

Normal form을 이용한 제어기 설치 위치 선정방법

이인수                      장길수                      권세혁                      이병준  
고려대학교                      전력계통연구소

Identification of optimum sites for power system controller using normal forms of vector field

Insoo Lee   Gilsoo Jang   Sae-Hyuk Kwon   Byong-Jun Lee  
Korea University Electric Power System Lab

**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 controller. This paper proposes an approach to identify the optimum sites for controller using the method of normal forms. In this paper nonlinear participation factor and coupling factor are proposed as a measures of identification of optimum sites for controller and a selection procedure is also proposed. The proposed procedure is applied to the 10-generator New England System and the KEPCO System in the year of 2010 to illustrate its capabilities.

1. 서    론

전력계통에서 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 정확하게 정의되지 않는다는 문제를 안고 있으며 또한 전력계통의 송전 선로가 과부하되고, 발전기들이 최대 용량에 가깝게 운전되는 현대의 전력계통에서는 비선형성이 무시될만한 작은 외란에 대해서도 interarea mode라고 불리는 발전기 그룹간 진동 현상이 발생하여 외란이 발생한 곳에서 지리적으로 멀리 떨어진 발전기에도 영향을 미치게 된다[2][3]. 이러한 압박된 전력계통(stressed power system)에서는 선형적근법으로 설명되지 못하는 여러 현상에 대한 해석을 위해 전력계통을 표현하는 vector field의 Taylor 급수 전개에서 나타나는 고차항을 이용하여 비선형성을 해석에 포함시킬 것이 요구된다. 따라서 제어기 위치 선정 및 설계에 있어 계통이 고유하게 가지는 비선형성 및 각 모드의 비선형 상호 작용에 대한 정보가 반영될 수 있도록 Normal Forms of Vector Field[4]를 이용하여 비선형 상호 작용을 정량화하고 이를 전기기계적 진동현상을 제동하기 위한 제어기의 적용 위치 선정 및 설계에 이용하고자 한다. 본 연구에서는 비선형 참여인수(Nonlinear participation factor)에 기초한 coupling factor를 제안하여 발전기들간의 연관 정도를 정량화 하였으며, 비선형 상호작용을 고려한 제어기 적용 위치 선정방법을 제시하였다. 제시된 지수와 방정식은 New England 시험계통(10기39모선)과 한전 2010 축약계통(70기772모선)에 적용하여 그 유용성을 검증하였다.

2. Normal forms of Vector Fields

2.1 전력계통 모델링

본 논문에서 전력계통을 구성하는 발전기는 제어기가 없는 고전 모델(classical model)과 제어기가 표현될 경우 2축 모델(two-axis)로 표현[5]하며, 발전기 제어기는 블록선도에 의해 미분 방정식으로 표현한다. 일정 임피던스 부하 모델로 전력계통의 부하를 표현하고 발전기

의 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.

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

여기서,

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

2.2 Normal Forms of Vector Fileds

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

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

여기서,

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

$$H^i = \partial^2 F_i / \partial x_j \partial x_k \Big|_{X_{SEF}}$$

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

$$\dot{y}_i = \lambda_i y_i + \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^N C_{kl} y_k y_l \tag{2.3}$$

여기서,

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

2 차항 비공진조건  $\lambda_i \neq \lambda_k + \lambda_l$  이 성립할 경우 식 (2.4) 로 정의된 비선형 변환에 의해 Z-domain으로의 변환 (식 (2.5)이 가능하게 된다.

$$Y = Z + h2(Z) \tag{2.4}$$

여기서,

$$h2^i(Z) = \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^N h2_{jk}^i z_j z_k$$

$$h2_{kl}^i = \frac{C_{kl}^i}{\lambda_k + \lambda_l - \lambda_i}$$

$$\dot{z}_i = \lambda_i z_i \tag{2.5}$$

식 (2.5)로부터 2 차항까지 포함된 normal form 계통이 식 (2.4)로 정의된 변환이 성립하는 범위내에서는 선형 계통과 같은 안정도 특성을 나타냄을 알 수 있다.

2.3 역변환을 통한 각 domain의 해 결정  
 앞 절에서 적용된 변환 과정의 역변환을 Z-domain에서 구해진 해 식 (2.6)에 적용함으로써 식 (2.7)과 (2.8)에 주어진 Y-domain과 X-domain에서의 해를 구할 수 있다.

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

$$y_j(t) = z_{j0} e^{\lambda_j t} + \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^N h_{2,kl}^j z_{k0} z_{l0} e^{(\lambda_k + \lambda_l)t} \quad (2.7)$$

$$x_k(t) = \sum_{j=1}^N u_{ij} z_{j0} e^{\lambda_j t} + \sum_{j=1}^N u_{ij} \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^N h_{2,kl}^j z_{k0} z_{l0} e^{(\lambda_k + \lambda_l)t} \quad (2.8)$$

### 3. 비선형성의 정량화

#### 3.1 비선형 참여인수

선형 참여인수는 모드와 기기 사이의 상호 관련을 파악하는데 사용되는 방법이고(1), 외란의 크기와 지속시간과는 무관한 계통의 구조(structure)와 부하 조건(loadings)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(2.9)와 같이 좌측 고유벡터와 우측 고유벡터의 해당 값 곱으로 표현된다.

$$p_{ki} = u_{ki} * v_{ik} \quad (2.9)$$

선형 참여인수가 좌측 및 우측 고유벡터의 곱으로 표시되기 때문에 고유벡터의 스케일과는 관계없이 상대적인 비교를 가능하게 한다. Normal form 변환 과정에 주어진 식 (2.4)의 역변환을 이용함으로써  $k$  번째 상태변수에 대한 해를 구할 수 있으며 식 (2.10)으로 주어진다.

$$x_k(t) = \sum_{i=1}^N u_{ki}(v_{ik} + v_{2,ikk})e^{\lambda_i t} + \sum_{p=1}^N \sum_{q=p}^N v_{2,kpq}(v_{pk} + v_{2,pkk})(v_{qk} + v_{2,qkk})e^{(\lambda_p + \lambda_q)t} \quad (2.10)$$

여기서,

$$v_{2,ipp} = - \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^N h_{2,kl}^i v_{kp} v_{lp}$$

$$v_{2,ikl} = \sum_{j=1}^N u_{ij} h_{2,kl}^j$$

식 (2.10)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.

$$x_k(t) = \sum_{i=1}^N p_{ki} e^{\lambda_i t} + \sum_{p=1}^N \sum_{q=p}^N p_{2,kpq} e^{(\lambda_p + \lambda_q)t} \quad (2.11)$$

여기서,

$$p_{ki} = u_{ki}(v_{ik} + v_{2,ikk})$$

$$p_{2,kpq} = v_{2,kpq}(v_{pk} + v_{2,pkk})(v_{qk} + v_{2,qkk})$$

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  $p_{2,kpq}$ 이며,  $p_{2,ki}$ 를 구성하는 두 개의 항에서 첫 번째 부

분은 기존 참여인수  $p_{ki}$ 에 해당하고, 이는 2차항까지 포함된 normal form 변환을 통해 추가적인 비선형 정보가 참여인수에 반영되었음을 의미한다. 일반적으로 normal form 변환에 의해 추가된  $u_{ki}$ 와  $v_{2,ikk}$ 의 곱은  $p_{ki}$ 비해 아주 작은 값을 나타내지만 전력계통 압박정도가 커짐에 따라 모드간의 비선형 상호결합에 의한 이 값이 커져 선형 정보에 의한 참여인수의 비교와는 다른 결과를 낳을 수 있게 된다. 따라서 비선형 상호작용이 시될 수 없는 압박된 전력계통에서의 제어기 위치 선정에 위해서는 비선형성을 정량화한 값들의 추가적인 고려가 필요하다. 또한 모드간의 비선형 상호결합에 의해 형성된 결합 모드와 상태변수 간의 관계를 정량화할 수 있는  $p_{2,kpq}$ 는 전력계통의 비선형성에 영향을 받지 않는 기기 상태변수의 선정 및 설계를 위해 유용한 정보가 될 것이다(6).

#### 3.2 비선형 참여인수를 이용한 결합지수

비선형 참여인수는 압박된 계통의 구조에 의한 각 기기의 상태변수가 모드에 미치는 영향을 정량적으로 나타낼 수 있는데 이를 확장하여 각 모드에서의 상태변수들간의 결합정도를 식 (2.12)와 같이 나타낼 수 있다.

$$C_{ij}^2(h) = p_{2,ih} * p_{2,jh} \quad (2.12)$$

여기서  $C_{ij}^2(h)$ 는  $h$  번째 모드에 대한  $i$  와  $j$  번째 상태변수간의 결합 정도를 나타낸다. 또한 전체 모드에 대한 상태변수들 간의 결합 정도를 나타내는 결합지수를 식 (2.13)과 같이 제시할 수 있다.

$$C_{ij}^2 = \sum_{h=1}^N C_{ij}^2(h) \quad (2.13)$$

이는 계통의 구조에 의한 각 기기의 상태변수들 간의 결합 정도를 나타내므로, 기존의 참여인수와 상태변수간의 참여정도 정량화와 함께 계통의 구조를 정량화할 수 있는 지수이다. 선형화를 통하여 초기동작점 부근의 계통 안정도를 개선하기 위하여 제어기 설치 위치를 결정하고자 하는 기존의 방법과 달리 비교적 큰 규모의 외란 발생시 적용가능한 제어기 설치위치를 결정하는데 사용할 수 있다.

#### 3.3 제어기 선정 알고리즘

##### ① critical mode선정:

계통의 선형화를 통해 구해진 계통상태행렬로부터 고유치를 구한 후 그 고유값 중 제동이 작은 모드들을 우선 선택한 후 주파수가 낮은 모드(0.2~0.8 Hz)를 critical mode로 선정한다.

##### ② 참여 state의 선정 :

critical mode에 대해 비선형 참여인수( $P_2$ )를 계산하여 가장 큰 값을 가지는 state를 찾는다.

##### ③ State의 구분 :

선정된 state가 control state인가 machine state인가를 판별한다.

##### ④ control state인 경우:

control state가 속한 machine을 찾고, 전체 결합지수( $C_{ij}^2$ )의 상위값 중 각 machine들과 가장 연관을 많이 갖는 machine을 선택하여 이 두 machine에 설치위치를 결정한다.

##### ⑤ machine state인 경우:

전체 결합지수( $C_{ij}^2$ )의 상위값 중 각 machine들과 가장 연관을 많이 맺는 machine과 ③에서 선정된 state와 critical mode에 대한 결합지수( $C_{ij}^2(h)$ )가 가장 큰 control state를 선정하여 이 두 machine에 설치위치를 결정한다.

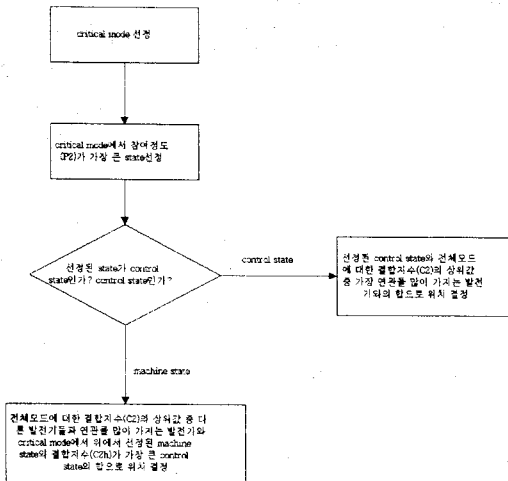


그림 1 제어기 선정 위치 알고리즘

3.4 사례연구(1)

사례연구의 10기 발전기 계통에서 9기는 2축 모델로 표현되었으며 1기는 고전모델로 표현하였다. 표 1에서 보는 것과 같이 25번모드를 critical mode로 선정하였다. 표 2는 PF와 P2 상위값 중 일부만을 나타내었다. PF와 P2값의 순위가 다를 수 있다.

표 1 New England 계통의 고유값

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-01	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

표 2 critical mode에서의 state와 발전기로 나타낸 PF와 P2

mode	gen#(state)	pf	mode	gen#(state)	p2
25	10(delta)	3.47E-01	25	9(xe2)	1.10E+00
25	9(omega)	1.35E-01	25	6(xe2)	1.05E+00
25	6(omega)	8.94E-02	25	5(xe2)	8.79E-01
25	7(omega)	5.89E-02	25	4(xe2)	7.63E-01
25	3(omega)	5.35E-02	25	7(xe2)	4.82E-01

각 모드에서의 state들 간의 참여정도 ( $C_{ij}^2(h)$ )와 전체 모드에 대한 state들 간의 참여정도 ( $C_{ij}^2$ )를 일부만만을 표 3과 표 4에 나타내었다.

표 3  $C_{ij}^2(h)$

state	$c_{ij}^2(h)$	발전기-state
61 64	1.15E+00	6(xe2), 9(xe2)
60 64	9.64E-01	5(xe2), 9(xe2)
60 61	9.21E-01	5(xe2), 6(xe2)
59 64	8.37E-01	4(xe2), 9(xe2)
59 61	7.99E-01	4(xe2), 6(xe2)
59 60	6.71E-01	4(xe2), 5(xe2)
62 64	5.29E-01	7(xe2), 9(xe2)
37 64	5.08E-01	10(delta), 9(xe2)
61 62	5.05E-01	6(xe2), 7(xe2)
37 61	4.96E-01	10(delta), 6(xe2)
56 64	4.43E-01	1(xe2), 9(xe2)
57 64	4.35E-01	2(xe2), 9(xe2)

표 4  $C_{ij}^2$

state	$c_{ij}^2$	발전기
57 62	3.71E+06	2(xe2), 7(xe2)
57 63	2.69E+06	2(xe2), 8(xe2)
56 57	2.63E+06	1(xe2), 2(xe2)
57 64	2.35E+06	2(xe2), 9(xe2)
57 60	1.91E+06	2(xe2), 5(xe2)
63 64	1.81E+06	8(xe2), 9(xe2)
56 64	1.10E+06	1(xe2), 9(xe2)
62 64	7.76E+05	7(xe2), 9(xe2)
56 63	6.82E+05	1(xe2), 8(xe2)
60 64	5.53E+05	6(xe2), 9(xe2)
56 62	5.37E+05	1(xe2), 7(xe2)
53 57	4.89E+05	7(xe2), 2(xe2)

표 3에서 보이는 것과 같이 critical mode(25번 모드)에서의 state들 간의 참여정도는 64번 state(xe2)가 지배적임을 알 수 있다. 다른 state들간에 관계에서 고려 관계하며 상위에 위치함을 볼 수 있다. 따라서 critical mode(25번 모드)의 제동을 개선시키기 위해서는 9번 발전기에 PSS를 설치하여야 할 것이다. 표5에서는 전체모드에서 state들간의 참여정도를 보이는 데 표에서 보이는 것과 같이 2번 발전기와 7번 발전기가 다른 발전기의 여자기 state들과 상호 관련을 강하게 맺고 있음을 알 수 있다. 알고리즘에 따라 P2에 따라 가장 우선순위에 있는 state는 64(xe2)이고 control state이다. 그리고 전체모드에서 상호 관련을 강하게 맺고 있는 발전기는 2번과 9번 발전기임을 보이고 있다. 따라서 동일 사양 전력계통안정화장치의 설치위치는 2번과 9번 발전기에 설치하여야 좋은 시스템 계동 특성을 보일 것이다. 이를 검증하기 위하여 사고를 계통에 가하고 시간에 따른 발전기 위상각( $\delta$ )의 변동을 시뮬레이션하였다. 사고는 임의로 선택된 19번 bus에 삼상사고를 가정하고 사고지속시간은(0.6 cycle) 0.01초로 하여 비교를 위하여 설치하지 않았을 때와 다른 발전기에 설치하였을 때를 그려보았다.

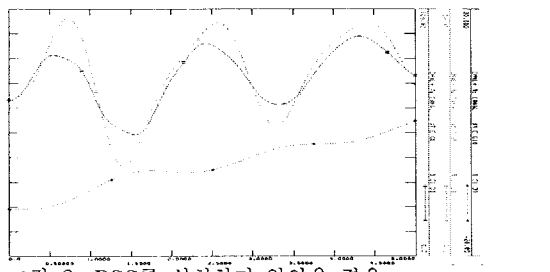
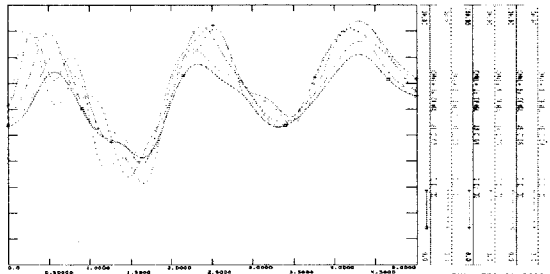


그림 2. PSS를 설치하지 않았을 경우

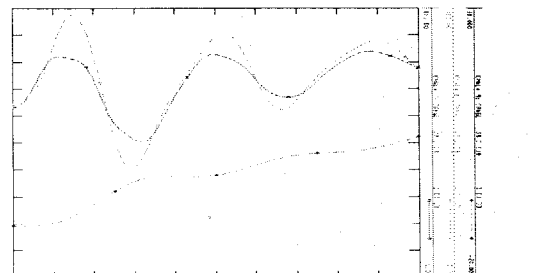
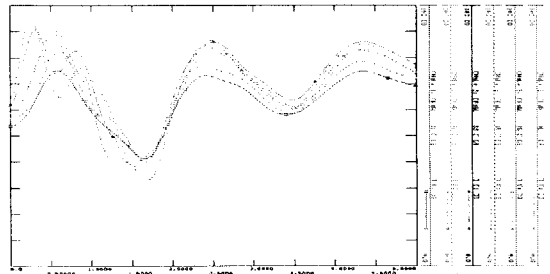


그림 3. 2번 발전기에 설치하였을 경우

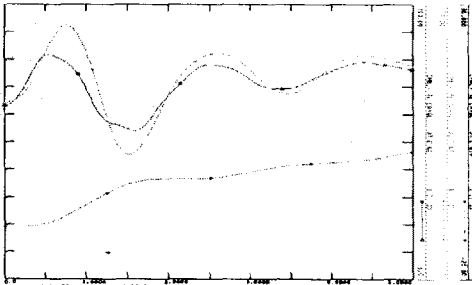
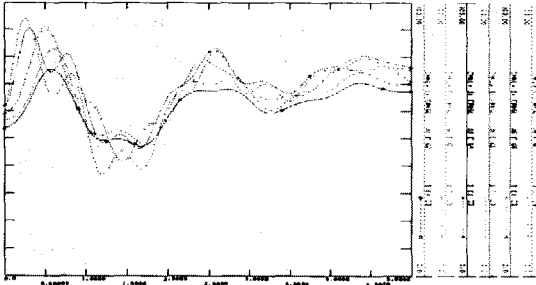


그림 4. 9번 발전기에 PSS를 설치하였을 경우

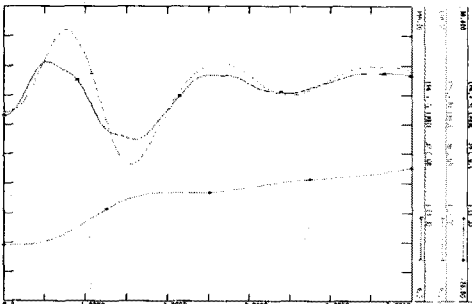
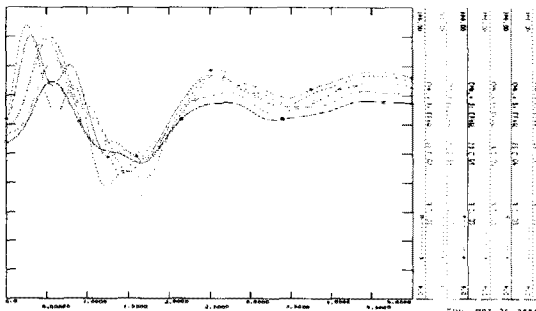


그림 5. 2번과 9번 발전기에 PSS를 설치하였을 경우

그림에서 보는 것과 같이 9번 발전기에 설치하였을 경우 다른 발전기에 설치하는 것 보다 좋은 제동 특성을 보임을 볼 수 있다. 또한 전체적인 제동 특성을 향상시키기 위해 2번 발전기와 더불어 9번 발전기에 설치한 경우 더 좋은 제동 특성을 보임을 알 수 있다.

### 3.4 사례연구(2)

한전 축약계통(70기 772모선)에 대하여 적용하였다. 발전기 중 11기를 선택하여 이축 모델로 구성하고 나머지는 고전모델로 모델링하였다. 11기의 선택은 유효전력의 발전량이 큰 순서로 선정하였다. 이는 유효발전량이 큰 발전기가 계통에 미치는 영향이 크다는 전제 하에 선정된 것이다. 총 194개의 진동모드가 나타나는데 표 5에 critical mode를 나타내었다.

표 5 critical mode

mode	고유값 (Re)	고유값 (Im)
45	- 5.93E- 04	5.10E+ 00
46	- 5.93E- 04	- 5.10E+ 00

45번 모드에 대한 비선형 참여인수(P2)와 선형 참여인수(PF)를 발전기와 state로 일부분을 표 6에 나타내었다. 표 6에서 보는 것과 같이 비선형 참여인수에서 나타나는 상태변수가 control state 일 때 같은 발전기라도 선형 참여인수는 machine state임을 알 수 있다. 그러나 대체적으로 상위 순위에서의 뒤바뀜은 일어나지 않고 있다. 표 6에서 나타난 것과 같이 전력계통안정화장치를 57번 발전기에 투입하면 개선된 제동 특성을 보일 것이다.

표 6. state번호를 발전기와 state로 나타낸 P2와PF

mode	state#	발전기와 state(P2)	mode	state#	발전기와 state(PF)
45	194	57(xe2)	45	102	57(delta)
45	192	46(xe2)	45	33	57(omega)
45	191	44(xe2)	45	100	46(delta)
45	102	57(delta)	45	99	44(delta)
45	33	57(omega)	45	31	46(omega)
45	100	46(delta)	45	26	11(omega)
45	183	57(xe1)	45	149	58(delta)
45	31	46(omega)	45	30	44(omega)

## 4. 결 론

비선형인 전력계통을 해석하는 것은 어렵기 때문에 평형점 주위에서의 선형화를 통하여 계통에 대해 해석하는 기존의 방법은 그 범위 내에서 타당한 해석법이다. 그러나 현대의 계통에 대해서는 비선형성의 증가로 이러한 선형해석법은 한계를 지니다. 따라서 비선형성을 고려한 (본 논문에서는 2차 까지만을 고려) 해석이 필요하다. normal form을 이용하여 구하여진 해로부터 비선형 참여인수와 모드와 모드 사이에서 상태변수의 참여 정도를 정량적으로 나타낼 수 있었다. 비선형 참여인수와 이로부터 유도된 결합지수를 이용하여 제어기 설치위치를 선정하였고 시뮬레이션을 통하여 이들 지수를 이용한 방법의 유용성을 검증하였다. 그러나 시뮬레이션시 투입한 전력계통안정화장치는 각각의 발전기에 맞는 튜닝된 안정화장치가 아닌 모두 동일한 장치였으므로 제어기의 효과를 극대화하기 위한 제어기 튜닝 연구가 필요하다.

## (참 고 문 헌)

- [1] Perez-Arriaga, I. J., G. C. Vergbese, and F. C. Schweppé. "Selective Modal Analysis with Applications to Electric Power Systems. Part 1: 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.