

무효전력보상기를 이용한 미소신호안정도 개선방안에 관한 연구

이수현* 노규민** 김덕영*** 권세혁*

*고려대학교 전기전자전파공학부 **충청전문대 ***군산대학교

A Study on the Small-Signal Stability Improvement Method Using Static Var Compensator

Su-hyun Lee* Kyu-min Rho** Deok-young Kim*** Sae-hyuk Kwon*

*School of Electrical Engineering, Korea Univ. **Chung Cheong College ***Kun San Univ.

Abstract - This paper proposes an efficient algorithm of designing PSS and CSS. First, the stabilizer input variable is selected using the participation matrix. Secondly, the stabilizer constants are decided using first order eigenvalue sensitivity. The proposed method was validated to sample power system.

1. 서론

최근 들어 전력계통에 있어 무효전력보상기(SVC)의 사용이 늘어나고 있다. 이것은 무효전력보상이 경제적이면서도 전압제어, 계통안정도 유지 등에 큰 이점을 가지고 있기 때문이다. 그러나 SVC 설치의 주된 목적은 빠른 전압제어이기에 SVC 자체만으로는 계통의 진동모드의 제동이 효과적으로 이루어지지 않는다. 이 때문에 CSS(compensator stabilizer)에 대한 연구가 진행되어져 왔다. 계통의 진동모드를 효과적으로 제동하기 위하여 PSS와 CSS를 설계하는 알고리즘을 제안한다.

2. 수학적 모델

본 논문에서 다룬 1기 무한모선 계통은 그림 1과 같고, 동기기는 7차 비선형 모델이며, 여자계통 및 PSS는 그림 2와 같다. SVC는 그림 1과 같이 커패시터와, 싸이리스터 TH1, TH2의 점호각에 의해 제어되는 인덕터로 구성되어 있다. 이 계통의 상태행렬은 초기동작점 $P = 1$ pu, $Q = 0.25$ pu, $V_{\infty} = 1.20$ pu에서 선형화하여 얻었으며 이는 다음과 같다(본 논문에서는 time base로 $\frac{1}{120 \times \pi}$ sec를 사용하였으며, 따라서 $1\text{sec} = 120 \times \pi$ pu가 된다).

$$MX = -KX + V \quad (1)$$

$$\text{단, } X = \begin{bmatrix} \Delta i_d & \Delta i_F & \Delta i_D & \Delta i_q & \Delta i_Q & \Delta \omega \\ \Delta \delta & \Delta V_{ST} & \Delta E_{FD} & \Delta i_{Bd} & \Delta i_{Bq} & \Delta B_L \end{bmatrix}^T$$

CSS는 그림 3과 같으며 모델 각각의 비선형 식들과 정수들은 참고문헌 [1][2]를 참고한다.

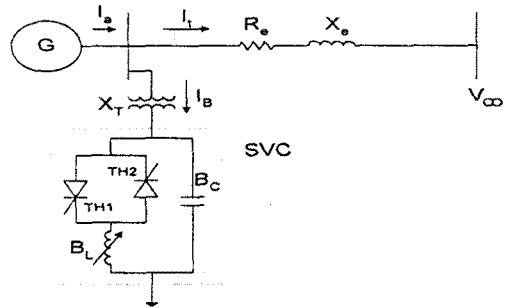


그림 1. 1기 무한모선 계통도

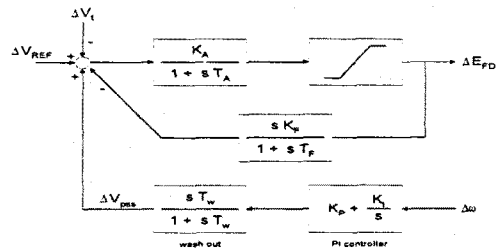


그림 2. 여자계통의 블록선도

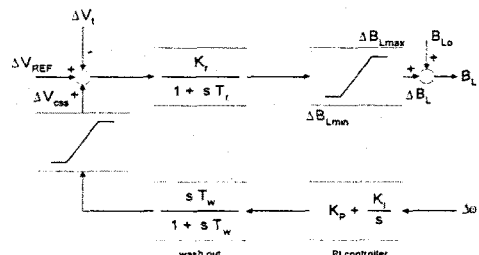


그림 3. CSS 블록선도

3. 안정기의 설계기법

3.1 Modal Matrix

i번째 고유치 λ_i 에 대해 다음의 (2)식과 (3)식을 만족하는 열벡터 ϕ_i 와 행벡터 ψ_i 를 각각 λ_i 에 관한 우고유벡터, 좌고유벡터라고 한다.

$$A\phi_i = \lambda_i\phi_i \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

$$\psi_i A = \lambda_i\psi_i \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

이 때 $\psi_i\phi_i = 1$ 이 되게끔 정규화하고 다음 (4)의 행렬을 정의한다[3].

$$\Phi = [\phi_1 \phi_2 \dots \phi_n] \quad (4)$$

$$\Psi = [\psi_1^T \psi_2^T \dots \psi_n^T]^T \quad (5)$$

여기서 Φ 를 행렬 A의 modal matrix라 하고, 고유벡터가 정규화되었으므로 $\Psi = \Phi^{-1}$ 이 성립한다.

3.2 참여행렬(participation matrix)

두 행렬의 같은 위치의 원소들끼리의 곱을 기호 \otimes 로 정의하면 참여 행렬 P는

$$P = \Phi \otimes \Psi^T = \Phi \otimes (\Phi^{-1})^T \quad (6)$$

로 정의된다[3]. 이 참여 행렬의 각 원소를 참여인자라 하며, P의 (i, j)원소 $p_{i,j}$ 는 j번째 고유치에 대한 i번째 상태변수의 상대적인 참여도이다. 따라서 가장 계동특성이 불량한 진동 모드가 k번째 고유치이고 상태변수가 n개라면

$$p_{m,k} = \max\{p_{i,k}\} \quad (\text{단, } i = 1, \dots, n) \quad (7)$$

인 m번째 상태변수를 안정기 입력으로 선정할 때 가장 효과적인 제어가 가능하다. 그러나 주의할 점은, m번째 상태변수의 다른 고유치에 대한 참여인자 역시 큰 값인 경우에는 m번째 상태변수는 안정기 입력으로 적절치 못하다는 점이다. 이것은 이 상태변수가 k번째 고유치 뿐만 아니라 다른 고유치에도 역시 높은 참여를 하고 있다는 것을 나타내고, 따라서 k번째 고유치는 복소평면에서 효과적으로 좌측으로 옮길 수 있지만, 또한 다른 고유치는 효과적으로 우측으로 옮길 가능성이 있다는 것을 의미하기 때문이다. 따라서 참여 행렬 P를 전체적으로 관찰하여 k번째 고유치에 대한 참여인자는 크고, 다른 고유치에 대한 참여인자는 상대적으로 작은 상태변수를 찾아서 이를 안정기의 입력변수로 선정하는 것이 바람직하다.

3.3 1차 고유치감도계수

(first order eigenvalue sensitivity)

(2)식을 임의의 변수 α 에 대해 편미분하면,

$$\frac{\partial A}{\partial \alpha} \phi_i + A \frac{\partial \phi_i}{\partial \alpha} = \frac{\partial \lambda_i}{\partial \alpha} \phi_i + \lambda_i \frac{\partial \phi_i}{\partial \alpha} \quad (8)$$

이 되고 이 식의 양변 좌측에 좌고유벡터 ψ_i 를 곱하면 $\psi_i\phi_i = 1$, $\psi_i(A - \lambda_i I) = 0$ 이므로, 변수 α 에 대한 고유치 λ_i 의 감도계수는 다음과 같이 정의

된다[4].

$$\frac{\partial \lambda_i}{\partial \alpha} = \psi_i \frac{\partial A}{\partial \alpha} \phi_i \quad (9)$$

여기서 $A = -M^{-1}K$ 인 경우에는 $M^{-1}M = I$ 이므로 $\frac{\partial A}{\partial \alpha}$ 는 (10)식으로부터 구할 수 있다.

$$\frac{\partial A}{\partial \alpha} = \frac{\partial(-M^{-1}K)}{\partial \alpha} = M^{-1} \frac{\partial M}{\partial \alpha} M^{-1}K - M^{-1} \frac{\partial K}{\partial \alpha} \quad (10)$$

만약 안정기 정수가 α 이고, $real(\frac{\partial \lambda_i}{\partial \alpha}) \leq 0$ 이면 α 를 양수 $\Delta\alpha$ 만큼 미소변화시켰을 때 고유치는 $\Delta\alpha \cdot real(\frac{\partial \lambda_i}{\partial \alpha})$ 의 크기만큼 좌측으로 움직이게 된다. 허수축 방향의 움직임은 고려치 않았다.

3.4 안정기 설계의 알고리즘

Step 1. 계통상태행렬 A를 구성하고 그 참여행렬 P를 계산한다.

Step 2. 참여행렬 P에 따라 안정기 입력 변수를 선정한다.

Step 3. 안정기정수의 초기값($\alpha_{j(0)}$)을 설정한다.

Step 4. 계통상태행렬 A를 재구성한다.

Step 5. 고유치(λ_i), 고유벡터(ϕ_i, ψ_i), 1차고유

치감도계수($\frac{\partial \lambda_i}{\partial \alpha_j}$)를 계산한다.

Step 6. 제약식하에서 중요진동모드의 실수부를 최소화하는 목적함수를 수행한다(LP program 이용).

· 목적함수

$$\text{Minimize } F = \sum_j Re \left[\frac{\partial \lambda_d}{\partial \alpha_j} \Delta \alpha_j \right]$$

· 제약식

$$1 : - \left| \frac{\alpha_{j(0)}}{10} \right| \leq \Delta \alpha_j \leq \left| \frac{\alpha_{j(0)}}{10} \right|$$

$$2 : Re \left[\lambda_{k(0)} + \sum_j \frac{\partial \lambda_i}{\partial \alpha_j} \Delta \alpha_j \right] \leq 0, (i=1, \dots, n)$$

Step 7. 종료조건에 만족하면 알고리즘을 끝내고, 그렇지 않으면 변수중분을 실행하여 Step 4로 복귀한다.

· 종료조건

$$|\Delta \alpha_j| \leq 10^{-4} \quad (j=1, \dots, m)$$

· 변수중분

$$\alpha_j = \alpha_{j(0)} + \Delta \alpha_j$$

4. 사례연구

SVC 설치 전 계통의 고유치와 설치 후 계통의 고유치를 표 1에 각각 나타내었다.

표 1. SVC 설치 전후의 계통의 고유치

SVC설치 전	SVC설치 후
	-11.104 ± 377.736i
-13.549 ± 376.336i	- 5.957 ± 374.741i
- 6.884 ± 20.536i	-42.403 ± 47.957i
- 0.134 ± 10.638i	- 0.380 ± 10.527i
-45.990 ± 1.620i	-33.499
-1.001	-29.008
	-1.939
	-1.016

이들 고유치로부터 SVC설치만으로 계통 진동모드를 상당히 안정화시킨다는 것을 알 수 있다. 그러나 진동모드를 보다 더 효과적으로 안정시키려면 PSS나 CSS의 설치가 필요하며, 이를 위하여 우선 참여행렬 P를 구하였다(표 2).

표 2. SVC를 설치하였을 때의 참여행렬

P의 7,8번째 열		P의 1번째 행		P의 6번째 행	
Δi_d	0.9800	λ_1	3.1251	λ_1	0.0002
Δi_F	0.9157	λ_2	3.1251	λ_2	0.0002
Δi_D	0.1832	λ_3	2.0113	λ_3	0.0004
Δi_q	0.0274	λ_4	2.0113	λ_4	0.0004
Δi_Q	0.0180	λ_5	1.1614	λ_5	0.0019
$\Delta \omega$	0.5095	λ_6	1.1614	λ_6	0.0019
$\Delta \delta$	0.5122	λ_7	0.9800	λ_7	0.5095
ΔV_{ST}	0.0001	λ_8	0.9800	λ_8	0.5095
ΔE_{FD}	0.0023	λ_9	0.2633	λ_9	0.0029
Δi_{Bd}	0.0000	λ_{10}	0.6176	λ_{10}	0.0140
Δi_{Bq}	0.0000	λ_{11}	0.9077	λ_{11}	0.0048
ΔB_L	0.0040	λ_{12}	0.0395	λ_{12}	0.0001

본 연구에서 고려한 안정기 입력변수로는 실측가능한 양($\Delta \omega$)이거나 실측가능한 양들의 선형결합으로 나타낼 수 있는 양(Δi_a , Δi_B)이다. 가장 계동특성이 불량한 진동 모드의 고유치가 7, 8번 고유치이므로, 참여 행렬 P의 7, 8번째 열을 관찰한다. Δi_{Bd} , Δi_{Bq} 의 참여인자는 매우 작으므로 이들의 선형결합으로 표시되는 Δi_B 는 안정기 입력으로 적합하지 않다. 반면에 Δi_d 의 경우, 모든 상태변수 중 가장 큰 참여인자를 보이지만 참여행렬 P의 1번째 행으로부터 다른 고유치에도 큰 참여인자를 갖는다는 것을 알 수 있으므로 Δi_d 와 Δi_q 의 선형결합으로 표현되는 Δi_a 역시 안정기 입력으로는 적합하지 않다고 판정할 수 있다. 한편 $\Delta \omega$ 는 4번째 크기의 참여인자를 갖지만 참여행렬 P의 6번째 행으로부터 $\Delta \omega$ 의 다른 고유치에 대한 참여인자는 7, 8번 고유치에 대한 참여인자에 비해 상대적으로 매우 작음을 알 수 있으므로 $\Delta \omega$ 를 안정기 입력변수로 선정하는 것이 바람직하다고 판단된다.

$\Delta \omega$ 를 입력으로 하는 PSS 및 CSS의 정수선정

을 step 4~7을 따라 각각 선정된 결과의 고유치를 표 3에 나타내었다. 표로부터 이 계통에는 CSS가 저주파 진동모드를 효과적으로 안정화시키고 있음을 알 수 있다.

표 3. PSS, CSS를 설치한 경우의 계통고유치

PSS 설치시		CSS 설치시	
T_w	3 sec or 1131 pu	T_w	3 sec or 1131 pu
K_P	-5.0355	K_P	5.1830
K_i	-0.0259	K_i	0.0267
-11.104 ± 377.735i		-10.827 ± 378.183i	
- 5.957 ± 374.743i		- 6.607 ± 374.171i	
-42.426 ± 47.996i		-42.073 ± 48.382i	
-37.552		-37.810	
-19.168		-17.119	
- 2.544 ± 4.826i		- 3.559 ± 5.129i	
-1.953		-1.853	
-1.826		-1.661	
-0.925		-0.910	

5. 결 론

전력계통의 안정화 방안의 하나인 SVC가 계통에 투입되고 있는데, SVC의 설치만으로는 계통 진동모드의 제동이 효과적으로 이루어지지 않고 있다. 따라서 SVC의 효과를 극대화하기 위한 PSS와 CSS를 설계해 보았다. 적용결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 안정기 입력 변수는 참여행렬을 사용하여 간단하고 효과적으로 선정하였다.
2. 안정기 정수는 1차고유치 감도계수를 통해 선정하였고, 그 결과 원하는 고유치를 효과적으로 좌측으로 이동시켜 진동 모드의 제동을 개선할 수 있었다.

(참 고 문 헌)

- [1] P.M. Anderson and A.A. Fouad, "Power System Control and Stability", IEEE PRESS, 1994
- [2] Chin-Hsing Cheng and Yuan-Yih Hsu, "Damping of Generator Oscillation Using an Adaptive Static Var Compensator", IEEE Trans. on Power Systems, vol 7, pp. 718-725, 1992
- [3] P. Kundur, "Power System Stability And Control", McGraw-Hill, Inc., 1993
- [4] H.M.Z. El-Din and R.T.H. Alden, "Second Order Eigenvalue Sensitivities Applied to Power System Dynamics", IEEE Trans. on PAS. vol 6, pp 1928-1936, 1977