

무효 전력 보상장치를 이용한 다기 계통의 주요 진동 모드에 관한 연구

권 세혁* 장 병훈** 노 규민*** 이 종석®
 * 고려대학교 전기공학과 ** 전력연구원 *** 충청전문대 전기과

A Study on the Dominant Oscillation Mode in the Multi-Machine System Using Static Var Compensator

S.H. Kwon* B.H. Chang** K.M. Rho*** J.S. Lee®
 * Korea University ** KEPRI *** Chungcheong College

Abstract

This paper addresses the small-signal stability and control problems associated with a Static Var Compensator and its power system stabilizer. The major emphasis is on determination of suitable location for SVC and stabilizer signal tuning through eigenvalues and frequency response techniques. To determine of suitable location for SVC, this paper used transfer function residues. Adequate oscillation damping is achieved by the use of stabilizing signals, designed through frequency response techniques and added to SVC. The study system is Benchmark System.

1. 서론

전력 계통을 효율적으로 운영하기 위해서는 계통의 전압을 일정하게 유지하고, 송전선에서의 손실을 최소화하여 최대의 전력을 부하단에 공급하여야 한다. 전력 계통에서 전압을 제어하기 위한 일반적인 방법으로는 발전기의 계자전류를 조절하기 위해 발전기에 여자기를 설치하여 발전기 단자의 전압을 제어하는 방법과 무효 전력 보상기(SVC) 등을 설치, 무효 전력 성분을 보상함으로써 모선 전압을 빠르게 제어하는 방법 등이 있다.

Static Var Compensator (SVC)는 전력 계통에서 dynamic voltage를 제공하고, electromechanical oscillation을 제동시키는 등의 효과가 있다. 계통 내에서 가장 적합한 SVC의 위치 결정과 SVC를 tuning하기 위해 더해지는 안정화 신호의 디자인에 관한 여러 방법들이 연구되어져 왔다.[1][2][3][6]

본 연구에서는 다기 계통에서 transfer function residues를 이용해 SVC의 적합한 위치를 결정하고, 적절한 제동을 위해 주파수 응답 기법을 사용하여 SVC를 tuning하는 안정화 신호를 디자인한다. 그리고 그에 대한 시스템의 영향을 보이기 위해 계통의 시간 응답을 구해 본다. 본 연구에서 사용한 다기 계통은 IEEE Benchmark System이며 브라질의 CEPTEL에서 만든 프로그램인 PACDYN V3.0을 사용하여 결과를 산출하였다.

2. Benchmark System

그림 1에 본 연구에서 사용한 AC/DC Benchmark System 을 나타내었다. 계통의 전체 data는 참고문헌[3]에 명시되어 있다. 이 시스템은 10개의 AC 모선과 6개의 여자기가 달린 발전기, 그리고 2개의 HVDC 컨버터를 포함한다. 각 발전기 및 여자기는 Kundur가 제시한 모델링방법에 따랐다.

표 1에 제어기를 포함하지 않았을 때 시스템의 주요 진동 모드 및 감쇄율, 그리고 그 고유치에 가장 영향을 많이 미치는 participation factor를 나타내었다.

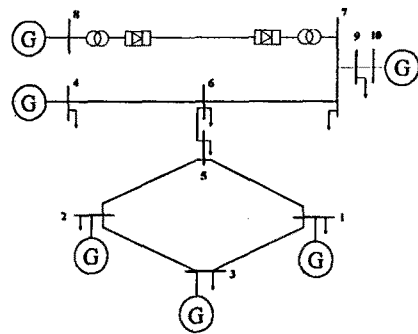


그림 1. AC/DC Benchmark System

표 1. 제어기를 포함하지 않았을 때 주요 진동 모드

고유치	damping ratio ζ (%)	maximum participation factor
$+0.450 \pm j3.488$	-12.78	G 10
$-0.240 \pm j5.605$	+4.28	G 3
$-1.805 \pm j9.195$	+19.26	G 2
$-2.019 \pm j9.173$	+21.49	G 1

그림 2는 제어기를 포함하지 않았을 때 4번 모선에 달린 발전기 여자기의 전압 reference에 +1%의 disturbance를 가했을 때의 step response 결과로서 4, 5, 6, 7, 8번 모선의 전압 크기를 나타낸 것이다. $\lambda = +0.450 \pm j3.488$ 의 불안정한 모드에 의해 반산 형태의 response가 일어난다.

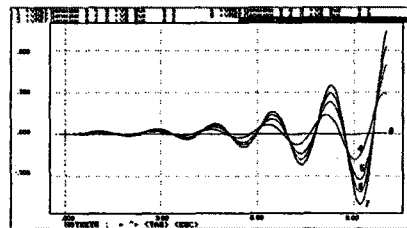


그림 2. 제어기를 포함하지 않았을 때 계통의 step response

3. Transfer Function Residues

transfer function residues는 특정 불안정한 모드를 제동하기 위한 가장 효과적인 dynamic component를 결정하고 계산하는데 필요하다.[4]

partial fraction한 전달 함수 $G(s)$ 에서

$$G(s) = \frac{R_1}{s-p_1} + \frac{R_2}{s-p_2} + \dots + \frac{R_n}{s-p_n}$$

R_i 를 p_i pole 에 대한 $G(s)$ 의 residues라 한다.

상태 방정식과 입출력 방정식

$$\Delta \dot{x} = A\Delta x + B\Delta u$$

$$\Delta y = C\Delta x + D\Delta u$$

에서 전달 함수는

$$G(s) = C\Phi [sI - A]^{-1}\Psi B \quad (\Phi, \Psi \text{ 는 eigenvector})$$

이고 여기서 residues는

$$R_i = C\varphi_i\psi_i B \quad (\varphi_i, \psi_i \text{ 는 eigenvector 의 elements})$$

의 형태로서 파라메터 a_i 에 대한 고유치의 영향을 나타내는 감도 계수의 식을 포함하고 있다. residues의 크기가 크다는 것은 그 파라메터가 고유치에 미치는 영향이 크다는 것을 나타낸다.[4]

4. The Nyquist Stability Criterion

일반 제어 공학에 나와 있는 Nyquist Criterion에 대해 간단히 설명하겠다. Nyquist Criterion은 개루프전달함수 (open-loop transfer function)의 극과 주파수 응답으로부터, 폐루프전달함수 (closed-loop transfer function)의 안정도를 평가한다. 개루프전달함수의 주파수 응답에 의해 구하여진 복소평면에서 (-1,0)점 주위를 회전하는 수를 N , 개루프전달함수의 불안정한 극의 수를 P , 폐루프전달함수의 불안정한 극의 수를 Z 라 하면

$$N = Z - P$$

인 식이 성립한다. 이에 의해 개루프전달함수의 극점 수가 P 개 일 때 복소평면에 사상된 곡선이 (-1,0)점 주위를 $-P$ 번 회전하면 폐루프 전달 함수의 불안정한 극이 우반면에 존재하지 않는다 ($\because Z=0$) 것이므로 시스템은 안정하게 된다.

5. 주파수 응답에 의한 PSS 디자인

그림 3에 PSS transfer function의 일반적인 블럭 다이어그램을 나타내었다.

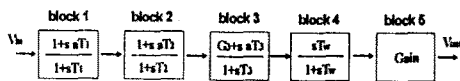


그림 3. PSS transfer function의 일반적인 블럭 다이어그램

여기서 블럭 4는 wash-out term을, 블럭 1~3은 phase-lead-lag term을 나타낸다. phase-lead-lag term에서 a 는 고주파 이득을 최소화하기 위하여 가능한한 작게 하는 것이 좋다. 최대 phase-lead angle (ϕ_{max})는 주파수 응답에서 불안정 모드 고유치 절대 값의 위치가 나타내는 각도로 잡는다. 이때 a 와 ϕ_{max} 는 다음의 관계에 있다.[5]

$$\phi_{max} = \sin^{-1} \left(\frac{a-1}{a+1} \right) \quad (1)$$

또한 최대 phase-lead angle이 주어질 경우 시정수 T 는 주파수 ω_{max} 에 의해 결정된다.[5]

$$\omega_{max} = \frac{1}{TVa} \quad (2)$$

그림 3의 phase-lead-lag term은 n 개의 블럭다이어그램으로 나타낼 수 있다. a 의 값이 너무 크면 고주파 영역에서 특성이 나빠지게 되는데 이때에는 phase-lead-lag term의 갯수를 늘리게 되면 a 의 값을 줄일 수 있다. n 개의 phase-lead-lag term이 있을 경우 (1)식은

$$\frac{\phi_{max}}{n} = \sin^{-1} \left(\frac{a-1}{a+1} \right) \quad (3)$$

과 같이 된다.[5][6]

또한 PSS gain은 Nyquist 선도에서 음의 실수축과 만나는 점에 의해 결정될 수 있는데 gain을 크게 할 경우 계통이 불안정해져서 oscillation이 생길 수 있으므로 적당한 값을 취하여야 한다.[6]

6. 사례 연구

6.1 SVC의 위치 결정

대기 계통에 SVC의 적합한 위치를 결정하기 위해서 3절에서 설명한 transfer function residues를 사용한다. 2절에 나타난 Benchmark 시스템에서 불안정 모드의 고유치 $\lambda = +0.450 \pm j3.488$ 에 대해 전달 함수 $\Delta V_b^i(s) / \Delta B_{var}^i(s)$ (i 는 모선)의 residues를 구해 보면 그림 4와 같다. $\Delta V_b^i(s)$ 와 $\Delta B_{var}^i(s)$ 는 모선 전압과 shunt admittance의 변화분을 나타낸다. 그림 4에서 residues의 크기가 가장 큰 6번 모선이 $\lambda = +0.450 \pm j3.488$ 의 불안정 모드를 제동하기 위해 SVC를 설치하는, 가장 적합한 위치임을 알 수 있다.

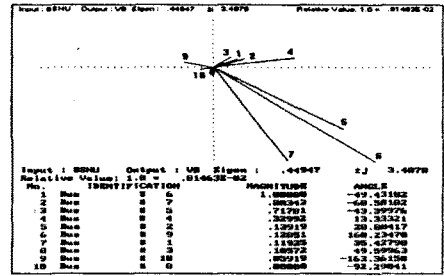


그림 4. 전달 함수 $\Delta V_b^i(s) / \Delta B_{var}^i(s)$ 에 대한 residues ($\lambda = +0.450 \pm j3.488$)

6.2 SVC의 투입

그림 5에 6번 모선에 투입되는 SVC 제어 블럭 다이어그램을 나타내었다.

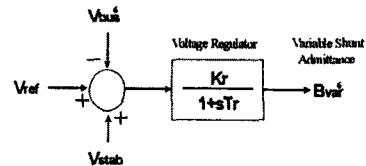


그림 5. SVC 제어 다이어그램

6번 모선에 투입되는 SVC의 각 정수값을 변화시켰을 때 주요 진동 모드 고유치를 다음의 표 2, 표 3에 나타내었다.

표 2. K_r 정수 변화에 의한 고유치의 형태 ($T_r = 0.05$ sec)

K_r	고유치	damping ratio ζ (%)
50	$0.28378 \pm j3.7557$	-7.53
70	$0.23360 \pm j3.8339$	-6.08
100	$0.16990 \pm j3.9305$	-4.32
150	$0.08818 \pm j4.0521$	-2.18
200	$0.02737 \pm j4.1407$	-0.66
250	$-0.01927 \pm j4.2077$	0.46

표 3. T_r 정수 변화에 의한 고유치의 형태 ($K_r = 150$)

T_r	고유치	damping ratio ζ (%)
0.01	$0.03534 \pm j4.0250$	-0.88
0.05	$0.08818 \pm j4.0521$	-2.18
0.10	$0.15762 \pm j4.0704$	-3.87
0.20	$0.28476 \pm j4.0615$	-6.99
0.30	$0.37770 \pm j4.0182$	-9.36
0.40	$0.43846 \pm j3.9659$	-10.99

여기서 K , 값을 증가시키는 경우 계동 특성이 개선되고, T , 을 증가시킬 경우 오히려 계동 특성이 나빠지는 것을 알 수 있다.

하지만 SVC 의 정수에 대한 고유치 감도 계수가 매우 작으므로 두 정수를 크게 변화시킨다고 해도 고유치에 미치는 영향은 미소하다.

$K_r=150$, $T_r=0.05$ 일 때 주요 진동 모드의 고유치와 step response를 표 4 와 그림 6에 각각 나타내었다.

표 4. SVC 투입시 주요 진동 모드

고유치	damping ratio ζ (%)	maximum participation factor
$-2.0192 \pm j9.1724$	21.5	
$-1.8062 \pm j9.1963$	19.3	G 5
$-0.1974 \pm j5.6676$	3.48	G 5
$0.0882 \pm j4.0521$	-2.18	G 5

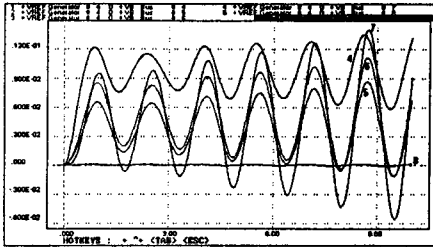


그림 6. SVC 투입시 step response

표 4와 그림 6에서 알 수 있듯이 계동의 안정도가 크게 개선되지는 않았다. 그러므로 SVC 에 적절한 안정화 신호로 tuning 할 필요가 있다. 다음절에서 이를 위한 PSS의 설계를 보인다.

6.3 PSS의 설계

그림 7에 SVC 투입시 전달 함수 $\Delta Freq^6(s) / \Delta V_{ref}^{mc}(s)$ 에 대한 Nyquist 선도를 나타내었다.

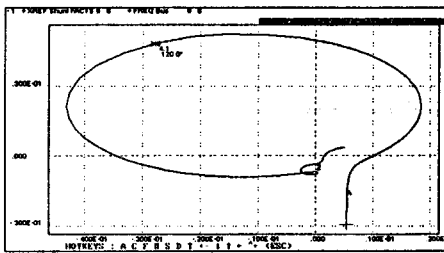


그림 7. $\Delta Freq^6(s) / \Delta V_{ref}^{mc}(s)$ 에 대한 Nyquist 선도 ($\lambda=0.0882 \pm j4.052$)

그림 7에서 불안정 모드 $\lambda=0.0882 \pm j4.052$ (critical frequency 4.1 rad/s)에 대해 5절의 내용에 따라 PSS를 설계해 보자. 그림 3의 PSS 블록의 phase-lead-lag term 에서,

$$\omega_{max}=4.1 \text{ rad/s}$$

그림 7에서 critical frequency 4.1 rad/s의 위상은 120° 이고 음의 허수 축으로 보상하기 위해 60°의 leading이 필요하다. 2개의 phase-lead-lag 블록을 설계해 보면,

$\phi_{max} = 60^\circ / 2 = 30^\circ$ 이고, 식 (3)에 의해 $a=3$ 이 된다. 이에 대한 시정수 T 는 식 (2)에 의해 $T=0.1408$ 이고 $aT=0.4220$ 이 된다. 계산된 값은 최대값이므로 시정수 $T=0.15$, $aT=0.42$ 로서 phase-lead-lag 블록을 구성하였다. 이에 대한 PSS 블록 다이어그램을 그림 8에 나타내었다.



그림 8. SVC tuning을 위한 PSS 블록 다이어그램

이에 의해 개선된 Nyquist 선도를 그림 9에 나타내었다.

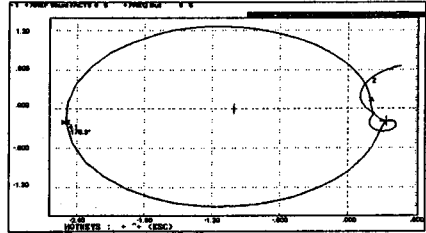


그림 9. 개선된 $\Delta V_{stab}^6(s) / \Delta V_{ref}^{mc}(s)$ 에 대한 Nyquist 선도

그림 9에서 보는 것과 같이 Nyquist 선도가 실수축과 만나는 점이 -2.5인데 이것으로 gain의 한계를 정할 수 있다. $15/2.5=6$ 이므로 gain은 6에서 무한대까지 증가시킬 수 있다. 하지만 gain을 크게 잡을 경우, 고주파 이득이 나빠지므로 가능한한 작게 하는 것이 좋다.

표 5에 SVC와 이를 tuning하는 PSS에 의해 계동된 주요 진동 모드의 고유치를 나타내었다. 그림 10에는 이에 대한 time response를 나타내었다. 그림 6과 비교하여 SVC를 tuning하는 PSS가 효과적으로 동작하고 있음을 알 수 있다.

표 5. SVC를 tuning하는 PSS 신호를 첨가하는 경우의 주요 진동 모드

고유치	damping ratio ζ (%)	maximum participation factor
$-2.3228 \pm j10.5003$	21.6	
$-1.9620 \pm j9.1709$	21.1	
$-1.7899 \pm j9.1284$	19.2	
$-0.3070 \pm j5.8067$	5.28	G 5
$-0.8111 \pm j4.2719$	18.7	G 4

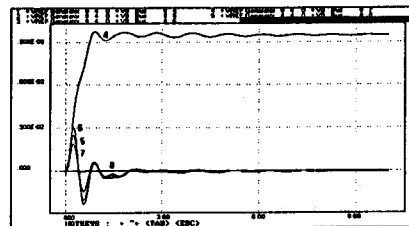


그림 10. SVC를 tuning하는 PSS 신호를 첨가하는 경우의 step response

6.4 발전기 여자기에 PSS를 설치한 경우와의 비교

본 연구에 사용된 Benchmark System의 발전기 여자기에 설치할 PSS를 디자인하여, 6.2, 6.3절에서처럼 SVC와 이를 tuning하는 PSS를 설치한 결과와 비교해 본다.

PSS를 설치할 가장 적합한 발전기를 결정하기 위해 3절에서 설명한 transfer function residues를 사용한다. 표 1에서 불안정한 모드의 고유치인 $\lambda=+0.450 \pm j3.488$ 에 대해 전달 함수 $\Delta \omega^i(s) / \Delta V_{ref}^i(s)$ (i 는 모션 번호)의 residues를 구해 보면 그림 11과 같다. $\Delta \omega^i(s)$ 와 $\Delta V_{ref}^i(s)$ 는 i 번째 모션의 발전기 회전

자 각속도와 AVR의 기준 전압을 나타낸다. 그림 11에 의해 4번 모선의 발전기에 PSS를 설치하여야 함을 알 수 있다. 10번 모선의 발전기는 그림 1에서와 같이 계통 전체 영역을 나타내므로 안정화 source로서는 바람직하지 않다.

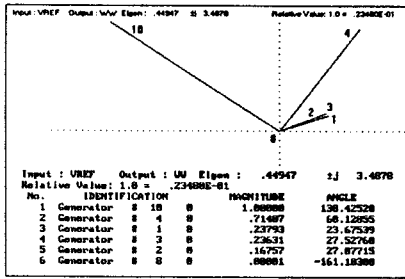


그림 11. 전달 함수 $\Delta\omega_i(s)/\Delta V_{ref}(s)$ 에 대한 residues ($\lambda = +0.450 \pm j3.488$)

그림 12에 전달 함수 $\Delta Freq^4(s)/\Delta V_{ref}(s)$ 에 대한 Nyquist 선도를 나타내었다. 이에 의해 6.3절에서 설명한 대로 a와 T의 값을 결정해서 그림 13과 같이 PSS를 설계하였다.

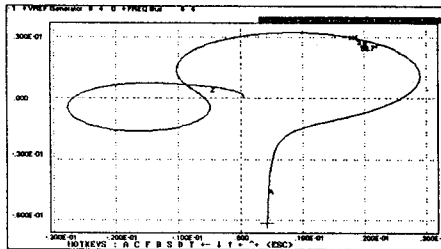


그림 12. 전달 함수 $\Delta Freq^4(s)/\Delta V_{ref}(s)$ 에 대한 Nyquist 선도

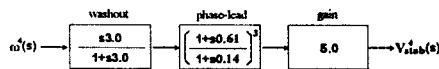


그림 13. 4번 모선의 발전기에 투입되는 PSS 블럭 다이어그램

설계된 PSS에 의해 제동된 주요 진동 모드의 고유치와 time response를 표 6과 그림 14에 각각 나타내었다. 그림 10과 비교해 보면 SVC와 이를 tuning하는 PSS를 설치하여 나타난 결과가 보다 효과적임을 알 수 있다.

표 6. 4번 모선의 발전기에 PSS를 설치한 경우 주요 진동 모드

고유치	damping ratio ζ (%)	maximum participation factor
$-1.3980 \pm j10.203$	13.57	G 3
$-2.0142 \pm j9.1613$	21.47	G 4
$-1.8189 \pm j9.1730$	19.45	G 4
$-0.61587 \pm j4.7805$	12.78	G 3
$-0.29446 \pm j3.5011$	8.78	G 4

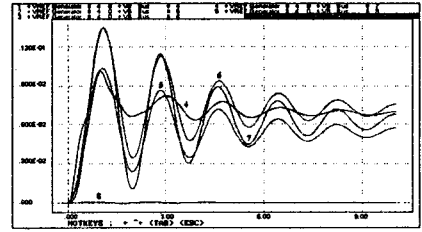


그림 14. 4번 모선의 발전기에 PSS를 설치한 경우의 time response

7. 결론

본 연구의 모든 결과는 PACDYN V3.0을 사용, 산출하였다. 참고문헌 [3]과 동일한 Benchmark 시스템의 DATA를 사용하여 얻어진 본 연구에서의 결론은 다음과 같다.

- (1) 대기 계통에서 SVC의 적합한 위치를 결정하기 위하여 transfer function residues를 사용하였다. 이는 고유치 감도 계수와 비슷한 개념으로 SVC뿐만 아니라 다른 제어기의 설치 위치를 결정하는데 효과적으로 사용할 수 있다.
- (2) SVC를 tuning하는 PSS블럭을 설계하기 위해 주파수 응답 기법을 사용하였다. Nyquist 선도에서 이를 위한 많은 정보를 얻어냈는데 이는 간단하고 효율적인 방법으로 평가된다.
- (3) SVC만 투입한 경우 시스템의 안정도에 미치는 영향은 그리 크지 않다. 이에 따라 SVC를 tuning하도록 PSS를 설계하였는데 매우 효과적으로 계통의 안정화에 영향을 미친다는 것을 알 수 있었다.

8. 참고문헌

- [1] N. Martins and L.T.G. Lima, "Determination of Suitable Location for Power System Stabilizers and Static VAR Compensators for Damping Electromechanical Oscillations in Large Scale Power Systems", IEEE Trans. on Power Systems. PWR5-5, No. 4, pp.1455~1469, 1990.
- [2] N. Martins, N.J.P. Macedo, L.T.G. Lima, and H.J.C.P. Pinto, "Control Strategies for Multiple Static VAR Compensator in Long Distance Voltage Supported Transmission Systems", IEEE Trans. on Power Systems. PWR5-8, No. 3, pp.1107~1117, 1993.
- [3] N. Martins, N.J.P. Macedo, A. Bianco, H.J.C.P. Pinto and L.T.G. Lima, "Proposal for a Benchmark System for Power System Oscillation Analysis and Control" Proceeding of Colloquium on Power System Dynamic Performance-CIGRE-SC38, Florianopolis, Brazil, September 1993.
- [4] P. Kundur, "Power System Stability and Control", McGraw-Hill, 1994.
- [5] P.M. Anderson and A.A. Fouad, "Power System Control and Stability", Iowa State University Press, Ames, Iowa, 1977.
- [6] N. Martins and L.T.G. Lima, "Eigenvalue and Frequency Domain Analysis of Small-Signal Electromechanical Stability Problems", IEEE Symposium on Application of Eigenanalysis and Frequency Domain Methods for System Dynamic Performance, publication 90 TH 0292-3 PWR, pp.17~33, 1989.
- [7] PACDYN User's Manual, V3.0, Oct. 1994.