

전력계통에서의 유연송전시스템 적용에 의한 미소신호안정도향상

백승도 이병준 장병훈
 한전 남서울전력관리처 고려대학교 전기공학부 한전 전력연구원

A study of Facts Application in power systems
 for the small signal Stability Enhancement

Seung-Do Baik, Byong-jun Lee, Byong-hun Jang
 Namsseoul Transmission Center of KEPCO, Korea Univ, KEPRI

Abstract - The supplementary controls of the FACTS are designed for the enhancement of the small signal stability in power system. The designed supplementary controllers using residue are applied to SVC or TCSC for the improving the damping ratio of dominant eigen value in the New England 39 bus test system as the sample system. The results show the validation of the supplementary controller for the enhancement of the eigenvalues which have the low frequency oscillations with poor damping ratio as the unstable problem in the sample system.

1. 서 론

유연송전 시스템의 기술개념은 미국 EPRI 에 의해 제안된 것으로 디지털제어와 고속 데이터 통신기술을 이용하여 교류전력계통을 실시간으로 제어함으로써 보다 효율적이고 유연한 전력계통의 구성 및 운용을 도모하는 차세대 신 송전기술이다.

유연송전시스템을 전력계통에 적용하는 가장 큰 장점은 외란이 있을 경우 전압, 전류, 임피던스를 신속히 제어하여 외란의 영향을 축소함으로써 유연송전 시스템이 적용되기 전보다 더 많은 유연성을 갖게 하고 외란시 짧은 시간동안 발생하는 과부하를 감당할수 있도록 한다.

유연송전 시스템 적용을 위한 계통해석 연구는 FACTS 타입, 위치 결정과 계통의 진동뎀핑을 위한 FACTS제어기 설계연구가 주인데 특히 발전기와의 협조제어가 필요하며 이를 위해서는 전달함수, 폴, 영, 레지듀, 게인 등의 계산이 필요하다.

본 논문에서는 전력계통에 유연송전시스템을 적용하여 불안정한 동적문제를 해결하기 위한 방법으로

- FACTS 보조제어기 설계를 위한 방법으로 레지듀를 이용한 방법을 적용하였으며,
- 이를 NEW England 39 모선계통에 대해 적용하여, FACTS 보조 제어기 설계과정 및 결과의 적정성을 기술하였다.

2. 본 론

2.1 상태행렬의 구성

전력계통은 동적 계통으로 고려될 수 있으며, 다음과 같은 상태방정식이라고 하는 1차 미분방정식으로 구성되게 된다.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx + Du \end{aligned} \quad (2.1)$$

여기서,

- x 는 상태 벡터이며, 계통의 움직임을 나타내는 동적 변수이다.
- A 는 상태행렬이다.
- u 는 계통의 입력이다.
- B 는 계통내에서 입력이 어떻게 기여되는지를 정의하는 입력 행렬이다.
- y 는 계통의 출력이다.
- C 는 출력이 포함된 각 상태의 비율을 정의하는 출력행렬이다.
- D 는 출력에서 직접적으로 나타나는 입력의 비율을 정의하는 행렬이다.

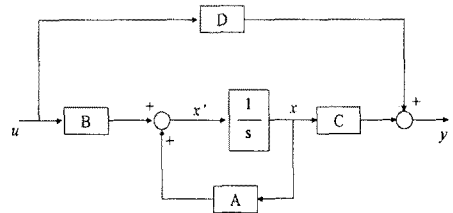


그림 2.2 선형계통의 블록다이어그램

2.2 고유치

상태 방정식의 해는 식 2.1의 라플라스 변환에 의해 구해진다.

$$\begin{aligned} \bar{x} &= (sI - A)[x(0) + B\bar{u}] \\ &= \frac{[(Ad)(sI - A)[x(0) + B\bar{u}]]}{\text{Det}(sI - A)} \end{aligned} \quad (2.2)$$

또한,

$$\bar{y} = C(sI - A)^{-1}[x(0) + B\bar{u}] + D\bar{u} \quad (2.3)$$

\bar{x} 의 폴(poie)은 다음의 루트(roots)이다.

$$\begin{aligned} \text{Det}(sI - A) &= 0 \\ \text{or.} \\ \text{Det}(A - sI) &= 0 \end{aligned} \quad (2.4)$$

폴의 가능 개수는 상태의 수와 같다. 식 2.4를 만족하는 s값은 고유치(eigenvalues) 라고 하는 상태행렬 A의 함수로 계산된다.

안정한 계통의 모든 폴은 음의 실수부를 가지고 있으며, 모든 고유치는 복소 s 평면의 좌반부에 있게 된다. 불안정한 계통은 적어도 하나 이상의 폴이 양의 실수값을 갖는다.

각 고유치(λ_i)에 대해 다음을 만족하는 열벡터 t_i 를 구할 수 있다.

$$At_i = \lambda_i t_i \quad (2.5)$$

2.3 레지듀

- 불안정한 모드를 제어함에 있어 제어기는 제어하고자 하는 모드에 강하게 영향을 미치는 계통설비에 설치 되어야만 한다.
- 참여행렬 P의 요소로 p_{rs} 는 다음과 같이 정의된다.

$$p_{rs} = t_{rs} \nu_{sr} \quad (2.10)$$

$$\text{여기서, } \sum_{s=1}^n p_{rs} = 1 = \sum_{s=1}^n p_{rs}$$

- 전달함수(Transfer function), 폴(Pole), 영(Zero), 레지듀(Residue)를 알아 본다.
- 전달함수와 전달행렬은 (2.1)식의 Laplace변환에 의해

$$\bar{x} = (sI - A)^{-1} B \bar{u} \quad (2.11)$$

$$\bar{y} = [C(sI - A)^{-1} B + D] \bar{u} = G(s) \bar{u} \quad (2.12)$$

- * y가 단일출력, u도 단일입력경우는 G(s)는 스칼라 전달함수가 된다.
- 전달함수의 폴(Pole)은 상태행렬 A의 고유치가 된다.
- S가 적당한 값을 가지면 전달함수는 전달 영이되며 입력에서 출력까지의 전달은 없게된다. 이러한 S값을 영(Zero)이라 한다.

· 스칼라 형태의 전달함수

$$\frac{\bar{y}}{\bar{u}} = K \frac{\prod_{i=1}^n (s - \gamma_i)}{\prod_{i=1}^n (s - \lambda_i)} \quad (2.13)$$

- 영과 폴이 같다면 해당모드는 전달함수로 표현된 특정 입력/출력에 대해 어떠한 참여도 할 수 없다. 이 경우 $\nu_i B$ 가 영(Zero), $C t_i$ 도 영(Zero)이 되어 가제어성과 가관측성은 영(Zero)이 된다.
- 전달함수는 다음과 같이 부분분수로 확장 될 수 있다.

$$G(s) = \frac{\bar{y}}{\bar{u}} = \left[\sum_{i=1}^n \frac{C t_i \nu_i B}{s - \lambda_i} + D \right] \quad (2.14)$$

위 식에서 레지듀(Residue)에 대한 표현식은

$$r_i = \lim_{s \rightarrow \lambda_i} (s - \lambda_i) G(s) = (C t_i) (\nu_i B) \quad (2.15)$$

여기서 r_i 는 i번째 고유치(λ_i)와 관련된 레지듀(residue)이다.

따라서 0이 아닌 레지듀를 갖는 모드는 반드시 제어가 가능하고 관측가능하다.

3. 레지듀를 이용한 FACTS 제어기 설계 사례연구

3.1 사례계통

- 적용될 FACTS기기
병렬형 FACTS기기로 SVC, 직렬형 FACTS 기기로 TCSC
- FACTS 기기설치 위치선정

- 우선 전력계통의 자코비안 행렬 고유치 계산, 이중 최소고유치(가장불안정한 고유치)를 선정, 이 고유치에 대한 모드 해석을 통해 가장 참여율이 높은 모선 또는 선로를 FACTS 설치 위치로 선정하는 방법 이용

- 사례계통
New England 39 모선계통 적용
- FACTS 기기 설치위치 선정과정
VSTAB 프로그램 이용

표 3.1 샘플계통의 자코비안 행렬 고유치

MODE No.	EIGENVALUE (R & D)
1	10.205097 .000000
2	22.630564 .000000
3	41.087933 .000000
4	45.551342 .000000
5	61.417084 .000000
6	66.914085 .000000
7	76.731506 .000000

표 3.2 샘플계통의 자코비안 고유치 모드 1에 대한 모선참여율 계산결과

NO.	BUS #	NAME	PFACTOR	NO.	BUS #	NAME	PFACTOR
1	12	LBUS12	.10839	2	7	LBUS07	.07533
3	8	LBUS08	.07288	4	5	LBUS05	.06832
5	14	LBUS14	.06800	6	13	LBUS13	.06746
7	4	LBUS04	.06706	8	11	LBUS11	.06679
9	6	LBUS06	.06397	10	10	LBUS10	.05821

표 3.3 샘플계통의 자코비안 고유치 모드 1에 대한 선로참여율 계산결과

NO	BUS #	BUS NAME	BUS #	BUS NAME	ID#	PFACTOR
1	4	LBUS04	5	LBUS05	1	1.0000
2	10	LBUS10	32	GBUS32	1	.4854 T
3	6	LBUS06	31	GBUS31	2	.2571 T
4	6	LBUS06	31	GBUS31	1	.2571 T
5	8	LBUS08	9	LBUS09	1	.2164
6	22	LBUS22	35	GBUS35	1	.1671 T
7	3	LBUS03	4	LBUS04	1	.1605
8	2	LBUS02	3	LBUS03	1	.1565
9	21	LBUS21	22	LBUS22	1	.1469
10	16	LBUS16	19	LBUS19	1	.1434

위의 결과에 따라 SVC 위치는 12번 모선으로 결정하고, TCSC 위치는 4번 모선과 5번 모선 사이의 선로로 결정할 수 있다.

그림 3.1의 사례계통에 대해 미소신호 안정도 해석을 수행하여, 저주파 진동 주파수를 갖는 관심 고유치를 계산한 결과를 표 3.4에서 보였다. 여기서 나타난 고유치는 0.2~2.0Hz 이하의 주파수를 갖으면서, 댐핑비가 0.05이하인 고유치이다.

표 3.4 New England 39 모선 계통의 관심 고유치

모드	고유치		주파수	댐핑비	해당발전기
1	-1.41E-01	7.20E+00	1.1453	0.0196	GBUS30
2	-2.43E-01	6.22E+00	0.9897	0.0390	GBUS31
3	-3.02E-01	7.28E+00	1.1582	0.0414	GBUS32
4	-3.40E-01	8.65E+00	1.3772	0.0393	GBUS33
5	-2.69E-01	6.91E+00	1.0999	0.0389	GBUS34
6	-4.10E-01	9.03E+00	1.4367	0.0454	GBUS36
7	-4.06E-01	8.79E+00	1.3995	0.0462	GBUS37
8	-2.82E-01	5.98E+00	0.9517	0.0472	GBUS38

위의 표 3.4에서와 같이 샘플계통인 New England 39모선 계통에 대해 관심 고유치에 대한 주파수, 댐핑비, 레지듀, 가제어성, 가관측성 등을 보였으며, 해당발전기는 각 고유치 모드에 가장 기여도가 높은 발전기를 나타내었다

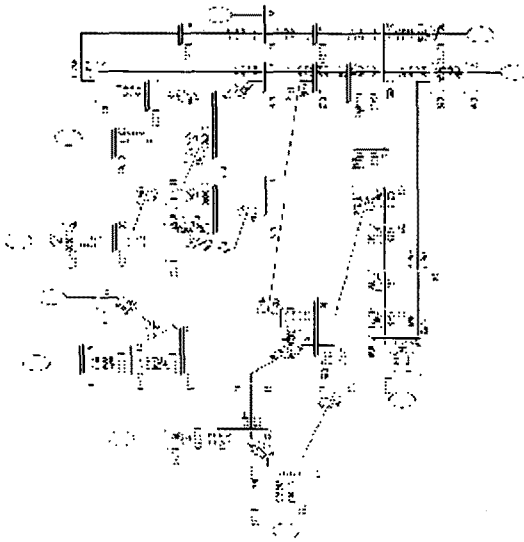


그림 3.1 New England 39 모선 계통

표 3.4에서 계산된 상태행렬의 관심 고유치 개선을 위해 SVC를 적용하고, 이에 대한 보조제어기를 레지듀를 이용한 방법을 통해 구현하여, 그 효과를 분석하였다. 다음은 SVC에 대한 보조제어기 설계적용과 샘플계통에 대한 사례연구이다.

3.2 SVC 적용사례

표 3.2에서와 같이 모선 참여율이 가장 높은 12번 모선을 SVC 설치위치로 결정하고, 아래의 그림3.2와 같은 SVC모형을 적용하였다.

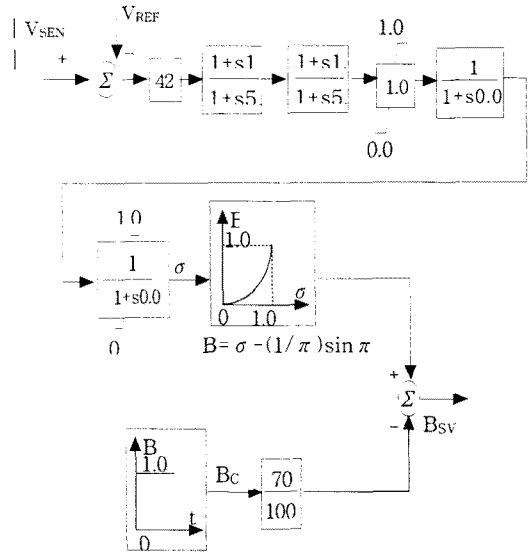


그림3.2 사례연구에 적용된 SVC 동적모델
위 그림 3.2와 같은 SVC를 적용한 후의 고유치 계산 결과를 표 3.5에서 원래 고유치와 비교하여 보였다. 관심 영역인 저주파 고유치의 댐핑개선이 잘 이루어지지 않고 있음을 알 수 있다. SVC용량은 ±200MVAR를 적용하였다.

표 3.5 샘플계통의 SVC 적용 전, 후 관심 고유치 비교

모드	SVC 적용전				SVC 적용후				해당 발전기
	고유치	주파수	댐핑비	레지듀	주파수	댐핑비	레지듀	가제어성	
1	-1.41E-01	7.20E+00	1.1453	0.0196	1.1458	0.0197	GBUS30		
2	-2.43E-01	6.22E+00	0.9897	0.0390	0.9907	0.0386	GBUS31		
3	-3.02E-01	7.28E+00	1.1582	0.0414	1.1598	0.0406	GBUS32		
4	-3.40E-01	8.65E+00	1.3772	0.0393	1.3764	0.0391	GBUS33		
5	-2.69E-01	6.91E+00	1.0999	0.0389	1.1007	0.0388	GBUS34		
6	-4.10E-01	9.03E+00	1.4367	0.0454	1.4362	0.0455	GBUS36		
7	-4.06E-01	8.79E+00	1.3995	0.0462	1.3993	0.0464	GBUS37		
8	-2.82E-01	5.98E+00	0.9517	0.0472	0.9513	0.0471	GBUS38		

본 논문에서는 사례계통의 댐핑 향상을 위해 3.1절에서 제안된 레지듀를 이용한 SVC의 보조제어기 설계를 수행하였다. 보조 제어기 설계를 위해 우선 입력신호를 선택하여야 하며, 이를 위해 2번 모선과 1번 모선사이의 선로의 조류를 입력신호로 하여 가관측성(observability) 및 레지듀를 계산하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

고유치	주파수	댐핑비	레지듀	가제어성	가관측성
-1.42E-01	7.20E+00	1.1453	0.0197	-2.83E-03	-5.35E-02
				9.28E-02	5.77E-01

위에서와 같이 1-2번 선로간의 유효조류를 입력신호로 하여 전달함수 특성을 분석하였다. 관심 모드의 레지듀는 -0.002828-j0.05348이며, 이를 이용하여 보조제어기를 설계하는 과정은 다음과 같다.

$$KH(s) = K \frac{sT}{1+sT} \left[\frac{1+sT_1}{1+sT_2} \right]^m \quad (3.1)$$

여기서, $R_{ijk} = -0.002828 - j0.05348$ 이므로,

$$\phi = 180^\circ - \arg(R_{ik})$$

$$\alpha = \frac{T_2}{T_1} = \frac{1 - \sin(\frac{\phi}{m})}{1 + \sin(\frac{\phi}{m})}$$

$$T_1 = \frac{1}{\omega_i \sqrt{\alpha}}$$

$$T_2 = \alpha T_1$$

위 절차에 따라,

$$\phi = 180 + 9.5986 = 189.5986^\circ$$

$$m = 2$$

$$\sin(\phi/2) = 0.9965$$

$$\alpha = 1.1667/1.9965 = 0.001753$$

$$T_1 = 1/(1.1458 \times 0.04187) = 20.85$$

$$T_2 = 0.0365$$

따라서,

$$H(s) = \frac{s10}{1+s10} \frac{1+s20.85}{1+s0.0365}$$

위와 같이 설계된 보조제어기를 SVC 모델에 추가하여 사례계통에 적용한 결과를 표 3.6에서 보였다.

표 3.6 샘플계통의 SVC 보조제어기 적용후 고유치 비교

모드	SVC 적용전		SVC 적용후		보조제어기 적용후		해당발전기
	주파수	댐핑비	주파수	댐핑비	주파수	댐핑비	
1	1.1453	0.0196	1.1458	0.0197	1.2286	0.0250	GBUS30
2	0.9897	0.0390	0.9907	0.0386	1.0818	0.0366	GBUS31
3	1.1582	0.0414	1.1598	0.0406	0.9736	0.0398	GBUS32
4	1.3772	0.0393	1.3764	0.0391	1.3857	0.0344	GBUS33
5	1.0999	0.0389	1.1007	0.0388	1.1538	0.0408	GBUS34
6	1.4367	0.0454	1.4362	0.0455	1.4355	0.0453	GBUS36
7	1.3995	0.0462	1.3993	0.0464	1.3513	0.0307	GBUS37
8	0.9517	0.0472	0.9513	0.0471	0.9561	0.0512	GBUS38

이와 같이 본 논문에서 제안된 방법으로 설계된 보조제어기를 적용한 결과, 사례계통인 New England 39모선 시험계통에서 가장 부족한 댐핑을 갖는 1번 모드에 대해, 댐핑비가 0.0197에서 0.0250으로 뚜렷한 개선효과가 있는 SVC 보조제어기를 설계할 수 있음을 보였다.

4. 결 론

- 본 논문은 전력계통에 FACTS를 적용하여 불안정한 동적 문제를 해결하기 위한 방법으로 FACTS의 보조제어기 설계방법을 고찰하였다.
- New England 39 모선계통에 레지듀를 이용한 제어기 설계방법을 적용하여 SVC에 대한 보조제어기를 설계, 불안정한 동적 문제인 저주파동요현상이 일어나는 작은 댐핑비를 갖는 최우측 고유치들에 대한 댐핑을 개선 하는 효과를 검증하였다.
- 실제계통은 사례계통보다 상당히 복잡한 동적 특성을 보이고 있고, 기존 선행해석 방법으로 설계가 곤란한 동적문제를 가질수 있으므로 이에 대한 연구가 지속적으로 이루어질 필요가 있다고 사료된다.

[참 고 문 헌]

- [1] 宋吉永 “新編電力系統工學” 통일출판사 1998.9 PP26~
- [2] CIGRE FACTS SOCIETY, “FACTS OVERVIEW” CIGREI, 95 TP 108, 1995. 4
- [3] EPRZ “Voltage stability/security Assessment and control”, TR-101931, Final Report VOL.1, 1993.4
- [4] B.Gao, G.K.Morisam, and P.Kun역, “Voltage s Fualuation using Model Analysis”, paper 91 SM pwr, presented at the 1991 IEEE PES Summer M San Diego, California, July 28. August1, 1991
- [5] P.Kundur, “power system stability and control”, Megraw-Hill, 1993, pp726