

조상설비 조합에 따른 정태적 특성 및 동태적 특성 비교

강상균, 장길수, 이병준, 권세혁
고려대학교

Dynamic Performance Comparison of various Combination of reactive power compensators

Sanggyun Kang, Gilsoo Jang, Byongjun Lee, Sae-hyuk Kwon
Korea University

Abstract - Flexible AC Transmission System (FACTS) can greatly reinforce power systems through improvement of power transmission capacity and utilization of equipment under the circumstance of continuous load growth and deregulation. SVC and STATCOM are shunt FACT devices that have similar static characteristics with Mechanical Switched Capacitor (MSC). The main issue of this paper is the analysis of different dynamic characteristics when STATCOM is solely adopted and when STATCOM is adopted with combination of other reactive power compensator such as SVC and MSC. Furthermore, better application of reactive power compensators can be clarified through analysis of dynamic characteristics of various combinations of reactive power compensators.

1. 서 론

지속적인 부하성장과 더불어 구조개편이 진행되는 상황에서 우리나라의 전력계통은 전력산업의 두 가지 측면인 공공성과 경제성 중에서 경제성 측면의 중요성이 강조하고 있다. 이는 필연적으로 전력계통의 안정성을 저해하는 요소로 작용하고 있다. 우리나라의 경우, 전원입지 부족에 따른 발전단의 편재현상, 부하중심지와 발전소간의 원격화 및 근본적인 복잡장류의 제약문제 등 여러 가지 계통운용 측면에서의 어려운 점을 가지고 있다. 유연송전 시스템(FACTS)은 전력 조류를 자유로이 조절함으로써 송전망 수송 능력과 설비 이용률을 향상시켜 전력 시스템을 안정하게 운영하는데 큰 도움이 될 수 있다. 대표적인 shunt FACTS 설비로 SVC, STATCOM이 있고 이 기기들은 특정 모선의 전압을 일정하게 유지시키는데 효과적이다. 어느 모선의 전압을 보상해주는 대표적인 기기로 MSC(Mechanical Switched Capacitor)가 있는데 이 기기는 SVC와 STATCOM과 같은 FACTS기와 정태적인 특성이 비슷하다. 어느 특정한 사고 발생시 계통의 안정도를 유지하기 위해 다양한 조상설비를 투입하게 되는데 이 논문에서는 다양한 조상설비를 투입함에 따른 동태적인 특성을 분석함으로써 경제성을 고려한 최적의 조상설비 투입 방안에 대하여 모색할 것이다.

2. 본 론

2.1 다양한 조상설비의 특성

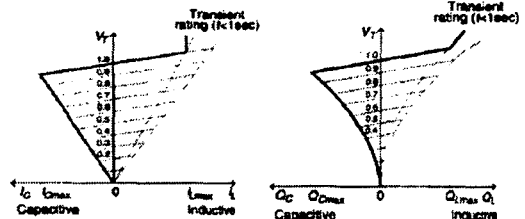
모선의 전압을 보상시켜주는 조상설비는 여러 가지가 있다. 본 논문에서는 여러 조상설비 중에서 커패시터, SVC(TCR, TSC), STATCOM에 대하여 고려하였다. SVC는 계통의 상태에 따라 사이리스터로 임피던스를 제어함으로써 계통의 전압을 일정하게 유지시켜준다. 따라서 정상상태에서 스위칭 동작을 고려하지 않는다면 단순히 계통에 커패시터나 리액터가 설치된 경우와 큰 차이가 없을 것이다. 임피던스를 제어하는 방식으로 전압

을 보상하는 경우 보상되는 무효전력 성분의 전류는 전압에 비례관계에 있다. 따라서 SVC의 용량의 한계나 다른 여러 이유로 모선의 전압이 기준 값보다 낮아지게 되는 경우 보상할 수 있는 무효전력의 용량은 전압의 제곱에 비례해서 감소하게 될 것이다. STATCOM은 dc 커패시터와 컨버터로 구성되는데 컨버터의 loss가 없다고 가정한다면 STATCOM은 전압의 크기에 상관없이 STATCOM의 출력전류 $I_{STATCOM}$ 은 일정하다. 따라서 fault 등과 같은 여러 이유로 모선의 전압이 떨어지게 되는 경우 STATCOM이 계통에 보상해주는 무효전력 Q_c 는 모선의 전압에 비례하여 감소하게 됨을 알 수 있다.

하지만 Steady-State 상태에서 단순한 passive 소자(커패시터, 리액터), SVC, STATCOM의 효과는 크게 차이가 나지 않을 것이다.

2.1.1 SVC의 특성 (TCR+TSC)

SVC의 출력전류는 전압에 비례하고 최대출력전류는 SVC의 정격에 의해 결정된다. 또한 SVC의 출력 MVar는 전압의 제곱에 비례한다[그림 1]. SVC의 출력이 0인 경우 손실은 매우 작고 cap. 출력이 증가할수록 step과 유사한 형태로 증가하고 ind. 출력이 증가할수록 손실은 증가한다. 고조파 발생이 상대적으로 낮은 편이지만 고조파 필터가 필요하다. 또한, 이론적으로 최대 지면은 1 사이클이다. 과도 과전압을 피하도록 커패시터를 스위칭 시킴으로써 과전압 문제를 해결 할 수 있다.



(a) V-I 특성곡선 (b) V-Q 특성곡선
그림 1. SVC의 V-I, V-Q 특성곡선

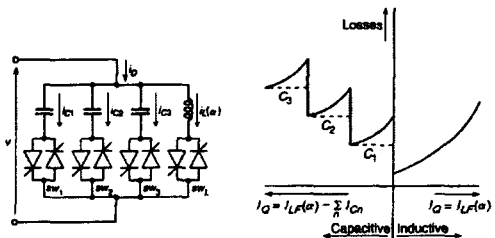


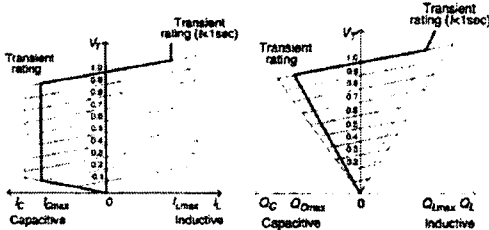
그림 2. SVC의 loss curve

2.1.2 STATCOM의 특성

STATCOM은 모선의 전압에 의존하지 않고 STATCOM의 정격 내에서 출력전류를 공급할 수 있다. 출력 용

량은 전압과 전류의 곱에 비해하고, 전류는 일정하기 때문에 출력용량은 전압에 비해한다.[그림 3]

STATCOM에 연결되어 있는 변압기에는 항상 고전압이 걸리기 때문에 발생하는 손실 및 snubber 회로의 손실, 도통시 컨버터에 걸리는 손실 등을 고려하면 STATCOM의 손실 곡선은 그림 4와 같이 될 것이다. 또한 multipulse, multilevel 컨버터를 이용함으로써 고조파의 발생을 최소화 할 수 있기 때문에, 고조파 필터가 필요하지 않다. 정적인 동작특성으로 지연은 거의 무시할 수 있다. 또한 낮은 임피던스 전압원을 사용하는 경우 transient를 완화시킨다.



(a) V-I 특성곡선 (b) V-Q 특성곡선
그림 3. STATCOM의 V-I, V-Q 특성곡선

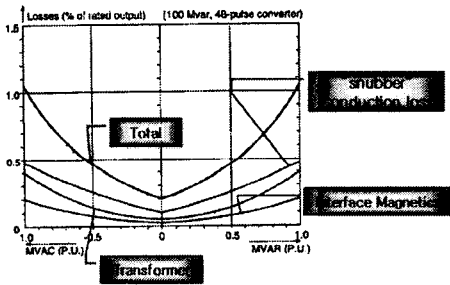
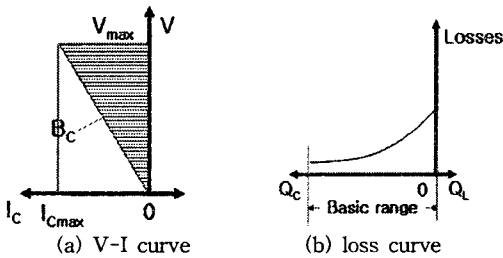


그림 4. STATCOM의 loss curve

2.1.3 TCR+FC의 특성

TCR(Thyristor Controlled Reactor)와 FC(Fixed Capacitor)를 1.0pu씩 조합해서 설치하는 경우 정적인 특성은 TSC와 매우 유사하다.[그림 5] 기기의 출력이 0인 경우 손실이 크지만 cap. out이 증가할수록 손실이 감소하고, ind. out이 증가할수록 손실이 증가한다. 또한 고조파 발생이 크기 때문에 고조파 필터가 필요하다. 이론적인 최대 지연은 1/2 사이클이고, 갑작스런 외란 발생시 FC는 과도과전압을 야기시키기 때문에 과도적인 동작특성은 좋지 않다.



(a) V-I curve (b) loss curve
그림 5. TCR+FC의 V-I, loss curve

2.1.4 TSC의 특성

TSC(Thyristor Controlled Capacitor)의 V-I, V-Q 특성 및 손실 곡선은 SVC의 capacitive 특성과 유사하다. 하지만 제어되는 리액터가 없기 때문에 연속적으로 Bc값을 제어할 수 없다. 그림 6(b)는 TSC의 손실곡선을 보여준다.

2.1.5 STATCOM+FC의 특성

그림 7은 STATCOM과 FC의 정적이 각각 0.5pu인 경우의 V-I 및 손실곡선을 보여준다. STATCOM이 1.0pu 설치된 경우와 비교시 cap. out에서의 특성은 유사하다. 사고 등으로 인하여 떨어진 전압을 보상시키기 위한 capacitive 출력이 기기투입 목적이라면 STATCOM과 STATCOM+FC의 큰 차이는 없을 것이다. 초기치 Q_{out} 이 0인 경우 STATCOM보다 손실이 더 많음을 확인할 수 있다.

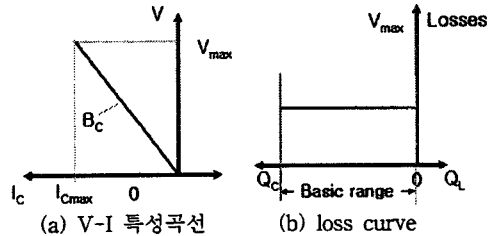


그림 6. TSC의 특성곡선

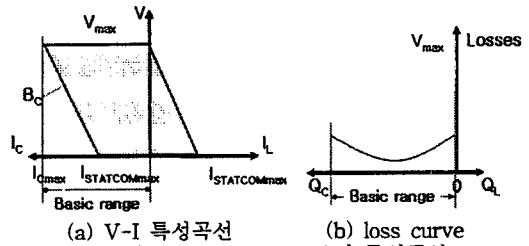


그림 7. STATCOM+FC의 특성곡선

2.1.6 STATCOM+TSC의 특성

STATCOM과 TSC를 각각 0.5pu씩 조합해서 설치하는 경우의 V-I 및 손실곡선은 그림 8과 같다.

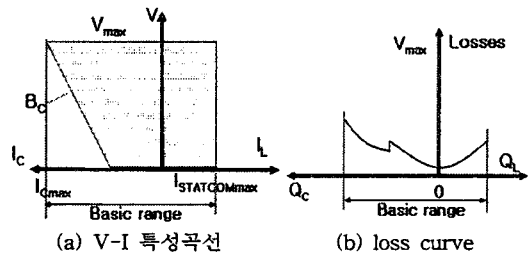


그림 8. STATCOM+TSC의 특성곡선

2.2 FACTS 기기의 Dynamic Performance

FACTS 기기의 전달함수의 블록 다이어그램은 그림 9와 같다. 조정 전압과 단자 전압과의 관계는 식 (2.1)과 같고, 시스템의 전압이 변함에 따라 터미널 전압이 얼마나 잘 제어되는가를 알아보기 위해 $V_{ref}=0$ 이라 하고 변화되는 전압이 충분히 작다고 하면 식 (2.2)와 같이 표현할 수 있다. T_1 과 T_d 는 무효전력보상기의 종류에 의해서 결정된다. 일반적으로 SVC는 STATCOM보다 동작속도가 훨씬 느리다. 또한 두 개의 다른 보상기기를 조합해서 설치하는 경우 transport lag는 더 늦게 동작하는 기기에 의해서 결정된다.

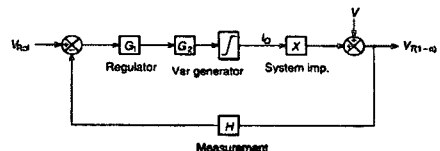


그림 9. Compensator의 전달함수 블록 다이어그램

$$V_r = V \frac{1}{1+G_1 G_2 H X} + V_{ref} \frac{G_2 X}{1+G_1 G_2 H X} \quad \dots\dots(2.1)$$

$$\frac{\Delta V_r}{\Delta V} = \frac{1}{1+G_1 G_2 H X} = \frac{1}{1+GHX} \quad \dots\dots(2.2)$$

$$G_1 = \frac{1/K}{1+T_1 s} \quad G_2 = e^{-T_d s}$$

$$H = \frac{1}{1+T_2 s}$$

- T₁ : PI controller의 time constant
- T₂ : measuring circuit의 time constant
- T_d : Var generator의 transport lag
- X : system 임피던스의 reactive 부분
- K : regulation slope

3. 사례연구

본 연구에서는 한전 첩두부하계통을 사용하였으며 부하모델은 한전 첩두부하계통 ZIP모델을 사용하였다.

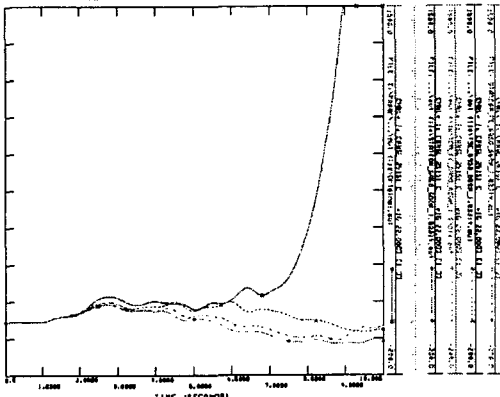
- 시뮬레이션 툴 : PSS/E Ver29
- 사고 유형 : 신안성-신서산 765kV route 사고
- 사고 지속시간 : 5cycle(0.08333sec)
- 조상설비 투입 위치 : 아산3 (6950)
- 계통의 spinning reserve : 1349.92 MW
- 사고시 탈락 발전기 : 당진 2기(#1, #2)
- 한전 첩두부하계통 ZIP 모델

구 분	Constant I	Constant G	Constant P
Real Power	13	35	52
Reactive Power	8	56	36

사고가 765kV 3상 2회선 지락사고이고, 이는 가혹한 상경사고 중의 하나이다. 조상설비를 투입하지 않고 모의한 결과 당진발전기군을 비롯하여 거의 모든 발전기가 발산을 하였다. 이 많은 발전기의 발산을 조상설비로 수렴시키는 것은 거의 불가능하기 때문에 계통의 운전 예비력을 고려하여 당진 발전기 2기(1000MW)를 탈락시켰다. FACTS기기 투입시 전압제어형으로 동작시켰으며, regulation 전압은 정상상태(Base Case)에서의 전압으로 하였다.(아산3의 경우 1.0331V_{pu}). 또한 시뮬레이션은 아무런 조상설비도 투입하지 않은 경우와 SVC는 ±600MVar, STATCOM은 600MVar TCR+FC는 각각 -600MVar와 600MVar, TSC는 600MVar, STATCOM+FC는 각각 300MVar와 300MVar를 투입한 경우로 나누어서 시뮬레이션을 실시하였다.

3.1 시뮬레이션 결과

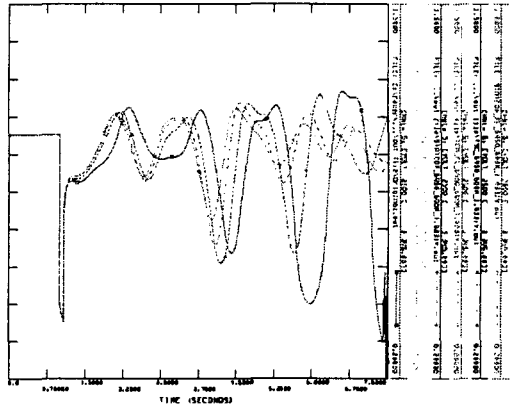
3.1.1 울진 1호기(25151)의 위상각



아무런 조상설비도 투입하지 않은 경우 위상각이 발산하였고, SVC, TCR+FC, TSC를 투입하는 경우 거의 유

사한 결과가 나왔으며, STATCOM+FC의 경우는 STATCOM과 비슷하지만 STATCOM만 투입한 경우가 조금 더 위상각을 잡아줌을 확인할 수 있었다.

3.1.1 동서울(2500) 전압



울진 1호기의 위상각과 마찬가지로 아무런 조상설비도 투입하지 않은 경우 damping이 부족하지만, SVC, TCR+FC의 경우 전압의 swing을 잡는 결과가 비슷하게 나왔으며, STATCOM+FC는 SVC보다 조금 더 나은 결과가 나왔고, STATCOM만 투입하는 경우 가장 뎀핑이 크다는 사실을 확인할하였다.

4. 결 론

위에서 모의한 사고는 지락사고이기 때문에 사고에 의해서 떨어지는 전압을 보상하기 위하여 조상설비의 cap. out이 필요하다. 따라서 시모의 결과는 2절에서 저전압에서의 cap. out의 특성에 따라서 performance가 결정되었다. 저전압에서 cap. out 특성은 STATCOM > STATCOM+FC > SVC=TCR+FC=TSC이고, 시모의 결과를 통해 확인할 수 있었다. 하지만 STATCOM+FC의 경우 정상적으로 운전하는 상황에서 STATCOM의 ind. out이 최대 출력되고 있기 때문에, 정상상태에서 STATCOM의 손실이 크다는 단점이 있다. 또한 PSS/E Ver29로 모의하였기 때문에 PSS/E가 갖는 time step의 한계로 인해 보다 정확한 결과를 얻는 데는 있으며, 보다 정확한 데이터 특성검토를 위해 전자기과도현상을 해석하는 프로그램을 이용한 연구를 수행중이다. 또한 투입한 FACTS기기의 파라미터 값과 실제 FACTS 장치와의 값에 차이가 있다. 하지만 실제통에서의 데이터와 데이터 특성 대략적으로 확인할 수 있었다. 보다 정확한 시뮬레이션을 위해서는 PSS/E급의 FACTS device의 모델링이나 파라미터 튜닝이 필요하다.

[참 고 문 헌]

- [1] Laszlo Gyugyi, "Converter-Based FACTS Controllers", IEE Colloquium, 23 Nov. 1998
- [2] Kimbark, E. W., "How to Improve System Stability without Risking Subsynchronous Resonance," IEEE Trans. PAS-96, no. 5, September/October 1977
- [3] Erinmez, I.A. and Foss, A. M., eds., "Static Synchronous Compensator(STATCOM)," Working Group 14.19, CIGRE Study Committee 14, Document No. 144, August 1999
- [4] Narain G. Hingorani, Laszlo Gyugyi, "Understanding FACTS", IEEE Press
- [5] Gyugyi, L., Taylor, E. R., "Characteristics of Static Thyristor. Controlled Shunt Compensators for Power Transmission system Applications," IEEE Trans. PAS, vol. PAS 99, no. 5, pp. 1795-1804, September/October 1980
- [6] Sen, K. K., "STATCOM-STATIC synchronous Compensator:Theory, Modeling, and Applications," 99WM706, Proceedings of IEEE/PES Winter Meeting, New York, 1999