

# 제주계통의 STATCOM 상정사고를 고려한 전력품질 해석

## Power Quality Analysis Considering Contingency of STATCOM in Jeju Power Grid

고지한\* · 김동완\*\* · 김승현\*\*\* · 김호민\*\*\*\* · 김일환\*\*\*\*\*†  
Ko Ji-Han\*, Kim Dong-Wan\*\*, Kim Seong Hyun\*\*\*, Homin Kim\*\*\*\*,  
Kim Eel-Hwan\*\*\*\*\*†

(Submit date : 2014. 2. 18., Judgment date : 2014. 2. 24., Publication decide date : 2014. 4. 21.)

**Abstract :** This paper presents the modeling and contingency analysis of Jeju power system. For the analysis of contingency with simulation, thermal power plants, current source type HVDC systems, wind farms, STATCOMs and Jeju power load are modeled by PSCAD/EMTDC program. And three kinds of simulation are carried out. Firstly, two STATCOMs are in normal operation. Secondly, one STATCOM is in fault. Lastly, all of STATCOMs are in fault. These comparative studies will be useful for evaluating the effectiveness of STATCOM to stabilize for the Jeju power system.

**Key Words :** Static synchronous compensator (STATCOM), High Voltage Direct Current (HVDC), Jeju power grid

### 1. 서 론

최근 급변하는 전력시장의 환경변화와 가중

되는 송전설비 확충의 어려움으로 기존 송변  
전 설비의 활용도와 전력 계통의 신뢰도를 극  
대화 할 수 있는 FACTS기술에 대한 연구가

\*\*\*\*\*† 김일환(교신저자) : 제주대학교 전기공학과  
E-mail : ehkim@jejunu.ac.kr, Tel : 064-754-3678  
\*고지한 : 제주대학교 풍력특성화 협동과정  
\*\*김동완 : 제주대학교 풍력특성화 협동과정  
\*\*\*김승현 : 제주대학교 전기공학과  
\*\*\*\*김호민 : 제주대학교 전기공학과

\*\*\*\*\*† Kim Eel-Hwan(corresponding author) : Department of  
Electrical Engineering, Jeju National University  
\*Kim Dong-Wan : Multidisciplinary Graduate School  
Program For Wind Energy, Jeju National University  
\*\*Ko Ji-Han : Multidisciplinary Graduate School Program  
For Wind Energy, Jeju National University  
\*\*\*Kim Seong Hyun : Department of Electrical Engineering,  
Jeju National University  
\*\*\*\*Homin Kim : Department of Electrical Engineering,  
Jeju National University

활발하다. 그 중 STATCOM은 IGBT와 같은 전압형 소자를 사용하여 무효전력을 빠르게 흡수·공급해 전압을 안정시키는 역할을 한다.[1] 제주계통은 육지계통과 연결된 제 1, 2 연계선의 경우 전류형 HVDC 양극 방식을 사용하고, 전력제어를 위해 사이리스터의 점호각의 제어를 하여야 하기 때문에 컨버터의 교류 전류의 위상은 항상 전압에 뒤진다. 그래서 지연된 전류를 흡수하기 위한 무효전력이 불가피하게 필요로 하게 되고 HVDC 연결단에 필터, 동기조상기, STATCOM과 같은 무효전력 보상장치가 설치되었다.[2] HVDC를 통해 공급되는 유효전력 변동에 따라 소비되는 무효전력이 변동되고 계통전압에 영향을 주고 있다. 이를 막기 위해 STATCOM이 실시간 무효전력을 보상하여 계통 전압을 안정시키고 있다.[3]

본 논문에서는 현재 제주계통에 설치된 STATCOM 2기의 영향에 대해 알아보기 위해서 제주계통의 2013년 7월 출력 데이터 중 무효전력 변동이 심한 29일 데이터를 기반으로 하여 STATCOM이 고장 시 계통 무효전력과 전압에 대해서 분석하였다. 제주계통모델링은 2013년 7월 기준으로 하고 MATLAB을 이용하여 7월 29일 데이터를 분석하였다. 그리고 분석한 데이터를 토대로 세 가지 시물레이션을 수행하였다. 첫째, 계통 모델링의 신뢰성을 입증하기 위해 시물레이션 결과와 출력데이터를 비교하였다. 둘째, 한라 변전소와 신제주 변전소에 각각 설치되어 운용되고 있는 STATCOM 사고 시 제주계통에 미치는 영향에 대해서 전력계통과 전력전자시스템을 해석하는데 유용한 PSCAD/EMTDC 프로그램을 이용하여 수행되었다.

## 2. 본 론

### 2.1 제주계통현황



Fig.1 The Power system in Jeju island

Fig. 1은 2013년 제주계통을 간단하게 보여 준다. 제주계통은 154 kV 가공선으로 운영되며, 제주화력 385 MW, 남제주 화력 200 MW, 한림복합 105 MW로 3개소의 발전소가 운전 중에 있다. 또한 서부지역 풍력발전단지 24.7 MW, 동부지역 풍력발전단지 83.5 MW가 운영 중 이다. 연계선의 경우 해남과 제주를 연결하는 제 1 연계선 육지의 전력을 제주에 공급하기 위해 영국의 AREVA(구 ALSTOM)사에 의해 1997년 완공되었으며 1998년에 최대용량 300 MW의 상업 운전을 시작으로 현재는 안정성을 고려하여 150 MW로 운전 중이다. 제 2 연계선의 경우 제주와 진도를 연결하고 있으며 2012년 이후 제주 지역 전력 수급에 어려움이 가중되어 예비유이 저하되고 제주지역 전력계통 취약성보강이 시급하다는 이유에서 2009년 설치되었다. 400 MW의 설비용량을 갖추고 있으며 운전범위는 역시 안정성을 고려하여 최대 250MW로 운전하고 있다. 그리고 신제주 및 한라변전소에는 각각 50 MVar의 STATCOM이 무효전력을 보상하기 위해 설치되어 운용되고 있다.

## 2.2 STATCOM

STATCOM은 변압기, 인버터, 제어 및 감시시스템, 보호시스템 등으로 구성되어 있으며 변압기를 통해 계통에 병렬로 연결되어 무효전력을 흡수·공급한다. STATCOM의 출력단 전압이 계통 전압보다 크면 무효전력을 공급하며, 작을 경우 흡수하는 역할을 한다. 효성중공업에서 2010년 신제주변전소와 한라변전소에 50MVar 2기를 설치하여 노후화된 발전소들의 휴/정지 시 발생하는 부족한 무효전력을 계통 내에 보상해 안정된 범위에서 계통이 유지되도록 하고 있다. [4]

전기 특성시험을 통해 결정된 발전기, 여자시스템, 조속기/터빈 모델 정수를 적용하였다. 풍력발전의 경우 동부, 서부 풍력발전단지로나뉘 가변 전류원으로 모델링하여 사용하였고 HVDC는 실제 출력과 동일한 출력을 얻기 위해 출력 데이터를 Look-up table화하고 축약 모델로 등가 변환하여 시뮬레이션 시간을 단축하였다. STATCOM의 경우 24pulse, 50MVar, 기준전압 15kV로 제어 모드로는 계통전압 제어, 정출력제어, 역률제어가 있지만 본 논문에서는 제주계통 전압을 피드백 받아 계통전압 제어를 실시하였고 1.5초 뒤에 계통에 투입되도록 설정하였다.

## 3. 제주계통모델링

Fig. 2는 PSCAD/EMTDC를 이용하여 제주계통을 모델링한 것이다.[5] 실제 선로정수와 변압기 파라미터를 사용하였다. 화력발전은 제주T/P, 남제주T/P, 한림S/T 각각의 발

## 4. PSCAD/EMTDC 시뮬레이션

### 4.1 실제데이터분석

본 논문에서는 전압변동이 심한 날 중 하루인 2013년 7월 29일 발전출력의 2초 간격 취

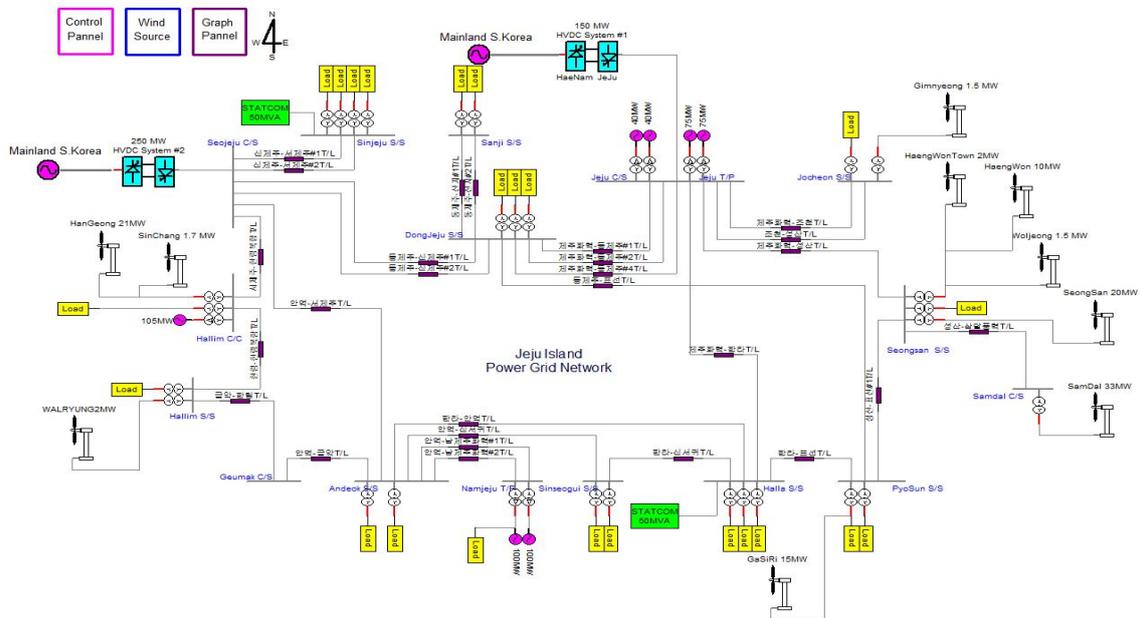


fig. 2 Modeling of the Power system in Jeju Island

특 데이터를 분석하였다.

Fig.3 은 실제 유효전력과 주파수이다. 7월 29일 평균 부하량은 589.55MW로 7시부터 부하가 증가하며 피크부하는 20시경에 나타난다.

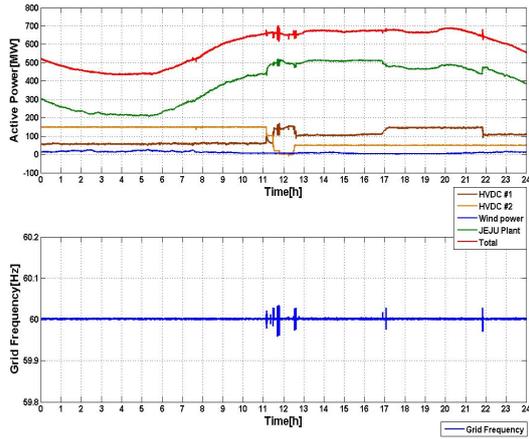


Fig. 3 The real data of active power and grid frequency in Jul. 29th, 2013

Table. 1 The analysis data of HVDC active power

	구간	최저출력 [MW]	최대출력 [MW]	출력변동 [ $\Delta$ MW]
HVDC #1	1	62.00	111.21	+49.21
	2	61.23	121.87	+60.64
	3	97.52	143.44	+45.92
	4	134.80	155.71	-20.91
HVDC #2	1	101.34	149.73	-48.39
	2	45.59	103.29	-57.70
	3	19.08	47.15	-28.07
	4	0	22.09	+22.09

HVDC #1, 2 출력은 하루 평균 95MW로 운전되었으며 출력 변동이 심한 11시부터 13시를 기준으로 분석한 데이터는 Table. 1에 보여준다. 구간은 출력변동이 큰 4구간으로 나누었으며

구간 1 - 11:08:44 ~ 11:09:24

구간 2 - 11:27:48 ~ 11:28:20

구간 3 - 11:29:50 ~ 11:32:16

구간 4 - 12:29:28 ~ 12:29:44 이다.

각 구간동안 최저출력과 최대 출력, 출력 변동을 나타낸다.

$$\text{출력 변동} = \text{나중출력} - \text{이전출력} \quad (1)$$

1~4구간 사이 유효전력 변동에 따라 주파수가 변동하였지만 전력품질유지기준에 의거한 주파수 변동 범위인  $\pm 0.2\text{Hz}$  이내에서 안정적으로 유지되었다.

풍력발전의 경우 평균출력 10.5 MW로 제주계통에 주는 영향이 아주 미미한 것을 알 수 있다.

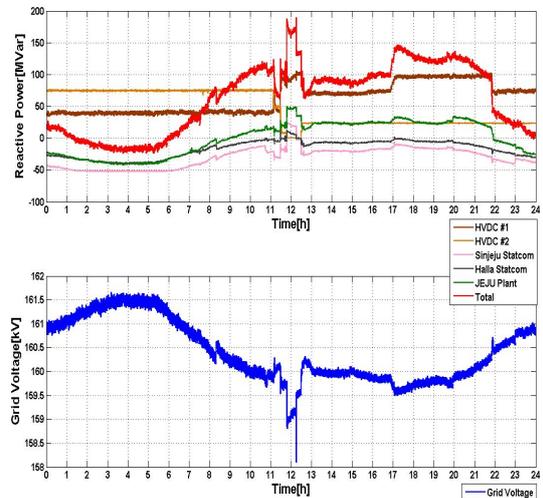


Fig. 4 The real data of reactive power and grid voltage in Jul. 29th, 2013

Fig. 4는 무효전력과 전압의 그래프이며 Table. 2는 유효전력 변동이 심한 동시간대 HVDC와 STATCOM의 무효전력 변동을 분석한 표이다.

Table. 2 The analysis data of HVDC, STATCOM reactive power

	구간	최저출력 [MVar]	최대출력 [MVar]	출력변동 [ $\Delta$ MVar]
HVDC #1	1	40.33	72.83	+32.50
	2	40.25	79.68	+39.43
	3	75.92	94.03	+18.11
	4	91.07	103.19	-12.12
HVDC #2	1	47.83	74.08	-26.25
	2	20.58	49.33	-28.75
	3	9.17	23.13	-13.96
	4	0	12.23	+12.23
신제주 STATCOM	1	-20.33	-33.16	-12.83
	2	-31.47	-8.45	+23.02
	3	-21.91	-17.28	+4.63
	4	-25.33	-2.2	-23.13
한라 STATCOM	1	-7.59	0.07	-7.66
	2	-5.63	16.51	+22.14
	3	-3.17	0.41	+6.34
	4	-9.89	-0.21	-9.68

HVDC #1의  $\Delta Q/\Delta P$ , 즉 P증감량에 따른 Q 증감량은 0.66~0.75사이이며, HVDC #2의 경우 0.46~0.55사이이다.[6] 이때 운전전압 160kV 기준으로 최소전압 158.7kV,  $\Delta V$ 는 2.23kV, 전압변동률은 1.41%로 발전소외에 STATCOM에서 실시간으로 무효전력을 보상하여 전력품질 유지기준에 만족하고 있다.

#### 4.2 계통 시뮬레이션

본 논문은 STATCOM이 계통 무효전력과 전압에 미치는 영향에 대해 중점을 두어 시뮬레이션에 사용한 데이터는 Fig. 5처럼 2013년 7월 29일 2초 간격 취득 데이터 중 7시부터 19시 사이 데이터를 1분 간격으로 샘플링하여 사용하였다. 그리고 case I, II로 나누어 11시부터 13시 사이 무효전력과 전압 변동을 살펴 보았다. case I은 한라 STATCOM이 탈락했을 때, case II는 한라, 신제주 STATCOM이 모두 탈락했을 때 상정사고를 수행했다.

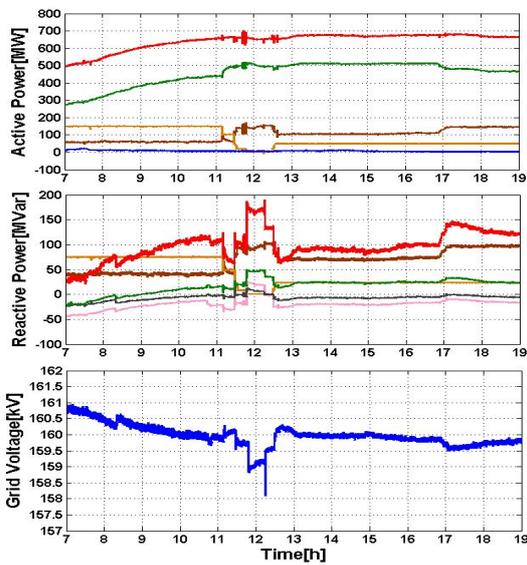


Fig. 5 The real data in Jul. 29th, 2013 7:00 to 19:00

무효전력의 경우 유효전력과 비슷한 패턴 갖고 HVDC #1, #2 출력이 교차하면서 무효전력 역시 크게 변동되는 것을 볼 수 있는데

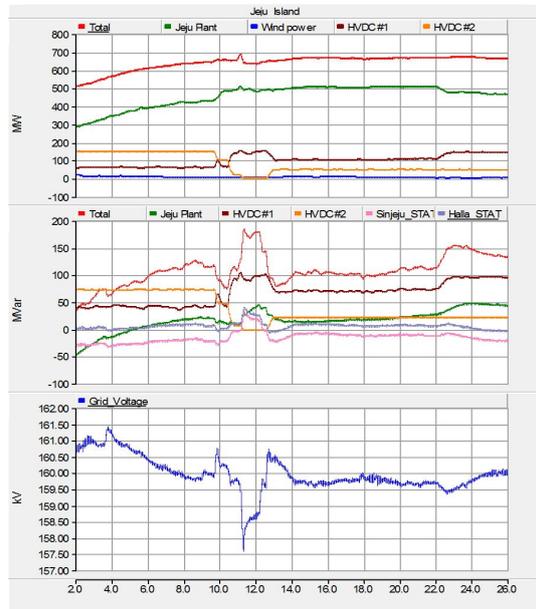


Fig. 6 Simulation results of based on actual data

Fig. 6은 7시 ~14시 동일 출력 데이터를 이용하여 PSCAD/EMTDC로 시뮬레이션한 유효 전력, 무효전력, 계통전압 파형이다. 실제 데이터와 유사한 결과가 나왔으며 최소전압은 실제 전압과 1kV 차이 나는 157.7kV이며, 전압변동률은 1.84%로 실제와 유사함을 확인할 수 있다.

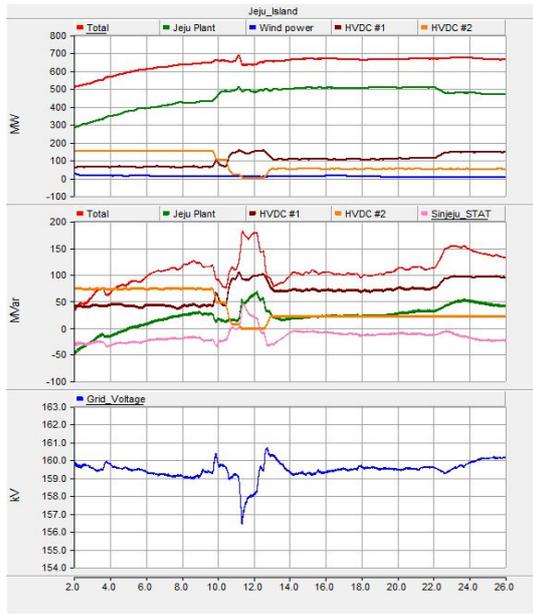


Fig. 7 Simulation result when Halla STATCOM is fault

#### 4.2.1 CASE I : 한라 STATCOM 탈락 시

Fig. 7은 한라 STATCOM이 탈락했을 때 결과이다. 유효전력의 경우 비슷한 결과가 나왔지만 무효전력 변동 시 화력발전소에서 더 많은 무효전력을 공급하고 있고 이때의 최소 전압은 156.4kV, 전압 변동률은 2.7%로 전압 변동이 더 큰 것을 알 수 있다.

#### 4.2.2 CASE II : 신제주, 한라 STATCOM 탈락 시

Fig. 8은 STATCOM 2기가 탈락했을 때의 결과이다. 유효전력 역시 동일하며 화력발전

에서 필요한 무효전력을 모두 공급해야 하므로 전압이 크게 변동하는 것을 볼 수 있다. 최소전압 154.3kV, 전압변동률 5.11%로 전력품질 유지기준에 의거한 전압 변동 범위인  $\pm 5\%$  안에 벗어남을 알 수 있다.

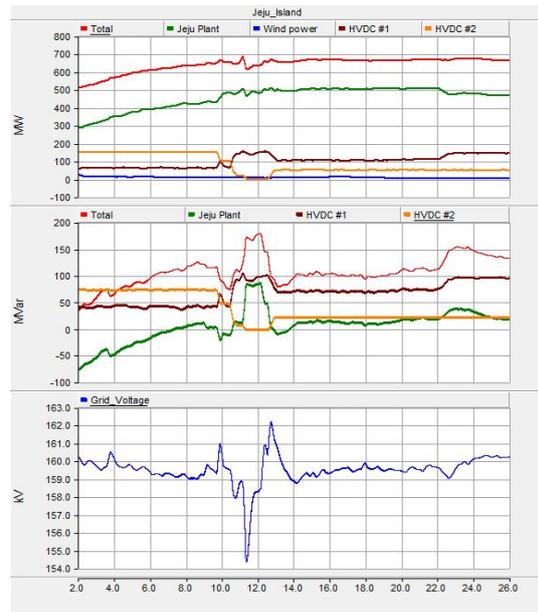


Fig. 8 Simulation results when Halla, Sinjeu STATCOMs are fault

Table. 3 Comparison of the results in real data and simulation outputs

	전압변동률	최소전압
실측	1.41 %	158.7 kV
컴퓨터해석	1.84 %	157.7 kV
CASE I	2.7 %	156.4 kV
CASE II	5.11 %	154.3 kV

Table. 3은 실측데이터와 컴퓨터 해석, 상정 사고를 비교한 표이다. STATCOM 사고 시 제주 계통 전압이 크게 변동되는 것을 알 수 있다. 제주지역은 매년 증가하는 부하에 따라 HVDC 출력량이 증가하고 있다. 실제 150MW

이상 출력하는 도중 탈락 할 경우에는 전압이 크게 흔들려 대규모 정전까지 이를 수 있다. 이를 막기 위해서 제주계통에 추가적인 STATCOM 설치가 필요 할 수 있다.

## 5. 결 론

본 논문은 2013년 7월 29일 기준으로 PSCAD/EMTDC로 제주계통을 모델링하고 계통에서 STATCOM의 영향에 대해서 시뮬레이션을 수행하였다.

실제 데이터와 시뮬레이션을 비교해본 결과 전압변동률은 0.43%, 전압 1kV 차이로 제주 계통 모델링의 신뢰성이 입증 되었다. 그리고 HVDC #1, 2 출력이 크게 변동할 때의 CASE I, II 상정 사고를 수행하였다. CASE I의 경우 전압변동률이 2.7%, CASE II의 경우 5.11%로 실제데이터와 비교하여 각각 1.29%, 3.7%정도 차이가 있었다. 그리고 최소 전압은 2.3kV, 4.4kV 차이가 있었다. 이는 STATCOM 탈락 시 제주 계통에 연결된 발전소에서 부족한 무효전력을 공급하기에는 제한되어 크게 변동하는 것으로 볼 수 있다.

시뮬레이션 결과 제주계통에 설치된 신제주·한라 STATCOM이 전압변동을 줄여 전력품질유지기준에 부합하는 것을 확인하였으며, 부하 증가에 따라 추가적인 STATCOM이 더 필요할 것으로 사료된다.

## 후 기

「This work was supported by the Expansion of the Type Testing Site for Wind Turbines (NO.2012T100201731) of the Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning(KETEP) grant funded by the Korea government Ministry of Trade, Industry and Energy.」

## Reference

1. Wu Shengyu, Zhang Xueming, Mei Shengwei, Effect of Sudden Increase of Dynamic Loads on Voltage Stability, Power System Technology and IEEE Power India Conference, Joint International Conference on, 2008, pp.1~8
2. G.Jang, S.Oh, B.M.Han, C.K.Kim, Novel reactive-power-compensation scheme for the Jeju-Haenam HVDC system, Trans. IEE Proc.-Gener. Vol 152, No.4, July. 2005
3. Sekoguchi.M, Konishi.H, Goto.M, Yokoyama. A, Qiang Lu, Nonlinear optimal control applied to STATCOM for power system stabilization, Trans. IEEE/PES. Vol 1, Oct. 2002, pp.342~347
4. Y.S Han, C.C Chung, J.S Park, S.M Yeo, J.Y Song, I.Y Suh, Installation of 50MVA STATCOMs in Jeju Power System, Trans. KPE Conference, July. 2010, pp.328~329
5. Jae-Hong Kim, Eel-Hwan Kim, Se-Ho Kim, Seong-Bo Oh, Choi. J, Modeling of Jeju island power grid system using PSCAD/EMTDC, Power Quality and Supply Reliability Conference, Aug. 2008. pp.119~124
6. Chan-Ki Kim, Young-Hun Kwon, Gilsoo Jang, New HVDC Interaction between AC network and HVDC Shunt Reactor on Jeju Converter Station, Power Engineering Society General Meeting, June. 2007.
7. PSCAD/EMTDC Manual, 2006