

전압안정도 향상을 위한 FACTS의 적용과 Bifurcation이론 해석

朱基成, 金鎮吾

FACTS Application for the Voltage Stability with the Analysis of Bifurcation Theory

Gi-Sung Ju, Jin-O Kim

요 약

본 논문은 전압안정도에 Bifurcation 이론을 적용하여 해석하고, FACTS기기인 SVC와 UPFC를 전력계통에 연계 하였을 때 전압안정도가 향상되는 효과를 보여주고 있다. 전압안정도는 일반적으로 시스템 파라미터(유효전력 또는 무효전력)를 포함하는 고도의 비선형 동적시스템의 식들에 의해 표현된다. 때때로 전력계통에서의 파라미터의 변이는 시스템 불안정을 일으키는 복잡한 동작을 일으킬 수도 있다.

전력계통에서의 FACTS의 연계는 이러한 전압안정도의 범위를 증가시킨다. FACTS를 이용하여 불안정한 Hopf Bifurcation과 Saddle Node Bifurcation을 지연시킴에 의해서 전압안정도가 향상됨을 사례연구를 통하여 입증하였다.

ABSTRACT

This paper proposes a bifurcation theory method applied for voltage stability analysis and shows the improvement of voltage stability by attaching the FACTS devices in the power system. A power system is generally expressed by a set of equations of highly nonlinear dynamical system which includes system parameters(real or reactive power). Sometimes variation of parameters in the system may result in complicated behaviors which give rise to system instability.

The addition of FACTS increases the range of voltage stability in the power system. The effect of FACTS which improves voltage stability are illustrated in the case studies by delaying of Unstable Hopf Bifurcation and Saddle Node Bifurcation.

Key Words : FACTS(Flexible AC Transmission Systems), Unstable Hopf Bifurcation, Saddle Node Bifurcation, Voltage Stability

1. 서 론

전력계통의 안정도 분야는 크게 두가지로 나누어 지는데, 그 중 하나는 주로 고장이나 외란이 발생하였을 때 짧은 시간 내에 정상상태로 회복시키는 과도안정도와 산업의 발달과 경제수준의 향상에 의한 전력수요의 증가에 따라 과부하의

영향으로 인한 전압변동이나 전압붕괴와 같은 전압안정도 분야로 나누어 진다.

과도안정도는 에너지함수 기법 등의 도입으로 말미암아 상당히 진전된 상태이다. 그러나, 전압안정도 분야에 있어서 최근에 와서야 그 원인이 부하의 유효전력과 무효전력이 임계점에 가까워짐에 따라 전압이 일정한 범위를 유지할 수 없다는 것을 알아내었고, 이러

한 전압붕괴의 안정성을 판별하는 방법으로 동적시스템 모델을 이용하는 동적방법과 어느 순간의 안정성이나 불안정에 대한 민감도, 근접도 등을 이용하는 정적 방법 등이 있다. 이러한 해석방법은 각 모션에서의 P-V곡선이나 Q-V곡선을 이용하여 부하의 증가에 따른 전압의 변화추이를 관찰하여 안정성을 판별한다.

그러나, 지금까지의 연구결과들은 계통이 임계점에 도달했을 때 전압이 급격히 붕괴되는 현상에 대해서만 고려하고 있으나, 많은 전력을 소비하는 부하모션에서 전압이 불안정하게 진동하는 현상들에 대해서는 간과하고 있다. 이러한 이유는 계통의 비선형 현상들을 다루는 방법에 있어서 기존의 방법들이 선형화된 모델링만을 사용하고 있기 때문이다. 즉, 계통의 비선형성으로 야기되는 카오스적인 현상들을 기존의 방법들만으로 다루기에는 역부족인 것이다¹¹⁾. 이에, 본 논문에서는 카오스이론의 하나인 Bifurcation이론을 소개하고, FACTS Device의 일종인 SVC와 UPFC를 전력시스템에 연계하였을 때 불안정한 Hopf Bifurcation과 Saddle Node Bifurcation의 지연현상을 살펴봄으로써 전압안정도의 향상효과를 보이고자 한다.

2. 전압안정도 해석

전압안정도란 어떠한 외란이나 부하의 증가가 있을 때 모든 모션의 전압이 허용할 수 있는 범위내의 값으로 유지될 수 있는 능력에 관련된 것이다¹²⁾.

전력시스템에 있어서 전압이 붕괴되는 현상은 운전점이 임계점 근처에 도달했을 때 일어난다는 사실이 밝혀졌다. 즉, 그 원인이 발전기가 공급할 수 있는 부하전력의 한계, 부하의 여러 가지 특성, 무효전력 보상 기기나 전압제어 장치와 같은 주변기기의 악영향 등 여러 가지 잠재적인 요소들이라는 것이다. 그 중에서도 가장 중요한 원인은 전력시스템이 부하가 요구하는 전력 요구량을 만족시키지 못하는 것이다.

그림 1과 같은 간단한 시스템의 전류와 부하 측 전압, 전력을 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$I = \frac{1}{\sqrt{F}} \frac{E_S}{Z_{LN}} \quad (1)$$

$$V_R = \frac{1}{\sqrt{F}} \frac{Z_{LD}}{Z_{LN}} E_S \quad (2)$$

$$P_R = \frac{Z_{LD}}{F} \left(\frac{E_S}{Z_{LN}} \right)^2 \cos \phi \quad (3)$$

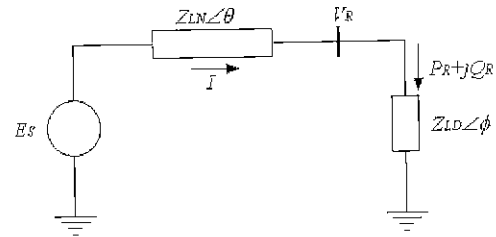


그림 1 개요도
Fig 1 Schematic Diagram

여기서,

$$F = 1 + \left(\frac{Z_{LD}}{Z_{LN}} \right)^2 + 2 \left(\frac{Z_{LD}}{Z_{LN}} \right) \cos(\theta - \phi) \quad (4)$$

식(1)~(3)을 이용하여 $\tan \theta = 10.0$, $\cos \phi = 0.95$ 인 경우 I , V_R , P_R 을 부하요구량 (Z_{LN}/Z_{LD})의 함수로 나타내면 그림 2와 같다.

그림 2를 살펴볼 때, 부하요구량 Z_{LD} 가 감소하면 부하측의 전력 P_R 은 처음에는 빠르게 증가하다가 점점 증가속도가 느려지면서 결국 최고점에 도달한 후 다시 감소하는 형태를 보인다. 이것은 전압원으로부터 전달되는 전력은 한계가 있고, 부하요구량이 이 한계점을 넘어가면 전압이 불안정해 진다는 사실을 알 수 있다.

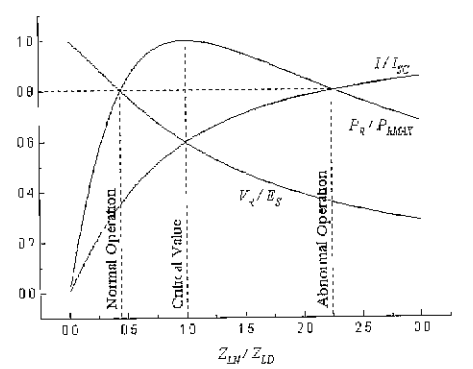


그림 2 부하요구량에 대한 부하측의 전압, 전류, 전력의 곡선

Fig. 2 Receiving End Voltage, Current and Power as a Function of Load Demand

이러한 현상을 표현하는 방법으로 그림 3과 같은 부하측의 전압 P_R 과 전력 V_R 간의 관계를 나타내는 P-V

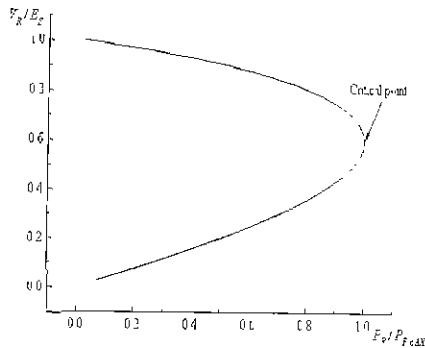


그림 3 $P_R - V_R$ 특성곡선
Fig 3 $P_R - V_R$ Characteristic Curve

곡선을 이용하는 방법이 있다. P-V특성곡선에서 임계점(Critical Point)보다 위에 존재하는 곡선은 전압이 안정한 영역이며, 임계점에 가까워질수록 불안정에 근접하게 된다. 부하요구량이 증가하여 임계점을 지나면 전압은 불안정하게 되어 빠르게 떨어진다. 이와 같이 P-V특성곡선은 전압안정도를 판별하는 방법으로 널리 사용된다.

3. Bifurcation이론

Bifurcation이론을 살펴보기 위하여 다음과 같이 표현되는 시스템을 고려해보자.

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mu) = \mathbf{f}_\mu(\mathbf{x}) \quad (5)$$

위의 식에서 \mathbf{x} 는 시스템 상태변수이며, 시간에 대한 함수 $\phi(t)$ 로 나타낼 수가 있으며, μ 는 시스템의 파라미터가 된다

카오스이론에서 나오는 Bifurcation은 시스템 파라미터의 작은 변화로 인해서 시스템의 질적인 변화가 생기는 것을 나타내며^[3,4], 평형점과 주기해(periodic solutions)들이 파라미터 μ 가 변함에 따라 서로간에 충돌함으로써 Bifurcation이 일어나게 된다. 이때, $\mathbf{f}(\mathbf{x}, \mu)$ 에 대한 Jacobian의 고유값은 0이나 순허수가 된다. 전압안정도를 해석하기 위한 P-V곡선에서 일어나는 기본적인 Bifurcation은 다음과 같다.

3.1 Hopf Bifurcation(HB)

시스템 파라미터 μ 가 변함에 따라 Jacobian의 한 쌍

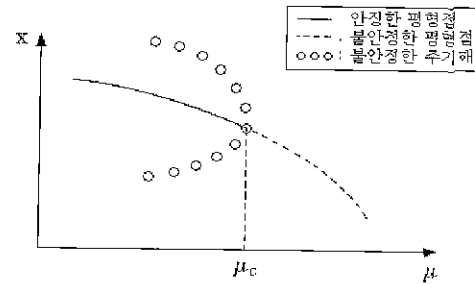


그림 4 불안정한 Hopf Bifurcation
Fig. 4 Unstable(Subcritical) Hopf Bifurcation

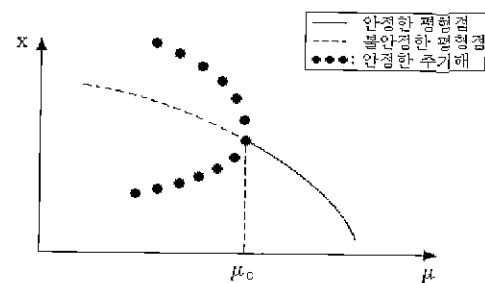


그림 5 안정한 Hopf Bifurcation
Fig. 5 Stable(Supercritical) Hopf Bifurcation

의 복소고유값이 순허수가 되는 점에서 Hopf Bifurcation이 발생하며, 이때 그 근방에 주기해가 존재하게 된다. 이러한 이유로 HB는 평형점의 안정성과 주기해의 존재 유무와 연관이 있다.

Hopf Bifurcation은 그 성질에 따라 두 가지 형태로 나누어지는 데, Subcritical Hopf Bifurcation은 그림 4에서 처럼 시스템 파라미터가 $\mu > \mu_c$ 인 구간에서 안정된 동작점을 얻을 수 없는 경우로 불안정한 Bifurcation이 된다. Supercritical Hopf Bifurcation은 그림 5처럼 시스템의 정상상태 동작이 $\mu < \mu_c$ 에서는 안정한 주기해를 가지고, $\mu > \mu_c$ 에서는 안정한 평형점에 머무르게 되어 파라미터 전 구간에 대해 안정한 해가 존재하여 안정한 Bifurcation이 된다.

3.2 Saddle Node Bifurcation(SNB)

Saddle-Node Bifurcation은 안정한 평형점과 불안정한 평형점이 공존하다가 파라미터값 μ 가 임계점에 도달했을 때 서로 충돌하여 두 개의 평형점이 모두 사라지는 현상으로 전압안정도의 해석에서 P-V곡선의 꼭

지점에서 일어나는 전압붕괴 현상을 예로 들 수 있다.

4. FACTS가 연계되지 않은 경우의 선형화모델

일반적인 전력시스템은 다음과 같은 형태의 미분-대수방정식 모델을 갖는다.

$$\dot{x} = f(x, y, u) \quad (6)$$

$$0 = g(x, y) \quad (7)$$

여기서,

x : 상태 벡터, y : 대수 벡터, u : 입력 벡터

위의 미분-대수 방정식을 3기 9모선 시스템에 적용하여 선형화하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{x}_{gi} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 & A_2 & 0 & A_4 & 0 & 0 \\ B_1 & B_2 & B_3 & B_4 & B_5 & 0 \\ C_1 & C_2 & C_3 & C_4 & C_5 & C_6 \\ D_1 & D_2 & D_3 & D_4 & D_5 & D_6 \\ 0 & 0 & E_3 & E_4 & E_5 & E_6 \\ F_1 & F_2 & F_3 & F_4 & F_5 & F_6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_{gi} \\ \Delta I_{d-q} \\ \Delta \theta_1 \\ \Delta V_g \\ \Delta \theta_{LF} \\ \Delta V_{LF} \end{bmatrix} \quad (8)$$

단,

$$A_1 = \begin{bmatrix} A_{11} & 0 & 0 \\ 0 & A_{22} & 0 \\ 0 & 0 & A_{33} \end{bmatrix} \quad (9)$$

위의 식(8)에서 각 변수에 관한 설명은 다음과 같다.

Δx_{gi} : $[\Delta x_{g1}, \Delta x_{g2}, \Delta x_{g3}]^T$ 로 배열되는 발전기 i 와 관련된 상태변수 ($i=1,2,3$)

ΔI_{d-q} : $[\Delta I_{d1}, \Delta I_{q1}, \dots, \Delta I_{d3}, \Delta I_{q3}]^T$ 로 배열되는 d 축과 q 축 고정자 전류벡터

$\Delta \theta_1$: 슬랙모선의 각

ΔV_g : 3대의 발전기모선의 전압 크기

$\Delta \theta_{LF}$: $[\Delta \theta_2, \dots, \Delta \theta_9]^T$

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

여기서, 아래첨자 LF는 부하조류 변수를 나타낸다. 1번 모선은 슬랙모선, 2번 모선과 3번 모선은 PV모선이며, 나머지 모선들은 PQ모선이다. 위의 식(8)에서 부하조류 Jacobian은 다음과 같다.

$$J_{LF} = \begin{bmatrix} E_5 & E_6 \\ F_5 & F_6 \end{bmatrix} \quad (10)$$

위의 식(10)은 다음과 같은 부분행렬(sub-matrix)의 순서로 배열된다.

- A. 동적 상태 변수 방정식
- B. 고정자 대수 방정식
- C. 슬랙모선에 대한 유효전력 평형방정식
- D. 발전기모선에 대한 무효전력 평형방정식
- E. 부하모선에 대한 무효전력 평형방정식
- F. 슬랙모선을 제외한 모든 모선에 대한 유효 전력 평형방정식

위의 식(8)의 고유값은 다음과 같은 A_{sys} 의 고유값을 구하면 된다.

$$A_{sys} = A_1 - J_1 * J_{AE}^{-1} * J_2 \quad (11)$$

여기서,

$$A = \begin{bmatrix} A_{11} & 0 & 0 \\ 0 & A_{22} & 0 \\ 0 & 0 & A_{33} \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$J_1 = [A_2 \ 0 \ A_4 \ 0 \ A_6] \quad (13)$$

$$J_2 = [B_1 \ C_1 \ D_1 \ E_1 \ F_1]$$

$$J_{AE} = \begin{bmatrix} B_2 & B_3 & B_4 & B_5 & 0 \\ C_2 & C_3 & C_4 & C_5 & C_6 \\ D_2 & D_3 & D_4 & D_5 & D_6 \\ 0 & E_3 & E_4 & E_5 & E_6 \\ F_2 & F_3 & F_4 & F_5 & F_6 \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$(15)$$

5. FACTS가 연계된 경우의 선형화모델

5.1 SVC가 연계된 경우의 선형화 모델

SVC는 그림 6과 같이 선형적인 제어특성을 보이고 있으며, V_{ref} 를 중심으로 제어영역을 벗어나면 단순히 고정된 커패시턴스/인덕턴스의 역할만 수행한다.

SVC의 Block Diagram은 그림 7과 같이 나타낼 수 있다^[5]. 이 그림에서, K 는 SVC 제어특성의 기울기, x_3 는 SVC의 어드미턴스 값, B_{SVC} , T_b , T_c 는 시정수, K_b , K_i 는 각각 비례 및 적분제어기의 상수, $V_{ref\ SVC}$ 는 SVC의 기준전압을 나타낸다.

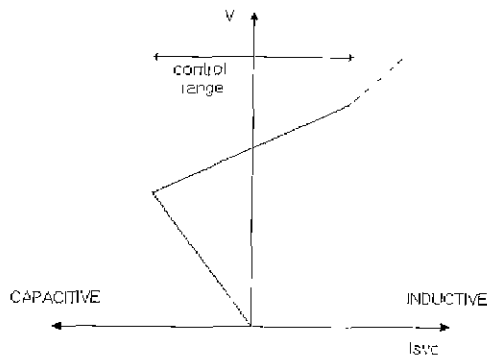


그림 6 SVC의 제어 특성
Fig 6 Control characteristic of SVC

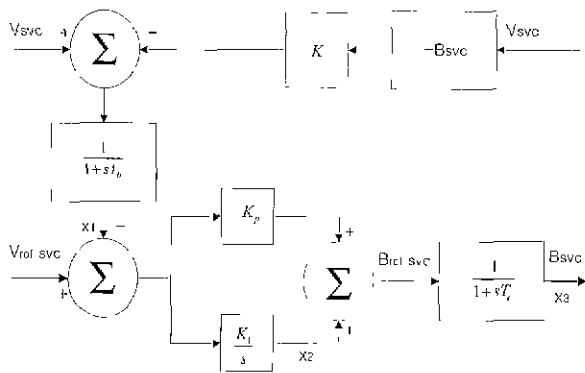


그림 7 SVC의 블록 다이어그램
Fig 7 Block Diagram of SVC

이러한 특성을 가진 SVC의 비선형 상태방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= \frac{1}{T_b} (V_{SVC}(1+Kx_3) - x_1) \\ \dot{x}_2 &= K_i (V_{ref,SVC} - x_1) \\ \dot{x}_3 &= \frac{1}{T_c} (x_2 + K_b (V_{ref,SVC} - x_1) - x_3) \\ Q_{SVC} &= V_{SVC}^2 x_3 \end{aligned} \quad (16)$$

식(16)을 선형화하면 식(17)과 같다

$$\begin{aligned} \Delta \dot{x}_1 &= \frac{1}{T_b} (\Delta V_{SVC}(1+Kx_3) + V_{SVC}K\Delta x_3 - \Delta x_1) \\ \Delta \dot{x}_2 &= K_i (\Delta V_{ref,SVC} - \Delta x_1) \end{aligned} \quad (17)$$

$$\Delta \dot{x}_3 = \frac{1}{T_c} (\Delta x_2 + K_b (\Delta V_{ref,SVC} - \Delta x_1 - \Delta x_3))$$

$$\Delta Q_{SVC} = 2V_{SVC} x_3 \Delta V_{SVC} + V_{SVC}^2 \Delta x_3$$

위의 식(17)을 식(8)에 추가하여 적용하면, 식(18)과 같다.

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{x}_{gr} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 & A_2 & 0 & A_4 & 0 & A_6 \\ B_1 & B_2 & B_3 & B_4 & B_5 & 0 \\ C_1 & C_2 & C_3 & C_4 & C_5 & C_6 \\ D_1 & D_2 & D_3 & D_4 & D_5 & D_6 \\ E_1 & 0 & E_3 & E_4 & E_5 & E_6 \\ F_1 & F_2 & F_3 & F_4 & F_5 & F_6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_{gr} \\ \Delta I_{d-q} \\ \Delta \theta_1 \\ \Delta V_g \\ \Delta \theta_{LF} \\ \Delta V_{LF} \end{bmatrix} \quad (18)$$

단,

$$A_1 = \begin{bmatrix} A_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & A_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & A_{33} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & A_{SVC} \end{bmatrix} \quad (19)$$

위의 식(18)에서 각 변수에 관한 설명은 다음과 같다.

$$\Delta x_{gr} : [\Delta x_{gr1}, \Delta x_{gr2}, \Delta x_{gr3}, \Delta x_{SVC}]^T$$

$$\Delta x_{SVC} : [\Delta x_1, \Delta x_2, \Delta x_3]^T$$

식(18), (19)에서 변화될 필요가 있는 행렬은 진하게 표시되었고, 행렬의 크기를 일치시키기 위하여 여기에 나타나지 않은 부가적인 0행렬요소가 포함될 필요가 있다. SVC가 시스템에 존재하는 부하모선 위에 연계되어 있다면, A_6 이 새로이 추가되며, ΔQ_{SVC} 때문에 식(17)에 0행렬이 아닌 행렬 E_1 이 추가된다.

5.2 UPFC가 연계된 경우의 선형화 모델

UPFC는 그림 8에 보는 바와 같이 2개의 전압원 인버터(인버터 I, II)가 하나의 직류 커패시터를 공유하여 링크되어 있다. 송전선로와 병렬로 연결되어 있는 인버터 I은 인버터II에서 필요로 하는 유효전력을 전력 시스템으로부터 흡수하여 직류링크를 통해 공급하거나, 병렬로 연결된 모선의 무효전력을 조절하는 기능도 한다. 선로와 직렬로 연결되어 있는 인버터II는 전력 시스템과 동일한 주파수의 교류전압을 선로에 직렬로 주입하는 기능을 갖는다^[6].

이러한 특성을 가진 UPFC의 비선형 상태 방정식은 다음과 같다.

$$L_1 \frac{dI_1}{dt} = -R_1 I_1 + V_i - \frac{1}{2} m_1 V_{dc} \cos \delta_1 \quad (20)$$

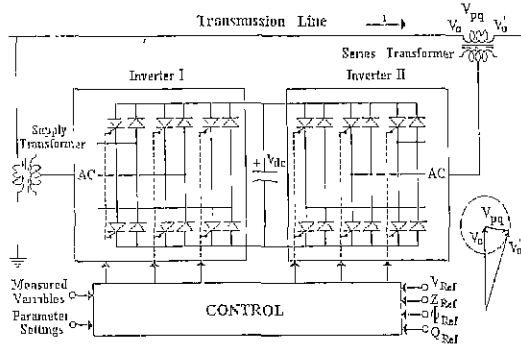


그림 8 UPFC의 시스템 구성
Fig. 8 System Configuration of UPFC

$$L_2 \frac{dI_2}{dt} = -R_2 I_2 - V_u + \frac{1}{2} m_2 V_{dc} \cos \delta_2 \quad (21)$$

$$C_{dc} \frac{dV_{dc}}{dt} = \frac{1}{2} m_1 \cos \delta_1 I_1 - \frac{1}{2} m_2 \cos \delta_2 I_2 \quad (22)$$

여기서, V_i 와 V_u 는 입력단과 출력단의 전압, m_1 과 m_2 , α_1 과 α_2 는 각각 인버터 I과 II의 변조율과 위상각, δ_1 과 δ_2 는 각각 $\omega t - \alpha_1$ 과 $\omega t - \alpha_2$ 를 나타낸다.

위의 UPFC를 7번 모선과 5번 모선 사이에 연계할 경우에 3기 9모선의 전력조류방정식에 다음과 같은 대수방정식이 추가된다^[7].

$$P_7 = -V_7 V_s (G_{77} \cos(\theta_7 - \theta_s) + B_{77} \sin(\theta_7 - \theta_s)) \quad (23)$$

$$Q_7 = -V_7 V_s (G_{77} \sin(\theta_7 - \theta_s) + B_{77} \cos(\theta_7 - \theta_s)) \quad (24)$$

$$P_5 = -V_5 V_s (G_{55} \cos(\theta_5 - \theta_s) + B_{55} \sin(\theta_5 - \theta_s)) \quad (25)$$

$$Q_5 = -V_5 V_s (G_{55} \sin(\theta_5 - \theta_s) + B_{55} \cos(\theta_5 - \theta_s)) \quad (26)$$

여기서, V_s 와 θ_s 는 각각 UPFC 직렬전압원의 전압 크기와 위상각을 나타낸다. 위의 식(20)~(22)를 선형화하면 식(27)~(29)와 같고, 식(23)~(26)를 3기 9모선의 전력조류방정식에 추가하여 선형화하면 식(30)~(33)과 같다.

$$\frac{d\Delta I_1}{dt} = -\frac{R_1}{L_1} \Delta I_1 + \frac{1}{L_1} \Delta V_u - \frac{m_1}{2L_1} \cos \delta_1 \Delta V_{dc}$$

$$+ \frac{m_1}{2L_1} V_{dc} \sin(\delta_1) \Delta \delta_1 \quad (27)$$

$$\frac{d\Delta I_2}{dt} = -\frac{R_2}{L_2} \Delta I_2 - \frac{1}{L_2} \Delta V_u + \frac{1}{2L_2} V_{dc} \cos \delta_2 \Delta m_2 + \frac{m_2}{2L_2} \cos \delta_2 \Delta V_{dc} - \frac{m_2}{2L_2} V_{dc} \sin \delta_2 \Delta \delta_2 \quad (28)$$

$$\frac{d\Delta V_{dc}}{dt} = -\frac{m_1}{2C_{dc}} \sin \delta_1 I_1 \Delta \delta_1 + \frac{m_1}{2C_{dc}} \cos \delta_1 \Delta I_1 - \frac{1}{2C_{dc}} \cos \delta_2 I_2 \Delta m_2 + \frac{m_2}{2C_{dc}} \sin \delta_2 I_2 \Delta \delta_2 - \frac{m_2}{2C_{dc}} \cos \delta_2 \Delta I_2 \quad (29)$$

$$\Delta P_7 = -V_s (G_{77} \cos(\theta_7 - \theta_s) + B_{77} \sin(\theta_7 - \theta_s)) \Delta V_7 - V_7 V_s (-G_{77} \sin(\theta_7 - \theta_s) + B_{77} \cos(\theta_7 - \theta_s)) \Delta \theta_7 \quad (30)$$

$$\Delta Q_7 = -V_s (G_{77} \sin(\theta_7 - \theta_s) + B_{77} \cos(\theta_7 - \theta_s)) \Delta V_7 - V_7 V_s (-G_{77} \cos(\theta_7 - \theta_s) + B_{77} \sin(\theta_7 - \theta_s)) \Delta \theta_7 \quad (31)$$

$$\Delta P_5 = -V_s (G_{55} \cos(\theta_5 - \theta_s) + B_{55} \sin(\theta_5 - \theta_s)) \Delta V_5 - V_5 V_s (-G_{55} \sin(\theta_5 - \theta_s) + B_{55} \cos(\theta_5 - \theta_s)) \Delta \theta_5 \quad (32)$$

$$\Delta Q_5 = -V_s (G_{55} \sin(\theta_5 - \theta_s) + B_{55} \cos(\theta_5 - \theta_s)) \Delta V_5 - V_5 V_s (-G_{55} \cos(\theta_5 - \theta_s) + B_{55} \sin(\theta_5 - \theta_s)) \Delta \theta_5 \quad (33)$$

위의 식(27)~(33)을 식(8)에 추가하여 적용하면, 식(34)과 같다. 식(34)에서도 SVC의 경우와 같이 변화될 필요가 있는 행렬은 진하게 표시되었고, 행렬의 크기를 일치시키기 위하여 부가적인 0행렬요소가 포함되었다.

$$\begin{bmatrix} \Delta x_{gr} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_1 & \mathbf{A}_2 & 0 & \mathbf{A}_4 & 0 & \mathbf{A}_6 \\ B_1 & B_2 & B_3 & B_4 & B_5 & 0 \\ C_1 & C_2 & C_3 & C_4 & C_5 & C_6 \\ D_1 & D_2 & D_3 & D_4 & D_5 & D_6 \\ 0 & 0 & E_3 & E_4 & E_5 & E_6 \\ F_1 & F_2 & F_3 & F_4 & F_5 & F_6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_{gr} \\ \Delta I_{d-q} \\ \Delta \theta_1 \\ \Delta V_g \\ \Delta \theta_{LF} \\ \Delta V_{I,F} \end{bmatrix} \quad (34)$$

$$\text{단, } \mathbf{A}_1 = \begin{bmatrix} A_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & A_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & A_{33} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mathbf{A}_{UPFC} \end{bmatrix} \quad (35)$$

여기서,

$$\Delta x_{gr} : [\Delta x_{g1}, \Delta x_{g2}, \Delta x_{g3}, \Delta x_{UPFC}]^T$$

$$\Delta x_{UPFC} : [\Delta x_1, \Delta x_2, \Delta x_3]^T$$

UPFC가 시스템에 존재하는 부하모선 사이에 연계되어 있다면, A_6 은 A_6 으로 수정되며, 각 모선의 전압과 위상각의 함수로서 나타내어 질 수 있다. 각 모선이 부하모선이므로 식(8)의 E_5, E_6, F_5, F_6 은 각각 식(30)의 E_5, E_6, F_5, F_6 으로 수정된다.

6. 사례연구 및 시뮬레이션 결과

6.1 3기 9모선 시스템에 SVC를 연계한 경우

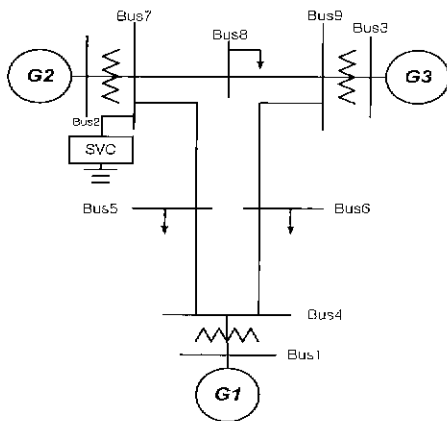


그림 9 SVC가 연계된 3기 9모선 시스템
Fig 9 3 Machine 9 Bus System with SVC

그림 9는 3기 9모선 시스템^[2]의 7번 모선에 SVC를 병렬로 연계한 경우이다. SVC에 대한 데이터는 표 1과 같다. 이 경우에 5번 모선에서 부하증가가 일어난다고 가정하면, 부하가 증가함에 따라 부가적인 전력이 그 기기의 관성에 비례하여 각각의 기기에 할당된다. 더 높은 관성을 가진 기기는 부가적인 발전력에 비례하여 더 큰 부분으로 주어진다. 여기서는 정전력 부하모델을 사용하였다.

표 1 SVC에 대한 데이터
Table 1 Data of the SVC

K	T_c	T_b	K_p	K_i	K_b	T_1	T_2
01	0.02	0.02	0.0	100.0	0.035	0.044	0.02

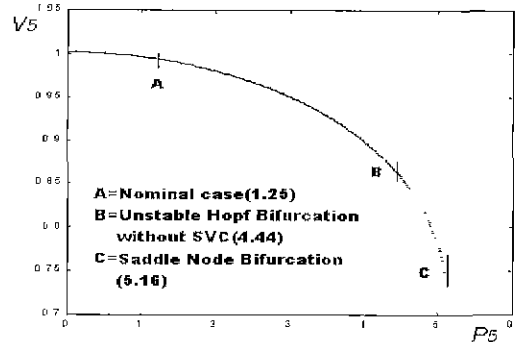
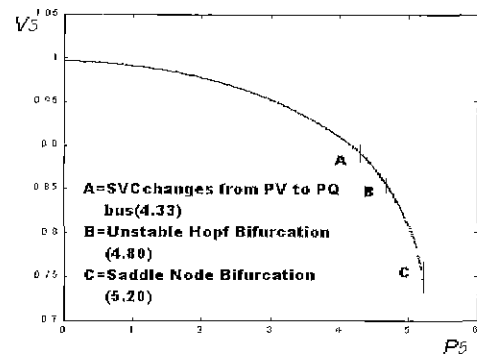
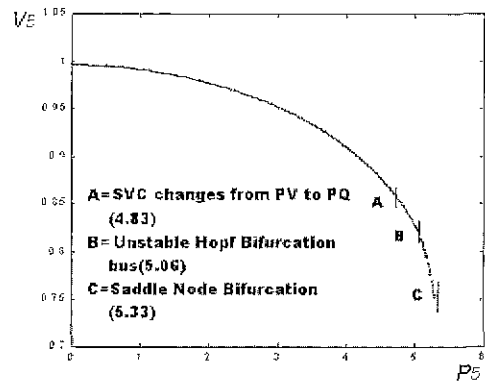


그림 10 SVC가 연계되지 않은 PV곡선의 윗부분
Fig. 10 Top Portion of the PV curve without SVC



(a) $Q_{SVC} = 0.5$



(b) $Q_{SVC} = 1.0$

그림 11 SVC가 연계된 PV곡선의 윗부분
Fig 11 Top Portion of the PV curve with SVC

그림 10에서 부하전력이 공칭값 1.25로부터 증가됨에 따라 SVC가 연계되어 있지 않은 경우는 불안정한 Hopf Bifurcation이 $P_5 = 4.44$ 에서 일어나며, Saddle Node Bifurcation은 $P_5 = 5.16$ 에서 발생한다.

SVC가 연계되었을 때, SVC에 입력되는 무효전력의 양이 각각 $Q_{SVC} = 0.5$ 와 $Q_{SVC} = 1.0$ 인 두 경우에 대하여 살펴보기로 하겠다. 그림 11(a)와 (b)는 이 두 경우를 잘 비교해 주고 있다. 그림 11(a)와 (b)에서 SVC모선이 PV모선으로부터 PQ모선으로 바뀌는 부분이 있다. 이때, SVC는 인덕턴스의 낮은 제한값을 넘어 커패시터 상태로 된다. 여기서, PV모선으로부터 PQ모선으로 바뀌는 P_5 는 각각 $P_5 = 4.33$ 과 $P_5 = 4.83$ 이다. 따라서, SVC모선에 공급된 무효전력이 클수록 PV모선으로부터 PQ모선으로 바뀌는 부하값도 증가됨을 알 수 있다. 이 값의 증가는 더 높은 부하로 SNB를 지연시킨다.

불안정한 Hopf Bifurcation(UHB)과 Saddle Node Bifurcation(SNB)를 비교해보면, $Q_{SVC} = 0.5$ 와 $Q_{SVC} = 1.0$ 일 때 각각 UHB는 $P_5 = 4.80, P_5 = 4.83$ 에서, SNB는 $P_5 = 4.80, P_5 = 4.83$ 에서 일어난다. 따라서, SVC모선에 공급된 무효전력이 클수록 UHB와 SNB 모두 지연됨을 알 수 있다. 즉, 전압붕괴가 지연되는 결과가 생긴다. 이들의 결과를 정리하면 표 2와 같다.

표 2 SVC의 모선 변화 및 Bifurcation 비교

Table 2 Bus Change and Bifurcation Comparison of SVC

Q_{SVC}	PV→PQ일때의 P_5	UHB의 P_5	SNB의 P_5
0.0		4.44	5.16
0.5	4.33	4.80	5.20
1.0	5.06	4.83	5.33

6.2 3기 9모선 시스템에 UPFC를 연계한 경우

그림 12는 3기 9모선 시스템의 7번 모선과 5번 모선 사이에 UPFC를 연계한 경우이다. 이 경우에 부하 증가가 일어나는 모선은 5번 모선이며, UPFC에 대한 데이터는 표 3과 같다.

$\theta_s = -5^\circ$ 의 같은 위상각에 대하여 $V_s = 0.03$ 와, $V_s = 0.06$ 일 때를 비교해보면, 그림 13(a)와 (b)에는 P_5 가 각각 3.86과 4.64에서 7번 모선이 PV모선으로부터 PQ모선

으로 바뀌게 된다. 따라서, 직렬전압원 V_s 의 크기가 클수록, 즉, 7번 모선에 공급된 유효전력과 무효전력이 클수록 PV모선으로부터 PQ모선으로 바뀌는 부하값도 증가됨을 알 수 있다. 이 값의 증가는 더 높은 부하로 Saddle Node Bifurcation을 지연시킨다.

V_s 가 0.03과 0.06일 때, 불안정한 Hopf Bifurcation(UHB)과 Saddle Node Bifurcation(SNB)을 비교하여 정리해 보면 표 4와 같다. 이 표에서 볼 수 있듯이 SVC 경우와 마찬가지로 모선에 공급된 유효전력과 무효전력이 클수록 UHB와 SNB가 지연되어 전압붕괴가 지연되는 결과가 생기는 것을 확인할 수 있다.

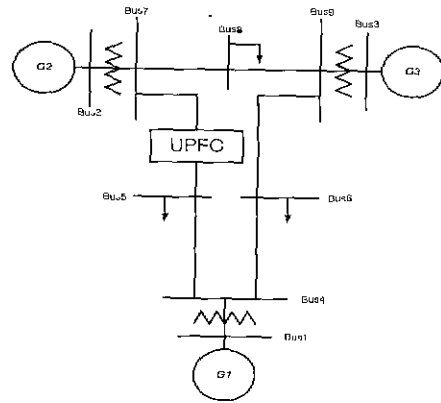


그림 12 UPFC가 연계된 3기 9모선 시스템

Fig. 12 3 Machine 9 Bus System with UPFC

표 3 UPFC에 대한 데이터

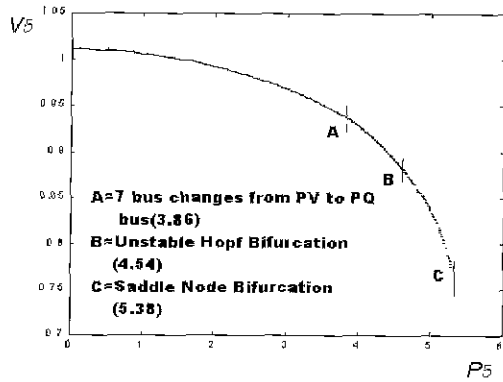
Table 3 Data of UPFC

R_1	L_1	R_2	L_2	m_1	m_2	C_{dt}	δ_1	δ_2
0.16	0.013	0.032	0.161	0.85	0.85	12	0	0

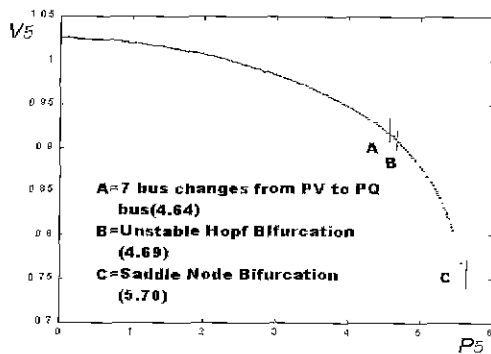
표 4 UPFC의 모선 변화 및 Bifurcation 비교

Table 4 Bus Change and Bifurcation Comparison of UPFC

직렬전압원	PV→PQ일때의 P_5	UHB의 P_5	SNB의 P_5
$V_s = 0.03, \theta_s = -5^\circ$	3.86	4.54	5.38
$V_s = 0.06, \theta_s = -5^\circ$	4.64	4.69	5.70



(a) $V_s = 0.03, \theta_s = -5^\circ$



(b) $V_s = 0.06, \theta_s = -5^\circ$

그림 13 UPFC가 연계된 PV곡선의 윗부분
Fig. 13 Top Portion of the PV curve with UPFC

7. 결 론

본 논문에서는 전압안정도 향상을 위하여 3기 930선
의 전력시스템에 SVC와 UPFC를 연계하였고,
Bifurcation이론을 통하여 PV곡선에서 전압안정도에
미치는 향상효과와 그 동작특성을 확인하였다. 즉,
SVC는 병렬로 연계된 모선에 무효전력을 공급하고,
UPFC는 병렬 및 직렬로 연계된 양단의 모선에 유효
전력 또는 무효전력을 공급하여 FACTS가 연계되지
않은 경우보다 연계된 경우에 있어서 불안정한 Hopf
Bifurcation이 지연된다. 그리고, PV모선으로부터 PQ
모선으로 변화하는 부하값이 지연됨으로서 Saddle
Node Bifurcation을 지연시키는 원인이 되므로 전압
붕괴가 지연되는 결과를 가져온다. 그러므로, FACTS
가 공급하는 유효전력 또는 무효전력의 증가는 전압안

정도의 범위를 증가시킴을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] W.Zhu, R.R.Mohler, R.Spee, W.A.Mittelstadt, D.Maratakulam, "Hopf Bifurcations in a SMIB Power System with SSR", *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 11, No. 3, pp.1579-1584, Aug., 1996.
- [2] P. Kundur, *Power System Stability and Control*, McGraw-Hill, Inc, 1993.
- [3] Denny Gulick, *Encounters with Chaos*, McGraw-Hill, Inc., 1992.
- [4] Hua Wang, "Control of Bifurcations and Routes to Chaos in Dynamical Systems," *University of Maryland College Park*, 1993.
- [5] K.R.Padiyar, R.K.Varma, "Damping Torque Analysis of Static Var System Controllers," *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 6, No. 2, pp. 458-465, May 1991.
- [6] K. K. Sen, E. J. Stacey, "UPFC Theory, Modeling, and Applications," *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 13, No. 4, pp. 1453-1460, Oct. 1998.
- [7] C. R. Fuerte-Esquivel, E. Acha, "Unified Power Flow Controller: a Critical Comparison of Newton-Raphson UPFC Algorithms in Power Flow Studies," *IEE Proc.*, Vol. 144, No. 5, pp. 437-444, 1997.

본 논문의 결과는 1999년 정보통신부의 정보통신
우수시범학교 지원사업에 의하여 수행된 것입니다.

저 자 소 개



주기성(朱基成)

1971년 11월 12일생. 1998년 동국대 공대
전기공학과 졸업(학사). 2000년 한양대
대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 태
광E&C 근무.



김진오(金鎭吾)

1956년 1월 17일생. 1980년 서울대 공대
전기공학과 졸업(학사). 1983년 동 대학
원 졸업(석사). 1991년 Texas A&M Univ.
졸업(박사). 현재 한양대학교 전기공학과
부교수.