

STATCOM을 이용한 전력계통의 전압안정도 향상방안에 관한 연구

김재현, 김양일, 기경현, 정성원
 순천대학교 정보통신공학부

A Study on Voltage Stability Enhancement of Power System using the STATCOM

Jaehyeon Gim, Yang-il Kim, Kyunghyun Ki, Sungwon Jeung
 School of Information & Communication Engineering, Sunchon National Univ.

Abstract In this paper there are different methods used to study the voltage stability, such as the P-V curve method, Jacobian method, and the voltage collapse proximity indicator(L-index) method. The P-V curve method is to check operating margin from the maximum operating point. The Jacobian method is to check the eigenvalue or the minimum singular value of the load flow Jacobian matrix. If the power system is unstable, one of the eigenvalues, at least, has crossed the imaginary axis. The L-index method is to quantify how to close a particular operating point. This paper describes these methods to select the best location of FACTS and demonstrate the effectiveness of STATCOM of voltage stability on the IEEE 9-bus system.

된다. M점을 기준으로 상부는 안정영역이고 하부는 불안정영역이다.

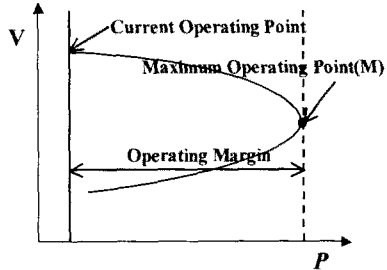


Fig.2.1 P-V Curve

M점은 부하전력이 최대가 되는점이며 부하임피던스의 감소에 따라 점점 증가하다가 M점에서 최대가 되고 이를 지나면 점점 감소하게 된다. 이것은 M점을 지나면 계통의 손실이 급격히 증가하여 부하모선의 전압을 감소시키기 때문이다.

1. 서론

국내의 전력계통은 부하의 지속적인 증가로 발전설비 규모는 현재의 전력계통보다 크게 성장할 것으로 예측되고 있다. 하지만 국내의 전력계통 구조적 특성을 살펴보면 부하와 전원설비가 특정지역에 편재되어 있고, 전원단지의 규모가 커짐에 따라 지역간 유통전력이 증대하는데 비해 송전계통의 경과지 확보는 각 지방자치 단체나 환경단체의 지역이기주의에 의해 어려움으로 설비확충이 제대로 이루어지지 않고 있는 실정이며 이러한 추세는 점차 심화될 것으로 전망된다. 이에 대안으로 전력계통의 특성을 개선하고 전력수송능력 및 설비의 이용률을 증대하기 위하여 유연송전시스템(Flexible AC Transmission System: FACTS) 기술 개발이 필요하게 되었다.[1-2] 그리고 전압안정도란 계통의 부하증가, 선로탈락, 발전기 정지 등의 외란이 발생할 경우, 전압을 크게 저하 또는 상승시키지 않고 안정하게 운전할 수 있는가를 평가하는 것으로 Jacobian Matrix를 이용한 Eigen-value[3]와 전압붕괴 근접도 지표 L-Index [4] 및 P-V과 Q-V곡선을 이용한 방법들이 있다.

2.2 전압 안정도 Index (L-index)

가. 간단한 전력 계통인 경우
 모선 1은 부하 모선이고 모선 2는 발전기 모선이다. 계통 어드미턴스 행렬을 모선 1의 전류 방정식을 나타내면 다음과 같다.

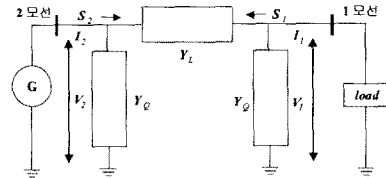


Fig.2.2 Line model

본 논문에서는 이 방법들을 이용하여 FACTS의 최적의 설치 장소를 정하고 그 효과를 IEEE 9모선 계통에 적용하여 계통이 전압 안정도가 향상되는 것을 입증하였다. FACTS모델은 다양한 모델이 있지만 본 논문에서는 모선 전압을 제어하는 STATCOM[5-6]을 이용하였다.

$$Y_{11} V_1 + Y_{12} V_2 = I_1 = \frac{S_1^*}{V_1} \quad (2.1)$$

여기서 Y_{11} , Y_{12} 는 어드미턴스 행렬[Y]의 요소이고, S_1 는 모선1의 피상 전력이며 다음식으로 표현된다.

$$S_1 = V_1 \cdot I_1^* \quad (2.2)$$

식 (2.1)로 부터 다시 정리하면 다음과 같다.

$$V_1^2 + V_0 V_1^* = \frac{S_1^*}{Y_{11}} = a_1 + i b_1 \quad (2.3)$$

$$\text{여기서 } V_0 = \frac{Y_{12}}{Y_{11}} V_2 = - \frac{Y_L}{Y_L + Y_Q} V_2$$

전압 V_1 의 크기가 일정하고 S_1 평면에서 중심은

2. 전압안정도

2.1 P-V곡선

그림2.1의 P-V곡선은 유효전력(P)와 모선전압(V)의 관계를 나타낸 것으로 현재의 운전점과 최대운전점(M)까지 얼마나 여유가 있는가로 전압안정도를 판별하게

($Y_{11}^* \cdot V_1^2$)에 의해서 결정되고 반경은 $Y_{11} \cdot V_0 \cdot V_1$ 으로 계산되는 원의 형태로 V_1 의 크기를 증가시키면 원의 중심위치가 이동되고 반경이 증가되는 그림 2.3과 같다. 그림 2.3에서 (+)는 실제 존재하는 상부의 고전압 V_1 이고, (-)부분은 하부의 저전압 V_1 이다. 안정도 기준은 S_1 평면에서 V_1 의 변화는 수학적으로 $P=(V_1 | 0 \leq V_1 < \infty)$ 범위에 정의되지만 실제 전력계통에서 유지해야 하는 전압으로 제한된다. 아래의 두 모선 계통에서 안정도 기준은 이 원을 포함하는 외곽선이 된다. 이 외곽선 외부는 물리적인 의미가 없지만 이 경계점은 두 해가 같은 점이 되는 중근이 되려면 식(2.4)를 만족해야 한다.

$$\pm \sqrt{\frac{V_0^4}{4} + a_1 V_0^2 - b_1^2} = 0 \quad (2.4)$$

이때의 근들의 집합이 그림 2.3의 외곽선이다. 식(2.3)으로부터 식(2.4)를 만족하도록 정리하면 다음과 같다.

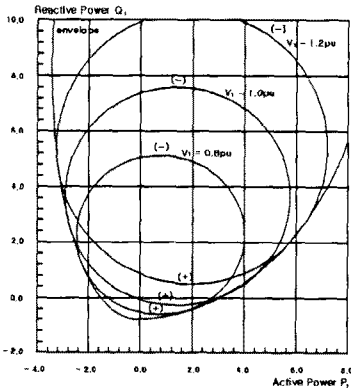


Fig.2.3 Power circles of constant voltage magnitude V_1

$$\left| 1 + \frac{V_0}{V_1} \right| = \frac{S_1}{Y_{11} V_1^2} = 1 \quad (2.5)$$

식(2.5)의 관계로부터 전압안정도를 평가할 수 있는 지표 L 을 정의할 수 있다. 전압 V_1 이 안정영역에 있을 때 지표 L 은 0에서 1사이에서 변화하고 식(2.6)과 같이 정의한다.

$$L = \left| 1 + \frac{V_0}{V_1} \right| = \left| \frac{S_1}{Y_{11} V_1^2} \right| = r + \sqrt{r^2 - 1} \quad (2.6)$$

그러므로 이 L 은 전압안정도에 대한 계통의 특성을 나타내고 있다. 또한 L 의 크기 정도는 전압붕괴의 척도로 사용할 수 있다.

나. 여러모선인 경우

발전기모선과 부하모선으로 구분하여 다시 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} I_C \\ I_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11}^{CG} & Y_{12}^{GL} \\ Y_{21}^{LC} & Y_{22}^{LL} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_C \\ V_L \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

여기서 I_C, I_L 과 V_C, V_L 은 발전기 모선과 부하모선의 전류와 전압을 나타낸 것이다. 주어진 부하 조건에서 L -index는 모든 부하 모선에서 계산할 수 있다. L 의 최대값이 계통의 전압붕괴의 근접지표를 나타낸다. L 값이 1에서 0으로 이동하면 전압 안정도 여유가 증가하는 것을 나타낸다.

$$L_j^{LG} = \left[1.0 - \sum_{i=1}^m A_{ij} \frac{V_i}{V_j} \right]^2 + \left[- \sum_{i=1}^m D_{ij} \frac{V_i}{V_j} \right]^2 \quad (2.8)$$

식(2.8)을 식(2.3)의 형태로 변형하면 다음과 같다.

$$V_j^2 + V_{0j} \cdot V_j = \frac{S_j^{**}}{Y_{jj}^*} \quad (2.9)$$

여기서 $V_{0j} = - \sum_{i=1}^m F_{ij} V_i$, $Y_{jj}^* = \frac{1}{Z_{jj}}$

$$S_j^* = S_j + S_j^{corr}$$

$$S_j^{corr} = \left(\sum_{i \neq j} \frac{Z_{ij}^*}{Z_{jj}^*} \cdot \frac{S_i}{V_j} \right) \cdot V_j$$

모선전압 V_j 는 모선전력 S_j 와 등가 전력 S_j^{corr} 에 영향이 있다. S_j^{corr} 는 전력계통의 다른 부하로부터 전달되는 등가전력이다. 그러므로 모선 j 의 전압 안정도 지표 L 는 다음과 같다.

$$L_j = \left| 1 + \frac{V_{0j}}{V_j} \right| = \left| 1 - \frac{\sum_{i=1}^m F_{ij} V_i}{V_j} \right| \quad (2.10)$$

계통이 안정하기 위한 조건은 $L_j \leq 1$ 이어야 한다.

전체 계통을 고려하면

$$L = \text{MAX}_{j=1, m} (L_j) \quad (2.11)$$

또는 다음식으로 표현할 수 있다.

$$L = \text{MAX}_{j=1, m} \left| 1 - \frac{\sum_{i=1}^m F_{ij} V_i}{V_j} \right| \quad (2.12)$$

즉 전력계통이 안정하기 위해서는 L 이 1보다 적어야 한다.

3.3 자코비안법

전력방정식을 Newton Raphson 방법에 적용시키면, 다음과 같은 자코비안 행렬을 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & N \\ M & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V/V \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

여기서 H, N, M, L 은 자코비안의 소행렬이고, θ 와 V 는 각각 전압의 위상각과 크기, P 와 Q 는 각각 해당 모선의 유효전력과 무효전력이다.

앞의 자코비안 행렬을 역행렬로 취하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V/V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & N \\ M & L \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

여기서, θ 와 V 의 편차를 구하여 뉴턴-랩슨법의 알고리즘에 의해 개선된 θ, V 값을 다음과 같이 구한다.

$$\theta_{i+1} = \theta_i + \Delta \theta \quad (2.15)$$

$$V_{i+1} = V_i + \Delta V \quad (2.16)$$

식(2.13)에서 Jacobian 행렬의 고유치들 중 하나라도 허수축을 교차하게 되면 안정영역에서 불안정영역으로 이동된다. 이 고유치들이 허수축의 왼쪽에 있을 때 그 시스템은 안정하다고 할 수 있다.

3. STATCOM(Static Synchronous Compensator) 모델

STATCOM은 그림 3.1과 같이 결합 변압기, DC를 AC로 변환하는 컨버터 및 DC 전원을 저장할 수 있는 장치로 구성되어 있다. 여기서 z_{SR} 은 모선 S와 R사이의 선로 임피던스이고, V_{sh} 는 컨버터의 출력 전압이다. V_S 는 S모선의 전압, z_{sh} 는 결합변압기 임피던스이다. 컨버터에서 발생한 전원은 발전기에서 생성된 전원과 같은 주파수의 정현파이며 전압의 크기와 위상을 제어할 수 있다.

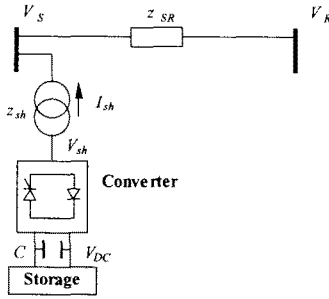


Fig 3.1 Structure of STATCOM

그림 3.2는 STATCOM의 등가회로이다. 컨버터에서 공급되는 전압 V_{sh} 로 치환하고 결합 변압기의 임피던스 z_{sh} 이다.

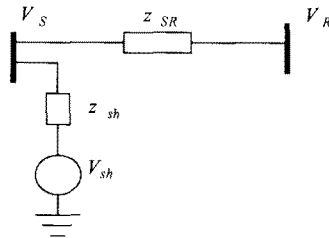


Fig 3.2 STATCOM Model

컨버터 전압 V_{sh} 와 결합 변압기의 임피던스를 이용하여 전류원으로 등가회로는 그림 3.3과 같이 표현된다. 이를 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$I_{sh} = \frac{V_S - V_{sh}}{z_{sh}} \quad (3.1)$$

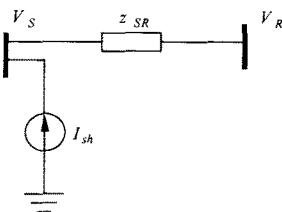


Fig 3.3 Current Equivalent Circuit of STATCOM

이 전류원을 모선 전압 V_S 를 기준으로 축으로 한 실수부와 허수부로 나눌 수 있다.

$$I_{sh} = I_{shp} + jI_{shq} \quad (3.2)$$

4. 모의실험

4.1 9모선 계통

모의 실험 계통은 참고문헌[7]의 IEEE 9모선 계통을 사용하였으며 그림 1에서 괄호에 있는 번호는 선로 번호이고 괄호가 없는 것은 모선 번호이다. 스윙모선은 모선 1번이다.

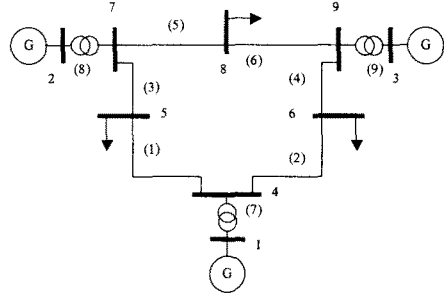


Fig 4.1 IEEE 9Bus System

4.2 모의 실험 결과

9모선으로 모의실험한 결과를 아래와 같이 나타내었다. 먼저 가장 일반적으로 사용되는 P-V 곡선을 이용한 모의실험에서는 그림 4.2와 같이 모선5가 가장 최적 모선으로 결과가 나왔다.

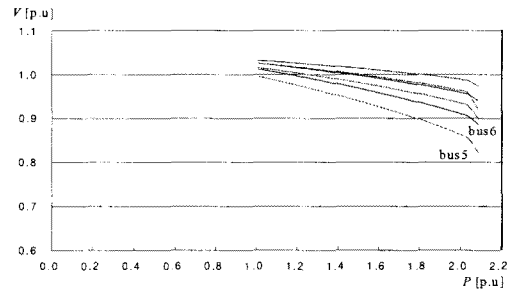


Fig 4.2 P-V Curve

Table 4.1 Eigen-values of the Jacobian Matrix

Bus No	Eigen-Value	
4	ΔP	0.0
5		-0.412
6		3.987
7		16.709
8		17.749
9	20.870	
4	ΔQ	0.0
5		0.0
6		0.669
7		2.570
8		1.337
9	1.235	

표 4.1은 자코비안 행렬의 고유치를 나타낸 것으로

여기서도 역시 모선 5가 최적 모선으로 선정 되었지만 2순위로는 모선 4가 선정되었다. 이 결과는 P-V곡선의 결과가 모선 6인 것과 다르다.

그리고 마지막으로 전압안정도 L-Index에서도 모선 5이 최적 모선으로 모의실험 결과가 나왔으며 이는 모선 5번의 전압이 가장 낮은 것으로 나타났기 때문이다.

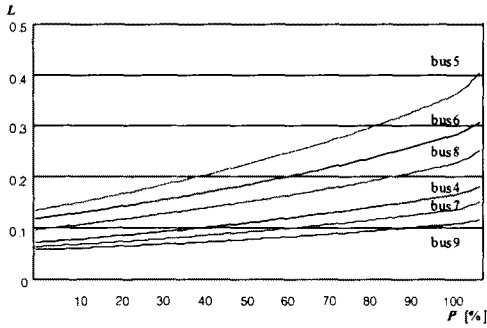


Fig 4.2 9Bus L-Index

따라서 STATCOM을 이용한 전력계통의 전압안정도를 향상시키기 위하여 최적의 위치를 모선 5번으로 선정하고 모선 4, 6번과 비교하여 STATCOM을 설치한 결과는 그림 4.과 같다. 이 결과에 따르면 STATCOM을 모선 5번에 설치하는 것이 전압안정도를 향상시키는 것이 효과적이다.

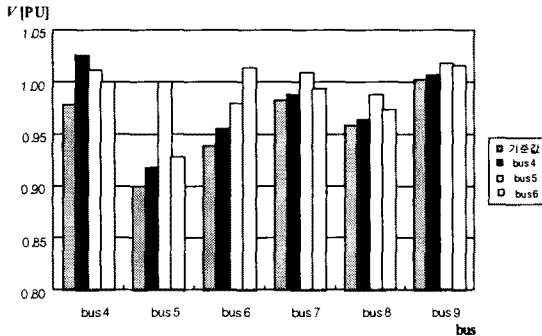


Fig 4.3 Compensation STATCOM on Bus 5 and 6

5. 결 론

전압 안정도 증진을 위한 STATCOM설치 위치에 따른 각 모선의 전압 상태를 분석하였다. 분석에 사용한 방법은 전압 안정도 해석에 주로 사용하는 방법인 P-V 곡선, L-Index, 및 Jacobian행렬의 고유값을 이용하여 최적의 설치 위치를 결정하였다. 그 결과에 의하면 모선 5에 설치하는 것이 모든 방법에서 최적으로 같은 결과를 나타내었다.

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력공학 공동연구소(02-008)주관으로 수행된 과제임.

(참 고 문 헌)

- [1] Hingorani, N.G and Gyugyi, L., "Understand FACTS-Concept and Technology of Flexible AC Transmission System", IEEE Press, 1999
- [2] "Flexible AC Transmission", IEEE Spectrum, pp 40-48, April 1993
- [3] M.M. Salama, E.M. Saied, S.M. Abdel-Maksoud, "Steady State Voltage Instability Assessment in a Power System", Elsevier Science Ltd. pp59-69, 1999
- [4] P.Kessel, H.Glavitsch, "Estimating the Voltage Stability of a Power System", IEEE Trans. Vol PWRD-1 No.3, July 1986
- [5] L Gyugyi, "Application Characteristics of Converter Based FACTS Controller", International Conference on Power System Technology, 2000.
- [6] JC.Passelegue, N.Hadjsaid, D.Georges, R.Feuillet, V.Hanneton, S.Vitet, "An Efficient Index to Deal with Interaction Phenomena of FACTS Devices in Power System" IEEE Trans. on PS, pp401-405, 1998
- [7] P.M. Anderson, A.A. Fouad, "Power System Control and Stability", 2003