

제주계통의 무효전력보상을 위한 SVC와 STATCOM의 운전특성 비교

The Comparison of Operating Characteristics of SVC and STATCOM for Compensating the Reactive Power in the Jeju Power System

이승민* · 김일환**† · 김호민*** · 오성보**** · 이도현*****
SEUNGMIN-LEE*, Eel-Hwan Kim**†, Ho Min Kim***, Sung-Bo Oh****
and DOHEON-LEE*****

(Received 4 May 2015; accepted 23 June 2015)

Abstract : This paper presents a comparative operating characteristics of static var compensator(SVC) and static synchronous compensator(STATCOM) for compensating the reactive power in the Jeju power system. There are two kinds of reactive power compensating systems, which are active and passive system in the applications of the line commutated converter type high voltage direct current (LCC-HVDC). In the Jeju power system, two STATCOMs as active compensating system have been operating. Even though STATCOM has good performance compared with SVC, economical efficiency of former system is not good to the latter system. So, it is necessary to examine the performance and economical efficiency depend on the intention before applying the system. To compare the operating characteristics of two systems in the Jeju power system, simulations have been carried out for case studies that both of the HVDC system have transient state by using PSCAD/EMTDC program.

Key Words : STATCOM(Static synchronous compensator), SVC(Static var compensator), LCC-HVDC(Line commutated converter type high voltage direct current), FACTS(Flexible AC transmission system)

**† 김일환(교신저자) : 제주대학교 전기공학과
E-mail : ehkim@jejunu.ac.kr, Tel : 064-754-3674
*이승민 : 제주대학교 풍력공학부
***김호민 : 제주대학교 풍력공학부
****오성보 : 제주대학교 전기공학과
*****이도현 : 제주대학교 풍력공학부

**† Eel-Hwan Kim(corresponding author) : Department of
Electrical Engineering, Jeju National University.
E-mail : ehkim@jejunu.ac.kr, Tel : 064-754-3674
*SEUNGMIN-LEE : Faculty of Wind Energy Engineering
Graduate School, Jeju National University.
***Ho Min Kim : Faculty of Wind Energy Engineering Graduate
School, Jeju National University.
****Sung-Bo Oh : Department of Electrical Engineering, Jeju
National University.
*****DOHEON-LEE : Faculty of Wind Energy Engineering
Graduate School, Jeju National University.

1. 서 론

최근 제주지역의 급속한 관광수요 증가로 인해 연평균 전력부하 증가율이 육지지방보다 높게 나타나고 있다. 뿐만 아니라 제주도가 의욕적으로 추진하고 있는 『Carbon Free Island by 2030』 계획에 따라 신재생에너지 설비 도입 또한 꾸준히 증가하는 추세이다. 이러한 추세에 대응하기 위해 정부에서는 2013년 제 2연계선을 완공하였으며, 이를 제주계통의 안정성 도모를 위해 운용하고 있다. 하지만 현재 제주도의 제 2연계선을 포함한 가동중인 모든 연계선은 전류형 타입으로서, 유효전력변동에 따라 무효전력 보상이 요구된다. 2010년 이전까지 제주계통의 무효전력 보상은 수동형 LC필터에 의해 수행되었으나, 이는 제주지역의 부하증가와 신재생에너지의 과도한 출력변동이 증가함에 따라 실시간 무효전력보상을 통한 계통의 전압 안정화에 많은 어려움이 있다. 이와 같은 문제를 해결하기 위해 속응성이 우수한 SVC나 STATCOM과 같은 FACTS(Flexible Alternating Current Transmission Systems) 설비가 활발하게 응용되고 있다. SVC와 STATCOM은 계통에 병렬로 연계되어 고속의 연속적인 무효전력 보상을 통해 모션전압을 제어한다. 또한 이를 통하여 과도안정도 향상, 전력동요 억제, 저주파진동 억제 등의 역할을 하게 된다.

SVC가 기존의 병렬 커패시터 및 리액터에 전력전자기술을 접목한 1세대 전력보상설비인데 반해, STATCOM은 전압원 인버터로 전압 제어를 수행하는 소형화 및 고성능화가 가능한 2세대 전력설비이다.¹⁾ 이에 따라, 제주지역의 부하 및 풍력발전설비 증가에 기인한 불규칙한 출력변동에 따른 계통의 전압안정도를 강화하기 위하여 2010년에는 신제주변전소와

한라변전소에 각각 50MVar규모의 STATCOM을 설치하여 운용하고 있다. 하지만 정밀도 부분에서 SVC가 STATCOM에 뒤지지만 경제성 부분에서는 앞서기 때문에 제어성능과 경제성을 종합 고려해 운용 목적에 가장 부합되는 설비를 선택할 필요가 있다.

따라서 본 논문에서는 제주계통에서 운용중인 STATCOM의 동특성을 실제 출력 데이터를 이용하여 분석하고 또한, PSCAD/EMTDC 프로그램을 이용하여 제주계통의 STATCOM을 SVC로 대체하여, 동일한 운전조건에서 무효전력 보상 및 전압 안정성을 비교·분석하고자 한다.

2. SVC 및 STATCOM의 제어원리

국내에서는 FACTS 설비 중에 SVC와 STATCOM이 주목을 받고 있다. 이러한 FACTS 설비는 무효전력을 보상하는 시스템으로서 대표적으로 1세대의 SVC 혹은, 2세대의 STATCOM이 사용되고 있다. SVC와 STATCOM은 제어방식 뿐만 아니라 과도시간에도 차이가 있다.²⁾

2.1 SVC

SVC는 전력용 반도체를 이용한 무효전력 보상설비로 대규모 전력망에 설치되어 계통전압의 안정성을 도모한다. SVC의 경우 설치비용이 적으며 유지비용 및 손실이 적은 장점이 있다.³⁾ SVC는 가변 리액터와 가변 커패시터를 병렬로 구성하며 사이리스터와 연결되어 있는 구조이며, 연속적으로 유연한 제어가 가능한 TCR(Thyristor Controlled Reactor)과 TSC(Thyristor Switched Capacitor)를 사용한다. SVC의 구조는 그림 1과 같다.

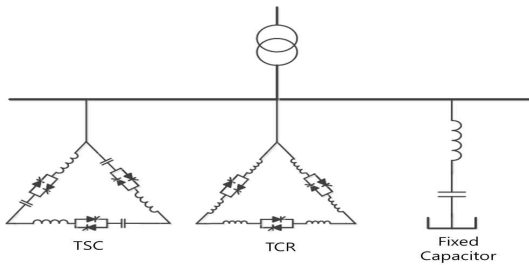


Fig. 1 Basic structure of SVC

2.1.1 SVC의 동작원리

SVC는 사이리스터를 이용하여 병렬로 구성된 리액터와 커패시터를 개폐시킴으로써 무효전력 및 전압을 제어한다. SVC는 모선전압의 변동을 감지하여 이에 대응하는 병렬 서셉턴스(Susceptance)를 변화시킴으로써 모선전압을 연속적으로 제어한다.²⁾ 기존 진상 무효전력 보상장치로 사용되는 전력용 커패시터(Shunt Capacitor)와 지상 무효전력 보상장치로 사용되는 병렬 리액터(Shunt Reactor)와는 다르게 SVC는 동기조상기와 비슷한 제어특성을 가진다. SVC의 전압 변동에 따른 V-I 특성은 그림 2와 같다. SVC가 연결된 모선의 전압이 V_0 로 운전되고 있을 때, 계통의 운전점 변화로 ΔV_0 만큼 전압이 증가되면 SVC는 모선의 전압을 감지하고 지상 전류 I_1 을 흐르게 하여 모선전압을 V_1 으로 이동시킨다. 이는 식 (1)과 같이 표현된다.⁴⁾

$$V_1 = (V_0 + \Delta V_0) - Z^* I_1 \quad (1)$$

모선 전압이 ΔV_0 만큼 감소하면, SVC는 진상 전류 I_2 을 흐르게 하여 모선 전압을 V_2 로 복구한다. 그러므로 SVC의 V-I특성 기울기인 Regulation Slope가 적으면 SVC에 흐르는 전류 변화를 더욱 증가시켜 더 큰 전압을 보

상하여 전압 변동을 적게 유지한다.

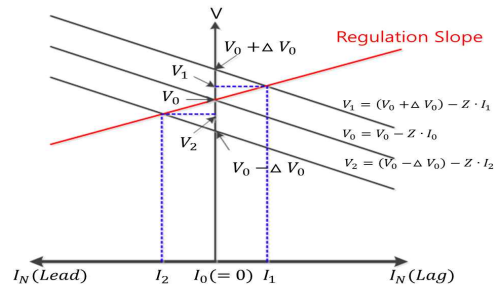


Fig. 2 V-I characteristic of SVC

2.2 STATCOM

STATCOM은 인버터, 계통연계 변압기, DC 커패시터 뱅크 등으로 구성된다. STATCOM은 SVC에 비해 설치비용이 높지만 다른 전력보상장치 보다 빠른 응답특성을 얻을 수 있으며 연속적인 무효전력 보상이 가능하다. 그림 3은 STATCOM의 시스템 구성도이다.

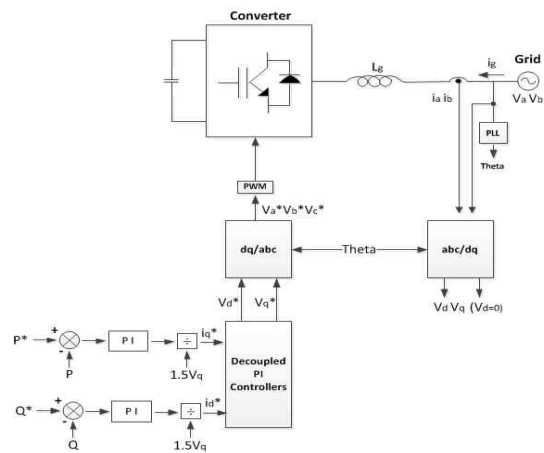


Fig. 3 Basic structure of STATCOM

2.2 STATCOM의 동작원리

STATCOM은 DC 커패시터 뱅크 양단의 직류 전압의 크기를 조정하여 무효전력을 보상한다. STATCOM의 전압보상에 대한 백터

도는 그림 4와 같으며, 인버터 출력전압 V_{inv} 와 모선전압 V_s 가 동일한 위상을 갖을 때, 인버터 출력전압 V_{inv} 가 V_s 보다 작다면 STATCOM은 계통으로부터 무효전력을 흡수하고, 인버터 출력전압 V_{inv} 이 모선전압 V_s 보다 크다면 무효전력을 공급한다. 또한 모선전압 V_s 가 모선전류 I_s 보다 뒤지게 되면 진상보상을 하여

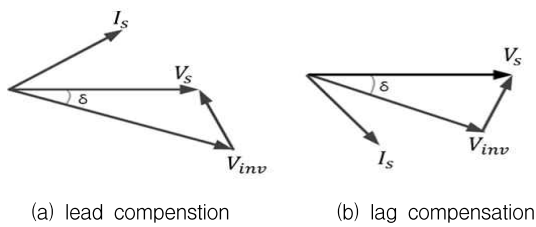


Fig. 4 Vector diagram of voltage and current

무효전력을 계통측으로 공급하게 되며, 모선전압 V_s 가 모선전류 I_s 보다 앞서면 지상 보

상을 하여 무효전력을 계통측으로 부터 흡수하게 된다.²⁾ 이와 같은 방식으로 리액터를 제어하여 DC 커패시터 뱅크의 전압의 크기를 조정하고, 인버터 출력전압의 위상을 변화시켜 무효전력을 보상한다.

3. 제주 전력계통의 모델링

제주계통은 크게 네 부분으로 구성된다. 첫째는 전원 공급원인 화력 발전소, 두 번째는 제주와 주계통 사이에 연계된 직류연계선, 셋째는 제주도처에 산재되어 있는 풍력발전원, 마지막으로 계통 부하이다. 본 논문에서는 STATCOM과 SVC의 무효전력제어에 따른 계통전압보상 특성을 정확하게 비교하기 위해서 제 2 연계선 LCC-HVDC의 가압시험이 있는 2013년 9월 18일을 기준으로 PSCAD/EMTDC 프로그램을 이용하여 제주계통을 모델링하였으며, 제주계통의 전반적인 구성은 그림 5와 같다.⁵⁾

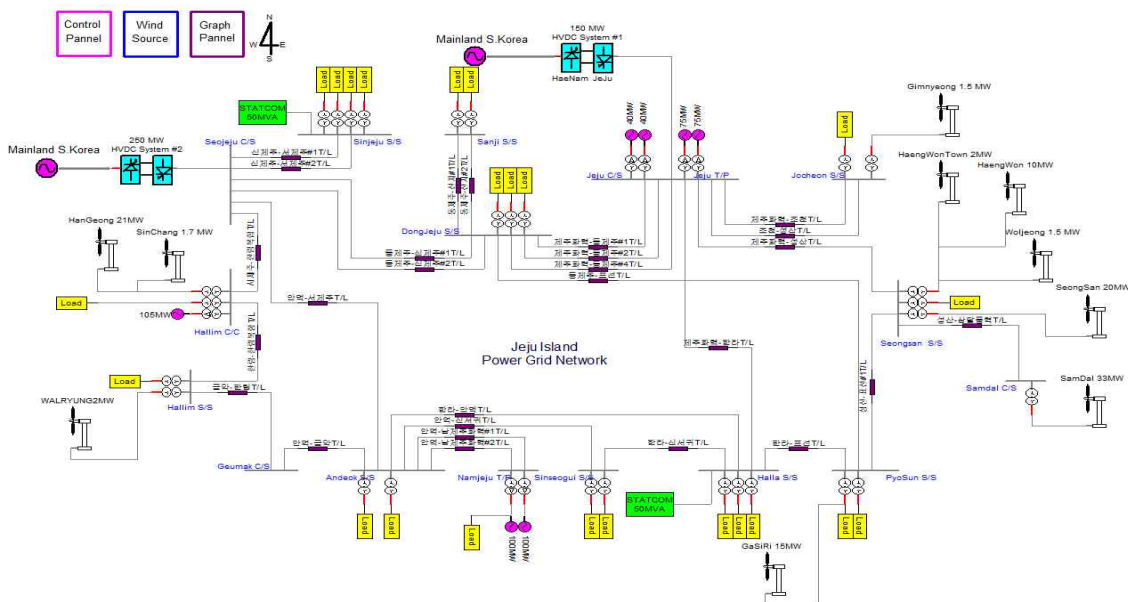


Fig. 5 PSCAD model of the Jeju power grid

3.1 발전소 모델링

발전소는 크게 스팀발전기와 가스발전기 그리고 디젤내연기관으로 구성되어 있다. 이는 그림 6과 같이 PSCAD/EMTDC 프로그램의 라이브러리를 이용하여 동기발전기, 여자기, 조속기로 구성되도록 모델링하였다. 제공되지 않는 요소는 제공되는 라이브러리에 가장 근접하게 등가화하여 해석을 하였다.⁶⁾

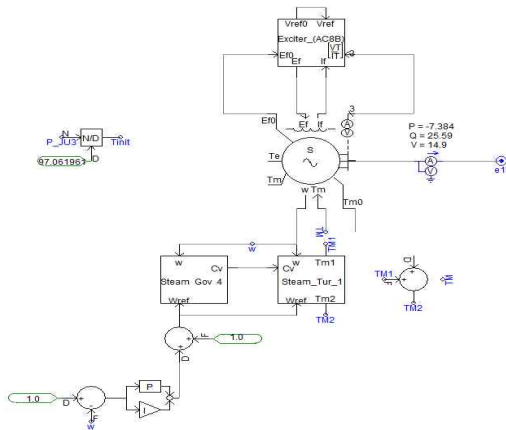


Fig. 6 PSCAD model of the thermal plant

3.2 풍력발전단지 모델링

풍력발전단지는 컴퓨터해석 시간의 단축을 위해 그림 7과 같이 전류원을 이용하여 출력 용량에 맞게 등가 모델화하였으며, 실제 풍력 출력을 공급하도록 하였다.

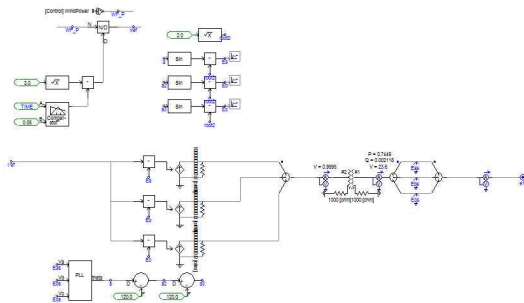


Fig. 7 PSCAD model of the wind farm

3.3 HVDC 모델링

제주계통의 LCC-HVDC는 컴퓨터해석 시간 및 전력조류 해석에 용이하도록 그림 8과 같이 전압원을 이용하여 출력 용량에 맞게 등가 모델화하였다.

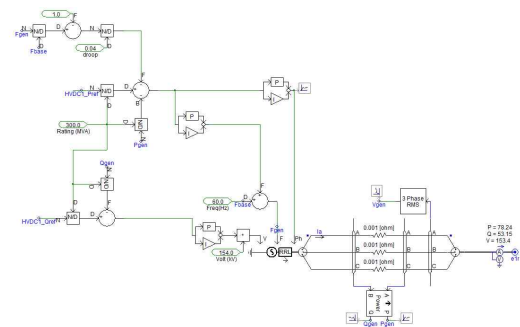


Fig. 8 PSCAD model of the HVDC system

3.4 STATCOM 모델링

제주 전력계통에는 신제주 변전소와 한라 변전소에 각각 50MVar의 용량을 갖는 STATCOM이 설치되어 있다. STATCOM은 그림 9와 같이 Main Transformer, Inverter Pole, DC Clamp, System Controller으로 구성되도록 모델링 하였다.

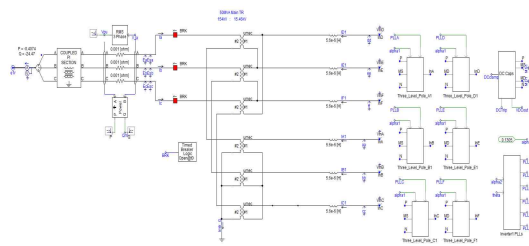


Fig. 9 PSCAD model of the STATCOM

3.5 SVC 모델링

SVC는 그림 10과 같이 PSCAD/EMTDC 프로그램내에 제공되는 라이브러리를 통해서 제주계통에 적합하도록 모델링하였다. 계통에

서 전압값과 무효전력값을 측정하고 Droop제어를 거쳐 전류 기준값을 얻게 된다. 이를 PI제어를 통해 TCR과 TSC에 신호를 주어서 무효전력의 흡·방출을 결정한다. 싸이리스터의 α 각은 90° 에서 180° 사이에서 게이팅을 주었으며 이를 통해서 무효전력 흡·방출의 양이 결정된다.

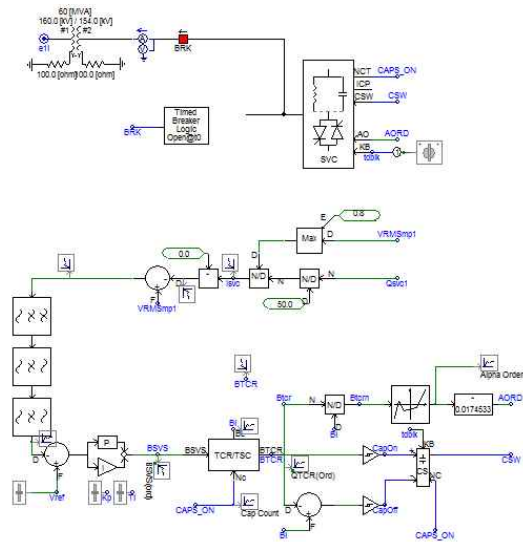


Fig. 10 PSCAD model of the SVC

4. 컴퓨터해석 결과

Table. 1 Real and simulation result data

	실제 출력 데이터	STATCOM 적용 시	SVC 적용 시
전압변동률	0.9 %	1.6 %	2.4 %
피크전압	161.1 kV	161.2 kV	161.9 kV
과도시간	36 min	25 min	28 min
비고	9월 18일 기준	9월 18일 기준	9월 18일 기준

표 1은 실제 출력 데이터에 의한 결과와 컴퓨터해석에 의한 LCC-HVDC 가압시험 순간에 발생하는 STATCOM과 SVC의 전압변동률, 과도시간 등의 결과를 나타낸다. 실측 데이터와 컴퓨터해석 결과를 통해 제주계통 모델링의

타당성을 입증하였으며, 이를 이용하여 SVC와 STATCOM의 동작특성을 비교하였다.

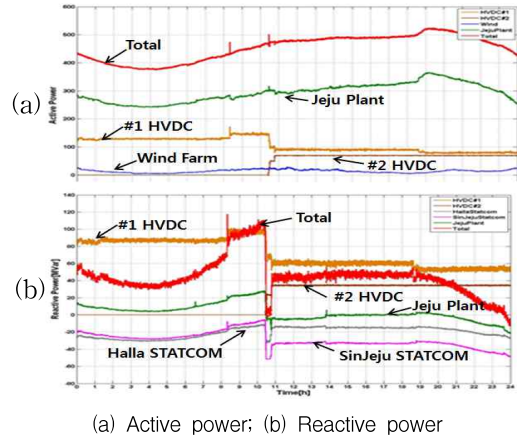


Fig. 11 Real data in the Jeju power grid.

그림 11-(a), (b)는 2013년 9월 18일 제주 계통의 실제 유효전력과 무효전력의 출력 데이터를 분석한 결과이다.

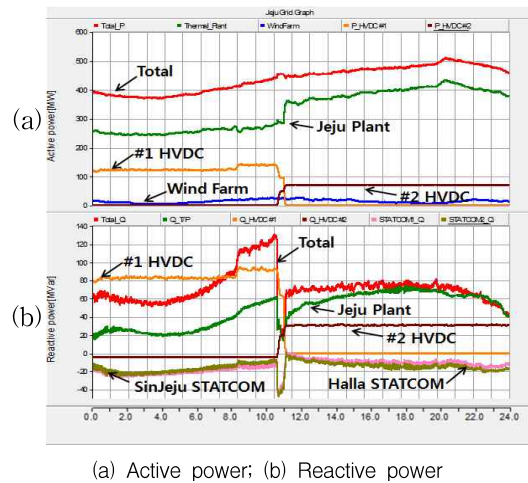


Fig. 12 Simulation results with two STATCOMs in the Jeju power grid.

그림 12는 그림 11과 같은 조건하에서 컴퓨터해석을 수행한 결과이다. 실제 제주계통 데

이터와 컴퓨터해석 결과를 비교·분석하면 두 결과가 매우 흡사함을 확인할 수 있다.

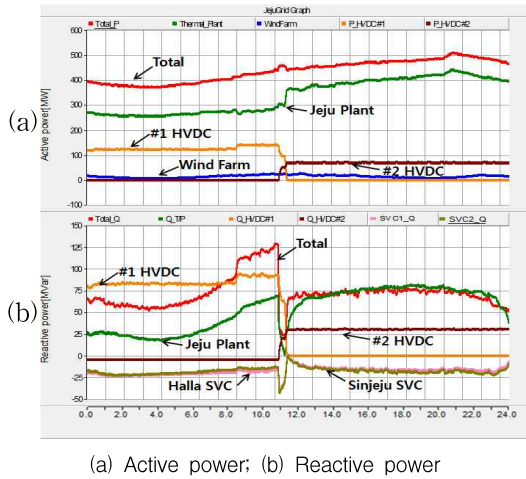


Fig. 13 Simulation results with two SVCs in the Jeju power grid.

그림 13은 제주계통의 무효전력 제어를 위해 새롭게 적용한 SVC에 대한 컴퓨터해석 결과이다. 제주 계통의 STATCOM이 설치되었을 때와 비교해 보았을 때, 흡사한 무효전력보상이 이루어짐을 확인할 수 있다.

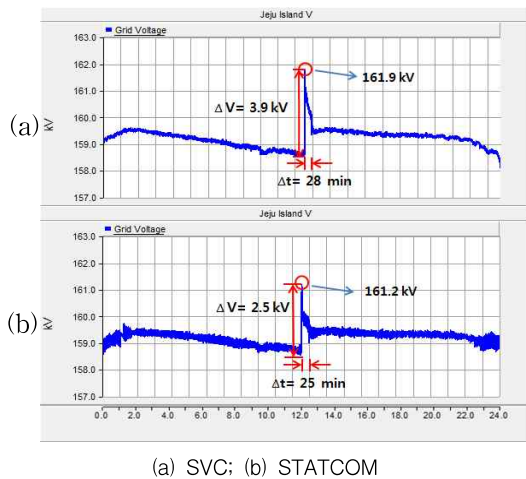


Fig. 14 Grid voltage with SVC and STATCOM.

그림 14-(a)는 제주계통에 STATCOM 설치 시이며, 그림 14-(b)는 SVC 설치 시에 대한 계통전압 결과이다. 컴퓨터해석 결과와 같이 LCC-HVDC의 가입시험이 발생할 때, STATCOM의 전압변동치와 전압변동률은 각각 2.5kV, 1.6%이며, SVC는 각각 3.9kV, 2.4%로 근소한 차이가 있다. 또한, 과도시간은 STATCOM이 약 3분 정도 적게 나타남을 확인할 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 고성능 무효전력 보상 설비로 주목받고 있는 STATCOM과 SVC를 제주계통에 적용하였을 때 나타나는 제주계통의 전압 안정도를 비교·분석하기 위하여 PSCAD/EMTDC 프로그램을 이용하여 제주계통을 모델링하였으며, 컴퓨터 해석을 진행하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 2013년 9월 18일 제주계통의 실제 출력 데이터와 제안한 제주계통 모델링을 이용한 컴퓨터해석 결과를 비교해보면 결과가 매우 흡사함을 확인할 수 있으며, 이를 이용하여 다양한 상황의 제주계통을 해석하는데 유용하리라 사료된다.
- (2) 제주계통의 동일한 운전조건하에서 STATCOM과 SVC의 동작 특성을 비교·분석하면 제주계통에서 운용되고 있는 LCC-HVDC와 같이 과도한 출력변동에 SVC보다는 STATCOM의 응답 특성이 양호함을 확인하였다.
- (3) 컴퓨터해석 결과와 같이 STATCOM이나 SVC의 응답에 있어서 과도시간이나 전압변동률은 약간의 차이가 있지만, 전력계통 신뢰도 및 전기품질 유지기준인 전압조정 목표 $\pm 4\text{kV}$ 이내로 모두 부합함을 확인하였다.

이상과 같은 결과를 종합해보면 과도시간에 크게 민감한 설비가 설치되어 있지 않을 경우, SVC 혹은 STATCOM을 채용하여 운용하여도 전압안정도에 큰 차이가 없을 것으로 여겨진다. 그러므로 무효전력 보상장치 선정 시 경제성 및 신뢰도 등에 대한 종합적인 검토를 통한 결정이 필요할 것으로 사료된다.

후 기

본 연구는 2012년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP) 풍력특성화대학원 인력양성사업(과제번호:20094020200020) 및 「풍력발전설비 평가용 실증단지 확장개발」 과제(과제번호:2012T100201731)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다.

Reference

1. Jong - Su Yoon, Yong -Hak Kim, Soo-Yeol Kim, Evaluation of Effects on Power System by Installing the Static Var Compensator, Transaction of the Korean Institute of Electrical Engineers, Vol. 59(7), pp. 1187-1193, 2010.
2. NARAIN G. HINGORANI, LASZLO GYUGYI, Understanding FACTS, IEEE Press, 2000.
3. Sang-Min Yeo, Hong-Ju Jung, Hyun-Jin Shin, Young-Seong Han, In-Young Suh, Chul-Hwan Kim, Modeling and Analysis for the Verification of Design and Performance of STATCOM/SVC using PSCAD, Transaction of the Korean Institute of Electrical Engineers, pp. 1020-1021, 2010.
4. Yun, Gwang Hee, Heejin Lee, A Study on Development of SVC to Improve Harmonics and Power Factor of Power Plant, Transaction of the Korean Institute of Electrical Engineers, Vol. 60(11), pp. 2109-2118, 2011.
5. Bo-seung Kang, Jae-Hong Kim, Eel-Hwan Kim, Se-Ho Kim, Seong-Bo Oh, Kiheouk Song, Power Quality Analysis of Jeju Power System during HVDC Overhaul using PSCAD/EMTDC, The Korean Institute of Power Electronics, pp. 82-84, 2008.
6. Report, IEEE Exciter Model Constans, GENERAL ELECTRIC COMPANY, 1997.