

SVC제어기에 의한 전압안정도 향상과 해석

주 기성 김 진오  
한양대학교 전기공학과

The Voltage Stability Improvement and Analysis by SVC Controller

Gi-Sung Ju Jin-O Kim  
Department of Electrical Engineering, Hanyang University

**Abstract** - The addition of SVC increases the range of dynamic stability in the power system. The inclusion of SVC is explained in detail and a numerical example is presented. The entire construction of the system A matrix is analyzed, and then the effect of SVC on Hopf bifurcations and the PV curves are illustrated in the case study.

계값보다 작은 구간에서는 안정한 주기해를 가지고, 임계값보다 큰 구간에서는 안정한 평형점에 머무르게 되는 경우로 파라미터 전 구간을 걸쳐 안정한 해가 존재하여 안정한 Hopf Bifurcation이라 한다. 이것은 미분방정식에서 나타나는 Jacobian의 복소 고유값의 실수부호가 양에서 음으로 변하기 때문이다.

1. 서 론

전압안정도는 정상상태에서와 외란을 받은 후에 모든 모선들이 허용전압을 유지하도록 하는 전력시스템의 능력과 관련된 것이다. 전력시스템은 외란, 부하수요의 증가, 시스템 조건의 변화가 전압에 있어서 점진적이고, 제어할 수 없는 강하를 일으킬 때 전압불안정의 상태에 들어간다.

이러한 전압불안정의 상태를 향상시키는 방법에는 여러 가지의 종류가 있다. 그 중에서 FACTS를 사용하는 방법이 있는데, 가장 잘 알려진 것은 SVC(Static Var Compensator)이다. SVC는 빠른 스위칭 용량을 갖는 커패시터와 인덕터를 결합한다. 모선전압이 기준전압 아래로 떨어지면 커패시터 상태가 되고, 모선전압이 너무 높으면 그것을 낮추도록 인덕터를 더한다.

본 논문에서는 이러한 특성을 가진 SVC를 3기 9모선의 전력시스템에 존재하고 있는 한 모선에 설치하여 전압안정도를 향상시키는 것을 보인다. 즉, SVC가 포함된 전력시스템은 더 높은 부하상태로 Hopf Bifurcation과 Saddle Node Bifurcation을 지연시켜 안정한 범위를 증가시킨다는 것을 보인다. 이것은 전력시스템의 무효전력량에 따른 PV곡선과 선형화를 통한 고유값 해석으로 설명된다. 여기서, SVC의 설치모선이 PV 또는 PQ모선으로 동작하는 경우에 있어서의 무효전력량의 변화 및 전압안정도의 변화를 살펴볼 수 있다.

2. 본 론

2.1 Hopf Bifurcation(HB)

Hopf Bifurcation은 파라미터가 변함에 따라 미분방정식에서 나타나는 Jacobian의 복소 고유값이 순허수가 되는 점에서 발생한다. 이 때, 이 근방에 주기해가 존재하게 되며, 그 성질에 따라서 임계값을 지난 후에 불안정해지는 경우와 안정해지는 경우의 두 가지가 있다.

Subcritical Hopf Bifurcation은 파라미터값이 임계값보다 큰 구간에서는 안정된 동작점을 얻을 수 없는 경우로 불안정한 Hopf Bifurcation이라 한다. 이것은 미분방정식에서 나타나는 Jacobian의 복소 고유값의 실수부호가 음에서 양으로 변하기 때문이다.

Supercritical Hopf Bifurcation은 파라미터값이 임

2.2 Saddle Node Bifurcation(SNB)

Saddle Node Bifurcation은 안정한 평형점과 불안정한 평형점이 존재하다가 파라미터값이 임계점에 도달했을 때 서로 충돌하여 두 개의 평형점이 모두 사라지는 현상으로 P-V곡선의 꼭지점에서 일어나는 현상이며, 실수 고유값의 부호가 음에서 양으로 변한다.

2.3 SVC가 연계되지 않은 경우의 선형화 모델

일반적인 전력시스템은 다음과 같은 형태의 미분-대수 방정식(DAE) 모델을 갖는다.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(x, y, u) & (1) \\ 0 &= g(x, y) & (2) \end{aligned}$$

여기서,  $x$ 는 상태 벡터,  $y$ 는 대수 벡터,  $u$ 는 입력 벡터이다. 위의 미분-대수 방정식을 3기 9모선 시스템에 적용하여 선형화하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{x}_{gi} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 & A_2 & 0 & A_4 & 0 & 0 \\ B_1 & B_2 & B_3 & B_4 & B_5 & 0 \\ C_1 & C_2 & C_3 & C_4 & C_5 & C_6 \\ D_1 & D_2 & D_3 & D_4 & D_5 & D_6 \\ 0 & 0 & E_3 & E_4 & E_5 & E_6 \\ F_1 & F_2 & F_3 & F_4 & F_5 & F_6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_{gi} \\ \Delta I_{d-q} \\ \Delta \theta_1 \\ \Delta V_g \\ \Delta \theta_{LF} \\ \Delta V_{LF} \end{bmatrix} \quad (3)$$

단,  $A_1 = \begin{bmatrix} A_{11} & 0 & 0 \\ 0 & A_{22} & 0 \\ 0 & 0 & A_{33} \end{bmatrix}$

여기서,

- $\Delta x_{gi}$ :  $[\Delta x_{g1}, \Delta x_{g2}, \Delta x_{g3}]^T$ 로 배열되는 발전기  $i$ 와 관련된 상태변수 ( $i=1,2,3$ )
- $\Delta I_{d-q}$ :  $[\Delta I_{d1}, \Delta I_{q1}, \dots, \Delta I_{d3}, \Delta I_{q3}]^T$ 로 배열되는  $d$ 축과  $q$ 축 고정자 전류 벡터
- $\Delta \theta_1$ : 슬랙모선의 각
- $\Delta V_g$ : 3대의 발전기모선의 전압 크기
- $\Delta \theta_{LF}$ :  $[\Delta \theta_2, \dots, \Delta \theta_9]^T$

$$\Delta V_{LF}: [\Delta V_4, \dots, \Delta V_9]^T$$

이고, 아래 첨자  $LF$ 는 부하 조류 변수를 나타낸다. 모선1은 슬랙모선, 모선2와 3은 PV모선이며, 나머지 모선들은 PQ모선이다.

## 2.4 SVC의 모델

SVC의 비선형 상태방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= -\frac{1}{T_b} (V_{SVC}(1+Kx_3) - x_1) \\ \dot{x}_2 &= K_i (V_{ref,SVC} - x_1) \\ \dot{x}_3 &= -\frac{1}{T_c} (x_2 + K_p (V_{ref,SVC} - x_1) - x_3) \\ Q_{SVC} &= V_{SVC}^2 x_3 \end{aligned} \quad (4)$$

여기서,  $x_3$ 는  $B_{SVC}$ 를 나타내며, 식(4)를 선형화하면 식(5)와 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \Delta \dot{x}_1 &= -\frac{1}{T_b} (\Delta V_{SVC}(1+Kx_3) + V_{SVC}K\Delta x_3 - \Delta x_1) \\ \Delta \dot{x}_2 &= K_i (\Delta V_{ref,SVC} - \Delta x_1) \\ \Delta \dot{x}_3 &= -\frac{1}{T_c} (\Delta x_2 + K_p (\Delta V_{ref,SVC} - \Delta x_1) - \Delta x_3) \\ \Delta Q_{SVC} &= 2 V_{SVC} x_3 \Delta V_{SVC} + V_{SVC}^2 \Delta x_3 \end{aligned} \quad (5)$$

## 2.5 SVC가 연계된 경우의 선형화 모델

위의 식(5)에서 SVC에 대한 입력은  $\Delta V_{SVC}$  이고, 출력은  $\Delta Q_{SVC}$ 이다. 선형화된 상태방정식은 식(6)에서 보는 바와 같이 식(3)에 더하여진다.

이렇게 해서,  $\Delta \dot{x}_{SVC}$ 에 관한 모델이  $\Delta \dot{x}_{g3}$ 아래에 더하여진다. 이것은 블록대각행렬  $A_{SVC}$ 와 함께 새로운 0행렬이 아닌 행렬  $A_6$ 이 생기게 한다.

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{x}_{gi} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 & A_2 & 0 & A_4 & 0 & A_6 \\ B_1 & B_2 & B_3 & B_4 & B_5 & 0 \\ C_1 & C_2 & C_3 & C_4 & C_5 & C_6 \\ D_1 & D_2 & D_3 & D_4 & D_5 & D_6 \\ E_1 & 0 & E_3 & E_4 & E_5 & E_6 \\ F_1 & F_2 & F_3 & F_4 & F_5 & F_6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_{gi} \\ \Delta I_{d-q} \\ \Delta \theta_1 \\ \Delta V_g \\ \Delta \theta_{LF} \\ \Delta V_{LF} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\text{단, } A_1 = \begin{bmatrix} A_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & A_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & A_{33} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & A_{SVC} \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned} \text{여기서, } \Delta x_{gi} &: [\Delta x_{g1}, \Delta x_{g2}, \Delta x_{g3}, \Delta x_{SVC}]^T \\ \Delta x_{SVC} &: [\Delta x_1, \Delta x_2, \Delta x_3]^T \end{aligned}$$

이다. 만약 SVC가 시스템에 존재하는 부하모선 위에 연계되어 있다면,  $\Delta Q_{SVC}$ 때문에 식(3)에 0행렬이 아닌 행렬  $E_1$ 이 추가되고,  $E_6$ 도  $E_6$ 으로 수정된다. 식(6)에서는 변화될 필요가 있는 행렬은 진하게 표시되었고, 행렬의 크기를 일치시키기 위하여 여기에 나타나지 않은 부가적인 0행렬요소가 포함될 필요가 있다.

## 3. 사례 연구 및 시뮬레이션 결과

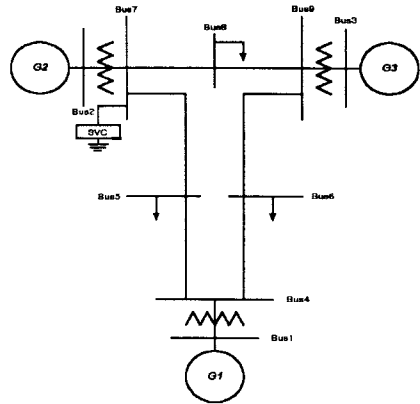


그림 1. 모선 7에 SVC가 연계된 3기 9모선 시스템

본 논문은 위와 같은 3기 9모선 시스템을 모델로 하여 SVC의 무효전력의 증가에 따른 SVC의 동작 특성 및 부하가 증가하는 모선에서의 전압안정도의 변화를 고찰하고자 한다. 여기서, SVC는 모선7에 연계되었고, 부하가 증가하는 모선은 5이며, SVC의 기준전압은 1.015로 가정하였다. 이 시스템의 주어진 데이터는 참고 문헌[1]에 있다.

### 3.1 SVC의 연계 유무에 따른 비교

표 1은  $Q_{SVC}=0$ 일때 SVC가 연계되지 않은 경우와 연계된 경우의 공칭값을 갖는 부하에서의 시스템의 고유값을 나타낸 것이다.

아래의 표 1에서 진하게 나타난 고유값은 임계 고유값을 나타낸 것인데, SVC가 연계된 경우가 연계되지 않은 경우보다 복소 평면의 허수 축으로부터 더 멀기 때문에 상대적으로 더 안정하게 됨을 알 수 있다.

표 1. 공칭값  $P_5=1.25$ ,  $V_5=0.9960$ 에서의 고유값

SVC가 연계되지 않은 경우	SVC가 연계된 경우
-0.8668±j12.7299	-0.8585±j12.7345
-0.2798±j8.3383	-0.2882±j8.3821
-5.4871±j7.9494	-5.5169±j7.9971
-5.3244±j7.9223	-5.3265±j7.9449
-5.2215±j7.8167	-5.2190±j7.8597
-0.4458±j1.2035	-0.4618±j0.9612
-0.4394±j0.7378	-0.4423±j0.6244
-0.4270±j0.4968	-0.4299±j0.4889
-5.1682	-5.4652
-3.4176	-4.4442
-0.0000	-0.0000
-0.1367	-0.1367
-3.2258	-3.2258
	-10.8443±j24.0259
	-76.8850

그림 2는  $Q_{SVC}=0$ 일 때의 PV곡선을 나타낸 것인

데,  $P_5=1.25$ 의 공칭값에서  $V_5=0.9960$ 의 값을 가지며, SVC가 연계되지 않은 경우와 연계된 경우의 불안정한 Hopf Bifurcation을 비교해 보면, 각각  $P_5=4.44$ ,  $P_5=4.75$ 에서 일어난다. 따라서, SVC가 연계가 된 경우가 연계가 되지 않은 경우보다 불안정한 Hopf Bifurcation이 지연됨을 알 수 있다.

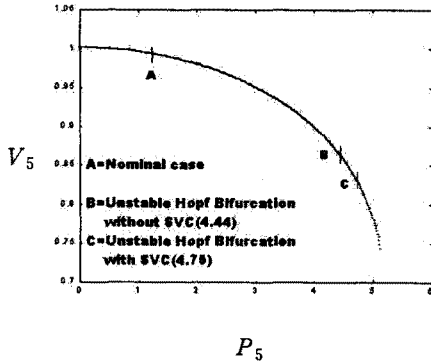


그림 2.  $Q_{SVC}=0$ 일때의 PV곡선

### 3.2 PV곡선에 따른 실제적인 SVC동작의 해석 및 불안정한 Hopf Bifurcation의 변화

실제적인 경우를 고려하여  $Q_{SVC}=0.5$ 와  $Q_{SVC}=1.0$ 인 두 경우에 대하여 살펴보았다. 이 두 경우는 SVC가 인덕턴스의 낮은 제한값을 넘어 PV모션으로부터 PQ모션으로 바뀔 때의 무효전력인데, 그림 3과 그림 4는 각각 이 때의 실제적인 SVC동작을 나타낸 것이다.

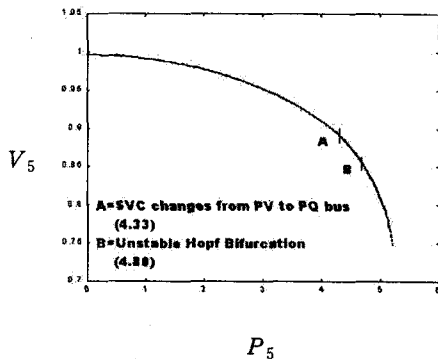


그림 3.  $Q_{SVC}=0.5$ 일때의 PV곡선

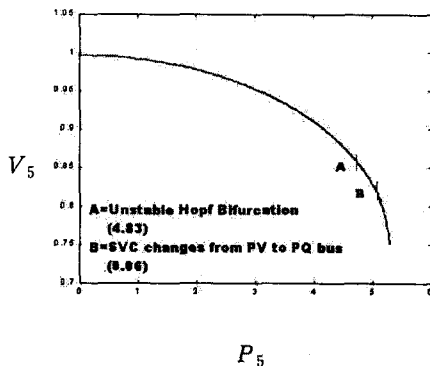


그림 4.  $Q_{SVC}=1.0$ 일때의 PV곡선

위의 그림 3과 그림 4에서는 SVC모션이 PV모션으로부터 PQ모션으로 바뀌는 부분이 있다. 이 때의 SVC모션의 전압은 기준전압인 1.015이다. 이 때, SVC는 인덕턴스의 낮은 제한값을 넘어 커패시터 상태로 된다. 여기서, PV모션으로부터 PQ모션으로 바뀌는  $P_5$ 는 각각  $P_5=4.33$ 과  $P_5=5.06$ 이다. 따라서, SVC모션에 공급된 무효전력이 클수록 PV모션으로부터 PQ모션으로 바뀌는 부하값도 증가됨을 알 수 있다.

$Q_{SVC}=0.5$ 일 때와  $Q_{SVC}=1.0$ 일 때의 불안정한 Hopf Bifurcation을 비교해 보면, 각각  $P_5=4.80$ ,  $P_5=4.83$ 에서 일어난다. 따라서, SVC모션에 공급된 무효전력이 클수록 불안정한 Hopf Bifurcation이 지연됨을 알 수 있다.

### 3.3 안정한 Hopf Bifurcation 및 Saddle Node Bifurcation의 변화

위의 그림 2, 3, 4에서 안정한 Hopf Bifurcation이 일어나는  $P_5$ 를 알아본 결과 Saddle Node Bifurcation이 일어나는  $P_5$ 에 상당히 근접하게 되어 이 때의 두  $P_5$ 의 값을 같은 값으로 간주하였고, 그 값들은  $Q_{SVC}=0$ ,  $Q_{SVC}=0.5$ ,  $Q_{SVC}=1.0$ 인 경우에 각각  $P_5=5.16$ ,  $P_5=5.20$ ,  $P_5=5.33$ 이었다. 따라서, SVC모션에 공급된 무효전력이 클수록 안정한 Hopf Bifurcation과 Saddle Node Bifurcation도 지연됨을 알 수 있다.

## 4. 결론

본 논문은 Bifurcation이론을 이용하여 SVC가 연계된 3기 9모션 시스템을 모델로 하여 각각의  $Q_{SVC}$ 에 따른 전압안정도의 변화 및 SVC의 실제적인 동작 특성등을 살펴보았고, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1)  $Q_{SVC}$ 의 증가에 따라 PV모션으로부터 PQ모션으로 바뀌는 부하값도 증가된다.
- (2)  $Q_{SVC}$ 의 증가에 따라 불안정한 경우와 안정한 경우의 Hopf Bifurcation 및 Saddle Node Bifurcation이 지연되어 전압안정도 향상에 기여한다.

### (참고 문헌)

- [1] M. J. Laufenberg, "Dynamic Sensitivity Functions and the Stability of Power Systems with Facts Controllers," M.S., University of Illinois at Urbana-Champaign, 1993.
- [2] Hua Wang, "Control of Bifurcations and Routes to Chaos in Dynamical Systems," University of Maryland College Park, 1993.
- [3] P. W. Sauer and M. A. Pai, "Modeling and Simulation of Multi-machine Power System dynamics," in Control and Dynamic Systems: Advances in theory and application, vol.43, C.T.Leondes, Ed., San Diego, CA: Academic Press, 1991.
- [4] P. Kundur, Power System Stability and Control, McGraw-Hill, New York, 1994.
- [5] P. W. Sauer and M. A. Pai, "Power System Steady State Stability and the Load Flow Jacobian," IEEE Trans. Power Appar. Syst., PAS-5, Nov. 1990, 1374-1383.