

비용함수에 의한 직병렬보상장치의 과도안정도 향상 특성 비교

최 규형* 정 창용 오 태규
한국전기연구소

Comparative Study on Transient Stability Improving Capability of Series and Shunt Compensation

Kyu-hyoung Choi* Chang-yong Jeong Tae-kyoo Oh

KERI

Abstract - The objective of this paper is to compare the series and shunt approaches of controlled reactive power compensation to improve power system transient stabilities. Including main circuit considerations of series and shunt compensators, application aspects are thought to have major impacts on efficiency and economy of the installation of the compensators. The concept is studied by means of EMTP simulations on one machine-Infinite Bus Test System which consists of a 612MVA steam turbine generator and transformer and double circuit 345KV transmission line. Idealized dynamic models of Thyristor Controlled Series Compensation and Shunt Compensation are used for the comparative study of the series and shunt compensation approach to damp power system oscillations.

1. 서론

전력계통의 과도안정도향상을 위한 수단으로서 사이리스터 제어방식의 무효전력보상장치가 효과적으로, FACTS 개념의 핵심기술로 되어 있다. 이러한 무효전력보상장치는 직렬콘덴서에 의한 직렬보상방식과 SVC 또는 STATCON 과 같은 병렬보상방식으로 나눌 수 있다. 이 두가지 무효전력보상방식은 전력조류제어나 전압안정도제어등과 같은 적용분야가 틀리지만, 과도안정도향상 측면에서 봤을 때 직렬보상방식은 병렬보상에 비해 몇가지 유리한점이 있다. 즉, 무효전력보상장치에 의한 과도안정도향상효과는 송전선로에 흐르는 전력조류를 modulation 하여 발전기 토크를 제어함으로써 얻어지는데, 같은 기기 용량에 대해, 직렬보상방식이 transfer 임피던스를 더 많이 감소시킬수 있다. Kimpbark는 차단기 제어의 무효전력보상장치의 경우, 같은 효과를 얻기 위해 병렬보상장치가 3~6배 더 큰 기기용량이 필요하다고 보고하고 있다.[1][2] Angquist는 투입된 무효전력보상장치 용량당 가변시킬수 있는 전력조류modulation량의 비는, 직렬보상장치의 경우 1~2, 병렬보상장치의 경우 0.1~0.2 라고 보고하고 있다.[3]

본문에서는 직렬 및 병렬보상장치의 효율성 및 경제성에 대한 비교분석을 수행한다. 여기서, 각 보상장치의 효율성은 단위용량당의 제동효과로 나타낸다. 분석에 사용한 대상 계통은 345KV 선로를 통하여 대규모 계통에 전력을 공급하는 발전기군을 모의한 1기 무한대모선계통으로 하였다. 또한, 무효전력보상장치에 의한 전력계통의 과도안정도 제어 특성은

강한 비선형성을 지니고 있기 때문에, 정확한 제어특성해석 및 제어기 설계가 곤란하다. 이에따라, 본문에서는 무효전력보상장치의 과도안정도향상효과를 평가하기 위해 performance measure(cost function)를 도입하기로 한다. 이 방식은 계통의 선형화나 small signal approximation에 의존하지 않으면서도 최적의 제어parameter를 도출해낼수 있다는 점에서, 현실적인 방법이라고 할수 있다. 이와 같이 직렬보상장치 및 병렬보상장치는 이상적인 보상기로 작동하도록 tuning된 제이스킴을 적용함으로써, 무효전력보상방식의 고유효과를 비교하였다.

2. 직/병렬보상제어에 의한 과도안정도향상

과도안정도향상 효과 분석을 위해 사용된 직/병렬보상장치의 제어기를 그림1과 그림2에 보인다. 직병렬보상장치의 과도안정도특성은 사용하는 제어기에 따라 차이가 클수 있으므로, 여기서는 제어기의 특성차에 의한 과도안정도제어효과의 차이를 가능한 줄이고 직병렬보상장치의 단위용량당 과도안정도향상효과를 분석하기 위해 이상적인 제어기를 적용하였다. 제어기는 발전기 각속도편차를 입력으로 하여 시간지연요소와 washout filter를 거친 후 control gain K를 통하여 제어량을 출력한다. 제어입력으로는 계통동요에 대한 제동특성 향상이라는 측면에서 발전기의 각속도편차가 이상적이므로 이를 이용하였다. 제어출력은 직렬보상장치의 경우 직렬보상 리액턴스 변화량, 병렬보상장치의 경우 병렬 서셉턴스 변화량이며, 직/병렬보상장치의 최대용량에 따라 제어 출력의 크기를 제한한다.

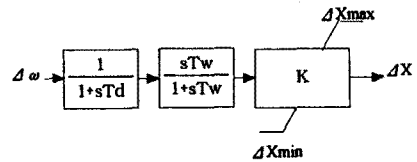


Fig.1 Series compensation control

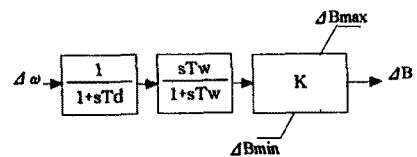


Fig. 2 Shunt compensation control

제어 파라미터의 변동에 따른 효과를 측정하고 시각적으로 나타냄으로서 최적 파라미터를 선정하기 위하여, 다음과과 같은 비용함수(Performance Measure)을 도입하였다.

$$C(K) = \frac{1}{1000000} \sum_{t=0}^{10sec} [P_{ss} - P(t, K)]^2$$

여기서

K : 제어기의 제어 이득

t : simulation time

P_{ss} : 정상상태에서의 발전기 출력

P(t,K) : 파라메터 K 경우의 시간 t에서의 발전기 출력

비용함수는 여러가지 제어 파라미터에 대해, 시스템의 정상상태로부터의 편차를 나타낸다. 이와 같이 비용함수를 선택함에 따라 계통동요에 대한 정량적인 평가지수로 이용할수 있다. 즉, 비용함수가 최소일때 시스템이 최적으로 조정된 것이 되며, 최적 구간에서의 비용함수 곡선의 기울기가 감도를 나타낸다. 비용함수는 0~10sec 동안의 시뮬레이션을 통하여 수치적으로 구하는데[4], 선별성을 높이기 위하여 동요초기의 변동분을 제외하고 5~10초 동안의 동요 후기의 전력변동분만을 포함하였다.

3. Simulation Study

직렬보상장치의 과도안정도 특성을 비교분석하기 위하여 사용한 Base Case System을 그림3에 보인다. 613MVA 발전기 4대를 1대를 모의한 발전기, 변압기 및 345KV 2회선 송전선 200Km를 통해서 무한대 모선에 접속된 1기무한대모선계통으로서, 발전기 관전정수는 표1과 같다. 상정사고로는 345KV 송전선 1회선에 3상단락사고가 발생하여 0.1초(6Hz)후에 차단기가 동작해서 고장선로가 분리되는 사고를 상정한다.

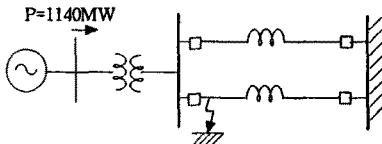


Fig. 3. Base Case System

Table 1 Base Case System Data

Generating Capacity		2452 MVA
Type of Generation		thermal
Generator	H=3.6	X _a =0.164
	X _d =1.86	X _q =1.81
	X _{d'} =0.282	X _{q'} =0.466
	X _{d''} =0.233	X _{q''} =0.233
	T _{do} '=5.8	T _{qo} '=1.2
	T _{do} ''=0.033	T _{qo} ''=0.054
Excitation		IET1S
Prime Mover		turbin regulator
Transformer	rating	2500 MVA
	reactance	15%
T/L	345KV 2 cct 200Km	

Fig. 4 는 TCSC에 의한 직렬보상방식을 적용한 계통으로서, 그림 1에 제시한 직렬보상제어기를 적용하며, TCSC는 선로 앞단에 설치한다. Fig. 5은 SVC에 의한 병렬보상방식을 적용한 계통으로서, 그림2에 제시한 제어기를 적용하며, SVC는 선로 중간점에 설치한다.

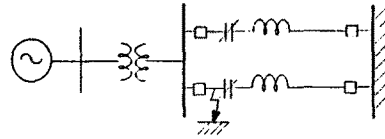


Fig. 4. System with Series Compensation

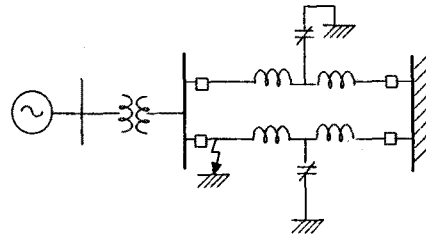


Fig. 5. System with Shunt Compensation

4. Simulation Results

Base Case System에서의 상정사고시의 발전기 angle 동요를 그림6에 보인다.

그림6과 같이 진동발산하는 계통에 대해, 직렬보상의 경우 그림1에 보이는 제어기를 갖는 TCSC를 기가용량기준으로 100MVA(1078μF) 적용한 결과 안정하게 계통이 유지되었다. 그림7은 TCSC 제어기의 control gain을 파라메터로 하여 performance measure를 시뮬레이션에 의해 도출한 것이다. 그림에서 control gain이 10~500 일 때 performance measure가 작게 나타나고, 비교적 넓은 범위에 걸쳐 감도가 낮음을 알수 있다. 제어기의 control gain이 50일때의 직렬보상계통의 전력동요곡선을 그림 8에 보인다.

병렬보상의 경우, 100MVA의 SVC를 적용하면 계통을 안정하게 유지할 수 있으나 그림9에 보이는 것처럼 100MVA의 직렬보상기를 적용한 경우에 비해 제동효과는 떨어진다. 그림 10은 병렬보상계통에서 100MVA, 200MVA, 300MVA의 SVC를 적용한 경우의 각각의 performance measure curve를 나타낸 것이다. 그림에서 100MVA TCSC를 적용한 경우와 비슷한 레벨의 계통동요 억제효과를 얻기 위해서는 200~

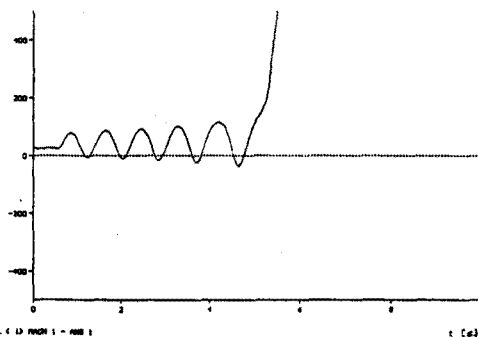


Fig. 6. Power swing curve for Base Case System

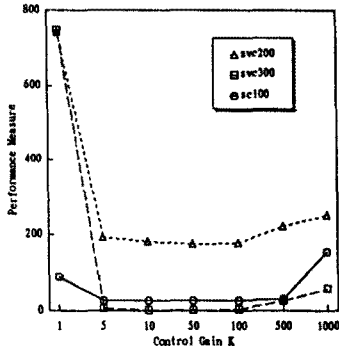


Fig. 7. Performance measure curve for series and shunt compensated system

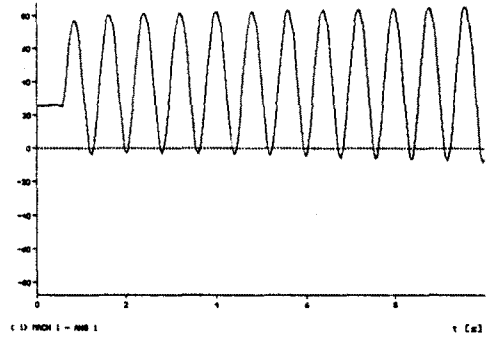


Fig. 9. Power swing curve for the system with 100MVA shunt compensation

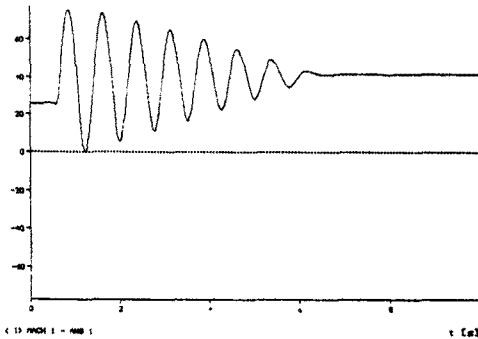


Fig. 8. Power swing curve for the system with 100MVA series compensation

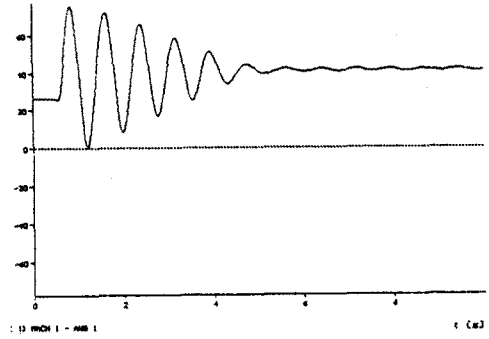


Fig. 10. Power swing curve for the system with 300MVA shunt compensation

300MVA의 SVC를 적용해야 함을 알 수 있다. 그림 11은 300MVA SVC를 적용한 경우의 계통동요곡선을 나타낸 것이다.

5. 결론

FACTS는 전력계통의 동요현상을 억제하는 데 크게 기여할 수 있다. 본 논문에서는 FACTS기기를 적용할 경우, 전력동요 억제효과로 나타나는 효율성과 전력계통을 안정화하는데 필요한 설비의 용량으로 나타나는 경제성을 체계적으로 비교하기 방법을 제시하였다. 또한 전력동요의 크기에 의해 산출되는 비용합수와 제어를 최적화하기 위한 방법론도 제시하였다. 345KV 2회선 송전선로로 구성된 1기 무한대모선 계통을 대상으로한 시뮬레이션 결과, 전력동요 억제 측면에서 직렬보상이 병렬보상에 비해 효과적이었다.

References

- [1] Kimbark, E. W.: Improvement of system stability by series capacitors, IEEE PAS(1966), Vol.PAS-85, No.2, pp.180-188
- [2] Vithayathil, J.J et al.,: Case Study of conventional and novel methods of reactive power control on an AC transmission system", CIGREE SC 3802, Paris 1988

- [3] Angquist, L et al.,: Power Oscillation Damping using Controlled Reactive Power Compensation-A Comparison
- [4] Dolan, P.S. : A Study of TCSC Optimal Damping Control Parameters for Different Operating Conditions, IEEE Trans. on Power Systems, Vol.10, No.4, 1995