

PSS와 FACTS의 감도기법을 이용한 위치 선정에 관한 연구

김양일, 기경현, 정성원, 김재현
 순천대학교 정보통신공학부

Optimal Location of PSS and FACTS using Sensitivity Index

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

Abstract - In this paper, a sensitivity index is proposed for identifying the location of FACTS in the power system with PSS. The index can be calculated by using the bus impedance matrix of the power system. This index that is related with sensitivity matrix is included in the network and not in operating condition for power system. This index is applied to IEEE 9 bus test system.

1. 서 론

전력계통의 안정도를 개선하기 위하여 주로 사용되고 있는 장치에는 전력안정화장치(PSS)와 유연 송전 선로(FACTS)등이 있다. PSS는 발전기의 여자기에 설치하여 발전기 단자 전압을 적절히 제어함으로써 전력 계통을 안정화하는 장치이며 FACTS는 선로에 설치하여 다양한 목적으로 사용되고 있는 장치로서 여러 종류들이 있다. 이들 종류를 크게 대별하면 선로와 병렬로 연결되어 무효전력을 주입하여 전압을 제어하는 (STATCOM) 장치와 선로에 직렬로 연결되어 선로의 임피던스(TCSC)를 제어하거나 전압원(SSSC)을 삽입하여 유효전력과 무효전력을 제어하는 장치들로 구분할 수 있다 [1].

PSS의 위치 선정에 사용되는 방법은 주로 고유치를 이용하는 방법이 많이 사용되고 있다[2-4]. 이들의 장치가 어느 위치에 설치되고 어떤 값으로 정정되느냐에 따라 안정도에 많은 영향을 미친다. 그러므로 본 논문에서는 PSS가 설치된 발전기와 가장 밀접하게 연관된 선로에 FACTS를 설치하게 함으로서 안정도, ATC (Available Transfer Capability)[5] 및 전력손실을 최소화하기 위한 위치 선정 방법을 직류법 조류계산을 이용한 발전기의 출력과 선로조류와의 관계를 감도로 분석할 수 있는 방법으로 개발하여 IEEE 9모선 계통에 적용하였다.

2. 감도 인덱스

2.1 전력계통 선형화

소 신호 동요에 관한 문제는 시스템을 선형화하고 선형 제어 이론을 적용하여 시스템의 불안정을 분석하고 안정도를 증진하기 위하여 적절한 제어 기법을 적용한다. PSS와 FACTS장치가 있고 m개의 발전기가 있는 시스템의 선형 상태 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{d}{dt}x = Ax + Bu \tag{1}$$

여기서 A는 n×n의 정방 행렬이고 x는 상태 변수, u는 PSS나 FACTS의 입력이 되는 제어 변수이다. 식(1)을 대각선화하면 다음과 같다.

$$\frac{d}{dt}z = \Lambda z + Q^T B u \tag{2}$$

여기서 z = Px. P와 Q는 n×n의 정방행렬로서 A행렬의 오른쪽 및 왼쪽 고유벡터이다. T는 전치 행렬한다. 불안정한 한 고유치에 대하여 식(2)을 나타내면 다음과 같다.

$$\frac{d}{dt}z_i = \lambda_i z_i + \sum_{k=1}^m q_i^T b_k u_k \tag{3}$$

여기서 λ_i는 A행렬의 i번째 고유치, q_i는 i번째 고유벡터, b_k는 B행렬의 k번째 열벡터이다. 여기서 i번째 고유치가 불안정한 모드라면 q_i^Tb_k가 i모드의 제어를 가능하게 하는 k번째 변수의 영향을 나타낸다. 그러므로 이것이 불안정한 모드를 안정화하는데 영향이 가장 크다.

2.2 감도 인덱스 계산

안정도의 판별은 각 발전기의 회전자 위치의 동요 상태를 이용하여 분석한다. 그러므로 불안정 모드에서 발전기의 회전자 위치나 각속도 변수에 대한 왼쪽 고유벡터 요소들을 서로 비교하여 그 변수들의 요소가 다른 요소와 비교하여 큰 값을 가지는 변수를 이용하게 된다. 그러므로 감도 인덱스는

$$q_i^T b_k = \sum_{j=1}^{n_g} q_{\Delta\omega_j, i} b_{\Delta\omega_j, k} \tag{4}$$

여기서 q_{Δω_j, i}는 Δω_j에 대한 q_i요소이고 b_{Δω_j, k}는 Δω_j에 대한 b_k요소이다. b_{Δω_j, k}는 참고문헌 [2]에서 계산한 방법을 사용하면 다음과 같이 구할 수 있다.

$$b_{\Delta\omega_j, k} = \frac{1}{M_j} \frac{\Delta P_j}{\Delta u_k} \tag{5}$$

여기서 P_j는 j번째 발전기의 전기적 출력이고 M_j는 발전기의 관성 정수이다. u_k는 제어 변수로서 PSS나 FACTS가 제어하는 변수들이다. FACTS는 모선 전압과 선로의 유, 무효 전력을 제어하는데 이용되는 것으로는 모선 무효전력의 입출력, 선로의 임피던스 변화와 전압원등이 있다.

PSS와 FACTS가 서로 협조 제어를 하기 위하여 PSS가 설치된 발전기와 FACTS가 설치될 위치와의 관계가 얼마나 연관성이 있는냐에 있다. 그러므로 본 논문에서는 선로의 제어 변수와 발전기의 제어변수의 관계를 감도행렬로 나타낸다. 계산된 방법은 전력방정식을 Fast Decoupled법으로 간략화하여 P-θ와 Q-V의 관계로 나누어 다음과 같은 가정에서 계산한다.

- (1) 모든 전압은 1.0[pu]이다.
- (2) 선로의 X/R비는 3보다 크다.
- (3) 모선의 위상각차는 매우 적다.
- (4) 변압기의 탭은 약 1.0이다.

이 감도행렬은 모선과 선로의 연관성을 나타내는 것으로 모선의 유효전력과 무효전력의 변화에 대한 모선의 전압과 위상 변위 및 선로의 유효, 무효전력으로 계통의 변화를 나타내는 행렬이다.

2.2.1 유효전력에 대한 감도 행렬

유효전력의 감도행렬의 구조는

$$\begin{bmatrix} \Delta p \\ \Delta \theta \end{bmatrix} = [S_{\theta}] \begin{bmatrix} \Delta \alpha \\ \Delta P \end{bmatrix} \quad (6)$$

여기서 p 는 선로의 유효전력 조류이고, P 는 모선에 주입되는 전력, θ 는 모선의 위상각, α 는 선로의 위상변위이다.

감도 요소는 임피던스 행렬의 요소를 이용하여 구할 수 있다. i 모선의 발전기의 유효전력의 변화가 선로 (j)의 유효전력변화를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\Delta p_{(j)}}{\Delta P_{Gi}} = (z_{mi} - z_{ni})b_{(j)} \quad (7)$$

여기서 z 는 모선 임피던스 행렬이고, m 과 n 은 선로 (j)가 연결되어 있는 모선이다. $b_{(j)}$ 는 선로 (j)의 서셉턴스이다. 선로 (j)의 위상 변위로 선로(j)의 유효전력 변화는

$$\frac{\Delta p_{(j)}}{\Delta \alpha_i} = [(z_{ms} - z_{mr} - z_{ns} + z_{nr})b_{(j)}]b_{(j)} \quad (8)$$

여기서 m 과 n 은 선로 (j)가 연결된 모선이고 s 와 r 은 위상 변위가 있는 선로 (j)이 연결된 모선이다.

2.2.1 무효전력에 대한 감도 행렬

유효전력의 감도행렬의 구조는

$$\begin{bmatrix} \Delta q \\ \Delta V \end{bmatrix} = [S_V] \begin{bmatrix} \Delta v \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad (9)$$

여기서 q 는 선로의 무효전력, v 는 선로에 주입되는 전압원 또는 변압기 탭, V 는 미지 값으로 모선의 종류에 따라 전압 또는 주입 무효전력 값으로서 발전기 모선인 경우는 무효전력이고 다른 모선인 경우는 모선 전압이다. Q 는 V 의 반대로 기지값을 나타낸다. 모선 i 에 주입되는 무효전력이 선로 (j)에 흐르는 무효전력에 대한 감도는

$$\frac{\Delta q_{(j)}}{\Delta Q_{Gi}} = (z_{mi} - z_{ni})b_{(j)} \quad (10)$$

여기서 m 과 n 은 선로 (j)가 연결되어 있는 모선이다. 모선 i 에 주입되는 무효전력의 모선 k 의 전압 변화에 대한 감도는

$$\frac{\Delta V_k}{\Delta Q_i} = z_{ki} \quad (11)$$

i 모선의 발전기의 전압 변화에 대한 선로 (j)의 무효전력 변화는

$$\frac{\Delta q_{(j)}}{\Delta V_i} = [(z_{ms} - z_{ns})b_{is} + (z_{mr} - z_{nr})b_{ir}]b_{mn} \quad (12)$$

b_{is} 는 모선 j 와 모선 s 사이의 서셉턴스이고 b_{ir} 는 모선 j 와 모선 r 사이의 서셉턴스이다. b_{mn} 는 선로 (j)의 서셉턴스이다. 모선 i 의 발전기의 전압 변화에 대한 모선 k 의 전압 변화는

$$\frac{\Delta V_k}{\Delta V_i} = z_{ks}b_{is} + z_{kr}b_{ir} \quad (13)$$

선로 (j)의 변압기 탭 변화에 대한 선로 (j)의 무효전력 조류 변화는

$$\frac{\Delta q_{(j)}}{\Delta \alpha_{(j)}} = [(z_{ms} - z_{mr}) - (z_{ns} - z_{nr})]b_{(j)}b_{(j)} \quad (14)$$

선로 (j)의 변압기 탭 변화에 대한 k 모선의 전압의 변화는

$$\frac{\Delta V_k}{\Delta \alpha_{(j)}} = (z_{ks} - z_{kr})b_{(j)} \quad (15)$$

이다.

위치 선정에서 설치할 FACTS와 발전기의 출력과의 관계를 감도 행렬의 요소로 결정할 수 있으며 이를 이용하면 어느 종류의 FACTS기기가 효과적인가를 알 수 있다. 그리고 발전기와 FACTS의 관계뿐만 아니라 변압기의 탭과 위상제어에도 적용 할 수 있다. 이 감도 행렬은 계통망에 관련된 감도로서 계통의 운전 조건은 포함하지 않으며 계통 고유의 특성만 포함하고 있다. 계통의 운전 조건에 대한 감도는 식(4)와 (5)에서 나타내고 있다.

3 모의 실험

3.1 9모선 계통

모의 실험 계통은 IEEE 9모선 계통을 사용하였으며 데이터는 참고문헌 [6]의 데이터를 사용하였다. 그림 1에서 괄호에 있는 번호는 선로 번호이고 괄호가 없는 것은 모선 번호이다. 스윙모선은 모선 1번이다.

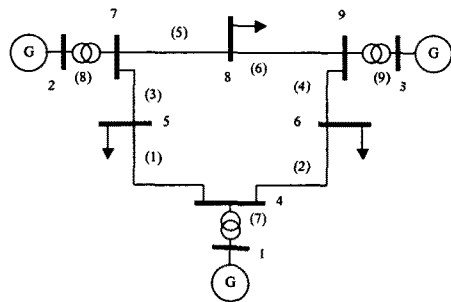


그림 1 IEEE 9모선 계통도

3.2 모의 실험 결과

[참 고 문 헌]

표1은 유효전력에 대한 감도 행렬로서 각 모선에 주입한 유효전력에 대한 각 선로에 미치는 영향을 나타낸 것이다.

표 1 모선 유효전력과 선로 유효전력조류의 관계

모선 \ 선로	5	6	8
(1)	-0.8751	-0.1351	-0.5329
(2)	-0.1249	-0.8649	-0.4671
(3)	0.1249	-0.1351	-0.5329
(4)	-0.1249	0.1351	-0.4671
(5)	0.1249	-0.1351	-0.5329
(6)	0.1249	-0.1351	0.4671

표1에서 음(-)의 부호는 모선에 주입된 전력이 스윙 모선으로 흐르는 방향과 계산을 위하여 잡은 방향이 반대인 것을 말한다. 5번 모선에 주입했을 때 (1)선로에 가장 큰 값이 나타나는 것은 가장 많이 조류가 흐른다는 것을 의미한다. 이는 스윙모선이 1모선이기 때문이다. 특히 8번 모선에 주입했을 때 6번 모선보다 5번 모선으로 더 많이 흘러 5번이 영향을 더 많이 받는다.

표2는 무효전력에 대한 감도 행렬로서 각 모선 전압의 변화에 대한 선로 무효전력과의 관계를 나타낸 것이다.

모선 1의 전압 변화에 대한 선로 무효전력 변화는 (7) 선로가 가장 영향을 많이 받는 것으로 나타났다. 이는 가장 가까운 위치에 있기 때문이며 선로(5)와 (6)을 비교하면 선로 (6)이 영향을 더 받는 것으로 FACTS의 설치를 선로 (6)에 해야 모선 1의 발전기와 연관성이 크게된다.

표 2 모선 전압과 선로 무효전력조류의 관계

모선 \ 선로	1	2	3
(1)	2.2589	-2.3564	-0.2319
(2)	2.1370	-0.1789	-2.3121
(3)	2.5334	-2.1881	-0.1503
(4)	2.4285	-0.0936	-2.1252
(5)	0.0219	2.9077	-3.1555
(6)	0.0792	3.0839	-3.0049
(7)	4.1416	-2.5850	-2.5938
(8)	-2.5850	4.7766	-3.0931
(9)	-2.5938	-3.0931	4.7201

4 결 론

본 논문에서는 전력계통의 안정도 증진을 위하여 사용되는 PSS와 FACTS설비의 협조제어를 위해 위치선정에 필요한 감도 행렬을 이용한 방법을 제시하였다. 이 방법은 계통망의 특성만 나타낸 것으로 각종 발전기 및 제어장치들의 동적인 특성은 고려하지 않은 결과이다.

- [1] L Gyugyi, "Application characteristics of Converter Based FACTS Controller", International Conference on Power System Technology, 2000.
- [2] Hiroshi Okamoto, Atsushi Kurita, Yasuji Sekine, "A Method for Identification of Effective Location of Variable Impedance Apparatus on Enhancement of Steady-State Stability in Large Scale Power Systems" IEEE Trans. on PS Vol. 10, No. 3, Aug. 1995
- [3] N. Martines, L.T.G. Lima, "Determination of suitable Locations for Power System Stabilizers and Static Var Compensators for Damping Electromechanical Oscillations in Large Scale Power Systems", IEEE trans. on PS, Vol.5, No.4, Nov. 1990
- [4] N. Matrines, "Effecient Eigenvalue and Frequency Response Methods Applied to Power System Small Signal stability Analysis of Large Power Systems", IEEE trans. on PS, Vol. 1, No. 1, 1986
- [5] N. Schnurr, W.H. Wellssow, "Determination and Enhancement of the Available Transfer Capability in FACTS" IEEE Porto Power Tech Conference 10 -13 Sept. 2001
- [6] P.M. Anderson, A.A. Fouad, " Power System Control and Stability", 2003