비해 훨씬 정현파에 가까운 출력 전압을 갖기 때문에 더 적은 용량의 필터가 필요하게 된다.

본 과제에서는 DFIG 타입의 풍력발전단지를 계통과 연계하는 MMC HVDC를 개발한다. 그렇기 때문에 고조파 필터 설계시 HVDC 자체에서 발생하는 고조파 이외에 풍력단지에서 발생하는 고조파도 고려하여야 한다. 본 논문에서는 실제 HVDC를 연계할 제주도 한경풍력단지에서 운전조건에 따라 고조파를 측정할 뒤에 이를 PSCAD/EMTDC 기반의 HVDC모델에 반영하였다. 풍력과 연계되는 변압기 2차측을 기준으로 고조파 스펙트럼 분석을 통하여 cut-off frequency를 선정하였다. 선정된 cut-off frequency를 바탕으로 설치할 고조파 필터의 용량 및 파라미터를 결정하였다. 설치할 고조파 필터와 계통이 공진을 일으키지 않는지 임피던스 분석 후에 시뮬레이션 모델에 고조파 필터를 반영하여 고조파 저감 효과를 분석하였다.

## 2. 본 론

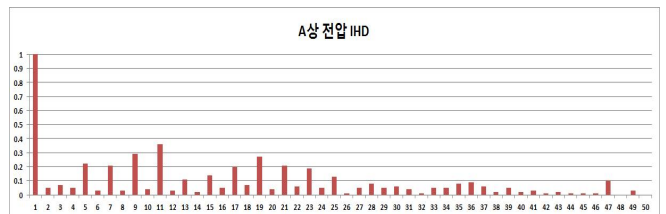
### 2.1 한경 풍력단지 고조파 측정

한경풍력단지는 DFIG 1.5MW급 4대와 3MW급 5대로 구성되어 있다. 본 과제에서는 3MW 발전기 5대(3MW\*5=15MW)와 전압형 MMC HVDC를 통하여 제주계통과 연계를 하게 된다. 풍속 변화에 따라 한경 풍력발전단지의 유효전력량의 변화(100%, 80%, 40%, 20%)를 고려하여, 일주일 동안 풍력단지에 발생하는 전압, 전류의 고조파를 측정하였다. 고조파 측정 결과, 유효전력량이 40%이상 구간에서는 전압, 전류 THD가 1%이내에서 측정되었다. 주로 3,5,11,19차의 저차 고조파가 다른 차수에 비해서 상대적으로 크게 발생하고 있다.

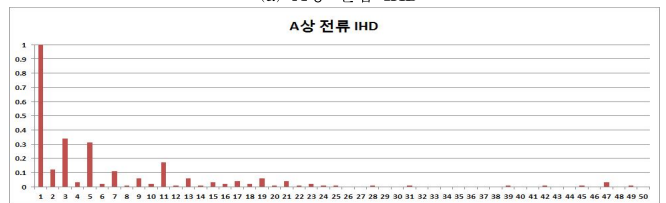
〈표 2〉 출력량에 따른 한경풍력단지 THD

구분	V_THD	I_THD
유효전력 정격운전(15MW)	0.8	0.53
유효전력 80%운전	0.69	0.55
유효전력 60%운전	0.78	0.71
유효전력 40%운전	0.79	0.95
유효전력 20%운전	0.91	3.71

본 논문에서는 15MW 정격 출력을 기준으로 하여 측정된 고조파를 등가화하여 HVDC 시뮬레이션 모델에 반영하였다.



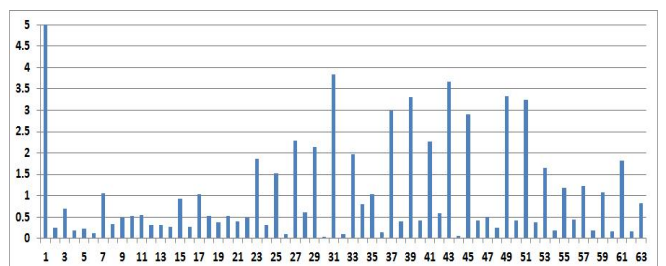
(a) A상 전압 IHD



(b) A상 전류 IHD

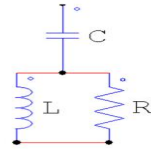
〈그림 2〉 정격출력 시, 한경풍력단지 IHD

### 2.2 고조파 필터 파라미터 설계



〈그림 3〉 풍력단지 변압기 2차측 고조파 결과

그림 3은 환경풍력단지의 고조파 특성을 HVDC 모델에 반영하여 풍력단 변압기 2차측에서 측정된 고조파 결과이다. THD는 7이상으로 IEEE 519-2014기준을 벗어나기 때문에 고조파 필터를 사용하여 고조파를 제거하여야 한다. 고조파 결과 주로 15차 이상의 고차 고조파 성분이 크기 때문에 High-Pass Filter(HPF)를 통하여 고조파를 제거한다. 구조를 단순화하기 위하여 Passive Filter를 고려하였다.



〈그림 4〉 수동 High-Pass Filter

[2]에서는 수동 HPF를 설계하는 절차를 정리하였다. HPF를 설계하기 위하여 전체 임피던스를 결정하는 식은 다음과 같다.

$$C_{filter} = \frac{(h^2 - 1)Q_{filter}}{h^2 \omega_c^2 v_{LL}^2} \quad (1)$$

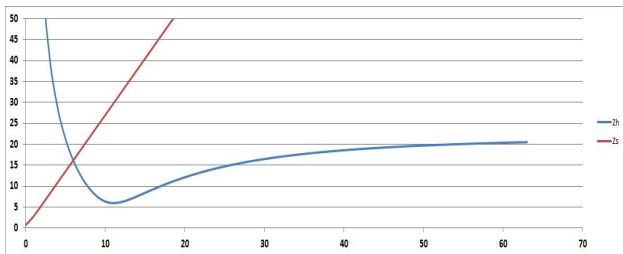
$$L_{filter} = \frac{1}{C_{filter} h^2 \omega_c^2} \quad (2)$$

$$R = Q_{filter} h L \quad (3)$$

위의 식에서  $Q_{filter}$ 는 필터가 보상해야 할 무효전력량으로 전압형 HVDC의 경우, 따로 무효전력 보상을 할 필요가 없기 때문에 고조파 감소 효과를 고려하여 전체 용량의 5%로 설정하였다.  $Q_f$ 는 quality factor로 일반적으로 2~10으로 설정한다.

### 2.3 임피던스 분석

고조파 필터와 계통 간의 공진현상을 막기 위하여 위에서 선정된 필터 파라미터와 접속점에서의 계통 임피던스를 가지고 임피던스를 분석하였다. 이때 사용된 계통 임피던스를 실제 환경 풍력단지의 변압기, 케이블 종류, 케이블 거리를 고려하여 산정하였다.

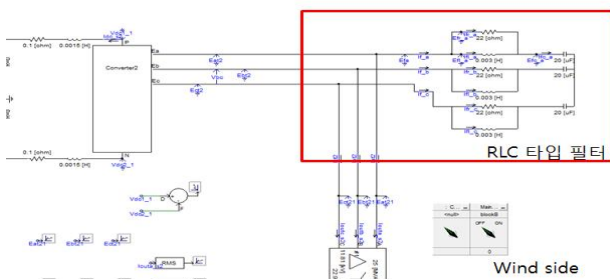


〈그림 4〉 고조파 필터와 계통간의 임피던스도

이때  $Z_h$ 는 주파수에 따른 고조파 필터의 임피던스이고,  $Z_s$ 는 계통 임피던스이다. 분석된 임피던스도를 보면 필터에 의해 제거하고자 하는 고조파와 계통간에 공진점이 떨어져 있어 공진현상이 발생하지 않을 것이라는 것을 확인할 수 있다.

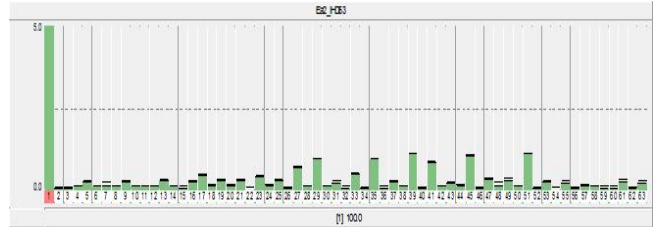
### 2.4 고조파 필터 효과 검토

위에서 선정된 고조파 필터를 PSCAD/EMTDC상의 HVDC 모델에 장착하였다. 필터는 풍력단쪽 변압기 2차측에 Y결선되어 있고, DC 링크 사고시, 고장전류가 유입되는 것을 막기 위하여 비접지 연결되었다.

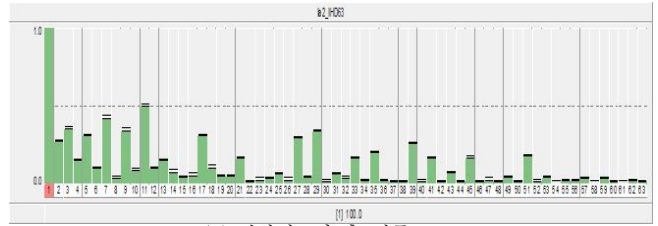


〈그림 5〉 시뮬레이션 회로 구성도

다음 결과는 정격 출력시 변압기 1차측에서 전압, 전류에 대해서 고조파 분석을 한 결과이다. 필터를 설치하기 전, 전압 THD가 7이상이었어서 IEEE 512-1992 기준을 만족하지 못하였다. 고조파 필터 설치 후에는 전압 THD가 3정도여서 고조파 필터의 설계 및 설치가 적정하다는 것을 확인할 수 있었다.

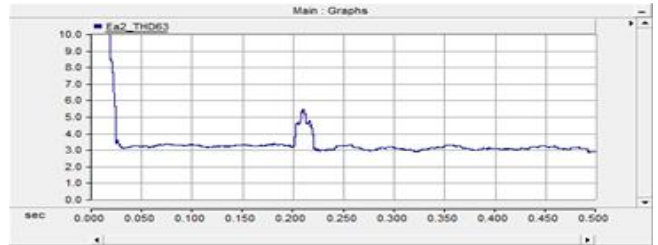


(a) 변압기 1차측 전압 THD



(b) 변압기 1차측 전류 THD

〈그림 6〉 정격출력 시, 변압기 1차측 전압, 전류 THD



〈그림 7〉 정격출력 시, 변압기 1차측 전압 THD

## 3. 결 론

본 논문에서는 풍력발전 연계형 전압형 MMC HVDC시스템에서 발생하는 고조파를 제거하기 위하여, 고조파 필터를 설계하여 그 효과를 검토하였다. 실제 연계할 환경풍력단지에서 발생하는 고조파를 시뮬레이션 모델에 반영하여, 실제 현상에 준하여 설계하였다. 검토 결과, 설계된 고조파 필터의 고조파 제거 효과가 고조파 기준인 IEEE 512-1992를 만족한다는 것을 확인할 수 있었다. 추후에는, 다양한 풍력 운전 조건에서 발생된 고조파에 대해서 설계된 고조파 필터의 고조파 저감 효과를 분석하는 연구가 수행되어야 할 것이다.

### [감사의 글]

본 논문은 2013년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다.

### [참고 문헌]

- [1] IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems, IEEE Power and Energy Society, 2014
- [2] Dipti Khare, Rective Power Compensation and Harmonic Filters for HVDC Classic, ABB