

고려사이버대학교 졸업 논문

# 해상풍력단지 최적의 전력계통연계방식

2021년 6월

고려사이버대학교

전기전자공학과

202031346 류 광 현

## 논 문 목 차

1. 서론	
1.1 연구배경 및 목적 .....	3
2. 국내 신재생에너지 현황	
2.1 국내 신재생에너지 현황과 목표 .....	3
3. 풍력발전	
3.1 풍력발전의 개요 .....	6
3.2 육상풍력발전 .....	8
3.2 해상풍력발전 .....	9
4. 해상풍력발전의 전력계통연계	
4.1 HVAC와 HVDC .....	13
4.2 전류형 HVDC(LCC-HVDC) .....	19
4.3 전압형 HVDC(VSC-HVDC) .....	21
4.4 HVAC, LCC-HVDC, VSC-HVDC 비교 .....	22
4.5 송전시스템의 신뢰성 평가 및 경제성 평가 .....	24
5. 결론 .....	26
참고자료(논문 등) .....	27

# 1. 서 론

## 1.1 연구배경 및 목적

급격한 산업발달로 인한 기후변화는 여러 환경문제를 야기시키며 인간의 생존을 위협하고 있다. 교토의정서 채택, 파리기후협약 등 세계는 온실가스를 줄이기 위해 노력하고 있으며, 과도한 화석연료 의존도를 줄이기 위한 대체에너지 개발 또한 진행중이다. 특히 신재생에너지에 대한 관심은 계속해서 증가하고 있으며, 최근 정부의 그린뉴딜 정책에 따라 관련 사업체들이 주목을 받고 있다.

이 중 풍력은 현재 가장 각광받는 자원으로 무공해, 무한정의 바람을 이용하므로 환경에 미치는 영향이 거의 없는 청정에너지로서 각광을 받고 있다.

기존의 육상풍력발전이 많은 분포를 차지하고 있었으나, 토지문제, 환경문제 등으로 인하여 최근에는 해상풍력발전에 대한 관심이 증가하고 있다. 이에 본 논문을 통하여 해상풍력발전으로 발생한 전력을 어떻게 육상까지 송전할 수 있는지, 그리고 손실을 줄이고 효율적으로 전달할 수 있는 방법을 알아본다.

## 2. 국내 신재생에너지 현황

### 2.1 국내 신재생에너지 목표와 현황

2019년 기준 신재생에너지 발전량은 57,457GWh로 전년대비 8.99% 증가한 수치이다. 이는 총발전량 대비 9.77%에 해당되는 비중이며, 이중 재생에너지 54,138GWh(9.21%), 신에너지 3,318GWh(0.56%)로 이루어져 있다. 에너지원별 발전량 비중·증감률 및 기여도는 아래 <표1>과 같다.

□ 원별 비중 · 증감률 및 기여도

(단위 : MWh)

구분	2018		2019p		전년대비 증감		
	발전량	비중%	발전량	비중%	발전량	증감률%	기여도%
총 발전량	593,638,916	100.00	588,095,999	100.00	△5,542,917	△0.93	-
신재생에너지	52,718,258	8.88	57,456,635	9.77	4,738,378	8.99	100.00
재생에너지	49,251,304	8.30	54,138,302	9.21	4,886,998	9.92	103.14
신에너지	3,466,954	0.58	3,318,333	0.56	△148,620	△4.29	△3.14
태양광	9,208,099	1.55	13,108,645	2.23	3,900,546	42.4	82.3
풍력	2,464,879	0.41	2,679,177	0.45	214,298	8.7	4.5
수력	3,374,375	0.57	2,791,076	0.47	△583,299	△17.3	△12.3
해양	485,353	0.08	474,321	0.08	△11,032	△2.3	△0.2
바이오	9,363,229	1.58	10,415,632	1.78	1,052,404	11.2	22.2
폐기물	24,355,370	4.10	24,669,451	4.19	314,081	1.3	6.6
연료전지	1,764,948	0.29	2,287,061	0.39	522,113	29.6	11.0
I.G.C.C	1,702,006	0.28	1,031,272	0.17	△670,734	△39.4	△14.2

주) 국내 총발전량은 사업자+상용자가+신·재생자가용 합계임

<표1. 2019년도 에너지원별 발전량 비중 · 증감률 및 기여도>

현재 정부는 산업통상자원부 주도하에 “재생에너지3020”을 진행중에 있다. 2030년까지 재생에너지 발전량의 비중을 20%까지 끌어올리겠다는 목표이다.

기존의 재생에너지는 폐기물과 바이오를 중심으로 이루어져 있으나, 점차 태양광과 풍력 등의 청정에너지 보급을 확대하고, 지역주민과 일반 국민들이 참여하도록 유도하는 것이 가장 큰 추진과제라 할 수 있다.

그리고 이는 주민수용성과 환경성을 고려하여 대규모 프로젝트를 단계적으로 추진하게 되는데, 1단계는 2018년부터 2022년까지 5.0GW를 공급하는 것을 목표로 한다. 2단계는 2023년부터 2030년까지 총 23.8GW를 수상태양광과 육상 및 해상풍력 대규모 계획 단지 조성을 통해 공급하는 것이 목표다.

또한 정부는 재생에너지 보급을 획기적으로 확대하기 위해 청정에너지 산업을

집중적으로 육성하고, 4차산업과 융합한 IoE 기반의 에너지 신사업을 발굴하고 확산하는 것에도 중점을 두고 있다.

특히, 정부는 2030년 완공을 목표로 서남해안에 대규모 해상풍력단지 건설에 대한 로드맵을 수립하였다.(<그림1> 참조) 단계별 계획 중 1단계 124MW규모의 실증단지가 완공되어 운영중에 있으며, 2030년까지 12GW 규모로 확대하여 세계 5대 해상풍력 강국으로 도약하는 것을 목표로 하고 있다. 서해안은 적절한 풍속에 얕은 수심을 가지고 있어 타지역보다 단지 조성이 용이하다.



<그림1> 산업통상자원부

이러한 정부의 뉴딜정책과 전세계적인 추세에 따라 풍력발전에 대한 관심과 투자가 급속도로 늘어나고 있다. 더불어 신안해상풍력단지의 경우 장기간 실행에 이어지지 못하였는데 최근 다시 한번 탄력받아 추진중에 있다. 이가 완성되면 세계 최대 규모의 해상풍력 단지가 완성된다. 신안해상풍력단지는 총 8.2GW 규모, 1000기의 발전기가 설치될 예정이며 2030년 완공을 목표로 하고 있다.

(발전·일자리 ‘일석이조’ ... 세계최대규모 신안 해상풍력단지 ‘가속도’,  
2020.12.01 - <http://www.munhwa.com/news/view.html?no=2020120101032727104001>)

뿐만 아니라 해외기업들도 우리나라에 공격적인 투자를 준비중에 있다. 최근 덴마크의 오스테드社는 인천 연안에 1.6GW 규모의 해상풍력단지를 조성하겠다고 밝혔다. 오스테드社는 한국 기업과의 상생을 강조하며 많은 경험이 우리 정부의 그린뉴딜 정책에 빠른 목표치를 달성하게 할 것을 강조하였다.

(오스테드 “인천 해상풍력에 8兆 투자 1.6GW 단지 조성할것”, 2020.11.24 -  
<https://www.fnnews.com/news/202011241808273040>)

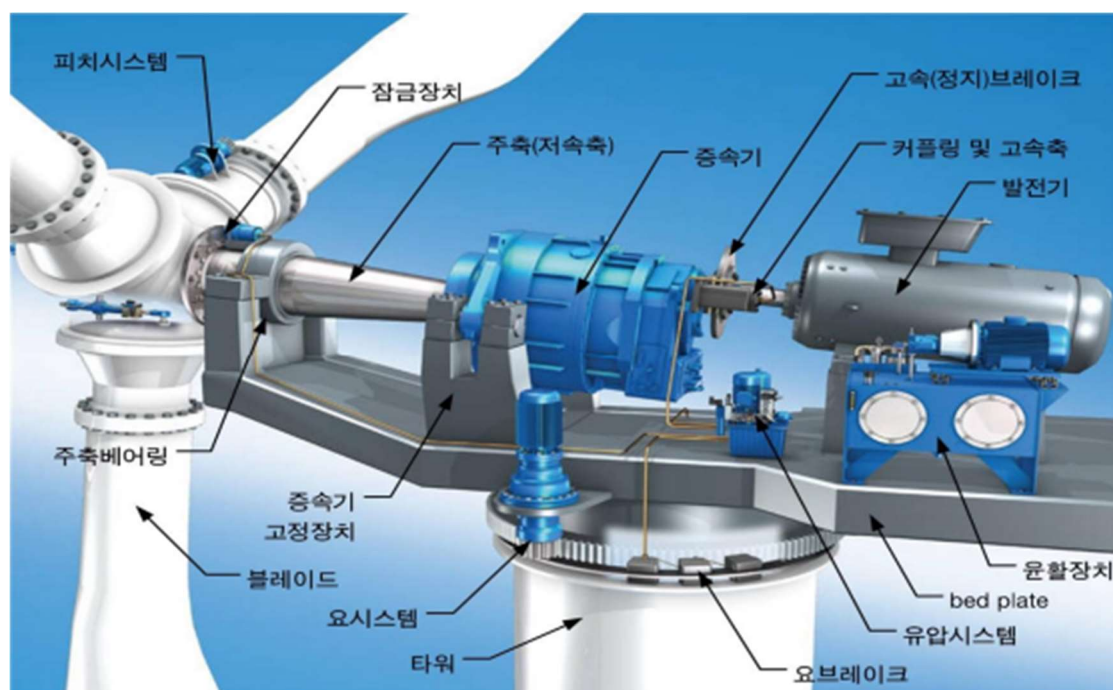
향후 에너지 가격 인상 및 기후변화대응 노력이 강화될수록 재생에너지, 특히 해상풍력에 대한 관심이 증가할 것이다. 2020년 이후에는 해상풍력 설비용량이 더 확대될 가능성이 높다. 중국 정부는 2050년까지 약 1,000GW의 육상 및 해상풍력 설치를 목표로 하는 로드맵을 발표하였다.

### 3. 풍력발전

#### 3.1 풍력발전 개요

풍력발전은 바람에 의하여 발생하는 에너지를 전기에너지로 변환하는 에너지 변환 기술이며, 바람이 가지는 운동에너지에서 로터 블레이드가 기계적 에너지를 추출하고 이 회전력으로 발전기의 로터를 회전시켜 전력을 생산한다. 풍력터빈은

바람의 운동에너지가 기계적 운동을 거쳐서 전기에너지로 변환하는 장치를 의미하며 가장 일반적인 풍력터빈은 3개의 블레이드(날개)와 증속기를 가진 수평축 프로펠러에 의한 유도발전 방식이며, ‘덴마크식 풍력터빈’으로 알려져 있다. 풍력발전 시스템은 <그림>과 같이 블레이드(blade), 허브(hub), 주축(main shaft), 증속기(gear box), 발전기(generator), 전력변환장치(PCS), 나셀(nacelle), 타워(tower) 등의 주요 부품으로 구성된다.



<그림2> 해상풍력터빈의 구조

육상풍력의 경우 발전단가가 이미 화석연료와 유사한 수준이며, 신재생에너지 중 가장 경제성이 있고, 친환경 재생에너지라는 측면에서 기존의 발전방식을 대체할 수 있는 가장 유망한 산업분야이다.

해상풍력발전기술은 해양의 풍부한 풍력 에너지를 경제성과 안전성을 기반으로

개발하고 효율적으로 운영하며 전력계통을 안정적으로 연계하여 운영하는 기술로, 가혹한 해상환경에 적응하기 위한 내부식성에 대한 문제를 해결하기 위한 재료의 선정, 나셀 내부의 안전 환경을 유지하기 위한 설비, 지지구조물 및 기초에 대한 추가의 고려가 요구된다.

## 3.2 육상풍력발전

### 3.2.1 육상풍력의 장단점

큰 규모의 설비이지만 발전단지 면적의 1%정도만 사용되며, 나머지는 목축이나 농업등의 다른 용도로 활용가능하단 점이 매력적이다. 또한 4m/s이상의 바람이 부는 지역에 발전단지 건설이 가능하며, 일정속도 운전을 위해 날개 기울기 제어 또는 타 발전원이 필요하다.

풍력 발전이 앞으로도 주요 재생가능 에너지원이 될 것으로 전망하는 배경에는 풍력이 기술적 잠재성도 높으며, 재생가능 에너지원 중에서 상대적으로 저렴하며, 비재생 에너지의 비용과 비교해서 경쟁력을 확보하기 때문이다. 물론 현재까지는 화석연료 에너지의 발전비용이 비싸지만, 앞으로 계속해서 신재생에너지의 발전 단가가 낮아질 것으로 예상되고 있다.

[참고: “한국재생에너지 발전비용, 내년부터 석탄보다 싸진다.” 한겨레

[http://www.hani.co.kr/arti/science/science\\_general/971987.html](http://www.hani.co.kr/arti/science/science_general/971987.html)]

### 3.2.2 육상풍력발전과 환경



육상에서 풍력발전의 가장 큰 문제점은 소음과 진동, 경관훼손 등으로 볼 수 있다. 풍력발전단지의 입지 특성상 바람의 세기가 중요하기 때문에 높은 지대에 건설되는 경우가 많다. 하지만 이러한 지역은 인간의 간섭이 적은 지역으로 생태계 보존가치가 높은 지역이 많다. 때문에 해당 지역에 풍력발전기나 진입도로가 건설될 경우 생태파괴가 심각하게 훼손된다.

그리고 풍력발전기의 특성상 조류에 미치는 영향이 클 것으로 예상되며, 회전하는 날개와 새가 충돌하는 데에 가장 큰 원인이 된다. 특히 철새의 경우 계절에 따라 이동하는 특성을 가지고 있기 때문에 이 부분을 고려하여 입지를 선정해야 할 것이다.

풍력발전기를 설치하기 위해서는 발전기 부지, 운영 시설, 변전소 건설에 필요한 면적뿐만 아니라 공사 장비 진입을 위한 진입로, 크레인 부지, 안전 및 시야 확보 등을 위한 추가면적이 필요하며, 이러한 면적은 건설부지의 지형에 따라 다르다. 풍력발전단지 부지 이외에 전력계통연계를 위한 송전선로 개설은 추가적인 산림훼손을 야기한다.

### 3.3 해상풍력발전

#### 3.3.1 해상풍력의 장단점

육상 풍력 발전기가 공간 활용의 한계성, 민원 및 소음 문제, 자원 활용의 어려움 등 산업 발전에 한계성을 드러내면서 새로운 공간을 모색하게 되었고, 육지에 비해 강하고 안정된 바람이 발생하는 해상으로 풍력발전단지 건설 계획이 세워지

고 있다.

육상에 비해 해상이 가진 장점으로는 풍부한 해상자원 보유, 대단위 풍력 단지 조성의 용이함, 높은 풍황자원, 낮은 난류 강도, 소음 문제 해결, 대형 풍력 발전 기기의 설치 및 운반 그리고 철거의 용이함, 설치 단지 취득, 그리고 전파 장애 등 환경문제의 미약함 등이 있다. 더불어 타 발전과의 혼합발전이 가능해져 발전 효율도 높아질 수 있어 해상풍력 산업은 더욱 빠른 성장세를 보이고 있다. 그러나 해상에서는 작업 여건이 불리하여 작업일수가 극히 제한될 수 있으므로 과도한 설치비용의 문제점을 가지고 있다. 또한 고가의 높은 유지 보수비용과 육상에 비해 작업 공간의 한계성, 접근의 어려움 등은 극복해야할 문제이다. 해상 풍력발전단지 건설비용은 터빈 설치 외 차지하는 비용이 크며, 고가의 투자비용과 관리 비용은 극복해야할 문제로서 제기되지만 대규모 풍력단지를 조성함으로써 이러한 경제성 문제도 해결할 수 있을 것으로 기대된다.

### 3.3.2 해상풍력발전과 환경

이에 따른 지역주민의 민원 제기가 늘어나자, 최근에는 육상에서 풍력발전을 하던 많은 국가에서 해상풍력에 관심을 갖게 되었다.

해상풍력은 설치 방법에 따라 환경에 미치는 영향이 조금 다른데 부유식의 경우 해저에 고정하지 않지만, 대부분 해저에 시설물을 설치하거나 파일을 받아 시설물을 고정한다. 또는 무거운 추를 바닥에 내려놓는 중력식의 경우 저지대의 가벼운 토양은 제거하고 대신 자갈을 채워 넣게 된다. 중력식의 경우 말뚝식보다

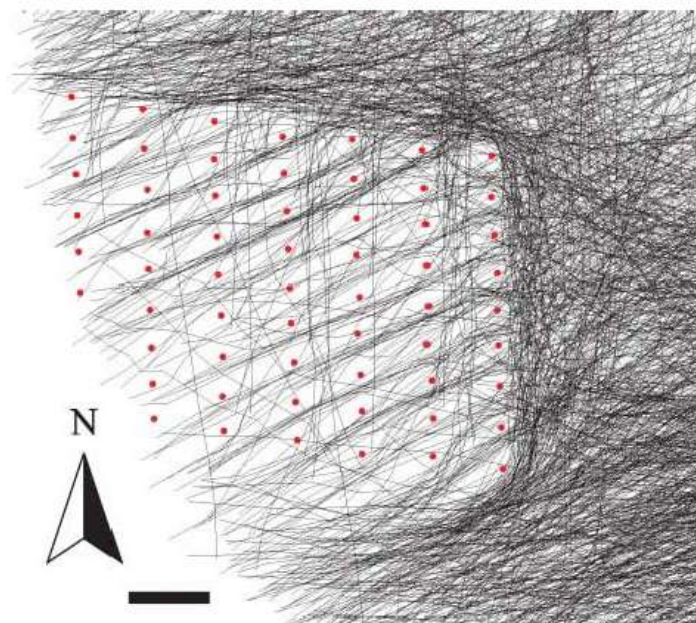
두꺼운 기둥을 필요하기 때문에 더 넓은 면적의 해저면을 교란할 수밖에 없다. 시설물이 들어서면서 말뚝이 설치되는 지점이나 풍력발전에서 나온 전기를 육상으로 인입하는 해저전력선을 놓게 되는 저질에 살고 있던 생물들은 서식처를 잃게 된다. 또한 공사시에 발생하는 부유물질이나 토사는 간접적으로 주변 해역의 생물들에 영향을 미친다.

공사에 투입되는 건설장비나 말뚝 등의 시공과정에서 소음과 진동 문제 역시 고려할 필요가 있다. 유영이 가능한 생물들은 회피하여 영향권에서 사라지지만, 이동능력이 제한되는 생물들의 경우 더 큰 영향을 받을 수 있다.

풍력발전단지의 건설이 완료되고 운영단계에 들어서면 또 다른 문제와 마주하게 된다. 첫번째로 전력계통에 인입하는 전력선에서 발생하는 전자기장과 열에 의한 영향이다. 전자기장의 세기는 전력선의 형태나 용량에 따라 달라질 수는 있지만 전력선 주변에 전자기장이 형성된다. 스웨덴에서 독일을 잇는 발틱 고압전력선의 경우 600MW의 용량에 1,330A가 흐르는데 전력선 주변 6m에 흐르는 자기장은 지구자기장의 크기에 맞먹는 수준이라고 한다. 이 때문에 해저 전력선 바로 상단의 해수면을 지나는 선박의 운항에도 영향을 줄 정도이다.

다음으로는 화학물질에 대한 문제로, 시설물의 부식을 보호하기 위해 표면에 독성 페인트를 사용한다든지, 윤활유, 연료, 냉각제 등이 누출되어 바다로 유입되는 경우 생물학적인 영향을 줄 수 있다. 화학물질의 누출 가능성은 실제 예측하기 어렵고 대응하기도 어렵다. 따라서 독성이 없거나 생물학적으로 분해가 가능한 물질을 활용할 필요가 있다.

육상풍력발전과 마찬가지로 조류와의 충돌 역시 고려해야할 사안이다. 일반적으로 해상풍력 발전기에 들어가는 터빈은 육상풍력보다 더 높게 설치되고 날개도 더 크기 때문에 날개 끝에서의 회전속도도 더 빠르고 이에 따른 와류 현상도 더 강력하다. 물론 많은 수의 새들이 풍력단지 안으로 이동하지는 않지만,(<그림3> 참조) 우리나라의 경우 다양한 철새들의 안식처들이 있기 때문에 이들의 이동경로에 위치하진 않는지 검토해볼 필요가 있다.



자료: Desholm & Kahlert, 2005

<그림3. 네덜란드 니스테드 풍력단지 주변 새떼 이동경로. Desholm & Kahlert, 2005>

소음과 진동문제 역시 육상과 동일하게 발생한다. 비록 주변에 사람이 사는 상황은 아니어서 직접적인 민원의 소지는 크지 않다고 볼 수 있지만 주변에 서식하거나 지나쳐가는 생물에게는 위협요인이 된다. 발전시설에서 발생하는 소음은 대기중에 전달되기도 하고 수직구조물을 따라 바닷속으로 전달되기도 한다. 어류들

의 감각기관은 매우 발달하여 있어 짧게는 400m에서 길게는 25km 밖에서도 이를 감지할 수 있다고 한다.

이외에도 레이도 교란, 경관훼손 등의 문제점이 있다. 하지만 풍력단지 건설로 인하여 해초와 다양한 어종들의 안식처를 제공하고 있다. 물론 풍력단지 내 어업 활동이 금지되면서 개체수가 증가하는 현상이라고도 볼 수도 있다.

## 4. 해상풍력발전의 전력계통연계

### 4.1 HVAC와 HVDC

해상풍력단지에서 육상 쪽으로 송전할 때에는 고압교류(HVAC) 송전 혹은 고압 직류(HVDC) 송전 방법이 있다. HVDC의 경우는 두가지 방법이 있는데, LCC(Line Commutated Converter)를 기초로 하는 HVDC, 그리고 VSC(Voltage Source Converter)를 기초로 한 HVDC 방식이다.

기존에 설치되어 있던 해상풍력발전소는 교류송전을 적용하고 있는데, 풍력발전소가 비교적 소규모이며 연안에서 멀지 않은 곳에 설치되어 있기 때문이다. 현재 설치중이거나 계획되어 있는 해상풍력단지의 경우 연안으로부터 먼 곳에 입지가 선정되고 있기 때문에 HVDC를 사용하는 추세이다.

HVDC의 기존 시장은 주로 장거리 송전을 위한 프로젝트가 대부분이었으나 최근 환경에 대한 관심이 증가하고 신기술이 등장하여 신재생에너지 발전이 가능해

짐에 따라 신재생 에너지와 연계하는 HVDC 시장이 빠르게 성장하고 있다. 또한 해상 풍력의 성장, 계통연계의 필요성, 효율 향상 등의 원인은 세계 HVDC 시장 규모 성장에 순영향을 미치고 있다. 기존에는 HVAC에 비하여 높은 초기 투자비용 때문에 AC망을 보완하는 정도에 지나지 않았으나, 전력전자 기술 발전에 따른 가격 인하 및 성능 향상 등으로 점차 HVAC를 대체하는 수준까지 이르고 있다. 국내 또한 선도 기술이 집약된 HVDC가 도입될 경우 전기 관련 전 분야로 기술이 파급될 수 있으며, 이를 지중화할 시 최근 국내에서 나타나는 한전과 초고압 송전탑 및 선로 설치로 인한 지역 주민들 간의 갈등 해소 및 비용 절감 등의 효과가 나타날 수 있다. 이러한 효과는 전력 공급지와 수요지 간의 분리로 인하여 대규모 전력 전송이 필요한 국내전력 시장의 상황을 해결할 수 있는 좋은 대안으로 이어질 수 있다.

해상풍력은 육상풍력에 비해 계통연계(접속) 기술의 중요성이 상대적으로 부각되며 종합 EPC기술 중에서도 특별히 계통분석과 설계기술이 중요한 사안이다. 해상풍력발전단지는 해상변전소와 해저를 관통하는 케이블 및 이를 접속하는 HVDC 계통 건설이 필수적으로 적용되며, 기존의 육상 전력설비와는 조금 다른 설계와 계통검토가 요구되기 때문이다. 더구나 해상풍력 접속계통은 건설이후에도 O&M(Operation & Maintenance)과 계통운영 측면에서 상대적으로 세심한 운전 전략이 요구되는 특수 전력플랜트이다.

#### 4.1.1 HVAC

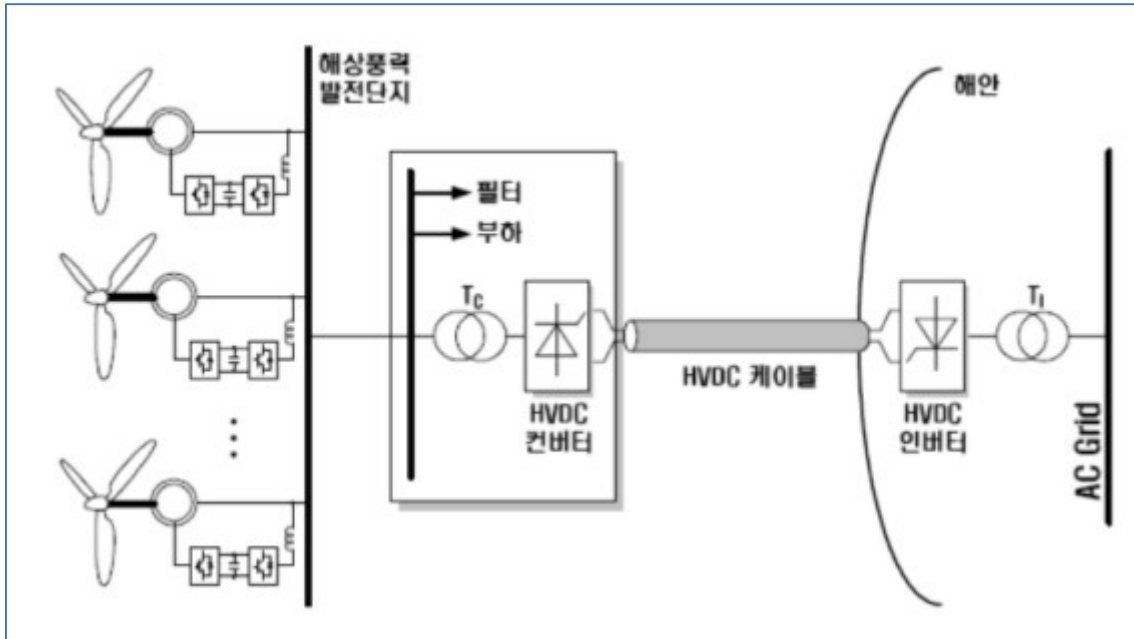
고압교류(HVAC) 송전시스템은 풍력발전단지내의 교류기초 집전시스템, 해상 무효전력보상장치를 포함한 해상 변전소, 육사까지의 3층 HVAC 케이블 및 육상 정지형 무효전력보상장치 등의 주요요소로 구성된다.

HVAC 송전시스템의 가장 큰 단점으로 꼽히는 것 중 하나가 케이블에서 발생하는 무효전력이 있다. 이는 송전거리를 제한하므로 해상풍력발전단지가 멀어질수록 사용하기 어려운 시스템이다.

이론적으로는 케이블 중간에 무효전력보상장치를 설치하여 송전거리를 더욱 길게 할 수 있으나, 해상에 설치된 사례가 없으며 무효전력보상을 위한 플랫폼을 추가로 건설하는 것은 비용측면에서도 현실적이지 못하다.

#### 4.1.2 HVDC(High Voltage Direct Current)

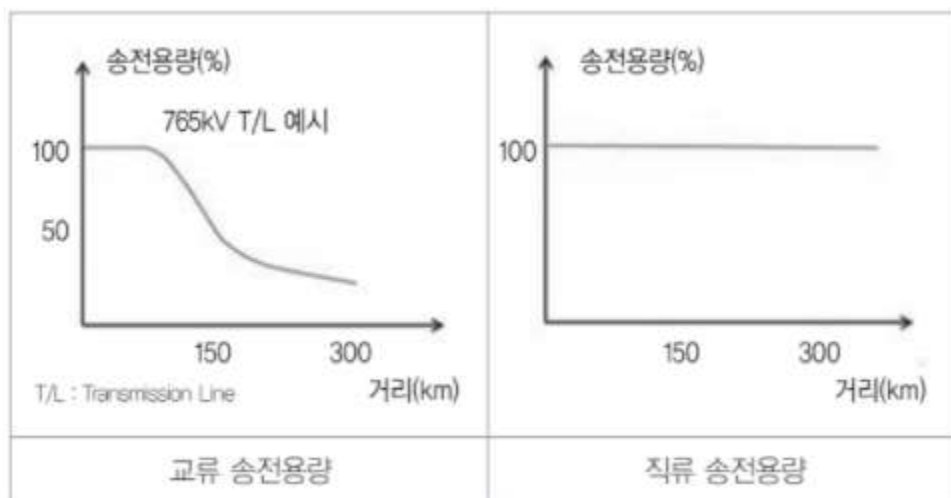
HVDC란 전기송전방식의 하나로써 고전압 직류로 전기를 전송하는 것을 말하는데, 발전소에서 생산된 고압의 교류전력을 변환장치를 통해 직류로 변환하여 송전한 후 다시 교류로 변환하여 공급하는 시스템이다.



<그림4> 해상풍력단지 HVDC 연계계통 개념도

#### 4.1.2.1 송전용량 비교

교류는 송전거리가 길어짐에 따라 전력의 흐름을 방해하는 요소(리액턴스)의 증가로 송전용량이 감소하지만, 직류는 송전거리에 따른 송전용량 감소가 발생하지 않는다.

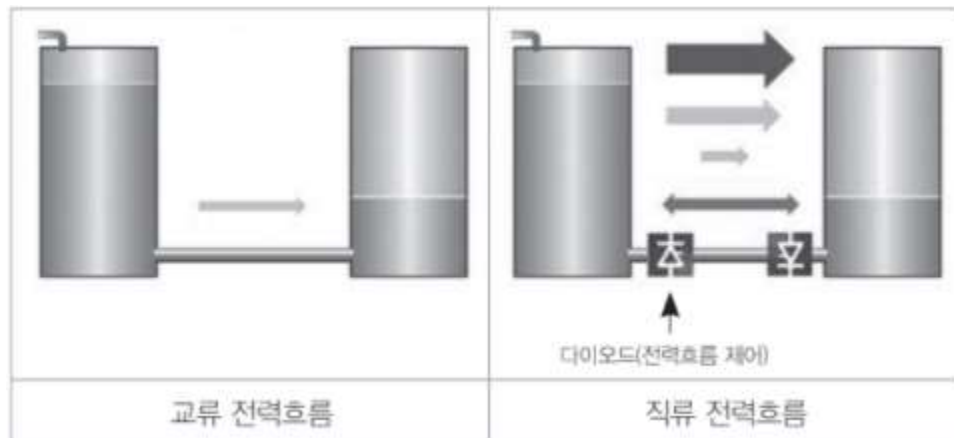




〈그림5〉 교류와 직류의 송전용량 비교

#### 4.1.2.2 전력흐름 비교

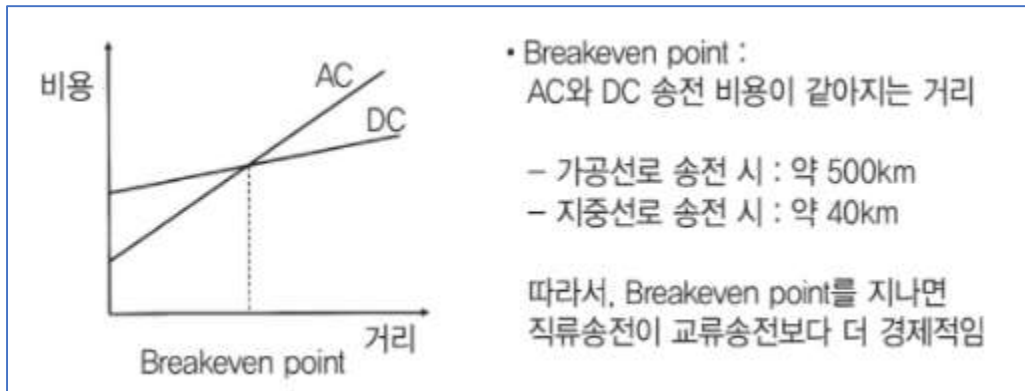
교류는 전력의 고저차에 따라 흘러가지만, 직류는 고저차에 상관없이 전력흐름을 원하는 방향으로 원하는 양을 보낼 수 있다.



〈그림6〉 전력흐름 비교

#### 4.1.2.3 HVDC의 장점

- ① 직류송전의 경우 선로전압이 동일 실효치의 교류전압 최대치의 약 70%에 불과하여 기기의 절연이 용이하고 절연설계의 측면에 있어서 현수애자의 크기, 수량 및 전선의 소요량을 그만큼 줄일 수 있고, 철탑 높이를 낮게 할 수 있어 우수한 경제성을 얻을 수 있다.



〈그림7〉 AC와 DC 송전비용 비교

- ② 교류송전방식에 비하여 코로나 손실이 매우 적고 유효전력만으로 송전되므로 교류계통의 충전전류 및 페란티 같은 현상이 일어나지 않고 무효전류에 의한 손실이 없으므로 송전효율이 매우 높다. 특히 케이블의 정전용량에 의한 송전한계를 극복할 수 있다.
- ③ 교류계통을 직류계통을 통해서 연계하면 무효전력의 전달이 없으므로 교류계통 사고 시 유입전류는 증대하지 않아 단락용량이 경감되어 대용량의 차단기가 불필요하다. 즉 직류변환장치의 고속제어 특성으로 기존계통의 단락용량을 증가시키지 않고 새로운 계통을 연계시킬 수 있다.
- ④ 송전손실은 무효전력에 의한 손실과 유도손실이 없으므로 적다. 코로나손실, 리액턴스 성분에 의한 손실이 없으므로 변환설비에 의한 손실이 전송전력의 약 0.6% 정도로 종합적인 손실은 장거리 송전 시 교류보다 유리하다.

#### 4.1.2.4 HVDC의 단점

- ① 전력의 제어는 변환기의 점호위상을 변환시키므로 전압보다 전류가 늦어

유효전력의 50~60%의 많은 무효전력을 소비하므로 무효전력 보상설비의 설비비가 크며 단락용량이 적은 교류계통에 연계되는 경우는 교류연계점에 전압 불안정현상이 발생한다.

② 현재 직류차단기의 실용화가 용이치 않고, 직류 송전계통이 2단자 계통으로 직류전력 계통구성의 자유도가 적어서 중간에 송전선을 분기하기 어렵다. 따라서 직류 교류단자의 송전제어보호방식 및 직류차단기의 신뢰성이 필요하다.

③ 직류변환장치가 복잡하고 고가이므로 장거리 송전선이 아닌 소용량 단거리 선로에서는 비경제적이며 변환장치에서 발생하는 고조파를 제거하기 위한 필터가 필요하다.

④ 송전전압을 자유롭게 승압, 강압할 수 없으며 고전압 직류계통에서 전류, 전압의 측정이 교류계통의 CT, PT보다 용이하지 않다.

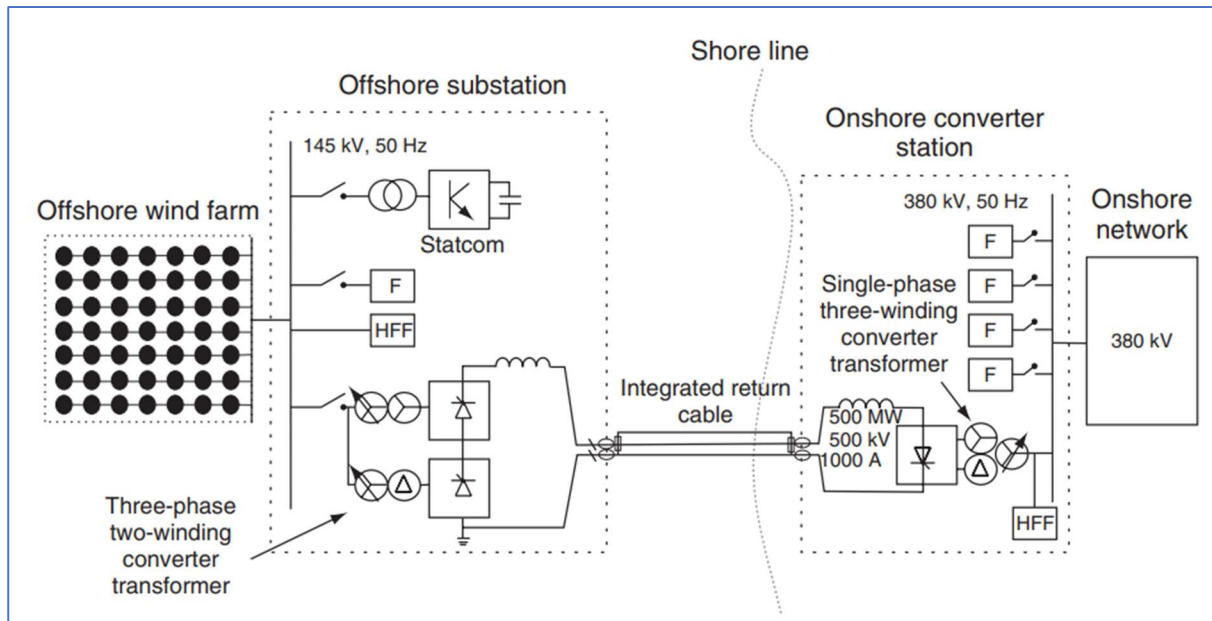
#### 4.2 전류형 HVDC(LCC-HVDC)

세계최초의 LCC-HVDC 송전은 1954년 스웨덴의 본토와 Gotland 섬을 이어주는 연계선을 건설하여 송전한 것이다. 전체길이 96km로 정격 20MW, 100kV 해저케이블을 사용하고 있다.

사이리스터 기술을 기초로 한 LCC HVDC 송전시스템을 해상 풍력발전소용으로 사용하는 경우 아래 그림과 같이 구성되며, 다음과 같은 요소가 필요하다.

- 풍력발전단지내의 교류집전시스템

- 2대의 3상 2권선 변압기와 AC-DC 컨버터 및 필터가 있는 해상 변전소
- 무효전력 보상컨버터 혹은 필요한 단락용량을 공급하는 디젤발전기
- DC케이블
- 단상3권선 변압기와 DC-AC컨버터 및 적절한 필터를 가진 육상전력변환소



〈그림8〉 500MW 해상풍력단지의 Statcom(무효전력보상 컨버터)를 이용한 LCC-HVDC 기본 구성

(F=Filter, HFF=high-frequency filter)

기본적인 LCC-HVDC 송전방식으로는 단극방식 즉, 전류의 귀로에 해수를 사용하는 방법이 있다. 이 방식은 2개의 전력변환소 사이에 필요한 케이블이 1개뿐이기 때문에 연계비용을 저감할 수 있고 해수를 사용함으로써 귀로의 저항을 무시할 수 있기 때문에 손실을 최소한으로 할 수 있다. 그러나 해수를 전류귀로에 이용하는 경우 몇 가지 부정적인 영향도 있을 수 있다.

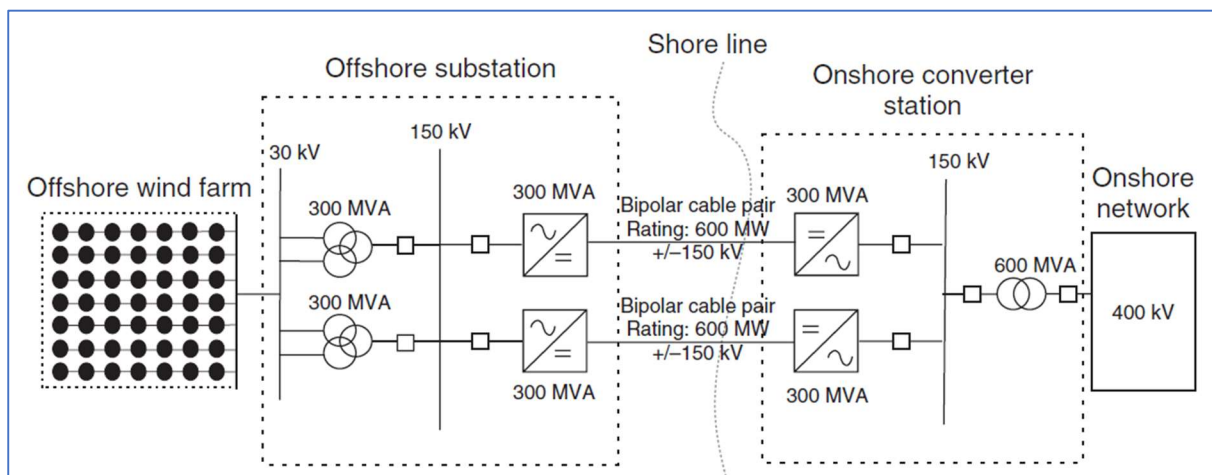
- 근방에 매설된 긴 금속물의 전기적인 부식

- 해수 중 전류귀로용 접지극에 의한 염소 혹은 다른 유해화학물질의 생성 가능성
- 불평행한 전류귀로에 의한 전자계의 발생. 해저케이블 위를 횡단하는 선박 항해용 나침반에 악영향을 줄 수 있다.

LCC-HVDC 방식은 여러 해에 걸쳐 사용되고 있으나 위에 서술한 부정적인 면의 영향을 생각하면 환경문제를 해결하는 것이 어렵다.

#### 4.3 전압형 HVDC(VSC-HVDC)

전압형 HVDC 송전시스템은 아래 그림과 같이 풍력발전소 내의 교류 집전시스템, 해상변전소 및 AC-DC 컨버터, 직류 케이블 및 육상 전력변환소로 구성되어 있다.



<그림9> 2대의 300MW 전력변환소를 사용한 VSC-HVDC 송전시스템에 의한 풍력발전소 구성도

VSC HVDC의 연계선은 육상과 해상의 강한 교류계통이어야 할 필요가 없고 계

통이 무부하인 경우에도 운전할 수 있다. 이것은 VSC HVDC 컨버터가 전류를 자기소호 가능하기 때문이며 전류에 필요한 유효전압을 공급할 필요가 없는 것을 의미한다. 또한 VSC 컨버터에서는 유효전력과 무효전력을 개별적으로 제어하면서 공급하는 것이 가능하다.

VSC HVDC 컨버터에는 약 2kHz의 스위칭 주파수로 동작하는 IGBT 반도체가 사용되고 있다. 이와 같은 설계에서는 변환소마다 1.5~2%의 비교적 큰 컨버터 손실이 발생하게 되지만 계속해서 손실비율이 감소하고 있는 추세이다. 고주파 스위칭을 이용하게 되면 고조파 발생등급이 낮고 필터를 작게 할 수 있는 이점이 있다.

#### 4.4 HVAC, LCC-HVDC, VSC-HVDC 비교

HVDC는 교류 전력을 직류로 변환하여 전력을 효율적이고 안전하게 송전하는 전력 송전시스템이다. 전력변환 구성 방식 및 전력반도체 소자에 따라 크게 사이리스터를 이용한 LCC(Line Commutated Converter, 전류형), IGBT를 이용한 VSC(Voltage Sourced Converter, 전압형) 방식으로 구분되며, VSC-HVDC 기술은 PWM, MMC, HML, CTL 등의 방식으로 분류된다. 아래 표는 HVAC, LCC-HVDC, VSC-HVDC 간의 비교를 통한 각 시스템별 원리, 구성 및 장단점을 나타낸 것으로, 전압형 HVDC가 가지는 각각의 장점으로 인하여 기존 송전시스템에 비해 비용절감 효과가 나타날 수 있으며, 특히 Black start기능 및 지중화가능 등의 장점은 보다 안전하고 신뢰성 있는 전력 시스템을 구성할 수 있다.

	HVAC	LCC HVDC	VSC HVDC
원리	AC 송전방식 (DC 변환 없음)	- 사이리스터 소자 사용 (Turn-on만 가능) - 소자의 Turn-On 시간 조절로 흐르는 전류의 크기를 제어 (1초에 120)	- IGBT 소자 사용 (Turn- On/Off 가능) - 소자의 Turn- On/Off를 통해 AC전압 크기와 위 상 제어 (1초에 수천번)
구성	- 변환소, 송전선로, 송전 탑 - 변압기 가스절연개폐장 치 - 진단제어장치	- 컨버터, 평활 리액터, 고 조파필터, 전극, DC선로, AC회로차단기, 무효전력공 급원 - 컨버터발생 고조파 및 흡 수되는 무효전력 공급위한 고조파필터, 병렬 커패시터 (또는 무효전력보상설비) - 접지 위한 전극, AC측 사 고시 전전구간과 사고구간 구분하는 AC회로차단기	- 컨버터 스테이션, 변압 기, AC필터, 위상리액터, 커패시터, DC차단기, DC 케이블 *MMC방식- 200 레벨 이 상일 경우 일반변압기 사용 가능, AC필터 사이즈 가 대폭 감소 가능 - LCC- HVDC와 달리 무 효전력 공급을 위한 설비 가 필요하지 않아 그 만큼 설치면적 감소
장점	- 운전경험 축적(국내대부 분) - 국내 기술보유 - 변전소 건설비 작음 - 송전선로 건설비 작음 - 손실 감소 - 전력흐름제어 가능 - 고장파급 방지로 계통신 뢰도 향상	- 첩탑규모 작음 - 대용량 설비 가능 (최대 800kV, 8GW급) - 전력변환손실 적음 (0.7%수준) - 컨버터 가격이 저렴함 - 긴 상용운전 통한 기술 검증 - 전압, 전류 변동이 낮아 전자기와 유도 발생 무 - 타계통과 연계가능 주파 수 - 장거리 지중화 가능	- 첩탑규모 작음 - 설치면적이 작음 (전류형의 60%) - Black Start 가능 - 교류대비 손실 작음 (60- 70%) - 무효전력보상설비 불필 요 - AC 전압원 불필요 - 장거리 지중화 가능 - 양방향 송전 자유 - DC Grid 가능 - 전압, 전류 변동이 낮아 전자기와 유도 발생 X - 타계통과 연계가능한 주파수
단점	- 조류제어 불가능 - 고장시 계통영향 큼 - 첩탑 규모 큼 - 765kV 지중화 불가 - 지중송전제약(30km이내) - 장거리 전송시 큰 손실	- 설치면적이 큼 (200x120x22m, 600MW) - 복잡한 운영 - AC전압원 필요 - DC Grid 적용 어려움	- 중급용량 (최대 345kV, 1GW급) - 설비비용 고가 (전류형대비 10~15%고가) - 전력변환손실 상대적으 로 큼 (1%수준)
활용 범위	-가공선로와 송전탑 연결 시 장거리 송전 가능 -기술적 제약 적음	- 1:1 대용량/장거리 송전 에 적합	- 기술적 제약이 적어 용도제한 없음 - 멀티터미널(1:N)연계 적 합
주요 동향	-시장성숙, 기술개발 완성 -국내 송전시스템의 대부 분	- 제주-해남 HVDC 적용 - 시장성숙, 기술개발완성	- 세계 각국이 제품개발 출시 중 - 경쟁적 기술개발 단계

VSC-HVDC는 LCC-HVDC에 비해 더 많은 비용을 소요하였으나 비용 외 기능적, 경제적, 기술적 등의 측면에서 편익을 분석한다면 더 구체적인 경제성을 고려할 수 있다. VSC-HVDC는 전류형에 비하여 계통전압 유지 및 사고 후 재가동, 독립 전원 공급 등의 제어 기능이 가능하다.

컨버터 스테이션부지 비용이 적용되면 전압형의 부지 비용은 전류형 부지의 60~70%이므로 추가적인 비용 절감을 고려할 수 있으며, 도심과 같이 부지비용이 비싼 곳에 입지할수록 VSC-HVDC가 가지는 편익은 더욱 올라갈 것이라 예상한다.

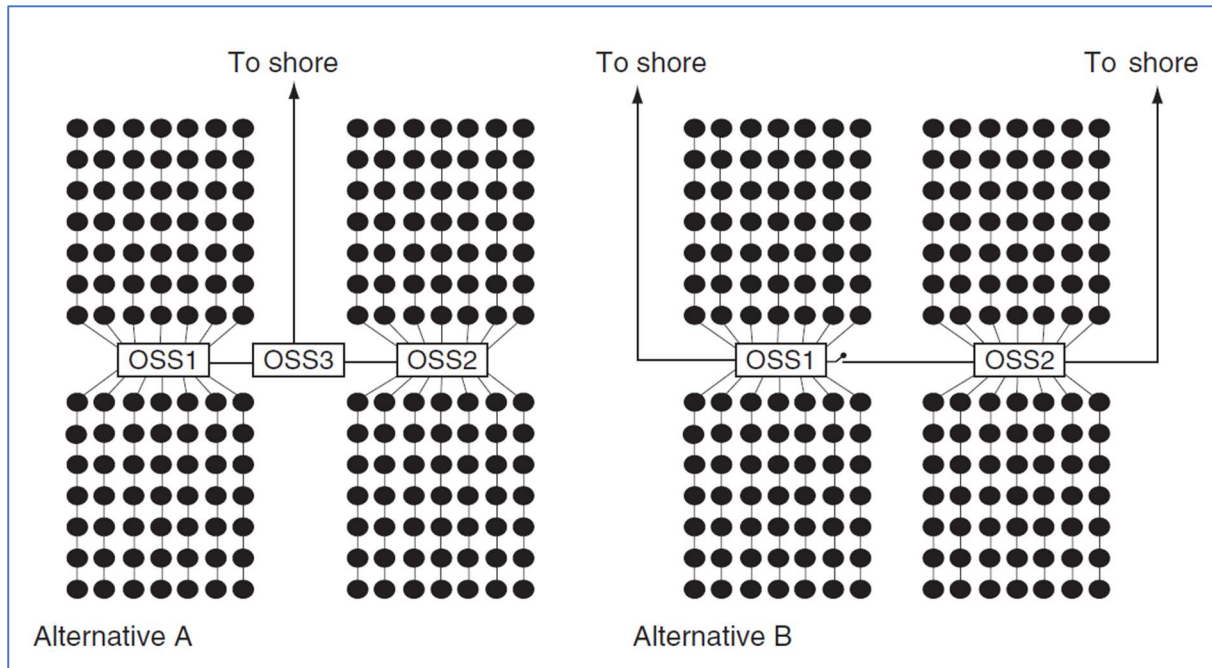
#### 4.5 송전시스템의 신뢰성 평가 및 경제성 평가

기기는 다양한 요인에 의해서 고장 날 가능성이 있다. 해상에서 기기의 보수는 매우 고비용이고 정지로 인한 기회비용의 손실이 증가된다. 해상 송전시스템의 설계시에는 신뢰성 평가를 상세하게 진행해야 한다. 또한 송전 방식차이나 구성 요소가 시스템 전체의 신뢰성에 미치는 영향도 비교·검토해야 한다.

많은 경우 송전방식은 육상까지 송전시스템 레이아웃, 즉 케이블의 개수에 영향을 준다. 예를 들어 1000MW 해상 풍력발전소를 육상까지 접속시킨 경우 VSC-HVDC로 접속하는 것도 좋으나, HVAC 방식을 사용하면 최대 5개의 케이블이 필요하게 된다. 그러나 HVAC의 경우 케이블 1개가 고장이 있더라도 나머지 800MVA분은 여전히 송전이 가능하다. 일반적으로 케이블 고장은 육상까지의 부설루트를 복수로 하거나 백업용 케이블을 사용하여 저감시킬 수 있다.



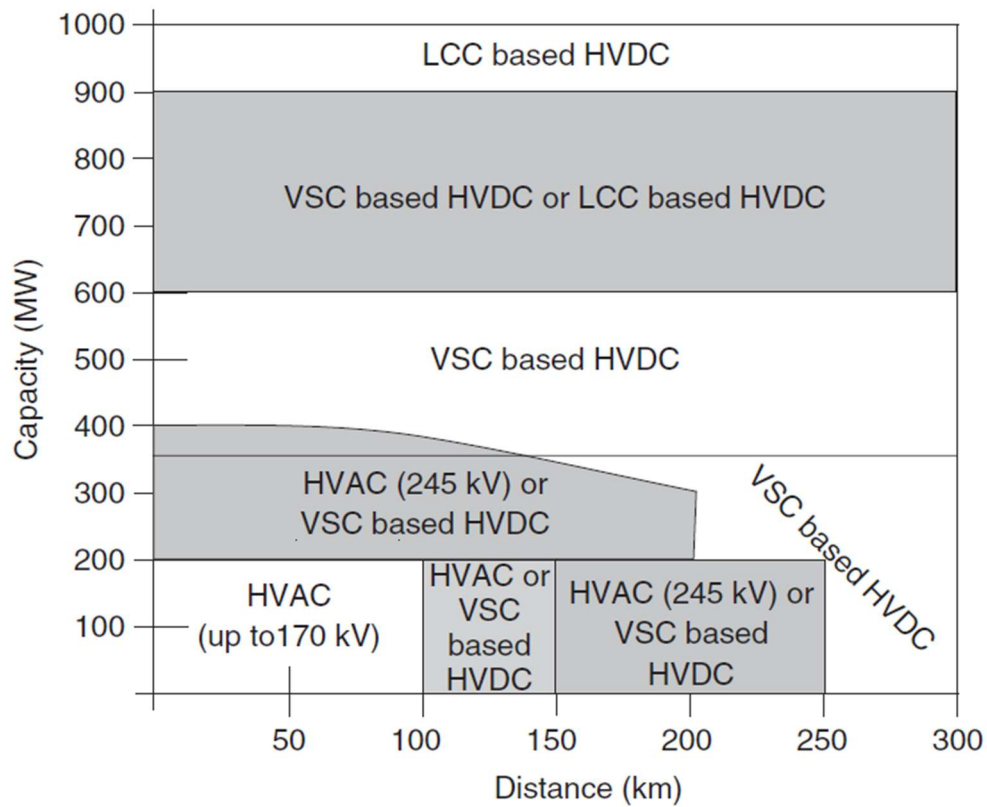
따라서 신뢰성이 다른 기기뿐만 아니라 레이아웃의 선택에 의해서도 신뢰성은 달라진다. 그래서 일반적으로 송전시스템을 설계하는 때에는 초기투자비용과 운용비용과 함께 기술적인 다양한 송전방식을 고려해야 한다. (<그림10> 참조)



<그림10> 980MW 해상 풍력발전소로 고려할 수 있는 레이아웃 예

(OSS=Offshore substation, 해상변전소)

다양한 송전시스템의 경제성 평가를 함에 있어서 풍속이나 송전손실, 신뢰성 문제에 대해 각 송전시스템의 전체적인 초기투자비용을 고려해야 한다. 그러나 초기비용은 수심이나 조류, 원자재의 가격, 건설비 등 다양한 요인에 의하여 영향을 받기 때문에 케이스마다 다르다. 하지만 많은 자료에서 대략 100km의 송전거리 이내의 경우 풍력발전소의 크기에 관계없이 HVAC 방식이 가장 비용적인 측면에서 유리하다고 언급한다.(<그림11> 참조)



〈그림11〉 전반적인 시스템 경제성을 기반으로 다양한 풍력 발전 단지 용량 및 육상 그리드 연결 지점까지의 거리에 대한 전송 기술 선택

## 5. 결 론

앞서 살펴본 바와 같이 풍력발전은 가장 깨끗하고 안정적으로 전력을 공급할 수 있는 장점을 가지고 있다. 하지만 이 역시 환경훼손에 대한 문제를 가지고 있으며 계속해서 관심을 가져야 할 부분이다.

그리고 해상풍력단지로부터 발생한 전력을 육상변전소까지 송전할 수 있는 방법에 대해 알아보았다. 크게 HVAC, LCC-HVDC, VSC-HVDC의 세가지 방법이 있

는데 HVAC의 송전효율이 HVDC에 비해 낮으며 경제성이 떨어진다. 물론 현재 대부분의 송전이 HVAC로 구성되어 많은 기술이 축적되어 있지만, 미래를 내다보고 새로운 기술에 대한 경험 축적이 필요하다.

전류형과 전압형 HVDC는 송전거리에 따른 손실이 거의 없으며, 무효전력이 발생하지 않아 무효전력보상장치 등이 필요하지 않다. 또 최근 사이리스터 및 IGBT 등의 소자들의 단가도 계속해서 낮아지고 있기 때문에 앞으로 더 많이 활용될 것으로 생각된다.

## 참고자료

- [1] 한국에너지공단, “2019년 신·재생에너지 보급통계(2020년 공표) 결과 요약”, 2020.11
- [2] 신철오 · 육근형, “해상풍력발전의 환경적 · 경제적 영향 분석”, p 29-50, 2011
- [3] T. Ackermann, “Wind Power in Power Systems”, 2005
- [4] 민창기, “국내 해상풍력발전단지의 경제성 분석”, p 4-7, 2013
- [5] 오진경, “덴마크 해상풍력발전의 성공요인 분석”, 2018
- [6] 권영기, “신재생에너지 해상풍력 발전단지의 경제성분석”, 2017
- [7] 권영한 · 이상범, “풍력발전단지 환경평가 방안 연구”, 2011
- [8] 고동휘, “서해 해상풍력단지 개발을 위한 바람과 파랑 설계조건에 관한 연구”, 2013