

풍력발전과 직류송전

■ 김 찬 기, 명 근 식 / 전력연구원

■ 문 형 배 / 한국전력공사

1. 서 론

화석에너지의 고갈에 따른 신재생 에너지원으로의 대체는 이제 전 세계적인 문제가 되었으며 EU와 미국은 2020년까지 전체전력량의 20%를 신 재생 에너지원으로 바꾸는 계획을 추진 중에 있다. 또한 각국의 CO₂억제계획에 따라 신재생 에너지원의 필요성은 더욱 증대되고 있으며, 신재생 에너지원 중에서 에너지 밀도가 높고 높은 경제성을 가지고 있는 것이 풍력에너지원이다. 현재 우리나라에서 공식적인 풍력의 단가는 70~80[원/kWh]정도이며, 미국의 대규모 풍력 단지들은 약 750[\$/kW]의 설치비와 약 5[C/kWh] 내외의 발전 단가를 보여주고 있으나 앞으로 1/3, 9[C/kWh]으로 낮아질 것으로 예상된다. 그러나 이러한 풍력에너지를 단순히 경제적인 관점에서 고려하지 않고 환경적인 관점에서 고려한다면, 200[kW]급 풍력발전기 1대가 1년간 운전하여 400,000[kWh]의 전력을 생산한다면 약 120-200[Ton]의 석탄을 대체하게 되며, 줄어드는 공해 물질의 배출량은 연간 SO_x는 2-3.2[Ton], NO_x는 1.2-2.4[Ton], CO₂는 300-500[Ton], 슬래그(slag)와 분진(ash)은 16-

28[Ton] 톤에 달하며, 부유 물질은 연간 약 160 - 280[kg] 정도 배출이 억제되는 효과가 있다. 이러한 직간접적인 효과 때문에 풍력시스템의 적용은 앞으로 더욱 늘어날 것으로 사료된다.

1. 해상풍력

풍력단지가 경제성을 갖기 위해서는 육지에 위치해 있는 것 보다는 해상에 위치한 것이 더 경제적이다 수 있다. 이러한 이유는 육지에 위치한 풍력단지는 대규모로 만들기 어렵고, 양질의 풍력에너지를 얻을 수 없다. 그리고 커다란 풍력 Tower는 경우에 따라서는 새로운 환경문제를 유발할 수 있기 때문에 건설이 용의하고 바람의 흐름이 급속하게 변하는 육지와 바다사이의 근해 풍력 시스템(Offshore Wind Power System)이 주목받고 있다.

2. 대규모 풍력단지

바람에너지를 전기에너지를 변환할 때 에너지 변환비율은 일반적으로 30%정도인 것으로 알려져 있다. 풍력시스템은 화석연료와 달리 에너지 효율을 높이는 방법이 대단히 어렵기 때문에 자연적인 조건

에 가장 적합한 발전기를 선정하는 것이 대단히 중요하다. 다시 말해서, 풍력용 발전기는 속도에 대한 가제어성을 가져야 하고, 전력품질관점에서 보다 나은 특징을 가져야 하며, 경제성도 가져야 한다. 그리고 기계적인 구조와 위치도 고려해야 한다. 이러한 복잡한 요구사항 때문에 풍력발전기는 순수한 AC계통과 달리 다양한 종류와 규모를 가지게 된다. 예를 들어, 동기발전기는 높은 출력특성을 갖고 있음에도 불구하고 바람에 특성에 따른 가변속이 어렵다는 단점을 가지고 있으며, 풍력시스템에 적용하기 위해서는 출력 단에 인버터를 설치해야한다는 단점을 가지고 있다. 반면에 유도기는 구조가 간단하고 가변속 특성이 우수하나 효율이 낮고 출력특성이 비선형적이라 출력제어가 어렵다는 단점을 가지고 있다.

V_s 은 수전단 측의 전압, δ 은 수전단 측과 송전단 측의 위상각, X 는 송전선로의 임피던스.

풍력 발전시스템은 바람이라는 불확실성입력을 받아서 어느 정도 가제어성을 가진 전력을 만드는 시스템이기 때문에, 전압과 위상각이 불확실해 질 수 있다. 따라서, 식 1에서 보여주는 식에 따라 입력 전압을 그림 1과 같이 SVC나 STATCOM을 이용하여 전압을 보장하는 시스템이 필수적이다.

2. HVDC(전류형 HVDC)를 이용한 해상풍력

그림 2는 HVDC를 이용한 해상풍력시스템을 나타내고 있다. 그림 2에서 보여주는 바와 같이 Classic HVDC를 이용한 해상풍력시스템은 STATCOM과

II. 대규모 해상 풍력시스템의 고찰

1. HVAC를 이용한 해상풍력

그림 1은 HVAC를 이용한 해상풍력시스템을 보여주고 있다. 그림 1에서와 같이 HVAC전송방식은 Offshore Substation, XLPE Cable 그리고 Onshore Substation으로 구성되어있으며, 풍력시스템에 발생할 수 있는 전압안정도 문제에 따라 SVC가 추가된 것이며, 기본적으로 HVAC가 적용될 수 있는 거리는 수십 km이내이다.

AC계통에서 전력전송에 관한 수식은 다음과 같다.

$$P_{ac} = \frac{V_s V_r}{X} \sin\delta \quad (\text{식 1})$$

여기서, P_{ac} 는 AC로 전송되는 전력, V_s 는 송전단 측의 전압,

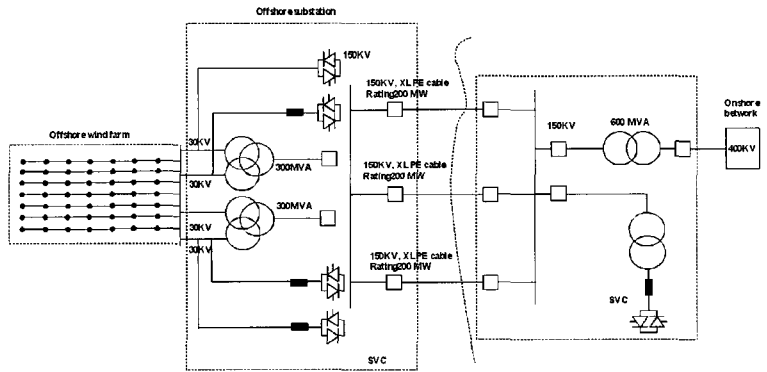


그림 1 HVAC를 이용한 해상풍력시스템

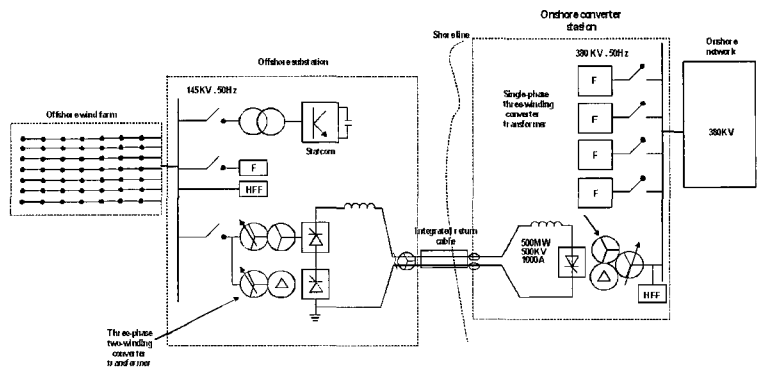


그림 2 HVDC를 이용한 해상풍력시스템

HVDC 그리고 MI케이블로 구성되어 있다. 이러한 형태의 전력전송방식은 장거리 그리고 대용량인 경우에 적합하다.

DC전력전송에 관한 수식은 다음과 같다.

$$P_{DC} = \frac{V_{DC(s)} - V_{DC(r)}}{R} \quad (\text{식 } 2)$$

여기서, P_{DC} 는 DC로 전송되는 전력, $V_{DC(s)}$ 는 Rectifier단의 전압, $V_{DC(r)}$ 는 Inverter단의 전압, R 은 DC 송전선로의 저항

3. 전압형 HVDC를 이용한 해상풍력

그림 3은 HVDC를 이용한 해상풍력시스템을 나타내고 있다. 이 경우는 그림 3에서 보는 바와 같이 HVDC시스템이 기존의 Thyristor 방식이 아니라 Turn On/Off가 가능한 소자를 이용한 전압형 HVDC를 이용한 것이며, 이러한 방식은 수전단 측에 Black-Start가 가능하고 유효전력과 무효전력이 제어가 가능하다는 장점을 가지고 있으나, 전력손실이 높고 대용량으로 만들기가 쉽지 않다는 단점을 가지고 있다. 이러한 전압형 HVDC시스템은 극성반전이 거의 없기 때문에 XLPE Cable을 이용하여 계통을 연계한다.

전압형 HVDC는 그림 4에서 보는 바와 같이 무효전력의 흡수와 발생이 가능하고, 유효전력의 방향을 임의로 바꿀 수 있는 장점이 있으며, 설치 면적도

Classic HVDC의 65%수준으로 작다. 그리고 전압원 Source이기 때문에 전압원 HVDC의 커패시터는 수전단 측의 전력을 평활하는 전압필터 그리고 순간적인 전력의 차단에서 전력을 공급하는 Power Source의 역할을 한다. 전압형 HVDC가 설치되어 있는 계통의 가장 큰 특징 중의 하나는 2개의 계통이 서로 Islanding되어 있기 때문에 서로 간섭을 하지 않는다는 사실 때문에 송전단에서 계통사고가 발생한 후에 발전기가 가속하여도 이러한 발전기의 가속에너지가 전압형 컨버터를 통하여 수전단 측의 전기에너지로 변환되어질 수 있다는 점이다.

III. 전압형 HVDC와 Classic HVDC의 비교

HVDC시스템은 HVAC시스템과 비교하여 HVDC Converter를 가지고 있기 때문에 이것의 가격 때문에 초기 투자비가 상승한다. 그림 5는 거리에 따른 HVDC와 HVAC사이의 Break-Even Point를 보여주고 있다. 그림 6은 거리와 용량사이에서 선택될 수 있는 연계방식을 보여준 것으로 이러한 그림은 반도체소자의 개발에 따라 다소 변화되어질 수 있다. 현재 전압형 HVDC시스템과 Classic HVDC시스템사이의 선택의 기준은 다음과 같다.

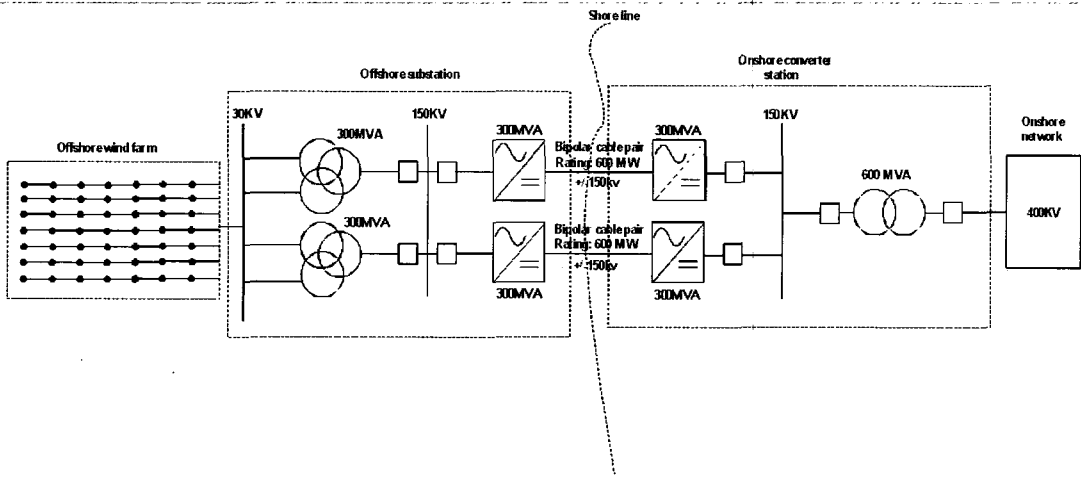


그림 3 HVDC(전압형)를 이용한 해상풍력시스템

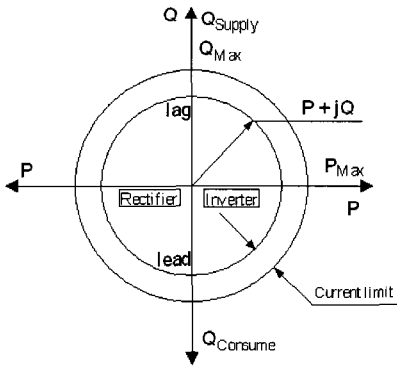


그림 4 전압형 HVDC 시스템의 제어가능 영역

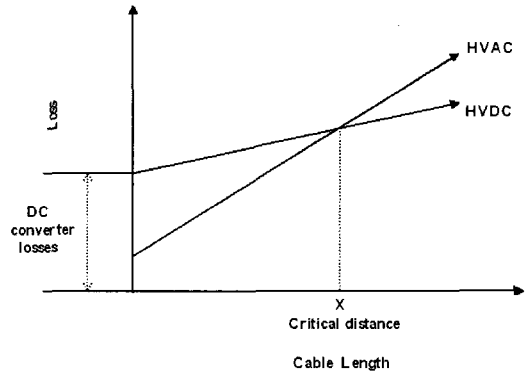


그림 5 거리에 따른 HVDC와 HVAC의 Breakeven Point

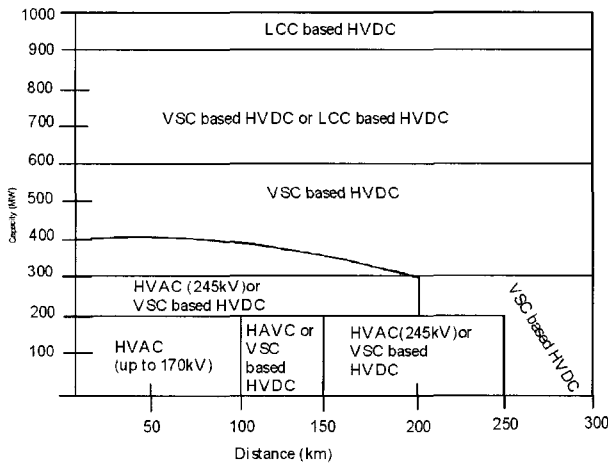


그림 6 거리와 용량에 따른 풍력시스템

A. 손실 관점에서 비교

전압형 HVDC시스템의 손실은 Classic HVDC시스템에 비하여 2~3배정도의 손실률을 보여주고 있다. 따라서, 일정한 전력전송을 목적으로 HVDC가 이용되는 경우에는 손실을 고려하여 Classic HVDC가 많이 사용되고, 계통안정화를 목적으로 하는 HVDC인 경우에는 유효전력과 무효전력을 동시에 제어 가능하고 제어의 성능이 우수한 전압형 HVDC가 많이 사용되고 있다.

B. 용량 관점에서 비교

전압형 반도체 소자를 직렬로 높이 쌓는 기술은

대단히 어렵기 때문에 반도체 소자의 용량을 높이는 방법이나 Multi-Level을 도입하는 방법을 취하고 있다. 전압형 HVDC의 용량 제한은 이론적으로는 없지만, 어느 용량을 넘어가면 경제적인 면이 상실되기 때문에 계통안정화나 계통의 안정화를 통한 전력전송의 증대를 목적으로 하는 FACTS 설비는 경우에 따라서는 전압형 HVDC기술과 좋은 경쟁이 될 수 있고, 비교기준은 경제성이다. FACTS설비는 기존의 AC계통에 전력전자설비(STATCOM이나 SVC등)를 추가하여 계통의 전압과 위상과 계통 파라미터를 제어함으로써 계통의 안정화나 계통의 안정화를 통한 전력전송을 증가시킬 수 있다. 그러나,

계통이 바뀌는 상황에 따라 FACTS설비의 효율성이 항상 일정한 것은 아니며, 제어가 어렵다는 단점을 가지고 있기 때문에 대규모 계통을 운전하기에는 아직은 많은 연구가 필요하다. 그러나 적은 비용으로 효과적인 계통의 성능 향상이 가능하기 때문에 국부적인 사용은 계속 늘어날 전망이다. 한편, HVDC는 AC전력을 DC전력으로 바꾸어서 전력을 전송하는 개념으로 계통을 완전히 2개로 분리하기 때문에 전력전송과 계통안정화효과는 정확할 수 있으나 가격이 고가라는 단점을 가지고 있다.

C. 풍력시스템에서 HVDC의 선택권

HVDC를 이용한 전력연계는 시스템을 설계하는

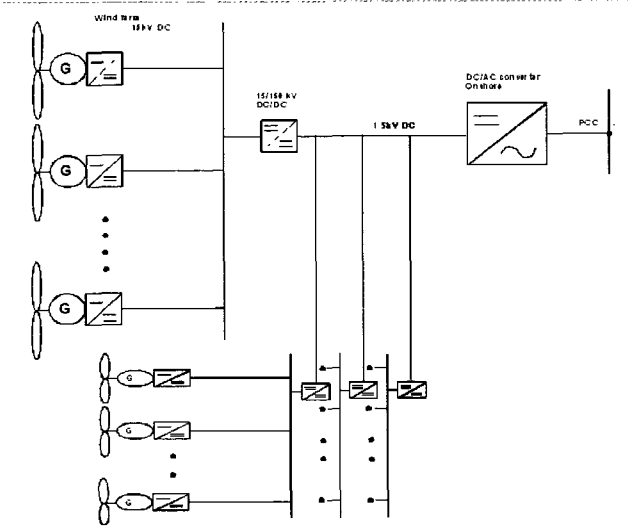


그림 7 AC발전기를 가진 풍력시스템

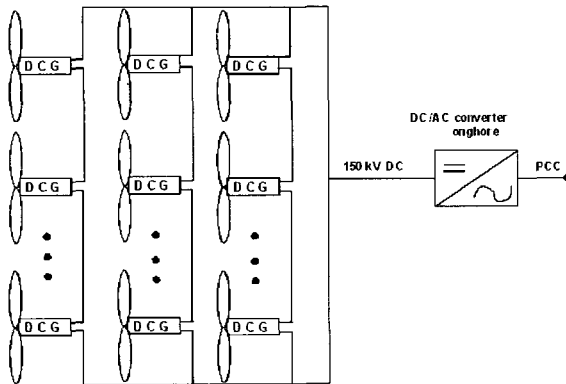


그림 8 DC발전기를 가진 풍력시스템

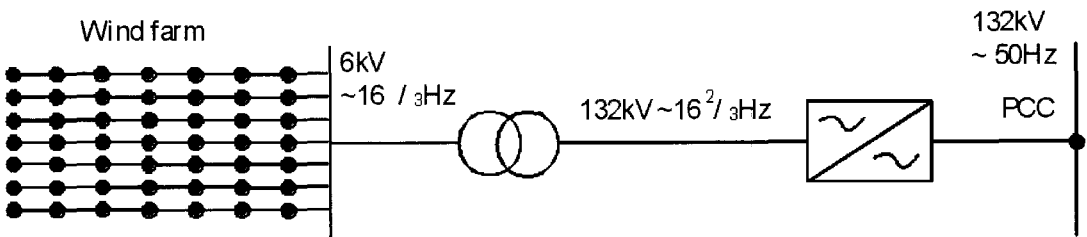


그림 9 낮은 주파수를 이용하는 풍력시스템

사람들에게 다음과 같은 선택권을 준다.

- 풍력발전기의 종류를 다양화 할 수 있다.

HVDC단에 연계된 AC계통의 전력품질은 HVDC의 성능에 달려있고, HVDC시스템은 일종에 풍력발전단과 AC계통사이의 전기적인 완충기(Electrical Buffer)역할을 하기 때문에 풍력발전단의 발전기를 선택하는 문제는 그림 7과 같이 AC발전기(동기기 혹은 유도기) 또는 DC발전기와 같이 다양해질 수 있다.

- 풍력 발전단의 주파수와 전압의 선택문제가 자유스럽다.

HVDC는 주파수와 전압이 상이한 계통을 연계하기 때문에 풍력발전단의 주파수와 전압선택문제는 AC계통에 비하여 대단히 자유스럽다.

- 풍력 발전단의 전력품질문제는 수전단의 AC계통보다 덜 완고하다.

전력품질문제는 전력계통에서 주파수와 전압 그리고 고조파문제를 말한다. 이러한 전력품질은 법적으로 규정된 값 이상으로 유지시켜야 하기 때문에 많은 투자비가 소요된다. 그러나 HVDC는 상이한 계통을 연결해 주는 시스템이기 때문에 전력 전송 단에서 전력품질 문제가 수전단에 영향을 미치지 않기 때문에 시스템 설계에 대단히 유리하다.(엄밀히 말해, HVDC도 상이한 2개의 계통사이의 상호작용은 작으나마 존재한다)

표 1 HVDC와 HVAC의 비교

	Transmission Solution		
	HVAC	LCC based HVDC	VSC based HVDC
Maximum available	200MW at 150kV	~120MW	350MW
Capacity per system	350MW at 245kV		500MW announced
Voltage level	Up to 245kV	Up to ±500kV	Up to ±150kV
Does transmission Capacity depend on distance?	Yes	No	No
Total system losses	Depends on distance	2-3%(plus requirements for ancillary services offshore)	4-6%
Does it have Black-Start Capability ?	Yes	No	Yes
Level of faults	High compared with HVDC solutions	Low compared with HVAC	Low compared with HVAC
Technical capability for network support	Limited	Limited	Wide range of possibilities(2005)
Are offshore substations in operation?	Yes	No	
Space requirements for offshore substations	Small	Depends on capacity; converter is larger than VSC	Depends on capacity; converter is smaller than LCC but larger than HVDC substation

표 1은 HVDC와 HVAC를 비교한 항목으로써 각각의 항목에 따라 비교를 한 것이다.

IV. 결론

이제는 신재생 에너지가 선택이 아니라 필수인 시대로 들어서고 있다. 이러한 신재생 에너지 중에서, 가장 경제성을 인정받고 있는 분야는 풍력발전기이며, 풍력발전기의 주류를 이루고 있는 유도발전기 기술과 전력전자기술을 바탕으로 하여 계통을 보다 효율적으로 운영하는 직류송전과 FACTS 기술이 현대 전력 기술의 핵을 이루어 나갈 것으로 사료된다.

지금까지 서술한 내용은 Wiley사에서 2005년 출판한 Thomas Ackermann의 "Wind Power in Power System" 내

용 중에서 해상풍력에 해당되는 부분을 발취한 것으로 도표와 그림은 Thomas Ackermann의 책의 내용을 많이 인용하였으며, 전반적인 내용은 저자가 그 동안의 연구내용을 서술한 것이을 알려드립니다.

참고 문헌

- [1] "Wind Power in Power System", Thomas Ackermann, Wiley Press, 2005.

◎ 기 호

- * HVDC : High Voltage Direct Current
- * HVAC : High Voltage Alternative Current
- * VSC HVDC : Voltage Source Converter HVDC
- * XLPE Cable : Crosslinkable Polyethylene Cable
- * MIND Cable : Mass Impregnated Non-Draining Cable
- * STATCOM : Static Compensator
- * SVC : Static Var Compensator
- * FACTS : Flexible AC Transmission
- * Offshore Substation
- * Onshore Substation