

벡터계 정규 형식을 이용한 전력시스템 제어기 설치 위치 선정

論 文

53A-4-5

Identification of Optimum Sites for Power System Controller using Normal Forms of Vector Field

張 吉 洙* · 李 仁 洙** · 權 世 嫻***
(Gilsoo Jang · Insoo Lee · Sae-Hyuk Kwon)

Abstract - In stressed power system, due to the presence of increased nonlinearity and the existence of nonlinear modal interactions, there exist some limitations to the use of conventional linear system theory to identify the optimum sites for a controller. This paper suggests an approach based on the method of normal forms to identify the optimum sites for controllers with incorporating the nonlinear interaction. In this paper, nonlinear participation factors and coupling factors are proposed as measures of the nonlinear interactions, and identification procedure of optimum sites for a controller is also proposed. The proposed procedure is applied to the 10-generator New England System and the KEPCO System in the year of 2010, and the results illustrate its capabilities.

Key Words : 벡터계 정규 형식(normal forms of vector fields), 참여인수, 고유치 감도, 결합지수

1. 서 론

전력시스템에서 발생한 외란에 대해 특정 발전기만이 영향을 받아서 지역모드(local mode)라 불리는 진동이 크게 나타나는 경우 이러한 진동 현상의 제동을 위한 제어기 적용 위치 선정은 선형시스템이론(linear system theory)에 근거하고 있다[1]. 이러한 선형 해석법은 운전점 주위(neighborhood of the operating point)에서는 타당하지만 이 주위의 크기가 명확하게 정의되지 않는다는 문제를 안고 있으며 또한 전력시스템의 송전 선로가 과부하되고, 발전기들이 최대 용량에 가깝게 운전되는 현대의 전력시스템에서는 비선형성이 무시될 만한 작은 외란에 대해서도 지역간(interarea) 모드라고 불리는 발전기 그룹간 진동 현상이 발생하여 외란이 발생한 곳에서 지리적으로 멀리 떨어진 발전기에도 영향을 미치게 된다[2][3]. 이러한 압박된 전력시스템(stressed power system)에서는 선형접근법으로 설명되지 못하는 여러 현상에 대한 해석을 위해 전력시스템을 표현하는 벡터계(vector field)의 Taylor 급수 전개에서 나타나는 고차항을 이용하여 비선형성을 해석에 포함시킬 것이 요구된다. 따라서 제어기 위치 선정 및 설계에 있어 시스템이 고유하게 가지는 비선형성 및 각 모드의 비선형 상호 작용에 대한 정보가 반영될 수 있도록 벡터계 정규 형식(normal forms of vector fields)[4]를 적용하여 비선형 상호 작용을 정량화하고 이를 전기-기계적 진동현상을 제동하기 위한 전력시스템 제어기의 적용 위치 선정 및 설계에 이용하고자 한다. 본 연구에서는 비선형 참여인수

(nonlinear participation factor)에 기초한 결합지수(coupling factor)를 제안하여 발전기들간의 연관 정도를 정량화 하였고, 비선형 상호작용을 고려한 제어기 적용 위치 선정방안을 제시하였다. 제시된 지수와 방안은 New England 시험계통(10기39모선)과 한전 2010년 축약계통(70기772모선)에 적용하여 그 유용성을 검증하였다.

2. 벡터계 정규 형식 (normal forms of vector fields)

2.1 전력시스템 모델링

본 논문에서 전력시스템을 구성하는 발전기는 제어기가 없는 고전 모델(classical model)과 제어기가 표현될 경우 2축 모델(two-axis)로 표현되며[5], 발전기 제어기는 해당 블록선도에 따라 미분 방정식으로 표현한다. 일정 임피던스 부하 모델로 전력시스템의 부하를 표현하고 발전기의 내부 노드로 축약함으로써 전체 n 개의 발전기에 대해 m 개의 발전기에 여자기, PSS 등과 같은 제어기가 설치되어 있다는 전제로 다음 식(2.1)이 구성된다.

$$\dot{X} = F(X) \quad (2.1)$$

여기서,

$$X = [E'_{q1}, E'_{d1}, \omega_1, \delta_1, E_{FD1}, x_{E1}, x_{E2}, \dots, E'_{qn}, E'_{dn}, \omega_n, \dots, \omega_m, \delta_m]^T$$

2.2 벡터계 정규 형식

식 (2.1)의 안정한 평형점 (stable equilibrium point)에서의 Taylor 급수 전개는 다음 식 (2.2)와 같이 주어진다.

$$\dot{x}_i = A_i x_i + \frac{1}{2} X^T H^i X + H.O.T. \quad (2.2)$$

* 正 會 員 : 高麗大 工大 電氣工學科 副教授 · 工博

** 準 會 員 : 高麗大 工大 電氣工學科 碩士

*** 正 會 員 : 高麗大 工大 電氣工學科 教授 · 工博

接受日字 : 2003年 12月 10日

最終完了 : 2004年 2月 20日

여기서,

$$A_i \text{는 } [\partial F / \partial X]_{X_{SEP}} \text{의 } i \text{ 번째 행이며}$$

$$H_{jk}^i = [\partial^2 F_i / \partial x_j \partial x_k]_{X_{SEP}}$$

A 행렬의 우측 고유벡터를 U, 좌측 고유벡터를 V라고 하고, 우측 고유벡터로 기저(basis)를 변환하는 $X=UY$ 유사 변환(similarity transformation)에 의해 식 (2.2)의 2차 항까지는 다음 식 (2.3)과 같이 표현된다.

$$y_i = \lambda_i y_i + \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^N C_{kl}^i y_k y_l \quad (2.3)$$

여기서,

$$\lambda_i \text{는 상태 행렬로부터 구한 } i \text{ 번째 고유치}$$

$$C^j = \frac{1}{2} \sum_{p=1}^N V_{ip}^T [U^T H^p U] = [C_{kl}^j]$$

2차 항 비공진 조건 $\lambda_j \neq \lambda_k + \lambda_l$ 이 성립할 경우 식 (2.4)로 정의된 비선형 변환에 의해 Z-domain으로의 변환(식 (2.5))이 가능하게 된다.

$$Y = Z + h_2(Z) \quad (2.4)$$

여기서,

$$h_2^i(Z) = \sum_{j=1}^N \sum_{l=1}^N h_{kl}^j z_k z_l$$

$$h_{kl}^j = \frac{C_{kl}^j}{\lambda_k + \lambda_l - \lambda_j}$$

h_{kl}^j 에서 보는 것과 같이 $\lambda_k + \lambda_l - \lambda_j$ 항의 값이 영(zero)에 가까울수록 이 계수의 값은 상당히 큰 값을 갖게 되어 비선형성의 증가로 나타나게 된다.

$$z_j = \lambda_j z_j \quad (2.5)$$

식 (2.5)로부터 식 (2.4)로 정의된 변환에 의해 선형 시스템과 같은 안정도 특성을 나타내는 2차 항까지 포함된 정규형식 시스템으로 변환되었음을 알 수 있다.

2.3 역변환을 통한 각 domain의 해 결정

식 (2.5)에서 주어진 Z-domain에서의 해는 식(2.6)로 주어진다.

$$z_j(t) = z_{j0} e^{\lambda_j t} \quad (2.6)$$

여기서, z_{j0} 는 Z-domain에서의 초기 값이다.

Z-domain에서 Y-domain으로의 역변환은 식 (2.7)과 같이 주어진다.

$$z = y - h_2(y) \quad (2.7)$$

식 (2.7)로 주어지는 역변환을 통하여 구한 Y-domain에서의 해는 식 (2.8)과 같이 얻어진다.

$$y_j(t) = z_{j0} e^{\lambda_j t} + \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^N h_{kl}^j z_{k0} z_{l0} e^{(\lambda_k + \lambda_l)t} \quad (2.8)$$

식 (2.8)에 대하여 Y-domain에서 X-domain으로의 변환 ($y = Vx$)를 이용하여 해를 구하면 식 (2.9)와 같다.

$$x_j(t) = \sum_{i=1}^N u_{ij} z_{i0} e^{\lambda_i t} + \sum_{i=1}^N u_{ij} \left[\sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^N h_{kl}^i z_{k0} z_{l0} e^{(\lambda_k + \lambda_l)t} \right] \quad (2.9)$$

식 (2.9)에서 나타낸 것과 같이 2차 항까지 고려된 비선형성은 λ_i 의 계수 $u_{ij} z_{i0}$ 와 추가적인 모드 $\lambda_k + \lambda_l$ 그리고 그 계수 $h_{kl}^i z_{k0} z_{l0}$ 로 나타남을 알 수 있다.

3. 비선형 상호작용의 정량화

3.1 비선형 참여인수

선형 참여인수는 모드와 기기 사이의 상호 관련을 파악하는데 사용되는 방법이고[1], 외란의 크기와 지속시간과는 무관한 시스템의 구조(structure)와 부하 조건/loading)에 의한 각 기기의 상태변수가 모드에 미치는 영향을 정량적으로 나타낸다. 참여인수 p_{ki} 는 i 번째 모드에 대한 k 번째 기기 상태변수의 참여 정도를 나타내며 식(3.1)와 같이 좌측 고유벡터와 우측 고유벡터의 해당 값 곱으로 표현된다.

$$p_{ki} = u_{ki}^* v_{ik} \quad (3.1)$$

선형 참여인수가 좌측 및 우측 고유벡터의 곱으로 표시되기 때문에 고유벡터의 스케일과는 관계없이 상대적인 비교를 가능하게 한다. 정규 형식 변환 과정에 주어진 식 (2.4)의 역변환을 이용함으로써 k 번째 상태변수에 대한 해를 구할 수 있으며 식 (3.2)으로 주어진다. (유도 과정은 부록 참조)

$$x_k(t) = \sum_{i=1}^N u_{ki} (v_{ik} + v_{ikk}) e^{\lambda_i t} + \sum_{p=1}^N \sum_{q=p}^N v_{kpq} (v_{pk} + v_{pkk}) (v_{qk} + v_{qkk}) e^{(\lambda_p + \lambda_q)t} \quad (3.2)$$

여기서,

$$v_{ikp} = - \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^N h_{kl}^i v_{kp} v_{lp}$$

$$v_{ikl} = \sum_{j=1}^N u_{ij} h_{kl}^j$$

식 (3.3)은 i 번째 모드에 대한 k 번째 상태변수의 참여를

나타내는 부분과 모드 p 와 q 의 상호 작용 (modal interaction)에 의해 생기는 결합 모드에 대한 k 번째 상태변수의 참여 정도를 나타내는 부분으로 표시되어 있다.

$$x_k(t) = \sum_{i=1}^N p_{ki} e^{\lambda_i t} + \sum_{p=1}^N \sum_{q=p}^N p_{kpq} e^{(\lambda_p + \lambda_q)t} \quad (3.3)$$

여기서,

$$p_{ki} = u_{ki}(v_{ik} + v_{ikk}) = p_{ki} + u_{ki}v_{ikk}$$

$$p_{kpq} = v_{kpq}(v_{pk} + v_{pkk})(v_{qk} + v_{qkk})$$

이러한 두 가지의 새로운 참여인수는 i 번째 단일 고유치 모드에 대한 k 번째 상태변수의 참여 정도를 나타내는 p_{ki} 와 모드 p 와 q 의 결합에 의해 형성된 (p, q) 모드에 대한 k 번째 상태변수의 참여 정도를 나타내는 p_{kpq} 이며, p_{ki} 를 구성하는 두 개의 항에서 첫 번째 부분은 기존 참여인수 p_{ki} 에 해당하고, 이는 2차 항까지 포함된 정규 형식 변환을 통해 추가적인 비선형 정보가 참여인수에 반영되었음을 의미한다. 일반적으로 정규 형식 변환에 의해 추가된 u_{ki} 와 v_{ikk} 의 값은 p_{ki} 비해 아주 작은 값을 나타내지만 전력시스템압박도가 커짐에 따라 모드간의 비선형 상호결합에 의한 이 값이 커져 선형 정보에 의한 참여인수의 비교와는 다른 결과를 낳을 수 있게 된다. 따라서 비선형 상호작용이 무시될 수 없는 압박된 전력시스템에서의 제어기 위치 선정을 위해서는 비선형성을 정량화한 값들의 추가적인 고려가 필요하다. 또한 모드간의 비선형 상호 결합에 의해 형성된 결합 모드와 상태변수 간의 관계를 정량화 할 수 있는 p_{kpq} 는 전력시스템의 비선형 상호 작용에 영향을 받지 않는 기기 상태변수의 선정 및 설계를 위해 유용한 정보가 될 것이다[6].

3.2 비선형 참여인수를 이용한 새로운 상태행렬

비선형 참여인수를 이용하여 새로운 좌측 고유벡터와 우측 고유벡터를 식 (3.4)와 같이 가정한다.

$$p_{ki} = u'_{ki} * v'_{ik} \quad (3.4)$$

U, V 는 식 (3.5)과 같은 관계를 갖는다.

$$U * V = I \quad (3.5)$$

여기서 I 는 단위행렬을 나타낸다.

선형화시킨 상태행렬 좌측 및 우측 고유벡터 V, U 를 초기값으로 하고 뉴턴-랩슨법(Newton-Raphson)을 적용하여 새로운 고유벡터 U, V 를 구한다. 이때 식 (3.4)에 대한 변수 u'_{ki} 에 대한 자코비안 행렬은 식 (3.6)으로부터 구할 수 있다.

$$\frac{\partial p_{ki}}{\partial u_{ki}} = v'_{ik} \quad (3.6)$$

이를 식 (3.7)에 적용하여 새로운 상태행렬을 구성한다.

$$A' = U \Lambda U^{-1} \quad (3.7)$$

여기서, Λ 는 선형화시킨 상태행렬에서 구해진 고유값으로 이루어진 대각행렬이다.

식 (3.7)로 주어진 새로운 상태행렬은 선형정보와 비선형 정보를 함께 포함한 상태행렬이다. 구해진 새로운 상태행렬은 비선형 정보가 포함된 기존의 선형화기법 적용을 가능하게 한다.

3.3 비선형 참여인수를 이용한 결합지수

이상적인 PSS(Power System Stabilizer)를 가정한 경우 PSS의 이득에 대한 고유치 감도는 식 (3.8)[7]과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial \lambda_h}{\partial k_i} = -u_{i+n, h} v_{h, i+n} \frac{1}{M_i} = -p_{ih} \frac{1}{M_i} \quad (3.8)$$

여기서 k_i 는 AVR의 이득을 나타내며 M_i 는 각 발전의 관성정수를 나타낸다. 또한 $u_{i+n, h}, v_{h, i+n}$ 는 각각 우측과 좌측 고유벡터의 $(i+n)$ 번째 요소를 나타낸다. 이를 확장하여 식 (3.9)과 같은 결합지수가 제안되었다[7].

$$C_{ij(h)} = \frac{p_{ih} * p_{jh}}{M_i M_j} \quad (3.9)$$

또한 전체모드에 대한 결합지수가 식 (3.10)과 같이 제시되었다[7].

$$C_{ij} = \sum_{h=1}^N C_{ij(h)} \quad (3.10)$$

비선형 참여인수는 압박된 시스템의 구조에 의한 각 기기의 상태변수가 모드에 미치는 영향을 정량적으로 나타낼 수 있는데 식 (3.9)에서 제시된 결합지수를 선형참여인수가 아닌 비선형 참여인수를 이용하여 각 모드에서의 상태변수들간의 결합정도를 식 (3.11)와 같이 나타낼 수 있다. 이는 3.2절에서 기술한 것과 같이 비선형 참여인수로부터 비선형 정보가 포함된 상태행렬을 구할 수 있다는 것에 근거한다.

$$C_{ij(h)}^2 = \frac{p_{ih}^2 * p_{jh}^2}{M_i M_j} \quad (3.11)$$

여기서 $C_{ij(h)}^2$ 는 h 번째 모드에 대한 i 와 j 번째 상태변수간의 결합 정도를 나타낸다.

3.4 제어기 위치 선정 알고리즘

본 논문에서 제시되는 전력시스템 제어기 설치 위치 선정 알고리즘은 다음과 같다.

- ① 임계(critical) 모드 선정: 시스템의 선형화를 통해 구해진 시스템상태행렬로부터 고유치를 구한 후 그 고유값 중 제동이 작은 모드들을 우선 선택한 후 주파수가 낮은 모드를 임계 모드로 선정한다.
- ② 가장 위험한 임계 모드에서의 참여 상태변수 선정: 임계 모드 중 가장 위험한 모드에 대해 비선형 참여인수 (P)를 계산하여 가장 큰 값을 가지는 상태변수(위상각, 속도)를 찾는다.
- ③ ②에서 선정된 상태변수가 속하는 발전기에서 전력시스템 안정화기의 이득에 대한 ①의 임계 모드들에서 고유치 감도 부호 판별: 선정된 발전기에서 전력시스템 안정화기의 이득에 대한 고유치 감도가 다른 임계 모드에서도 이득 증감시 같은 부호를 갖는가를 판별한다. 즉 가장 중요한 모드의 제동특성을 개선하기 위해 선정된 발전기에 전력시스템 안정화기를 설치하여 이득을 증감시킬 경우 다른 임계 모드의 제동 특성을 개선시키려는가를 판별한다.
- ④ 가장 위험한 모드에서 전력시스템 안정화기 이득에 대한 고유치 감도의 부호와 다른 부호를 가지는 임계 모드가 삼분의 이(2/3)이상인 경우 ②에서 선정된 상태변수가 속한 발전기에만 전력시스템 안정화기를 설치한다.
- ⑤ 가장 위험한 모드에서 전력시스템 안정화기 이득에 대한 고유치 감도의 부호와 같은 부호를 가지는 임계 모드가 삼분의 이(2/3)이상인 경우 가장 위험한 모드를 기준으로 ②에서 선정된 상태변수와와의 결합정도 $C_{ik(n)}$ 의 상위 값 중 부호가 같고 전력시스템 안정화기 이득에 대한 고유치 감도의 부호가 다른 모드에서는 $C_{ik(n)}$ 값의 크기가 작은 (10^{-3} 이하) 상태변수를 선정한다. 가장 위험한 모드와 동시에 다른(2/3) 임계 모드들의 제동 특성을 개선하기 위하여 가장 위험한 모드의 제동 특성은 ②에서 구하여진 상태변수가 속하는 발전기에 전력시스템 안정화기를 설치하여 개선하고 이와 더불어 다른(2/3이상) 임계 모드들의 제동특성을 동시에 개선하기 위하여 전력시스템 안정화기를 설치할 발전기를 선정한다. 제시된 위치 선정 과정을 그림 1에 도식적으로 나타내었다.

3.5 사례연구(1)

사례연구의 10기 발전기 계통에서 9기는 2축 모델로 표현하였으며 1기는 고전모델로 표현하였다.

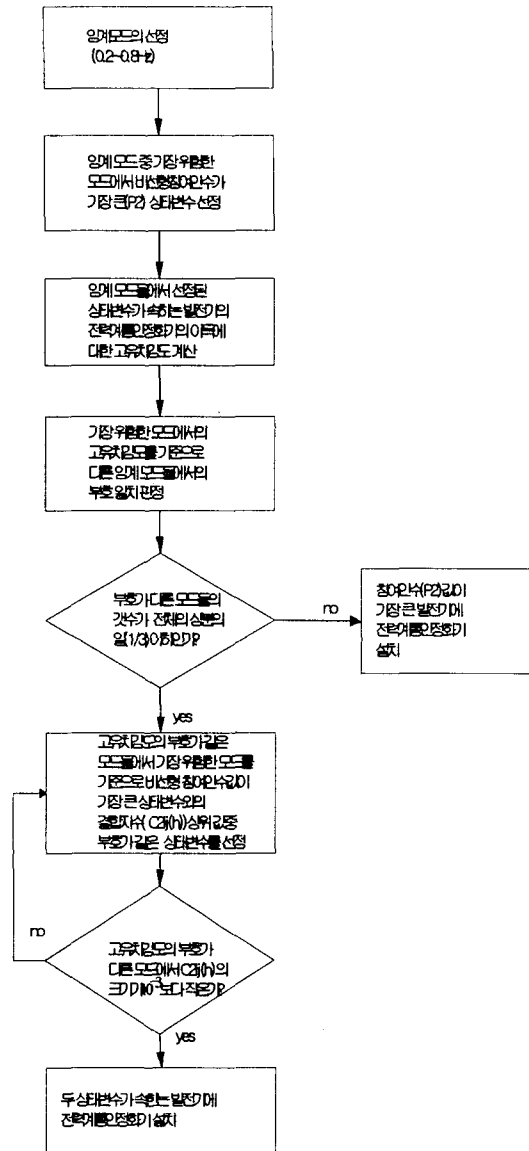


그림 1. 제어기 위치 선정 알고리즘

Fig. 1. Algorithm for control location

표 1. New England 계통의 고유값

Table 1. Eigenvalues of NE test system

mode	고유값(re)	고유값(im)	mode	고유값(re)	고유값(im)
1:	-3.34E+00	1.60E+01	33:	-1.55E+00	9.56E-01
3:	-1.40E+00	1.59E+01	35:	-1.13E+00	1.04E+00
5:	-1.54E+00	1.44E+01	37:	-7.84E-01	7.39E-01
7:	-1.11E+00	1.27E+01	39:	-1.04E+00	8.78E-01
9:	-1.08E+00	1.22E+01	41:	-1.03E+00	7.48E-01
11:	-4.77E-01	1.01E+01	43:	-1.38E+00	0.00E+00
13:	-5.20E-01	7.97E+00	45:	-6.82E-01	0.00E+00
15:	-2.26E-01	6.38E+00	47:	-8.37E+00	0.00E+00
17:	-9.81E+00	1.68E+00	49:	-8.59E+00	0.00E+00
19:	-9.87E+00	1.36E+00	51:	-1.05E+01	0.00E+00
21:	-6.80E+00	1.08E+00	53:	-1.66E+01	0.00E+00
23:	-2.36E+00	3.94E+00	55:	-1.00E+02	0.00E+00
*25:	-1.64E-03	2.92E+00	57:	-1.00E+02	0.00E+00
27:	-4.33E+00	3.59E-01	59:	-1.00E+02	0.00E+00
29:	-3.03E+00	5.57E-01	61:	-1.00E+02	0.00E+00
31:	-1.89E+00	4.89E-01	63:	-4.61E+01	0.00E+00

임계 모드는 표 1로부터 13, 15, 25, 37모드이다. 이 중 가장 위험한 모드는 *표시된 25번 모드이다. 선형참여인수(pf)와 비선형 참여인수(p2)의 상위값 중 일부분만을 표 2에 나타내었다.

표 2. 모드 25에 대한 상태변수와 발전기로 나타낸 선형 참여인수(PF)와 비선형 참여인수(P2)

Table 2. Linear and nonlinear participation factors

모드	상태변수	선형참여인수(pf)	모드	상태변수	비선형참여인수(p2)
25	27	1.35E-01	25	64	1.10E+00
25	24	8.94E-02	25	61	1.05E+00
25	25	5.89E-02	25	60	8.79E-01
25	21	5.35E-02	25	59	7.63E-01
25	36	4.66E-02	25	62	4.82E-01

위 표에서 보는 것과 같이 선형 참여인수에 대하여 25번 모드에서 참여인수가 큰 상태변수는 순서대로 27, 24, 25.. 이고 비선형 참여인수가 큰 순서는 64, 61, 60,... 여기서 29에서 37번까지의 상태변수는 발전기 위상각(delta (δ))를 나타내고 56번에서 64번까지는 여자기 상태변수(xe2)를 나타내며 순서대로 56번은 1번 발전기에 대응되며 64번은 9번 발전기에 대응된다. 가장 위험한 모드(25번 모드)의 제동을 개선시키기 위해서는 9번 발전기에 PSS를 설치하여야 할 것이다.

임계 모드들에서 64번 상태변수가 속하는 9번 발전기에 설치된 전력시스템 안정화기의 이득에 대한 고유치 감도를 계산하고 그 부호를 판별한 것을 표 3에 나타내었다.

표 3. 임계 모드에서 전력시스템 안정화기의 이득에 대한 고유치 감도

Table 3. Eigenvalue sensitivity

13번모드	positive	15번모드	negative	37모드	negative	25모드	negative
-------	----------	-------	----------	------	----------	------	----------

표 3에서 보이는 것과 같이 13번 모드를 제외하고 나머지 모드에서 9번 발전기에 설치된 전력시스템 안정화기의 이득에 대한 고유치 감도는 부호가 음(negative)으로서 동일함을 알 수 있다. 알고리즘에 따라 임계 모드 전체 4개의 모드에서 3개의 모드의 부호가 일치함으로 가장 위험한 모드(25번 모드)의 제동 특성은 9번 발전기에 전력시스템 안정화기를 설치함으로써 개선시키고 15번 모드와 37번 모드의 제동 특성을 동시에 개선하기 위한 발전기 상태변수(위상각, 속도)를 선정하기 위하여 제약조건, 즉 전력시스템 안정화기의 이득에 대한 고유치 감도의 부호가 동일한 모드(15, 37번 모드)에서는 9번 발전기에 해당하는 27번 상태변수와와 결합지수 $C_{ij}^2(h)$ (여기서, $i=27$)중 상위 값을 갖고 고유치 감도의 부호가 다른 모드(13번 모드)에서는 결합지수 $C_{ij}^2(h)$ 의 크기가 10^{-3} 이하의 제약조건을 만족시키는 상태변수와 식 (3.11)로 정의된 각 모드의 결합지수($C_{ij}^2(h)$)의 부호와 크기를 구하면 표 4과 같다.

표 4. 제약조건을 만족하는 상태변수의 $C_{ij}^2(h)$

Table 4. $C_{ij}^2(h)$ of state variables

상태변수	13번 모드		15번 모드		37모드		25모드	
	25	27	25	27	25	27	25	27
$C_{ij}^2(h)$ 의 부호	negative		positive		positive		positive	
$C_{ij}^2(h)$ 의 크기	2.18E-04		2.94E-01		3.48E-09		2.72E-01	

표 4에서는 보이는 것과 같이 9번 발전기에 설치된 전력시스템 안정화기의 이득에 대한 고유치 감도의 부호가 다른 13번 모드의 결합지수($C_{ij}^2(h)$)의 크기는 2.18E-04로 영향을 거의 주지 않고 고유치 감도의 부호가 동일한 37번 모드에서의 크기는 3.48E-09로 거의 영향이 없지만 15번 모드와 25번 모드에서의 크기는 각각 2.94E-01, 2.72E-01로서 25번 상태변수와 27번 상태변수가 속하는 7번 발전기와 9번 발전기에 전력시스템 안정화기를 설치하면 15번 모드와 25번 모드의 제동 특성을 개선할 수 있게 된다.

동일 사양 전력시스템안정화장치는 7번과 9번 발전기에 설치하여야 좋은 시스템 제동 특성을 보일 것이다. 이를 검증하기 위하여 상정 사고를 시스템에 가하고 시간에 따른 발전기 위상각(δ)의 변동을 시뮬레이션하였다. 사고는 임의로 선택된 33번 모선의 삼상 사고를 가정하고 사고 지속 시간은(3 cycle) 0.05초로 하여 설치하지 않았을 때와 알고리즘에 따라 설치하였을 때를 비교하였다.

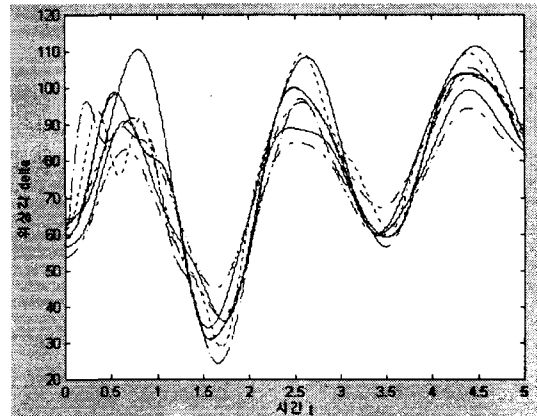


그림 2. PSS를 설치하지 않았을 경우

Fig. 2. Case without a PSS

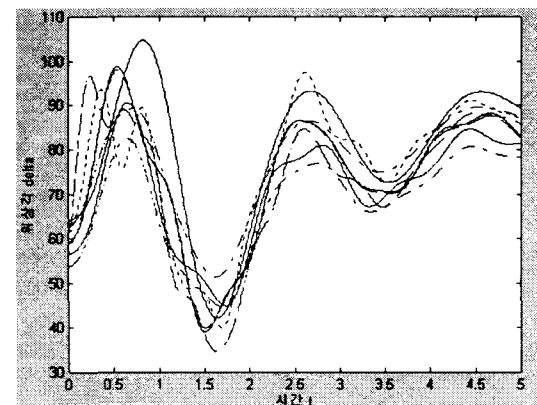


그림 3. 7번 발전기에 설치하였을 경우

Fig. 3. Case with a PSS at Generator 7

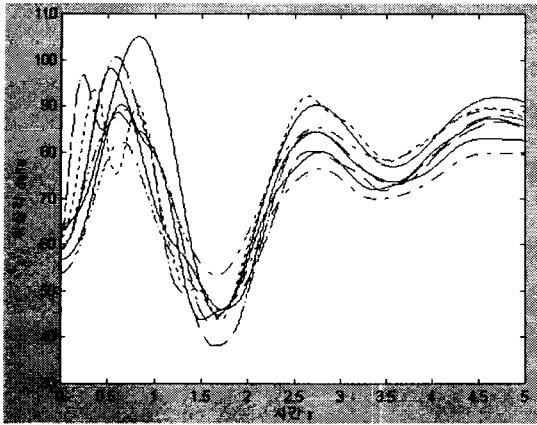


그림 4. 7번과 9번 발전기에 PSS를 설치하였을 경우
Fig. 4. Case with PSS at Generators 7 and 9

그림에서 보는 것과 같이 9번 발전기에 설치하였을 경우 다른 발전기에 설치하는 것 보다 좋은 제동 특성을 보임을 볼 수 있다. 또한 다른 임계 모드의 제동 특성을 향상시키기 위해 7번 발전기와 더불어 9번 발전기에 설치한 경우 더 좋은 제동 특성을 보임을 알 수 있다.

3.6 사례연구(2)

제안된 방법을 한전 축약시스템(70기 772모선)에 적용하여 전력시스템 제어기 최적 설치 위치를 제안하고자 한다. 발전기 중 11기를 선택하여 이축 모델로 구성하고 나머지는 고전 모델로 모델링하였다. 11기의 선택은 유효전력의 발전량이 큰 순서로 선정하였다. 이는 유효발전량이 큰 발전기가 시스템에 미치는 영향이 크다는 전제 하에 선정된 것이다. 11개의 발전기는 순서대로 2, 5, 9, 11, 24, 26, 32, 44, 46, 53, 57번 발전기이다. 총 194개의 진동모드가 나타나는데 먼저 시스템의 고유값을 구하였으며 임계 모드와 그 고유값만을 표 5에 나타내었다.

표 5. 발전기70개 한전시스템의 임계 모드와 고유값
Table 5. Critical modes of KEPCO reduced system

모드	고유값 (re)	고유값 (im)
23	- 6.12E - 02	4.00E + 00
* 45	- 5.93E - 04	5.10E + 00
47	- 7.14E - 02	5.52E + 00
49	- 7.35E - 02	5.65E + 00

45(46)번 모드에 대한 비선형 참여인수(P2)와 선형 참여인수(PF)를 표 6에 나타내었고 그에 따른 발전기와 상태변수를 일부분만 표 7에 나타내었다.

표 6에서 보는 것과 같이 비선형 참여인수에서 나타나는 상태변수가 제어기 관련상태변수일 때 같은 발전기라도 선형 참여인수는 발전기 관련 상태변수임을 알 수 있다. 그러나 상위 순위에서의 뒤바뀐은 현저하지 않다. 표 7에서 나타난 것과 같이 전력시스템안정화 장치를 57번 발전기에 투입하면 개선된 제동 특성을 보일 것이다.

제안된 알고리즘을 적용하면 다음과 같다. 임계 모드는 표 5로부터 23, 45, 47, 49모드이다. 이 중 가장 위험한 모드는 45번 모드이다. 가장 위험한 모드에서 비선형 참여인수가(P2) 가장 큰 상태변수는 표 6으로부터 194번 상태변수(xe2)이며 이 상태변수가 속하는 발전기는 57번 발전기이다. 임계 모드

들에서 194번 상태변수가 속하는 57번 발전기에 설치된 전력 시스템 안정화기의 이득에 대한 고유치 감도를 계산하고 그 부호를 판별한 것을 표 8에 나타내었다.

표 6. 45번 모드에서 선형 참여인수와 비선형 참여인수
Table 6. Linear and nonlinear participation factors

모드	상태변수	선형참여인수(pf)	모드	상태변수	비선형참여인수(p2)
45	102	1.44E-01	45	194	7.33E-01
45	33	1.02E-01	45	192	4.49E-01
45	100	9.22E-02	45	191	2.56E-01
45	99	6.37E-02	45	102	1.16E-01
45	31	5.26E-02	45	33	1.03E-01
45	26	4.95E-02	45	100	7.19E-02

표 7. 45번 모드에서 상태변수와 발전기로 나타난 선형 참여인수(PF)와 비선형참여인수(P2)

Table 7. Relation of state variables and participation factors

모드	발전기상태변수	선형참여인수(pf)	모드	발전기상태변수	비선형참여인수(p2)
45	57(delta)	1.44E-01	45	57(xe2)	7.33E-01
45	57(omega)	1.02E-01	45	46(xe2)	4.49E-01
45	46(delta)	9.22E-02	45	44(xe2)	2.56E-01
45	44(delta)	6.37E-02	45	57(delta)	1.16E-01
45	46(omega)	5.26E-02	45	57(omega)	1.03E-01
45	11(omega)	4.95E-02	45	46(delta)	7.19E-02

표 8. 임계 모드에서 전력시스템 안정화기의 이득에 대한 고유치 감도

23모드	negative	47모드	negative	49모드	negative	45모드	negative
------	----------	------	----------	------	----------	------	----------

표 8에서 보이는 것과 같이 57번 발전기에 설치된 전력 시스템 안정화기의 이득에 대한 고유치 감도는 모두 부호가 음(negative)으로서 동일함을 알 수 있다. 알고리즘에 따라 임계 모드 전체에서 고유치 감도의 부호가 일치함으로 가장 위험한 모드의 제동특성은 57번 발전기에 전력시스템 안정화기를 설치함으로써 개선시키고 23번 모드, 47번 모드, 49번 모드의 제동특성을 동시에 개선하기 위한 발전기 상태변수(위상각속도)를 선정하기 위하여 제약조건, 즉 전력시스템 안정화기의 이득에 대한 고유치 감도의 부호가 동일한 모드(23번, 47번, 49번 모드)에서 결합지수 $C_{ij}^2(h)$ 의 크기가 상위 값이고 $C_{ij}^2(h)$ 의 부호가 같은 상태변수를 선정하기 위하여 각 모드의 결합지수($C_{ij}^2(h)$)를 구하면 표 9과 같다. 여기서 79번 상태변수는 57번 발전기의 위상각 속도이며 32번 상태변수는 53번 발전기의 위상각 속도이다.

표 9. 제약조건을 만족하는 상태변수의 $C_{2ij}(h)$

Table 9. $C_{2ij}(h)$ of state variables

	23번 모드	47번 모드	49번 모드	45번 모드
상태변수	32 79	32 79	32 79	32 79
$C_{2ij}(h)$ 의 부	positive	positive	positive	positive
$C_{2ij}(h)$ 의 크	5.72E-02	4.76E-05	4.99E-04	5.93E-03

표 9에서는 보이는 것과 같이 23번, 47번, 49번, 45번 모드에서 제동특성을 개선하기 위해서는 53번 발전기와 57번 발

전기에 전력시스템 안정화기를 설치하면 각 모드의 결합지수로 판단할 때 상대적으로 23번 모드는 크게 개선될 것이며 47번, 49번 모드의 제동특성은 상대적으로 작게 개선될 것이다.

알고리즘에 따라 가장 위험한 모드(45번 모드)에서 비선형 참여인수 값이 가장 큰 상태변수(194번 상태변수)가 속하는 57번 발전기에 전력시스템 안정화기를 설치하면 제동특성을 개선시킬 수 있으며 이와 동시에 다른 임계 모드(23번, 47번, 49번 모드)의 제동특성을 개선시키기 위해 32번 상태변수가 속하는 53번 발전기에 전력시스템 안정화기를 설치하면 제동특성을 개선시킬 수 있다. 따라서 동일 사양 전력시스템 안정화장치는 53번과 57번 발전기에 설치할 것이 제안된다.

이에 대한 검증은 프로그램의 발전기 모델링 문제와 발전기를 제어기 설치가 가능한 이축 모델로 할 수 있는 개수의 제한이 존재하고 이에 따라 비선형성이 정확히 반영되지 않은 결합지수로 지표 삼을 수 없으므로 한계를 지낸다. 따라서 이 문제는 프로그램이 실행되는 하드웨어의 용량 확장과 프로그램의 최적화를 통해 해결해 나가고자 한다.

4. 결 론

대규모 비선형 시스템인 전력시스템의 동적 특성에 대한 해석적인 접근은 불가능하며, 따라서 작은 외란을 가정한 선형화된 시스템을 이용한 해석은 타당한 대안이 될 수 있다. 그러나 비선형성이 증가하는 현대의 전력시스템에서는 이러한 선형 해석법은 그 한계를 나타내게 된다. 이러한 비선형성을 고려한(본 논문에서는 2차까지 고려) 해석의 필요성에 따라 본 논문에서는 정규 형식을 이용하여 구하여진 해로부터 비선형 참여인수와 모드와 모드 사이에서 상태변수의 참여 정도를 정량적으로 표현하는 방법이 제시되었다. 비선형 참여인수와 그에 근거한 결합지수를 이용하여 제어기 설치 위치를 선정하였고 비선형 시간 영역 시뮬레이션을 통하여 이들 지수를 이용한 방법의 유용성을 검증하였다. 그러나 시뮬레이션시 투입한 전력시스템 안정화장치는 각각의 발전기에 맞는 튜닝된 안정화장치가 아닌 동일한 설계로 구성된 것이며, 최적의 제어효과를 얻기 위해서는 설치 위치 선정 연구와는 별도로 최적 제어기 설계 연구를 필요로 한다. 제안된 방법은 전력계통 구조에 따라 그 효과가 크게 나타나며, 그에 대한 추가 연구를 수행하고자 한다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부 및 한국과학재단 지원에 의하여 수행되었으며, 이에 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

[1] Perez-Arriaga, I. J., G. C. Vergbese, and F. C. Schweppe. "Selective Modal Analysis with Applications to Electric Power Systems. Part I: Heuristic Introduction." IEEE Transactions on PAS Vol. 101, pp.3117-3125 September 1982.
 [2] P. Kundur, "Power System Stability and Control", McGraw-Hill Inc., New York, NY.

[3] Klien, M., G. J. Rogers, and P. Kundur, "A Fundamental Study of Interarea Oscillations in Power Systems", IEEE Transactions on PWRs, Vol. 6, pp.914-921, August 1991.
 [4] Arrowsmith, D. K., and C. M. Place. An Introduction to Dynamical Systems. Cambridge University Press, Cambridge, 1990.
 [5] Andeson, P. M., and A. A. Fouad. Power System Control and Stability. IEEE Press, 1994.
 [6] Jang, G. "Nonlinear control design for stressed power systems using normal forms of vector fields" Ph.D. Thesis, Iowa State University, Ames, Iowa, 1997.
 [7] D. R. Ostojic, Dipling., M. Sc, "Identification of Optimum Site for Power System Stabilizer Applications", IEE Proceeding, Vol. 135, Pt. C, No.5 September 1988.

부 록

한 개의 상태 변수에 의해 여기되도록 초기 조건 벡터로 $x_0 = e_k$ 가 가해질 경우 $y_D = v_{jk}$ 가 되며 z-domain에서는 다음과 같다.

$$z_D = v_{jk} - \sum_{p=1}^N \sum_{q=1}^N h_{pq}^j v_{pk} v_{qk} = v_{jk} + v_{2,jkk} \quad (A1)$$

주어진 식을 식 (2.9)에 대입하여 정리하면 식 (3.2)를 구할 수 있다.

저 자 소 개



장길수 (張吉洙)

1967년 10월 26일생. 현재 고려대학교 전기공학과 부교수.

Tel : (02) 3290-3246

Fax : (02) 3290-3246

E-mail : gjang@korea.ac.kr



이인수 (李仁洙)

1972년 11월 13일생. 1998년 고려대 공대 전기공학과 졸업. 동 대학원 전기·전자·전파공학부 석사과정 졸업. 현재 삼성전자 근무

Tel : (02) 3290-3675

E-mail : otter@elec.korea.ac.kr



권세혁 (權世熾)

1949년 5월 14일생. 현재 고려대학교 전기공학과 교수.

Tel : (02) 3290-3220

E-mail : shkwon@elec.korea.ac.kr