

## 해양풍력발전단지의 계통연계를 위한 전압형과 전류형 HVDC 비교 연구

윤동희\*, 오세승\*, 장길수\*  
고려대학교\*

### Study on the grid interconnection of offshore wind farm with VSC HVDC and CSC HVDC

Dong-Hee Yoon\*, Sea-Seung Oh\*, Gilsoo Jang\*  
Korea University\*

**Abstract** - 오늘날 고유가 시대를 맞아 신재생에너지에 대한 관심이 점점 더 증가하는 추세에 있다. 전세계적으로 풍력발전은 신재생에너지를 이용한 여러 발전방식 가운데 가장 각광을 받고 있으며 실용화된 발전방식이다. 풍력발전의 경우 다른 신재생에너지를 이용한 발전원보다 경제성이 있고 용량이 크기 때문에 이미 상당한 용량의 풍력발전단지가 설치되어 운영중에 있으며 향후 더 많은 풍력발전단지가 건설될 예정이다. 특히 제주도 지역의 경우 풍력발전단지의 입지조건에 부합되어 많은 풍력발전단지가 건설될 예정이다, 세계적인 추세인 해양풍력발전단지가 건설될 예정이다. 해양풍력발전의 경우 육지에서 약간 떨어진 바다에 풍력발전기를 건설한 후, 육지로 전력을 수송하게 된다. 육지와 해양풍력발전단지의 연계는 여러 방식이 있는데 본 논문에서는 HVDC를 이용한 해양풍력발전단지의 연계에 관한 연구를 진행하였다. HVDC의 경우 전압형과 전류형 HVDC가 있는데 두 가지 방식을 비교분석하여 해양풍력발전단지의 계통 연계에 알맞은 최적의 방식을 도출해본다.

#### 1. 서 론

최근에 와서 유가상승, 화석에너지의 고갈문제에 의해 신재생 에너지에 대한 관심이 점점 더 높아지는 추세에 있다. 비단 외국뿐만 아니라 우리나라의 경우도 세계적인 추세에 발맞추어 신재생에너지에 많은 관심을 보이고 있으며 다양한 신재생에너지가 개발되고 있다. 물론 아직까지 경제성의 측면에서 비교해보면 신재생에너지는 기존의 발전원과 비교했을 때 경제성이 부족한 상태이다. 현재 신재생에너지를 이용한 발전 방식중에서 가장 경제성을 갖추고 있는 발전원은 풍력이다. 태양광을 이용한 태양광이나 연료전지 등은 실용화 및 상업화 측면에서 풍력에 많이 뒤떨어져 있다. 외국의 경우 대단위 풍력발전단지가 상업운전을 하는 나라도 많으며 계속된 기술개발을 하고 있다. 유럽지역의 덴마크, 독일, 스페인 등의 나라에서는 이미 많은 풍력발전단지가 건설되어 있어 상업운전을 하고 있으며 그 기술수준도 높다. 풍력발전의 건설 추세는 점차적으로 대단위 풍력발전단지를 건설하려고 하며, 발전기 하나의 용량도 증가추세에 있다.

용량이 작은 풍력발전단지의 경우 배전단에 연결하여 사용하면 계통에 큰 영향을 주지 않는다. 그러나 상대적으로 작은 계통에 대규모 풍력발전단지를 건설하면, 그 영향은 무시할 수 없다. 풍력발전의 기술이 아무리 발달하여도, 바람의 간헐성에 의해 출력이 일정하지 않으며 인위적인 제어가 힘들기 때문이다. 풍력발전단지의 위치를 결정하려면 무엇보다 일정한 바람이 부는 장소가 필요하다. 특히 평균 풍속 뿐 아니라 전체적으로 고른 풍속을 보이는 지역에 건설되어야 한다. 따라서 외국의 경우 고른 바람을 얻을 수 있고, 부지의 제약이 상대적으로 적은 해양풍력발전단지가 많이 건설되었고, 향후 더욱 많은 해양풍력발전단지가 건설될 예정이다. 해양풍력발전단지의 경우 초기 설치비용은 육지보다 많이 들지만, 상대적으로 육지에 건설한 풍력발전단지에 비하여 고른 풍속으로 발전하기 때문에 양질의 전력을 얻을 수 있다.

제주도의 경우 관광특구로 지정된 섬이기 때문에 화력, 원자력 발전이 건설되기 어려운 실정이다. 또한 양질의 풍자원으로 인하여 행원, 환경 등에 풍력발전단지가 건설되어 있으며 향후 대규모 풍력발전단지의 건설 또한 예상된다. 제주도의 계통 규모가 내륙에 비해 작기 때문에 대규모의 풍력발전단지가 건설되면 계통 전체에 영향을 주게 되며, 이는 풍력발전단지 건설전에 반드시 검토할 사항이다. 또한 풍력발전의 입지에 풍향, 풍질등의 환경적인 조건과 더불어 전기적인 측면도 고려할 수 있다. 본 논문은 제주도 계통을 기반으로 하는 테스트 계통을 이용하여 2가지 타입의 HVDC를 이용한 해양풍력발전단지의 연계를 모의하고 최적의 연계방식에 대하여 고찰해본다.

#### 2. 본 론

##### 2.1 해양풍력발전단지의 연계 분석

##### 2.1.1 AC 연계

해양풍력발전단지의 AC연계에서 가장 중요한 부분은 무효전력의 제어를 어떻게 하는가에 있다. 해양풍력발전단지의 특성상 해상 풍력발전단지로부터 육지의 계통까지 장거리를 케이블로 연계를 해야 하기 때문에 전력전송을 위해 필요한 무효전력이 중요한 요소가 된다. 연계의 안정함을 위하여 가장 중요한 요소는 무효전력의 제어방법에 있는데, 부하의 종류에 따라서 케이블에 무효전력을 보상해 주는 것이 필요하다. 부하가 적을수록 무효전력의 보상이 많이 필요한데, 무부하시에는 최대의 보상이 필요하다. 정격으로 운전 중에는 무부하시의 무효전력 보상치의 50%~60%정도만 보상을 하면 된다. 보상을 위한 장비로는 2가지를 고려해 볼 수 있는데, 하나는 고정 보상장치이며 하나는 제어 가능한 보상장치이다. 고정 보상장치는 상대적으로 제어가 가능한 보상장치에 비하여 작은 공간을 차지한다. 그렇기 때문에 특히 장소의 제약을 많이 받는 해양풍력발전단지의 연계에 매우 적합하다. 또한 해안가에 있는 케이블 끝단의 전압 또한 유지를 해야 한다. 대개 풍력발전기의 경우 약간의 부가적인 무효전력 공급과 전압 조절을 할 수 있으며, 점점 사용이 많아지는 DFIG(Doubly Fed Induction Generator)의 경우에는 상당한 무효전력 제어를 할 수 있다. AC송전을 이용하여 해양풍력발전단지를 사용하는 경우에 있어서는 FACTS설비인 Static VAr Compensator(SVC)의 사용을 고려해 보는 것도 나쁘지 않다. 고정적인 무효전력의 공급이 가능하며 계통과의 연계점에서 무효전력 공급 및 전압 유지를 원하는 대로 할 수 있기 때문이다.

##### 2.1.2 DC 연계

풍력발전의 경우 유동적인 출력이 계통운영에 있어서 어려움을 겪는 요인이 된다. 이러한 출력변동으로 인하여 풍력발전의 연계에 있어서 DC연계는 큰 장점을 가진다. AC로 생산되는 전력을 DC로 전환 후에 다시 정주파수의 AC전력으로 바꾸기 때문에 전력의 절대적인 양에는 변동이 있지만 전력의 질은 높아진다. 또한 발전되는 전력의 변동은 DC로 한번 걸러줄 수 있으며, HVDC특성상 장거리 송전에 적합하기 때문에 해양풍력발전단지와 육지의 계통연계에 필요한 거리가 길수록 연계에 적합하다.

전류형 HVDC는 이미 우리나라에서도 제주-해남간에 건설되어 150MW가량의 전력을 육지에서 제주도에 공급하고 있으며 2차 HVDC가 건설예정이다. 전압형 HVDC의 경우 HVDC light등이 Voltage Source Converter를 기반으로 하는 전압형 HVDC의 대표적인 상품명이다. 이미 전압형 HVDC도 경제성을 가지고 상용화되어 널리 사용되고 있는데 고틀랜드의 경우처럼 풍력발전의 연계에도 사용되고 있다. 전압형 HVDC가 풍력 연계에 강점을 보이는 것은 비단 풍력발전의 변동에 적합하기 때문만이 아니다. SVC등의 FACTS 설비처럼 전압형 HVDC의 경우 무효전력의 제어가 가능하기 때문에 안정적인 풍력발전의 연계가 가능하다. 전력전자 설비를 이용한 무효전력의 빠른 공급은 모선의 전압 유지에 있어 매우 강력한 방법이 된다. 또한 풍력발전기 쪽의 컨버터 단에서 전압과 주파수의 유지를 HVDC가 해주기 때문에 발전량의 변동에도 큰 문제가 없다.

##### 2.2 HVDC 비교분석

풍력발전 시스템에 적합한 HVDC사양을 선정하기 위하여 전압형 HVDC와 전류형 HVDC를 비교분석해 본다. 2가지 방식의 HVDC는 기본적으로 어떤 전력전자 소자를 사용하여 구현하느냐에 따라 그 분류가 다르다. 전류형 HVDC는 turn-on을 조절할 수 있는 사이리스터를 사용하여 밸브를 여닫고, 전압형 HVDC의 경우 turn-on, off가 가능한 소자를 사용하여 구현된다.

전류형 HVDC의 설계는 전류(commutation)시에 AC전압원에 의존하도록 설계되어 있다. 즉 AC전압원에 의한 컨버터의 밸브 전류가 0이 될 때 전류가 일어나게 되어 있다. 만약 AC계통에 발전기가 없다면, SVC나 STATCOM이 필요한 전압원으로 사용될 수 있다. 이에 비하여 자체

turn-on이 가능한 VSC(voltage source converter)는 교류전압원이 필요하지 않다. 왜냐하면 컨버터 밸브를 turn-off 할 수 있기 때문에 AC전압원이나 전류의 상태에 의존적이지 않다. 이것이 바로 전압형 HVDC와 전류형 HVDC의 결정적인 차이가 된다.

전류형 HVDC 컨버터는 무효전력을 흡수한다. 왜냐하면 전류회로가 컨버터 변압기의 누설 리액턴스의 영향을 받기 때문이다. 그러므로 전류의 위상각은 전압의 위상각에 뒤처지게 되며, 심지어 조절되는 지연각이 0°(싸이리스터에서의 이론적인 최소값)라 하더라도 위상각의 뒤처짐은 일어난다. 실제로 전류형 HVDC에 사용되는 싸이리스터는 안정성을 위하여 조금 더 높은 최소의 각도(0°보다 큰)에서 운전되며, 오직 게이트의 점호를 늦추어 컨버터의 전류를 제어한다. 그러므로 전류형 HVDC에 컨버터 전류는 항상 전압에 비교해 보면 지연된 위상각을 가지며, 이는 무효전력을 흡수하는 것을 의미하게 된다. 전류형 HVDC의 인버터 부분은 싸이리스터의 turn-off 시간으로 인하여 약 15°만큼의 최소 소호각이 전류실패를 방지하기 위하여 필요하다. 이러한 최소 소호각의 필요성은 전류형 HVDC에서 무효전력의 소모를 가중시키는 역할을 한다. 전류형 HVDC의 정상상태 동작에서, 무효전력의 소모량은 유효전력의 50%에서 60%에 달한다. 실제로 현재 제주-해남간에 운전되는 HVDC의 경우도 전송하는 유효전력량의 약 2/3에 해당하는 무효전력을 흡수하고 있다.

전압형 컨버터는 요구사항에 따라 무효전력을 흡수, 생산이 모두 가능하다. 게다가, 정해진 제한치 안에서 무효전력의 제어가 유효전력과 별개로 이루어진다. 매우 빠르고 여러 가지 용도로 무효전력의 제어가 전압형 컨버터를 통하여 이루어진다. 이는 AC 계통에 매우 유용한 결과를 가져온다. AC계통과 HVDC가 접하는 지점에서의 SCR(short-circuit ratio)값은 매우 중요한 파라미터이다. 특히 전류형 HVDC의 설치에 있어서 반드시 검토를 해야 할 사항이다. SCR은 Psc를 Pdc로 나눈 값이며, Psc는 접촉점에서 단락 파워 값이고 Pdc값은 송전선의 정격 DC 값이다. 전류형 HVDC의 안정적인 운전을 위한 최소의 SCR값이 존재한다. 유효전력의 변화가 상응하는 무효전력의 변화를 일으켜 AC계통에 전압 변동을 가져오기 때문에 SCR값이 필요하다. AC계통의 전압 강하는 부가적인 무효전력의 소모를 발생시키며 더 큰 전압 강하로 이어질 수도 있다. 이러한 현상은 전압 불안정으로 알려져 있다. 이러한 전압 불안정 현상을 피하기 위하여, 대개 2 이상의 SCR값을 필요로 한다. 전압형 컨버터는 안정적인 운전을 위한 SCR값의 제한을 받지 않는다. 왜냐하면 전압형 컨버터는 무효전력과 유효전력의 크기를 정해진 범위 안에서 각각 독립적으로 제어할 수 있기 때문이다. 전압형 컨버터의 설계에서 유효전력의 전송량은 AC계통의 일반적인 이론과 일치하게 된다.

전류형 컨버터의 기본적인 구조는 3상 브리지 컨버터이다. 왜냐하면 전류형 컨버터는 전류를 위하여 교류전압을 사용하며, 다수의 turn-on, off의 동작을 각 상당 전력 주파수 사이를 1회당 1번하게 된다. 각각의 차수(6n±1)를 가지는 고조파 전류는 3상 브리지 컨버터에서 발생된다. 6 펄스 컨버터 2개를 조합한 12펄스 컨버터가 널리 사용된다. 6펄스 컨버터 하나는 변압기와 y-y결합을 하며 다른 하나는 y-delta 결합을 한다. 이론적으로 이러한 결합은 몇몇 고조파를 제거할 수 있으며 (12n±1)차수의 고조파만 남게 된다. 그럼에도 불구하고 고조파 필터는 전압 왜곡이나 계통으로 고조파 전류의 주입되는 것을 방지하기 위하여 필요하다. 필터의 크기는 시스템 임피던스에 영향을 받는 고조파를 제어하기 위한 정도로 설계된다. 전형적인 필터 बैं크의 크기는 컨버터 정격의 20%에서 30%정도이다. 이러한 필터는 보통 커패시터 बैं크의 무효전력 보상의 일 부분에 포함된다.

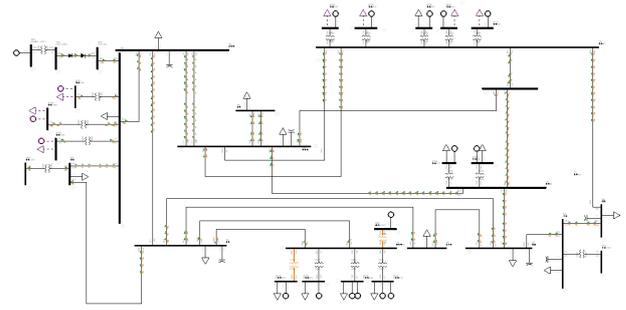
이와는 반대로, 전압형 컨버터는 스위치의 turn-off기능을 사용하기 때문에 1사이클 당 1회의 스위치 turn on-off만 가능한 것이 아니다. 고속의 스위칭 동작이 가능하며, 이러한 높은 횟수의 스위칭 동작은 낮은 차수의 고조파 문제를 해결할 수 있다. 시스템의 임피던스와 컨버터의 1상당 스위칭의 횟수에 의하여, 필터가 필요하지 않을 수도 있으며 혹은 작은 크기의 필터를 설치하여 고차수의 고조파를 제거할 수도 있다. 그러나 스위칭 주파수가 증가하면 그에 비례하여 전력의 손실이 증가되기 때문에 고조파를 제거하기 위하여 무작정 스위칭 주파수를 증가시킬 수는 없다. 적절한 선에서 스위칭 주파수를 결정해야 한다.

전압형 HVDC가 위에서 열거한 장점을 가지고 있지만, 아직까지 전류형 HVDC에 비해서 고가이고 전력손실도 전류형보다 약간 더 크다. 또한 대용량 전력수송에 있어 고전압을 감당할 수 있는 싸이리스터를 사용하는 전류형 HVDC는 대용량의 전력수송을 감당하기 어려운 전압형 HVDC에 대하여 장점을 가지고 있다.

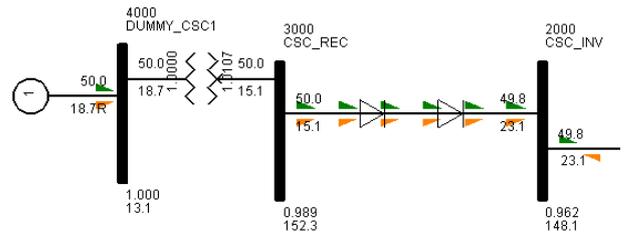
## 2.3 Case Study

### 2.3.1 test system

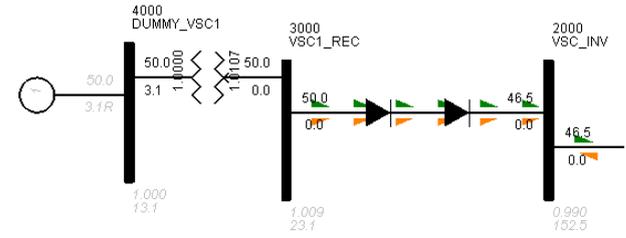
Case study에 사용된 계통은 2009년 제주도 하계 피크계통을 기반으로 하는 시험계통이다.(부하량은 624.49MW) HVDC의 상호간섭을 고려하여, 기존의 제주-해남 HVDC는 같은 용량의 등가발전기로 대체하여 모의에 사용하였다. 모의는 PSS/E를 사용하여 진행하였다. 해양풍력발전단지 위치는 향후 환경에 건설될 가능성이 있기 때문에 한림모선에 연계하는 상황을 가정하여 모의를 진행하였다.



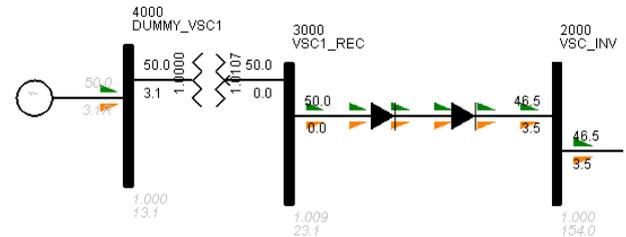
<그림 1> 모의에 사용된 시험계통



<그림 2> 전류형 HVDC를 이용한 연계



<그림 3> 전압형 HVDC를 이용한 연계 - pf제어모드



<그림 4> 전압형 HVDC를 이용한 연계 - 전압제어모드

<그림 2>에서는 전류형 HVDC를 이용한 연계를 나타내고 있다. 전류형 HVDC의 동작 특성상 인버터에서 무효전력을 흡수하는 것을 확인할 수 있다. <그림 3>과 <그림 4>에서는 전압형 HVDC를 이용한 연계를 나타내었다. 전압형 HVDC를 어떤 제어모드로 운전하느냐에 따라 인버터에 입출력되는 무효전력의 양이 달라짐을 확인할 수 있다.

## 3. 결 론

HVDC를 이용한 해양풍력발전단지의 연계에 관하여 두가지 타입의 HVDC를 분석하고 PSS/E를 이용하여 모의를 수행하였다. 경제적인 측면을 고려하지 않고 전기적인 관점에서 보면 무효전력의 제어를 통하여 계통의 안정도에 공헌할 수 있는 측면을 고려했을 때 전압형 HVDC가 전류형 HVDC보다 우월함을 확인하였다. 향후 이에 관한 경제성 분석 및 동특성 모의가 좀더 연구되어야 할 것이다.

## [참 고 문 헌]

- [1] SIEMENS, "PSS/E 31 On-line Documentation" December 2007
- [2] CIGRE, "VSC Transmission", April 2005
- [3] CIGRE, "Electric power system planning with the uncertainty of wind generation", April 2006,