

## 제주-해남 HVDC 시스템에 STATCOM 적용 타당성 분석

백승택\*, 한병문\*\*, 장길수\*\*\*

\*명지대 차세대전력기술연구소, \*\*명지대 전기공학과, \*\*\*고려대 전기공학과

### Feasibility Analysis of STATCOM Application for Jeju-Haenam HVDC System

Seung-Taek Baek\*, Byung-Moon Han\*\*, Gil-Soo Jang\*\*\*

\*NPTC, Myongji Univ., \*\*Dept. Electrical Engineering Myongji Univ., \*\*\*Dept. Electrical Engineering, Korea Univ.

**Abstract** - This paper describes a feasibility analysis result of STATCOM application for the Jeju-Haenam HVDC system. The Jeju-Haenam HVDC system is one of the typical HVDC system interconnected with the low short-circuit-ratio AC system, which is vulnerable to the commutation failure due to the AC voltage variation. STATCOM has been considered as an effective reactive-power compensator to increase short-circuit-ratio of the interconnected AC system. In this study, a simulation model of Jeju-Haenam HVDC system with STATCOM was developed using PSCAD/EMTDC. The developed simulation model was utilized to analyze the dynamic performance analysis of Jeju-Haenam HVDC system with STATCOM. The analysis results show that STATCOM can improve the dynamic performance of Jeju-Haenam HVDC system, such as load-change recovery performance and fault recovery performance.

## 1. 서 론

HVDC 시스템에서 단락비(SCR: Short-Circuit Ratio)는 교류계통의 단락용량과 HVDC 시스템의 송전용량과 비율을 의미하는데, HVDC 시스템과 교류계통의 상호간 실현상은 이 단락비와 관계되어있다. 이 값이 3 이상인 경우 교류계통의 강인도가 높다고 하고 2.5 이하인 경우 강인도가 낮다고 한다. 또한 정상상태에서는 단락비가 높다고 하더라도 전송용량의 증대나 교류계통의 고장에 의해 일시적으로 단락비가 낮아질 수 있다.

저단락비 교류계통에 연계된 제주-해남 HVDC 시스템은 송전선로 고장 시 정류실패의 가능성이 크므로 이를 방지하기 위한 대책이 필요하다. 또한 인버터 단에서 순시전압변동을 억제하는 대책이 필요한데 이를 해결하기 위해서는 다양한 운전 조건하에서 안정적으로 무효전력을 공급하기 위한 적절한 방안이 요구된다. 특히 무효전력의 과도부족분을 공급하기 위해서는 연결점의 전압크기에 관계없이 보상이 가능하고 속응성이 우수한 무효전력보상기를 필요로 한다.

저단락비 교류계통에 연계된 HVDC 시스템에서 과도 무효전력을 보상하는데 사용가능한 보상기에는 동기조상기, SVC, STATCOM이 있다[1][2]. 동기조상기는 동기전동기와 동일한 구조로 무부하상태에서 여자전압을 제어하여 단자전압을 조절하여 무효전력을 공급하는데, 설비의 가격과 정비 및 유지비가 높으며 속응성이 낮은 점을 갖는다. SVC는 수동소자인 커패시터와 리액터에 사이리스터스위치를 결합하여 스위칭에 의해 무효전력을 조절하여 공급하는데, 설비의 가격과 정비 및 유지비가 동기조상기에 비해 낮고 속응성도 우수하나 연결점의 단자전압에 따라 보상영역이 제한되는 단점을 갖는다. STATCOM은 전압원인버터를 이용하여 동기조상기와

동일한 기능을 수행하며 회전부가 없고, 하드웨어 규모가 작고, 정비 및 유지비가 낮으며 속응성이 아주 우수하다. 따라서 과도무효전력을 교류 한주기 내에 제어하는 기능을 갖는다.

본 연구에서는 STATCOM에 의한 제주-해남 HVDC 시스템의 동적성능개선효과를 분석하기 위해 STATCOM을 포함한 제주-해남 HVDC 시스템의 PSCAD/EMTDC를 이용한 시뮬레이션 모델을 개발한다. 개발된 모델을 이용하여 전송무효전력의 급작스런 변동에 대한 무효전력의 과도보상특성을 분석하고 고장에서 회복될 때 계통이 요구하는 무효전력의 과도보상특성을 분석한다.

## 2. 본 론

### 2.1 제주-해남 HVDC 시스템

본 논문에서는 EMTDC를 이용하여 제주-해남 HVDC 시스템과 제주지역의 전 계통을 모델링하고 이를 분석하였다. 제주-해남 계통에 투입되어 있는 HVDC는 정격 300MW, 100km의 해저 케이블 선로를 가지며, 한 Pole 당 전압 150kV, 전류 833A의 Bipole 방식으로 구성되어 있다. 변환소 변압기는 용량이 188MVA이며 Y-Y- $\Delta$ 결선으로 되어 있고 각 변압기의 변압비는 154kV/79.3kV/79.3kV이다. 또한 전력 변환 과정에서 AC계통에 발생하는 고조파(11,13차)를 줄이기 위하여 해남측(렉티파이어)에는 27.5MVA용량의 필터와 무효전력 보상을 위한 27.5MVA의 커패시터 뱅크가 설치되어 있다. 제주(인버터)측에는 고조파 필터와 무효전력 보상을 위한 동기 조상기 2기가 설치되어 있으며 Y- $\Delta$ 변압기를 통하여 연결되어 있다. 컨버터에 설치된 싸이리스터는 하나의 밸브당 해남측에는 46개의 싸이리스터가 직렬로 연결되어 있으며 제주측에는 밸브당 48개의 싸이리스터가 직렬로 연결되어 있다[3]. 표 1은 제주-해남 HVDC 전력계통 데이터를 나타낸 것이고 그림 1은 제주-해남 HVDC 직류연계 계통도이다. 실제적인 HVDC 시스템의 안정성을 고려하여 150MW를 수전량의 기준으로 하고 있다.

표 1. 제주-해남 HVDC 전력계통 데이터

정격 DC 전압	$\pm 180\text{kV}$ (1 p.u)
정격 DC 전류	$\pm 833\text{A}$ (1 p.u)
정격 DC 전송전력	300 MW (2 pole)
변환소 변압기	삼상 188MVA (Y Y $\Delta$ )
필터	각 터미널 당 4개의 27.5kV, 154kV 필터
동기 조상기	인버터 변환소의 75MVA 2대

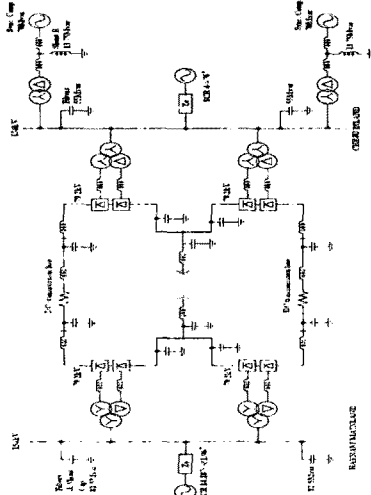


그림 1. 제주-해남 HVDC 전력계통 구성도

## 2.2 STATCOM과 SVC의 동특성 비교

그림 2는 STATCOM과 SVC의 단자전압과 보상전류의 특성을 하나의 V-I 곡선으로 나타내고 부하변동에 따른 단자전압의 변화를 부하선으로 표시한 것이다. 부하선 1은 보상기의 출력전류가 영일 때 정적전압에서 V-I 특성곡선과 교차하고, 부하선 2는 단자전압의 감소로 진상영역에서 V-I 특성곡선과 교차하며, 부하선 3은 단자전압의 증가로 지상영역에서 V-I 특성곡선과 교차한다. 부하선 2와 3이 수직축과 교차하는 점은 무보상시 단자전압의 변동을 나타내고 보상기의 V-I 특성곡선과 교차하는 점은 보상기의 단자전압을 나타낸다. 선형영역에서의 단자전압변동은 STATCOM과 SVC 모두 동일한 특성을 갖으나 단자전압의 변동이 커서 선형영역 밖에서 제어기가 동작할 경우 각 보상기는 전혀 다른 특성을 나타낸다.

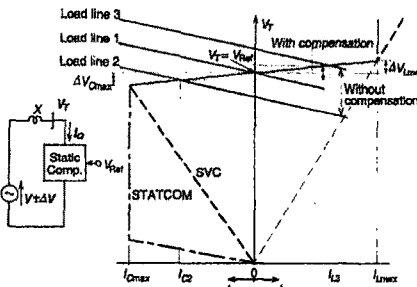


그림 2. STATCOM과 SVC의 V-I 특성곡선

정상동작영역에서의 보상기의 동적특성은 그림 3에 보인 시스템의 전달함수의 응답특성과 관계된다.

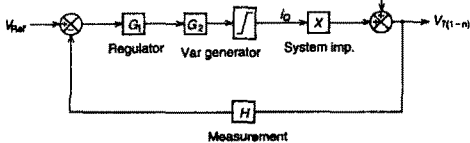


그림 3. 무효전력보상기의 전달함수 블록도

단자전압  $V_T$ 는 보상기의 선형동작영역에서 내부선압

$V$ 와 기준전압  $V_{Ref}$ 에 대해 다음 수식과 같이 표현 가능하다.

$$V_T = V_1 \frac{1}{1 + G_1 G_2 H X} + V_{Ref} \frac{G_1 G_2 X}{1 + G_1 G_2 H X} \quad (1)$$

제어의 목적은 단자전압이 시스템전압의 변동에 대해 적절히 조정되도록 하는 것이다. 만일  $\Delta V_{Ref}=0$ 이고 적은 변동만 가상한다면 시스템전압의 변동  $\Delta V$ 에 대한 단자전압의 변동  $\Delta V_T$ 는 다음 수식과 같이 표현된다.

$$\frac{\Delta V_T}{\Delta V} = \frac{1}{1 + G_1 G_2 H X} = \frac{1}{1 + G H X} \quad (2)$$

여기서,

$$G_1 = \frac{1/k}{1 + T_1 s} \quad (3)$$

$$G_2 = e^{-T_2 s} \quad (4)$$

$$G = G_1 G_2 = \frac{1/k}{1 + T_1 s} e^{-T_2 s} \quad (5)$$

$$H = \frac{1}{1 + T_2 s} \quad (6)$$

$T_1$ 은 PI 제어기의 시정수로 10-50ms 정도로 보상기의 전달지연상수에 의해 정해진다.  $T_2$ 는 크기 측정회로의 시정수로 약 8-16ms 정도이다.  $T_d$ 는 보상기의 전달지연상수로 SVC의 경우 2.5-5 ms 이고 STATCOM의 경우 0.5 ms 이다.  $X$ 는 전력회로의 리액턴스이고  $k$ 는 전압조정 기율기 상수로 대략 1-5% 이다.

그림 4는 SVC의 TCR과 TSC, 그리고 STATCOM의 인버터가 갖는 전달지연에 상수  $T_d$ 에 따라 제어전달함수  $e^{-T_d s}$ 의 주파수에 대한 위상각 변화를 나타낸 것이다. 이 그래프에서 알 수 있는 바와 같이 인버터로 구성된 STATCOM은 TCR과 TSC로 구성된 SVC에 비해 위상변이가 180°에 도달하는 주파수가 10배나 크므로 제어기의 안정도가 높아 외란에 강한 특성을 갖는다.

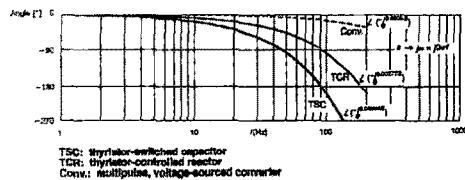


그림 4. SVC와 STATCOM의 위상-주파수 특성

이상에서 설명한 바와 같이 STATCOM의 전압조정 제어루프의 달성 가능한 응답시간과 밴드폭은 SVC의 값에 비해 대단히 빠르고 넓다. 전달지연 상수  $T_d$ 의 경우 STATCOM의 경우는 0.5ms 이나 SVC는 5.0ms 정도이다. 또한 STATCOM의 경우 제어의 밴드 폭이 넓어 고장이나 개폐기 조작에 의한 송전선로의 임피던스 변화에 대해 제어기의 안정 운용이 가능하다.

STATCOM의 적용 타당성을 검토할 때 고려할 다른 요소가 외형의 크기와 설치에 관련된 사항이다. STATCOM은 계통의 무효전력을 제어 할 뿐 아니라 동기조상기와 마찬가지로 자체적으로 발생한다. 따라서 SVC와 같이 무효전력을 직접 생성 또는 흡수하기 위한 커패시터뱅크, 공심리액터, 차단기 등을 요하지 않아 외형이 40-50% 이상 감소하는 장점을 갖는다. 따라서 지가 높은 지역에서는 설치면적의 감소에 따른 이득과 운용상 경제적 이득이 예상된다. 또한 설치 위치의 변경에 따른 이전도 용이하다.

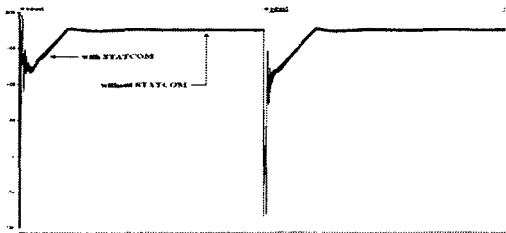
### 2.3 고장회복 과도해석

계통 사고시 STATCOM 설치로 인한 전압안정도 향상에 대한 분석을 하였다. 제주 계통중 제주TP와 동제주간 선로에 3상 지락사고가 0.1초 동안 발생했을 때 STATCOM이 설치되지 않았을 경우와 설치되었을 경우로 시뮬레이션을 실시하였다. 이 시뮬레이션 결과를 그림 5에 나타내었다. 시뮬레이션 결과에서도 알 수 있듯이 STATCOM이 설치된 경우가 계통의 전압안정도 측면에서 우수한 결과를 나타내고 있다. 표 2는 STATCOM 설치 전후의 제주 계통 각 154kV 모선의 전압을 나타낸 것이다.

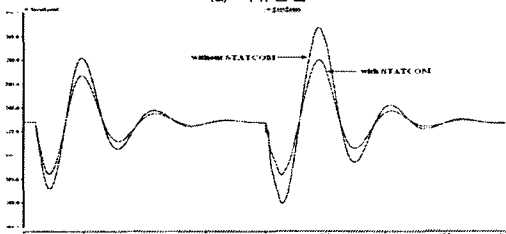
특히, 그림 5의 시뮬레이션 결과로부터 세 가지 성능 향상을 설명할 수 있다. 그림 6(c)는 제주 AC 계통의 120번 154kV 모선단 전압을 나타낸 것이다. 사고가 제거된 후 모선단의 정상적인 전압까지 도달하는 시간이 STATCOM을 설치했을 경우가 설치하지 않았을 경우보다 대략 두 배정도 빠른 것을 알 수가 있다. 이는 STATCOM이 계통의 과도안정도 성능이 우수하다는 것을 보여주고 있는 것이다. 또한 그림 6(d)는 STATCOM이 설치된 모선의 전압을 나타낸 것이다. STATCOM이 설치된 모선의 전압을 조절하는 자동전압제어를 수행하고 있기 때문에 STATCOM이 설치되지 않았을 경우보다 전압강하가 작게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 따라서 그림 6(b)와 같이 사고 제거 후 정상적인 계통 주파수로의 수렴이 STATCOM을 설치했을 경우가 더 빠르고 주파수 변동폭도 더 작은 것을 확인할 수가 있다.

표 2. 제주 AC 계통의 154kV 모선전압[p.u.]

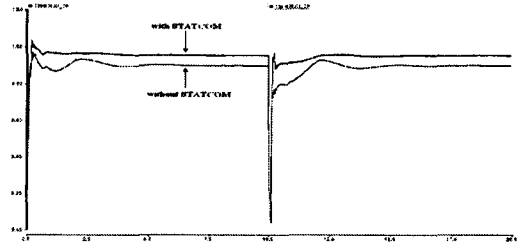
154kV 모선번호	without STATCOM	with STATCOM
120	0.9	0.95
121	0.9	0.95
160	0.89	0.94
140	0.89	0.94
150	0.89	0.94
170	0.89	0.94
180	0.89	0.94
190	0.89	0.94
121 C/S	0.89	0.94



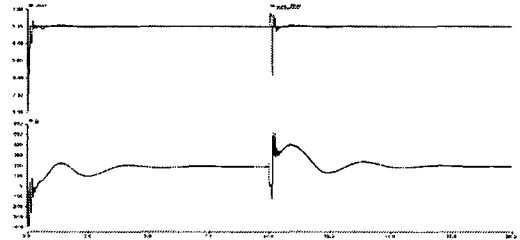
(a) 직류전압



(b) 계통주파수



(c) STATCOM이 설치된 120번 모선 전압의 RMS



(d) STATCOM의 모선전압 기준값과 실측값, 주입 무효전력  
그림 6. 제주 AC 계통 사고 분석

### 3. 결 론

본 연구에서는 저단락비 교류계통과 연계된 제주-해남 HVDC 시스템에서 동적성능개선을 위한 무효전력공급방안의 하나로 STATCOM을 설치하여 운용할 때 그 효과를 분석한 내용을 기술하였다.

본 연구에서는 동적성능 개선효과를 분석하기 위해 먼저 PSCAD/EMTDC를 이용해 STATCOM을 포함한 제주-해남 HVDC 시스템의 시뮬레이션 모델을 개발하였다. 개발된 모델을 이용하여 HVDC가 고장에서 회복될 때 계통이 요구하는 무효전력의 과도보상특성을 분석하였다.

시뮬레이션결과를 통하여 STATCOM은 고장회복 시 요구되는 과도무효전력을 신속하게 공급함으로써 저단락비 교류계통인 제주지역 교류계통의 주파수제어와 계통 전압 안정도에 대단히 유효함을 확인할 수 있었다.

#### 감사의 글

본 연구는 산업자원부 지원(과제번호 R-2002-0-242)에 의하여 이루어진 연구결과로서, 관계부처에 감사드립니다.

#### 참 고 문 헌

- [1] Y. Zhuang, R. W. Menzies, O. B. Nayak, and H. M. Turanli, "Dynamic performance of a STATCOM at an HVDC inverter feeding a very weak ac system," IEEE Trans. Power Delivery, vol. 11, pp. 958-964, Apr. 1996.
- [2] O. B. Nayak, A. M. Gole, D. G. Chapman, and J. B. Davies, "Dynamic performance of static and synchronous compensators at an HVDC inverter bus in a very weak ac system," IEEE Trans. Power Syst., vol. 9, pp. 1350-1358, Aug. 1994.
- [3] B. R. Andersen, J. L. Haddock, R. Burgess, and S. I. Kim, "Korean mainland to Cheju island HVDC link," Modern Power Systems, Apr. 1994.