

## HVDC 추가도입에 대한 제주도 계통의 정태 안정도 분석

신성수, 김도형, 김재언  
충북대학교

### Stability Analysis of Jeju Power System added with HVDC

Seong-Su Shin, Do-Hyung Kim, Jae-Eon Kim

Department of Electrical and Electronics Engineering, Chungbuk University

**Abstract** - This paper presents results of comparing CSC HVDC with VSC HVDC on the stability in case of connecting Haenam to Jeju electrical power system. the steady-state stability in the case of Jeju electrical power system with CSC HVDC or VSC HVDC, is validated through PV curve, QV curve of Jeju electrical power system. And in the case of CSC HVDC, it is considered that synchronous condenser is connected or not. The results are compared each other. PSS/E simulation tool is used for the steady-state stability analysis.

#### 1. 서 론

HVDC(High voltage Direct Current) 시스템 기술은 전력 시스템의 안정성과 전력 손실의 문제를 해결해주는 기술적인 해결책으로서 전력용 반도체 소자 및 전력전자 기술의 발전으로 그 활용 범위가 확대되고 있다. 우리나라에서는 1998년부터 제주-해남 간 전류형(CSC) HVDC 시스템이 상업운전을 하고 있으며 최대 용량 300MW, 정격 운전 용량 150MW의 전력전송 능력을 가진 시스템으로 케이블에 연결되어 Pole 당 DC 189kV의 전압으로 제주 지역에 안정적으로 전력을 공급하고 있다. 또한 제주도에서는 풍력발전이 2007년 기준으로 19MW를 발전하고 있으며 향후 풍력발전 설비의 증가로 그 발전량은 더욱 증가되어 2011년에는 제주 최대 발전용량의 36%에 해당하는 246.6MW에 이를 것으로 예상된다. 그러나 태풍의 길목인 있는 제주도의 지리적 여건으로 인하여 풍력발전이 안정적이고 지속적으로 이루어 질 수 없으며 기존 HVDC는 Overhaul을 수행하거나 고장 시 제주 계통에 안정적인 전력공급에 문제가 발생할 수 있으며 이러한 문제를 해결하기 위해 육지를 잇는 HVDC의 추가적인 건설이 추진되고 있다. 본 논문에서는 풍력 발전이 연계된 제주 계통에 있어서 전류형(CSC)형 HVDC와 전압형(VCS) 추가적으로 도입되었을 때를 가정하여 각각의 정적 안정도를 비교, 분석하였다. 또한 동기 조상기의 설치 여부에 따른 계통의 안정도를 비교하였다. 시스템의 정적 안정도 평가 방법은 PSS/E를 이용하여 실제 계통을 모의 하여 시뮬레이션 결과를 근거로 하여 P-V Curve와 Q-V Curve를 통한 전력 전송 한계용량과 전압 안정도를 해석 하였다.

#### 2. 본 론

##### 2.1 HVDC 시스템

##### 2.1.1 전류형(CSC) HVDC 시스템

CSC HVDC 시스템은 직류 송전에 대한 제어가 위해 사이리스터의 점화각  $\alpha$ 에 의해서 이루어지므로 지연된 전류를 흡수하기 위해서 무효전력이 반드시 필요하게 된다. 보통 사이리스터를 사용하는 CSC HVDC는 직류 전송량의 약 60%에 해당하는 진상 무효전력을 AC 계통에서 공급받아야 한다. 이러한 무효전력의 소비는 HVDC 전송용량이 커짐에 따라서 더 많은 문제를 유발할 수 있다. 따라서 CSC HVDC 연결단에는 콘덴서 동기 조상기 SVC, STATCOM과같은 FACTS 기기를 설치한다. 일반적으로 사용되는 동기 조상기는 차과도 시간영역에서 짧은 시간의 전압 안정도를 유지 시킬 수 있으며 HVDC 단자 근처에서 발생한 고장으로 갑작스럽게 직류단의 전력 전송이 끊어질 때 사이리스터 컨버터의 과다한 무효 전력 공급으로 인하여 교류시스템에서 발생하는 전압 상승을 저감시킬 수 있다.

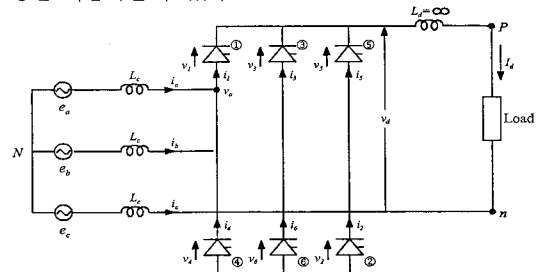


Fig 1. Equivalent circuit of three phase full wave bridge

$$V_{dor} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} TV_{acr} \quad (1)$$

$$V_{doi} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} TV_{aci} \quad (2)$$

$$I_d = \frac{V_{dor} \cos \alpha - V_{doi} \cos \gamma}{R_r + R_L + R_{ci}} \quad (3)$$

$$P_{dr} = V_{dr} I_d = V_{di} I_d + I_d^2 R_L \quad (4)$$

$$P_{di} = V_{di} I_d \quad (5)$$

$$Q_{dr} = P_{dr} \tan \Phi_r \quad (6)$$

$$Q_{di} = P_{di} \tan \Phi_i \quad (7)$$

위 식과 같이 유효전력을 DC전류  $I_d$ 의  $V_{dor} \cos \alpha$ 와  $V_{dor} \cos \gamma$ 에 의하여 제어할 수 있다. 결국 DC전류  $I_d$  제어는 사이리스터 밸브의 점화각과 소호각의 제어를 통해서 이루어지고 1~10msec의 빠른 응답을 가진다. 또한 CSC HVDC 시스템은 AC계통의 선간전압  $V_{dor}$ 은 컨버터 변압기의 탭 제어를 통해서 이루어지고 5~6sec의 느린 응답을 가진다. CSC HVDC 시스템은 직류송전에 대한 제어를 위해 점화각  $\alpha$ 의 제어가 필요하기 때문에 컨버터의 교류 전류의 위상은 항상 전압에 뒤진다. 현재 제주 계통에는 switched capacitor와 reactor로 구성된 HVDC 필터와 55MVar 용량의 동기 조상기가 2기 설치 되어있다.

### 2.1.2 전압형(VSC) HVDC 시스템

VSC HVDC는 운전 시 유효전력은 AC계통에 식 2.1에 의해서 공급하고 무효전력은 식 2.2에 의해서 공급할 수 있다.

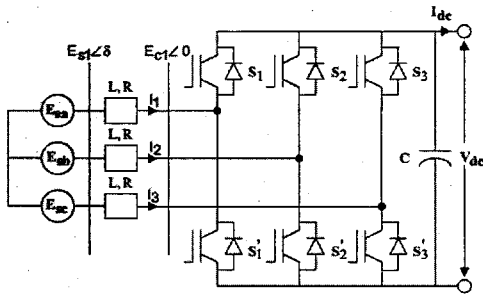


Fig. 2 Power circuit of a three phase VSC

$$P = \frac{Es1Ec1 \sin \delta}{X} \quad (8)$$

$$Q = \frac{Es1(Ec1 \cos \delta - Es1)}{X} \quad (9)$$

즉 식 (8)의 유효전력은  $Es1$ 과  $Ec1$ 간 위상차  $\delta$ 에 의해서 결정된다. 만약  $Ec1$ 이  $Es1$ 보다 지상이면 VSC는 정류기 모드로 동작하고 AC계통으로부터 유효전력을 흡수한다. 그 반대의 경우에는 AC계통으로 유효전력을 공급하게 된다. 무효전력은 식 (9)에서  $Ec1$ 에 의해서 결정되며 만약  $Ec1$ 이  $Es1$ 보다 클 경우 VSC HVDC는 무효전력을 공급하고 반대의 경우는 무효전력을 흡수한다.

### 2.2 제주계통 모델링

제주도 계통분석을 위해 PSS/E V30.31를 이용하여 제주계통을 모델링 하였고 다음 표에 주어진 데이터는 2011년의 설비 용량을 기준으로 하였다. 풍력발전설비는 660kW용량의 Vestas V47 (VS47A)와 1.8MW용량의 Vestas V80(VS80A)의 두 모델로 모델링 하였다. 제주계통의 모델링 데이터는 표1와 같다.

Table.1 The anticipated Jeju system data in 2011

#### a) Total load capacity data in 2011

Bus	Bus Name	P(MW)	Q(MVAR)
130	동제주	156.9	31.68
140	신제주	119.5	25.84
150	한림CC	58.10	16.82
160	안덕	61.90	16.58
180	신서귀	50.50	9.00
190	한라	69.50	21.58
200	성산	111.87	43.53
210	산지	29.6	12.00
996	조천	26.5	3.90
998	표선	9.60	3.00
Total		693.97	183.93

#### b) Generation data

Bus	Generator Name	Pmax (MW)	Qmax (MVAR)
20122	제주TP#2	75	35
20123	제주TP#3	75	35
20125	NEWSC#1 (동기조상기)		55
20126	NEWSC#2 (동기조상기)		55
20166	한림GT#1	35	17
20167	한림GT#2	35	17
20168	한림ST	35	17
20171	남제주TP#3	100	50
20172	남제주TP#4	100	50
Total		455	291

#### c) Wind generation data

Bus	Wind Generator Name	Pmax (MW)	Qmax (MVAR)
20151	한경1차풍력	6.60	-2.80
20152	한경2차풍력	14.40	-6.62
20153	삼무풍력	30.60	-14.06
20154	신창풍력	1.80	-0.83
20201	행원풍력	9.90	-4.20
20202	월정풍력	1.80	-0.83
20203	신산풍력	11.80	-5.04
20204	남산풍력	15.18	-6.44
20205	성산풍력	19.80	-9.09
20206	상도풍력	32.40	-14.87
20221	행원풍력	18.48	-7.94
20222	덕진풍력	39.60	-17.80
20223	동북풍력	45.00	-20.22
Total		247.36	-110.74

### 2.3 정적안정도 분석

정적안정도분석은 풍력 발전 설비가 연계된 제주계통을 PSS/E를 이용하여 모델링하고 기존의 CSC HVDC에 CSC HVDC 또는 VSC HVDC 추가도입에 따른 PV Curve와 QV Curve의 비교를 통하여 유효전력의 한계전송용량과 전압안정도를 분석하였다. 또한 SCS HVDC의 경우에는 새로 도입되는 SCS HVDC에 기존의 HVDC에 연계된 동기 조상기와 같은 모델과 용량을 연결했을때와 SCS HVDC만을 연결했을 경우에 PV, QV Curve를 계산하였다.

### 2.3.1 유효전력 전송능력 비교(PV Curve)

PV Curve은 부하의 증가에 따른 전압의 특성을 볼 수 있다. 또는 어떤 버스에서 요구되는 전압에 따라 유효전력의 값을 알 수 있으며, 버스에서의 전압이 붕괴되는 점까지의 그 버스가 전송할 수 있는 유효전력을 알 수 있다. 이 논문에서는 추가 도입되는 HVDC와 제주계 연계지점에서 CSC HVDC 또는 VSC HVDC 경우에 유효전력 전송능력을 비교 하였다. 또한 CSC HVDC의 경우에는 동기조상기의 설치 유무에 대한 PV Curve을 비교 하였다.

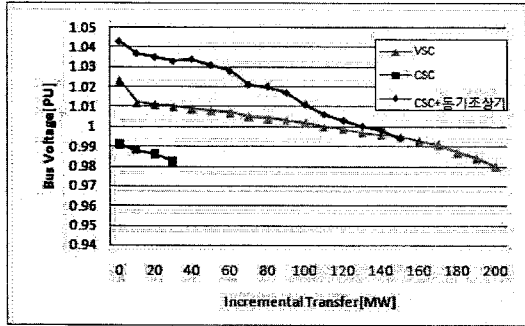


Fig. 3 PV curve of 999 bus in Jeju system

그림3과 같이 VSC HVDC를 추가 연결했을 경우 유효전력 전송능력은 약 200MW이며 전압 0.98[pu]에서 붕괴되었다. CSC HVDC만을 추가 도입 했을 경우에는 유효전력 전송능력은 약 30MW이며 전압 0.98[pu] 부근에서 붕괴 되었다. 제주계통에 CSC HVDC 추가 시 유효전력 전송능력이 떨어지는 이유는 CSC HVDC가 무효전력을 AC계통으로부터 흡수하는 특성 때문에 전압붕괴 지점이 그림4와 같이 전압운영 범위 안에 존재하기 때문이다. 반면에 CSC HVDC에 동기 조상기를 연결하여 추가 도입했을 경우 전력 전송능력은 약 150MW이며 전압 0.99[pu]에서 붕괴되는 것을 확인할 수 있다. VSC HVDC가 CSC HVDC보다 유효전력 전송능력이 우수하다는 것을 확인할 수 있으며 동기조상기를 연결해 주었을 경우 전송능력은 증가하는 것을 확인할 수 있다.

### 2.3.2 전압 안정도(QV Curve)

QV Curve은 요구되는 전압으로 버스 전압을 조절하기 위해 버스에 무효전력을 결정하는데 사용되어 질 수 있다. 버스에 존재하는 무효성 부하를 가지고 시작하여 버스에서의 전압이 시스템이 전압 붕괴 지점에 도달하여 발산할 때까지 무효성 부하가 단계적으로 증가함으로써 계산되어 질 수 있다. QV Curve의 기울기  $dQ/dV$ 가 0이 되는 아래 부분은 전압 안정도한계를 나타낸다. QV Curve은 HVDC가 새로 추가되는 지점과 가장 먼 부하 모선인 180을 시뮬레이션 하였으며 그림4와 같이 동기조상기 없이 CSC HVDC만을 연계되었을 경우에 전압 안정도 한계가 버스 전압 운영범위(0.95-1.05PU) 0.95PU 근처에 있는 것을 볼 수 있다. 이는 계통이 불안정하게 운영되고 있다는 것이다. 그러나 CSC HVDC에 동기 조상기를 연결했을 경우 QV Curve은 VSC HVDC와 거의 비슷한 Curve을 그리는 것을 확인할 수 있다. 이것은 CSC HVDC에서 흡수하는 무효전력을 조상기에서 충당함으로써 계통의 전압 안정도가 크게 향상된 것을 알 수 있다. 그림 4에서 보듯이 전압 안정도 측면에서 보았을 때 VSC HVDC가 우수하다는 것을 알 수 있으나 CSC HVDC에서 흡수하는 무효전력을 보상기를 통해서 공급해 줌으로써 전압안정도가 개선됨을 알 수 있다.

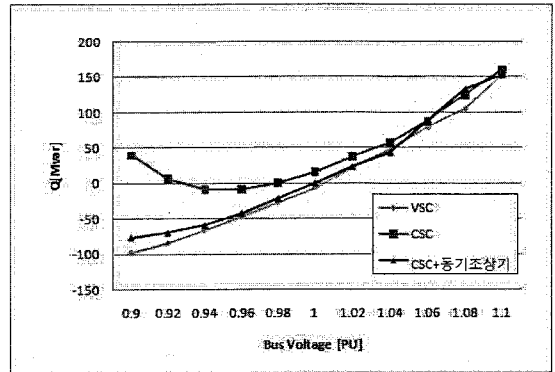


Fig.4 QV curves of 180 bus in Jeju system

## 3. 결 론

본 논문에서는 기존의 제주-해남간 HVDC 시스템에 추가적으로 HVDC이 도입 되었을 경우 VSC HVDC 와 CSC HVDC와의 정태안정도를 PSS/E를 이용하여 PV Curve과 QV Curve을 통해서 분석하였다. 또한 CSC HVDC인 경우에 동기조상기가 연결되는 경우와 그렇지 않은 경우를 비교하였다. 제주도는 현재 다기의 풍력발전 시스템이 연계되어 있으며 2011년까지 제주 계통의 36%에 이르게 될 것으로 예상된다. 따라서 제주도 계통에 있어서 무효전력의 수급은 중요한 요소 중에 하나이며 CSC HVDC 시스템의 무효전력 흡수를 보상해주는 시스템이 반드시 필요하다 하겠다. 시뮬레이션 결과 VSC HVDC를 추가 도입할 경우 계통의 안정도 측면에서 가장 좋을 수 있으나 VSC HVDC에 동기 조상기를 투입함으로써 계통의 전력전송 능력과 전압의 안정도가 전압형의 경우에 근접한 것을 확인할 수 있었다. 향후 동기 조상기를 비롯해 적절한 무효전력 보상장치를 연계시켰을 경우의 정태 안정도뿐만 아니라 과도 안정도까지 분석하여 보다 명확한 결론을 얻을 수 있을 것으로 사료된다.

### [참 고 문 헌]

- [1] P.F. Toledo, B. Bergdahl, G. Asplund, "Multiple Infeed Short Circuit Ratio-Aspect Related to multiple HVDC into one AC network", 2005 IEEE/PES, Transmission and Distribution Conference & Exhibition Asia and Pacific Dalian, China
- [2] Carson W. Taylor, "Power System Voltage Stability", McGraw-Hill, pp194, 1994
- [3] "제 3차 전력수급기본계획", 산업자원부, 2006
- [4] Z.Y. Liu, J. Wen, M.X. Han, L. Dong, H. Ding "Researches on the Load Representation of Hunan Power Grid AC/DC System", 2006 International Conference on Power System Technology, pp.1-5, Oct. 2006
- [5] P. Kundur, "Power System Stability and Control", McGraw-Hill, 1994
- [6] 송길영, "송배전공학", 동일 출판사, pp 298, 1991
- [7] Hadi saadat, "Power System Analysis", McGrow Hill, 1999