

## 한전 실계통에서의 저주파 동요현상 해석

송길영 권세혁 김덕영\* 권영준 송석하  
고려대학교 전기공학과 한전 계통운영처

### Analysis of Low Frequency Oscillations in KEPCO System

K. Y. Song S. H. Kwon D. Y. Kim Y. J. Kwon S. H. Song  
Korea University KEPCO

#### ABSTRACT

Low frequency oscillations have been observed in KEPCO system. This paper represents how to analyze the power system by using the AESOPS program and analyze the various factors affecting the damping characteristics of these oscillations in KEPCO system of 1986. The characteristics of load, the amount of power flow on the transmission line and the gain of exciter have a significant effects on the damping of the system while the governing system has only a minor one. With the Power System Stabilizers, the stability of the power system has been increased.

#### 1. 서론

전력수요가 지속적으로 증가함에 따라 전력계통 또한 복잡화, 대규모화 되어가고 있으며 전력공급의 신뢰성과 고품질에 대한 사회적 요구 또한 높아지고 있다. 우리나라 전력계통은 설비의 대용량화와 부하의 경인지역집중, 발전설비의 영남지역 집중화 등의 지역적 수요의 불균형 그리고 송전설비의 장거리 대전력수송 등으로 계통의 안정운영에 많은 어려움이 따르고 있다. 실제로 86년의 경우 영·호남지역을 연결하는 345KV 주요간선계통인 북부산-신마산 송전선이 운전정지된 상태에서 서대구-신옥천 345KV 송전선 1회선 정지시에 저주파 동요현상이 발생하였다.

본 논문은 이때의 계통상태를 중심으로 AESOPS 프로그램을 사용하여 저주파 진동현상의 원인인 전기기계적 진동과 관련된 모든 고유치를 찾고 이중에서 감쇠정수와 주파수가 작은 몇개의 중요모드를 선정하여 이들을 관찰하였다.

AESOPS 프로그램은 미국의 EPRI 연구소에서 개발한 프로그램으로 본 연구에서는 그 내용의 일부를 수정·보완하여 사용하였다.

계통동요에 영향을 미치는 여러요인들을 분석하기위해 실계통에 대하여 부하특성, 여지정수 조정, 조류량의 변화, 조속기의 영향등을 고려하여 진동모드의 변화를 관찰하였다. 또한 저주파 동요현상의 개선책으로 전력계통 안정기를 적정 위치에 투입하여 진동모드의 개선효과를 관찰하였다.

#### 2. 계통해석

86년 저주파 동요현상 발생 계통에 대해 AESOPS 프로그램을 사용하여 고유치 해석을 하였다. 이때의 계통의 발전기의 수, 모선수, 선로수, 그리고 부하의 크기는 다음과 같다.

발전기의 수	모선수	선로수	부하의 크기[Mw]
35	281	471	8200

N개 발전기 계통의 전기기계적 진동과 관련된 고유치는 (N-1)개이다. 그러나 AESOPS 프로그램에서는 특정 구동발전기에 속도편차 1.0, 초기고유치 So를 넣고 반복계산하여 실제의 고유치로 수렴시키기 때문에 (N-1)개의 고유치를 모두 발견하는 것은 어려우며 본 계통의 경우 31개의 고유치를

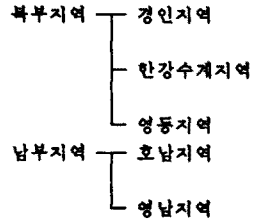
표 2.1 1986년 계통의 고유치계산과정

모드	고유치	freq.	감쇠율	영향을 받는 발전기
1	-0.1334	52.0087	0.2787	0.0280
2	-0.7099	7.1131	1.133	0.534
3	-0.8808	7.1539	1.139	0.461
4	-0.9094	7.4733	1.189	0.466
5	-1.2729	7.7011	1.226	0.354
6	-1.0736	8.1073	1.290	0.435
7	-0.8633	8.1349	1.293	0.513
8	-1.1977	8.2637	1.315	0.402
9	-1.4996	8.2777	1.317	0.320
10	-0.9671	8.4360	1.343	0.487
11	-1.2356	8.5238	1.357	0.402
12	-1.4731	9.3452	1.487	0.371
13	-1.3166	9.4010	1.496	0.415
14	-1.3188	9.4137	1.497	0.414
15	-1.1548	9.6679	1.539	0.472
16	-1.4488	9.8757	1.540	0.390
17	-1.9378	9.7155	1.546	0.286
18	-1.8961	9.9773	1.588	0.303
19	-2.4800	9.4004	1.496	0.191
20	-2.1703	9.9713	1.587	0.255
21	-1.7238	10.9779	1.747	0.373
22	-1.5537	11.0408	1.757	0.413
23	-2.0657	11.1661	1.777	0.313
24	-2.1286	11.5880	1.844	0.315
25	-2.1741	11.7419	1.869	0.312
26	-1.5780	11.8440	1.885	0.433
27	-2.2136	11.8700	1.889	0.310
28	-2.0332	13.0226	2.073	0.375
29	-2.2207	13.8931	2.211	0.366
30	-1.5713	14.9092	2.373	0.516
31	-2.1974	15.6885	2.497	0.415

발견하였다. 위의 계통에서 발견된 고유치와 주파수 그리고 그 진동모드에 영향을 크게 받는 (속도편차 0.2 이상) 발전기들을 표 2.1 에 나타내었다.

표 2.1에서 영향을 받는 발전기는 해당 진동모드에 대한 발전기 각속도편차의 크기가 0.2보다 큰 발전기들을 의미한다.

각 진동모드에 참여하고 있는 발전기를 지역적으로 구분하여 보면 그 진동모드가 지역간 진동모드인지 또는 국부적인(Local) 진동모드인지 파악할 수 있으며, 편의상 전체계통의 발전기를 소속된 지역에 따라 다음과 같이 구분하였다.



여기서 북부지역과 남부지역의 경계는 발전력은 비경인지역에, 부하중심은 경인지역에 집중되어 있는 계통여건상 중앙-서서울, 및 신유전-동서울의 2개 345KV 송전선으로 하였다.

한전계통을 이미 언급한 3개의 송전선을 경계로 남, 북으로 분할하였을때, 해당진동모드에 영향을 주는 지리적 위치에 따라 남부, 북부에 걸친 발전기가 영향을 준 경우 '전국모드(National Mode)'라 부르기로 한다. 북부모드는 북부의 경인, 한강수계, 또는 영동등의 3개지역 상호간의 모드이며, 남부모드는 남부의 호남과 영남지역간의 진동모드를 말한다.

표2.1의 진동모드중에서 지역별로 발전기를 구분하면 다음과 같다.

- 전국모드
  - 전국모드 1 : 진동모드 1 (0.797Hz)
  - 전국모드 2 : 진동모드 3 (1.139Hz)
  - 전국모드 3 : 진동모드 7 (1.293Hz)
  - 전국모드 4 : 진동모드 10(1.343Hz)
  - 전국모드 5 : 진동모드 18(1.588Hz)
  - 전국모드 6 : 진동모드 21(1.747Hz)
  - 전국모드 7 : 진동모드 22(1.757Hz)
- 북부모드
  - 북부모드 1 : 진동모드 2 (1.133Hz)
  - 북부모드 2 : 진동모드 8 (1.315Hz)
  - 북부모드 3 : 진동모드 23(1.777Hz)
  - 북부모드 4 : 진동모드 26(1.885Hz)

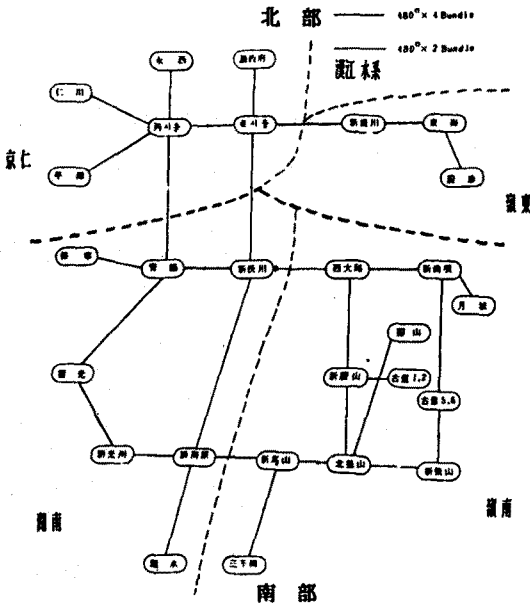


그림 2.1 한전계통의 345KV 계통도('86년)

DRIVEN GEN IS UNIT		NORMALIZED GENERATOR SPEEDS		AT BUS 1071. ALPHA=-0.9671 BETA= 8.4360 FREQ= 1.343 SPR=0.487			
1001	-0.33 0.14	1002	-0.33 0.14	1025	-0.29 0.13	1031	-0.19 0.04
1041	-0.23 0.04	1042	-0.24 0.04	1051	0.40-0.02	1052	0.34-0.04
1061	-0.31 0.21	1062	-0.32 0.21	1071	0.85-0.14	1072	1.00 0.01
1091	-0.30 0.23	1092	-0.30 0.22	1101	-0.17 0.11	1102	-0.09 0.09
1105	0.22 0.71	1111	-0.12 0.05	1112	-0.12 0.05	1121	0.63-0.30
1151	-0.13 0.05	1161	-0.26-0.16	1171	-0.07-0.04	1201	-0.14-0.16
1205	0.35 0.32	1251	0.05 0.04	1301	-0.34-0.67	1302	-0.34-0.67
1321	0.01 0.01	1322	0.01 0.01	1325	0.01 0.01	1326	0.01 0.01
1356	-0.03 0.01	1361	-0.03 0.07	1362	-0.03 0.07		

DRIVEN GEN IS UNIT		NORMALIZED GENERATOR SPEEDS		AT BUS 1071. ALPHA=-0.9671 BETA= 8.4360 FREQ= 1.343 SPR=0.487		
1072	CHNCHN2G I			V		I
1071	CHNCHN1G I			V		I
1121	SOYNG 1G I			I		I
1051	CNGPNG1G I			V		I
1205	YNGKNG1G I			I		I
1052	CNGPNG2G I			VI		I
1105	CHNGJULG I			I		I
1161	DAEBCNG1G I			I		I
1092	KUJAM 2G I			I		I
1091	EUIAM 1G I			I		I
1061	HWACHN1G I			I		I
1062	HWACHN2G I			I		I
1001	INCHN#1G I			I		I
1041	PLDNG#1G I			IV		I
1042	PLDNG#2G I			IV		I
1025	SEKUL#5G I			I		I
1002	INCHN#2G I			I		I
1301	SMCNPO1G I			I		I
1302	SMCNPO2G I			I		I

그림 2.2 전국모드 4의 발전기 속도편차 그래프 (AESOPS 프로그램 출력)

그림 2.2 에 전국모드 4의 발전기 속도편차의 그래프를 보았다. 그림에서 하나의 행에 정규화된 복소속도편차(H+jV)가 출력되며, 중앙은 0으로 좌속값이 -1, 우속값이 +1의 값을 의미한다. 즉 H가 +의 값을 갖는 발전기 군과 -의 값을 갖는 발전기군 사이의 진동모드임을 알 수 있다.

86년 계통의 진동모드 중에서 전체계통의 안정도에 미치는 영향이 큰 전국모드 1에 대한 PSS/E 과도안정도해석 프로그램의 결과는 그림 2.3 과 같다.

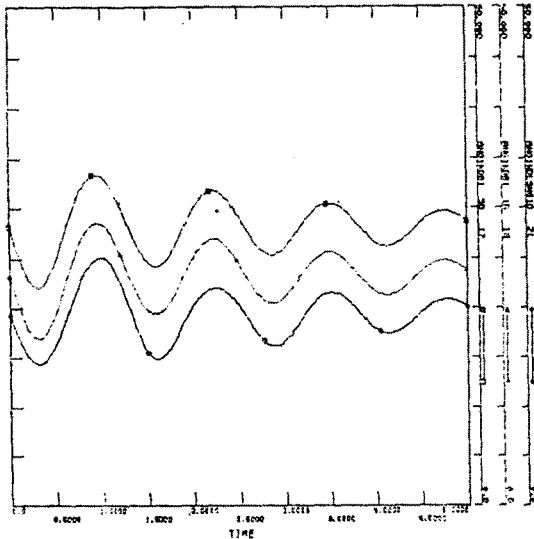


그림 2.3 전국모드 1의 PSS/E 과도안정도 해석결과

그림 2.3 에서 월성1호기, 고리1,3호기에서의 동요곡선의 진동주파수는 0.793Hz이며, 이는 AESOPS 프로그램의 해석결과인 0.797Hz의 진동주파수와 매우 근접한 결과이다.

### 3. 계통동요 요인 분석

계통동요에 영향을 미치는 요인들을 분석하기 위해 부하특성 및 여자기정수, 송전선의 조류량, 조속기 등을 변화시켜 가면서 진동모드의 변화를 분석하였다.

#### 3.1 부하특성

일반적으로 부하는 다음식과 같이 전압의 함수로 나타낼 수 있다.

$$P = P_0(A + BV + CV^2)$$

$$Q = Q_0(D + EV + FV^2)$$

위의 식에서  $P_0$ 와  $Q_0$ 는 각각 정격전압에서의 유효, 무효 부하전력을 나타내며, 6개의 변수 A, B, C, D, E, F는 부하의 특성을 나타내는 계수이다.

케이스1 : 일정 임피던스부하 (C=F=1.0)

케이스2 : 일정 전류부하 (B=E=1.0)

케이스3 : 일정 MVA부하 (A=D=1.0)

케이스4 : 86년 인천제공 부하특성

(A=0.57, B=0.13, C=0.35, D=0.36, E=0.08, F=0.56)

각 케이스 별 중요 진동모드에 관련된 고유치는 표 3.1과 같다.

표 3.1 부하특성에 의한 진동모드의 변화

일정임피던스부하	일정전류 부하	일정 MVA 부하	인천제공 부하특성
-0.1953+j5.3851	-0.1448+j5.1421	1.8034+j2.9780	-0.1394+j5.0067
-0.7783+j7.2258	-0.7218+j7.1319	-0.7452+j6.4480	-0.7099+j7.1131
-0.8818+j7.1520	-0.8806+j7.1533	-0.8805+j7.1598	-0.8808+j7.1539
-0.8373+j7.5059	-0.9001+j7.4754	-0.9026+j7.3354	-0.9098+j7.4729

표 3.1 에서 부하특성에 따라 진동모드에 미치는 영향이 매우 크며, 선형부하의 경우와 비선형부하의 경우를 비교해 보면 부하를 비선형부하로 모델링한 경우가 선형부하로 모델링한 경우보다 감쇠율이 불량해진 것을 관찰할 수 있다.

#### 3.2 여자기 정수 조정

여자기 정수가 계통안정도에 미치는 영향을 살펴보기 위해 출력이 큰 원자력 발전기의 여자기정수  $K_A$  값을 변화시켜 가면서 고유치 해석을 하였다.

케이스1:  $k_A=400$ (영광1,2호기), 1000(월성1호기, 고리1,2,3,4호기)

케이스2:  $k_A=250$ (영광1,2호기), 700(월성1호기, 고리1,2,3,4호기)

케이스3:  $k_A=50$ (영광1,2호기, 월성1호기, 고리1,2,3,4호기)

각 케이스별 중요모드의 변화는 표 3.2와 같다.

표 3.2 여자기정수( $K_A$ )값에 의한 진동모드의 변화

케이스 1	케이스 2	케이스 3
-0.1952+j5.2382	-0.1138+j5.1785	-0.3906+j5.0023
-0.5748+j7.1449	-0.6590+j7.1152	-0.7400+j7.1274
-0.8717+j7.2082	-0.8678+j7.1907	-0.9534+j7.1146
-0.9137+j7.4582	-0.9107+j7.4684	-0.9057+j7.4834

위의 고유치 해석결과 여자기정수  $K_A$ 의 값을 작게할수록 계통이 안정해지며 계통에 미치는 영향이 큰 것을 알 수 있다.

#### 3.3 송전선 조류량의 조정

표 3.3 부하량과 발전량의 조절에 의한 송전선 조류량의 변화

계통상태	전세발- 전량(MW)	전세부- 전량(MW)	송전선 조류량	조류량 합계
1 정상상태 계통	8407.2 +j2888.3	8145.9 +j2778.0	동서울T/L:964.8-j34.2 서서울T/L:1406.8-j172.4	2371.6 +j138.2
2 경인부하증가 영남발전증가	8840.0 +j4380.5	8491.5 +j2903.4	동서울T/L:1097.4-j23.4 서서울T/L:1389.8-j259.0	2687.2 +j283.0
3 경인부하증가 호남발전증가	8763.4 +j3752.1	8461.1 +j2892.3	동서울T/L:999.8-j79.6 서서울T/L:1440.8-j116.4	2440.4 +j36.8
4 경인부하감소 영남발전감소	8180.5 +j2233.9	7946.0 +j2705.4	동서울T/L:889.8-j63.8 서서울T/L:1301.0-j128.8	2190.8 +j65.0
5 경인부하감소 호남발전감소	8217.1 +j2544.9	7972.0 +j2714.8	동서울T/L:835.2-j139.2 서서울T/L:1222.8-j32.0	2058.0 +j117.2

본 연구에서는 경인지역의 부하를 증감시키고 이에 해당하는 만큼의 발전량을 호남지역과 영남지역에서 각각 증감시켜 송전선에 흐르는 조류량을 변화시켜가면서 진동모드에 미치는 영향을 분석하였다.

표 3.4 조류량의 조정에 의한 진동모드의 변화

케이스 1	케이스 2	케이스 3	케이스 4	케이스 5
-0.1394+j5.0067	-0.0709+j4.7339	-0.1211+j4.9939	-0.1524+j5.0427	-0.1463+j5.0323
-0.7099+j7.1131	-0.6802+j6.9116	-0.6596+j7.0462	-0.8453+j6.9499	-0.7959+j7.0078
-0.8808+j7.1539	-0.8932+j7.1332	-0.8372+j7.6954	-0.7980+j7.3694	-0.8268+j7.3457
-0.9098+j7.4729	-0.8003+j7.8561	-0.8881+j7.1395	-0.8799+j7.1650	-0.8855+j7.1825

위의 고유치 해석결과 대체로 등서율T/L, 서서율T/L에 호르는 조류량이 증가하면 계통이 불안정에 가까워지고, 조류량이 감소하면 보다 안정하게되는 것을 알 수 있다.

3.4 조속기의 영향

계통동요 현상에 미치는 조속기의 영향을 조사하기 위해 전체 발전기의 조속기를 제거하고 진동모드의 변화를 관찰하였다.

표 3.5 조속기에 의한 진동모드의 변화

With Governor	Without Governor
-0.1394+j5.0067	-0.1430+j5.0004
-0.7099+j7.1131	-0.6984+j7.2238
-0.8808+j7.1539	-0.8817+j7.1416
-0.9098+j7.4729	-0.9001+j7.5801

표 3.5 에서 계통동요 현상에 미치는 조속기의 영향은 매우 작은 것을 알 수 있다.

4. 전력계통 안정기의 적용

저주파 계통동요 현상의 개선책으로 전력계통 안정기(PSS: Power System Stabilizer)를 전력계통에 투입하여 진동모드에 미치는 영향을 조사하였다.

일반적으로 PSS를 설치하는 데는 PSS의 정수들을 적합한 위치에 설치하는 위치설정 문제와 적절한 값으로 정수들을 선정하는 정수문제가 대두된다.

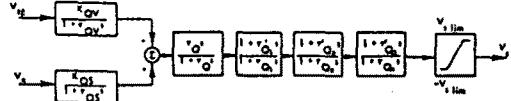
우선 PSS의 위치선정은 AESOPS의 출력 결과에서 하나의 진동모드에 대하여 정규화한 발전기 속도편차로부터 속도편차가 가장 큰 발전기와 가장 작은 발전기(-부호)에 PSS를 설치하는 것이 적합한 위치가 되며 이는 고유벡터를 사용하여 PSS의 위치를 선정하는 것과 유사하다. [5]

또 하나의 문제인 정수선정은 발전기의 종류 및 출력등을 고려하여 참고문헌에 나와있는 데이터 중에서 어느정도 적절하다고 생각되는 정수들을 선정하였다. [1]

86년 Peak시의 고유치해석 결과중 허수축에 가까운 중요모드와 이때의 속도편차중에서 가장 큰 값과 가장 작은 값을 갖는 발전기는 다음과 같다.

-0.1394+j5.0067 : 청평1,2호기 - 고리1,2,3,4호기

즉 PSS의 최적설치 위치는 청평1,2호기와 고리1,2,3,4호기가 되며 여기에 추가로 영광1,2호기에도 PSS를 설치하는 경우에 대해서도 조사하였다. 그림 4.1 에 일반적인 PSS 블록선도와 정수를 보였다. 이때 PSS의 입력신호로는 발전기 회전자의 속도편차를 사용하였다.



수령기:  $K_{qv}=0.0$   $K_{qs}=1.0$   $\tau_{q1}=30.0$   $\tau'_{q1}=0.5$   $\tau_{q2}=0.03$   $\tau'_{q2}=0.5$   $\tau_{q3}=0.03$   $\tau'_{q3}=0.0$   $\tau_{q3}=0.0$   $V_{lim}=0.1$

원차력기:  $K_{qv}=0.0$   $K_{qs}=10.0$   $\tau_{q1}=10.0$   $\tau'_{q1}=0.08$   $\tau_{q2}=0.02$   $\tau'_{q2}=0.08$   $\tau_{q3}=0.0$   $\tau'_{q3}=0.0$   $\tau_{q3}=0.0$   $V_{lim}=0.1$

그림 4.1 PSS블록선도와 정수

케이스1 : PSS 설치(보령1,2호기)

케이스2 : PSS 설치(케이스1+청평1,2호기, 고리1,2,3,4호기)

케이스3 : PSS 설치(케이스2+영광1,2호기)

각 케이스별 진동모드의 변화를 표 4.1과 그림 4.2에 나타내었다.

표 4.1 PSS설치에 의한 진동모드의 변화

케이스 1	케이스 2	케이스 3
-0.1394+j5.0067	-0.1699+j5.0560	-0.1849+j5.0863
-0.7059+j7.1131	-0.7089+j7.1436	-0.7413+j7.1476
-0.8808+j7.1539	-0.9670+j7.4336	-1.0037+j7.4437
-0.9098+j7.4729	-0.9219+j7.4603	-0.8975+j7.4853

표 4.1 에서 PSS 설치에 따라 진동모드가 안정화되는 것을 알 수 있다. 그러나 진동모드가 큰 폭으로 개선되지는 않았으며, 이는 PSS 정수들이 최적의 정수가 아닌 일반적인 정수들을 사용했기 때문으로 생각된다.

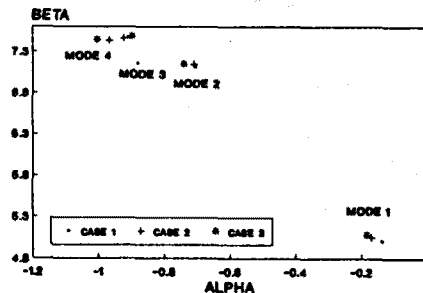


그림 4.2 PSS 설치에 의한 진동모드의 변화

## 5. 결론

본 논문은 86년 저주파동요현상 발생계통에 대해서 AESOPS 프로그램을 사용하여 전기기계적 진동모드에 관련된 고유치를 구하고, 이를 지역적으로 구분해석하여 각 진동모드가 어떠한 의미가 있는가를 규명하였다. 또한 고유치해석 결과를 PSS/E과도안정도 해석프로그램의 결과와 비교하여 타당성을 검증하였다.

계통동요에 영향을 미치는 여러요소들에 의한 진동모드의 영향을 분석하였다. 그 결과 부하특성과 송전선 조류량의 변화가 계통동요에 큰 영향을 미치는 것을 알게되었다. 여자기 정수조정은 출력이 큰 원자력 발전기의 여자기 정수를 조정하였기때문에 계통에 미치는 영향이 크며, 조속기는 계통동요에 별 영향이 없음을 알게되었다.

계통의 안정도를 증진시키기위하여 전력계통안정기를 계통에 투입하였다. 이때 전력계통 안정기의 위치설정 문제는 AESOPS프로그램의 해석결과에 기초하였으며, 그 결과 계통의 안정도가 증가되는 것을 관찰하였다.

## 6. 참고문헌

- [1] P.M.Anderson and A.A.Foud, Power System Control and Stability, Iowa State University Press, Ames, Iowa, 1977.
- [2] R.T.Byerly, D.E.Sherman, and B.J.Bennon, "Phase II:Frequency Domain Analysis of Low Frequency Oscillations in Large Electric Power Systems", Vol.1,2,3,4 and 5, Research Project 744-1, Electric Power Research Institute, Palo Alto, California, April, 1982.
- [3] 전력계통의 저주파 계통동요 해석과 안정화 대책에 관한 연구, 89M-J05, 한국전력공사 계통운용처.
- [4] Y.Y.Hsu, S.W.Shyue, and C.C.Su, "Low Frequency Oscillations in Longitudinal Power System", IEEE PWRS Vol.2, No1, pp92-100, February 1987.
- [5] F.P.deMELLO, P.J.Nolan, T.F.Laskowski, and J.M.Undrill, "Coordinated Application of Stabilizers in Multimachine Power Systems", IEEE Pas-99, No.3, pp.892-901, May/Jun 1980.