

대규모 계통의 동적 축약에 관한 연구

論 文

49A-8-5

A Study on the Dynamic Reduction of Large-Scale Power Systems

金亨俊* · 張吉洙** · 尹用範*** · 李 鎮§

(Hyung-Jun Kim · Gil-soo Jang · Yong-Beum Yoon · Jin Lee)

Abstract - This paper presents new algorithms for equivalencing large-scale power systems. Generators are identified to the coherent groups according to the relation factors, which represent the relative coupling degree between the generators. While the groups are identified, participation numbers, which are the measure of the relative participation of the generators in the group, are obtained. All generators and controllers in the group are weighted by participation numbers and aggregated to construct a dynamic equivalent. The proposed algorithms are applied to a 272-machine Korea Electric Power Corporation (KEPCO)'s system. The enclosed results indicate the accuracy and usefulness of the algorithms.

Keywords : Power system reduction, dynamic equivalents, coherency, identification, aggregation, relation factor, participation number

1. 서 론

계통을 신뢰성 있고 안정되게 운용하기 위해서 과도 안정도 및 미소 신호 안정도 등 계통 해석에 대한 요구가 증가하고 있다. 대규모 계통의 경우 동적 축약을 이용하여 축약 계통을 구성하면 계통 해석을 위한 계산적인 부담을 줄이는 장점이 있으며 특히 실시간으로 계통의 현상을 모의하는 시뮬레이터에 있어서 계통 크기의 제한을 받게 되므로 원 계통의 특성을 적절히 반영할 수 있는 축약 계통의 개발이 필수적이다. 지난 1998년 정부에서 전력 산업의 구조 개편에 대한 추진 방침이 발표된 이후 이에 대한 관심이 높아지고 있다. 전력 시장이 경쟁 체제로 변하게 되면 각 전력 사업자들은 다른 지역보다 자신의 영역에서 일어나는 계통 현상을 보다 자세히 살펴보기를 원하게 될 것이다. 다시 말해서, 자신의 영역에 있는 계통은 그대로 두고 다른 지역의 계통은 간단한 계통으로 축약함으로써 자신의 영역에서 일어나는 계통 현상을 보다 집중적으로 모의하게 될 것이다.

동적 축약의 신뢰성은 축약 계통의 응답특성이 원계통에 얼마나 일치하는가에 달려있는데 이를 위해 다양한 측면에서의 동적 축약에 대한 접근 방법들이 연구되어져 왔다. 가장 먼저 모드해석에 기초하여 계통을 축약을 하는 방법들이 제시되었다.[1,2] 여기서는 계통을 관심 계통과 외부 계통 및 나머지 계통으로 분리한 후 관심 계통은 자세히 모델링을 하

고 그 외의 계통들은 아주 간단한 모델링을 하거나 모드 해석을 통하여 중요하지 않은 모드들을 제외시킴으로써 안정도 계산이나 동적 시뮬레이션을 위한 미분 방정식에서의 계통 차수를 효과적으로 줄일 수 있음을 보였다. 하지만, 이러한 접근 방법은 계통의 기본 구조를 그대로 유지할 수 없으므로 축약된 계통이 명확한 독립된 계통으로 표현될 수 없다는 단점을 지니고 있었다. 또 다른 접근 방법으로는 각 발전기들을 조사하여 서로 coherent한 특성을 보이는 발전기군을 하나의 그룹으로 묶어 이를 대용량 발전기로 등가화시키는 이른바, coherency에 기초한 방법이 있다. 이러한 접근 방법에서의 핵심이 되는 문제는 발전기들이 서로 coherent하다는 특성을 어떻게 정의할 것이며 또한 그러한 특성을 가진 발전기군을 어떠한 절차에 의해 찾아낼 것인가 하는 데에 있다. 이에 대하여 [3]에서는 선형화한 고전 발전기 모델을 가지고 시뮬레이션하여 정해진 오차 범위내의 위상각을 가지는 발전기군을 coherent한 그룹으로 선정하는 방법이 제시되었다. 여기서는 외란이나 계통의 조건에 따라 coherent한 발전기군이 달라지기 때문에 다른 형태의 시뮬레이션을 행할 때에는 그에 맞는 축약 계통을 다시 구성해야 한다.

그 후에 이러한 모드해석과 coherency 방법의 단점들을 극복하고 두 해석 방법의 장점들을 이용하여 계통을 축약하려는 시도들이 이루어졌다. 이 중 [4]에서는 모드해석을 바탕으로 하여 coherency 특성을 측정하는 척도를 구하여 계통을 축약하였으며 [5]에서는 계통 내에 존재하는 모드들을 계산하여 이를 느린 모드와 빠른 모드로 구분하고 느린 모드들에 대한 각 발전기들의 상호 동요를 살핍으로써 동일한 특성을 보이는 발전기군을 구성하는 방법을 제시하였다. 이렇게 형성된 축약 계통은 외란이나 조건 등에 상관없이 원래 계통을 그대로 축소된 구조를 형성하는 장점이 있다. 하지만 이러한 방법들은 축약 계통의 크기가 작아질수록 계통에 존재하

* 正 會 員 : LG 産 電 電 力 研 究 所 主 任 研 究 員
** 正 會 員 : 高 麗 大 電 氣 電 子 電 波 工 學 部 助 教 授 · 工 博
*** 正 會 員 : 韓 電 電 力 研 究 院 責 任 研 究 員 · 工 博
§ 正 會 員 : LG 産 電 電 力 研 究 所 責 任 研 究 員
接受日字 : 2000年 3月 13日
最終完了 : 2000年 7月 27日

는 모드들을 계산하여 발전기군을 형성하는데 어려움이 따르게 되며, 발전기군을 통합하는 과정이 각 발전기와 발전기 그룹간의 연관 관계를 고려하지 않은 가중평균 방법을 사용하기 때문에 이에 대한 개선이 필요하다[6].

본 연구에서는 계통에 존재하는 모드들, 즉 고유치들을 계산하지 않고서도 coherent한 발전기군을 찾아내는 방법을 소개한다. 각 발전기의 위상각들을 상태 변수로 선정하여 그들 간의 관계를 나타내는 상태 행렬을 구성한다. 다음에 이 상태 행렬을 통하여 발전기간의 연관 관계를 나타내는 관계 정도를 구한 후, 모든 발전기들에 두 발전기가 미치는 영향의 차를 수치적으로 정의한 관계 오차를 계산한다. 관계 오차로부터 비슷한 특성을 보이는 발전기들을 찾아내어 그룹을 형성한다. 그룹 안에 포함된 발전기들은 그룹에 대한 참여 수를 가지게 되고 이를 이용하여 그룹의 특성을 대표하는 기준 발전기를 선정하고 등가 발전기 및 제어기들의 파라미터를 결정하는 방법이 제시되었다. 제안된 방법을 272개의 발전기와 1199개의 모선으로 이루어져 있는 2010년 한전 계획 계통에 적용하여 세 개의 축약 계통을 만든 후 동일한 상정 사고에 대하여 원 계통과 그 응답 특성을 비교하고 그 결과를 보였다.

2. 계통의 모델링

발전기의 위상각과 각속도는 계통의 모드를 결정하는 가장 영향력 있는 상태 변수들로 알려져 있으며, 발전기의 고전 모델이 계통 특성을 반영하는 발전기군을 구성하는데 효과적인 모델로써 사용되고 있다[3]. 계통내의 모든 발전기들이 고전 모델로 표현되었을 때 계통은 다음과 같이 비선형 모델로 표현된다.

$$M\dot{\delta} = f(\delta, V) \tag{1}$$

$$I = g(\delta, V) \tag{2}$$

$$I = YV \tag{3}$$

여기서, M 은 발전기의 관성 행렬이고, δ 는 각 발전기의 위상각을 나타내는 벡터이고, V 는 각 모선의 전압 벡터이며, f 는 발전기의 동특성을 나타내는 함수이며, g 는 발전기 모선의 전력 조류를 표현하는 함수이고, Y 는 어드미턴스 행렬이다. 식(1), (2), (3)을 선형화하면 다음의 식이 얻어진다[2][7].

$$\dot{X} = J_A X + J_B \Delta V \tag{4}$$

$$\Delta I = J_C X + J_D \Delta V \tag{5}$$

$$\Delta I = Y \Delta V \tag{6}$$

여기서, 상태변수 X 는 발전기의 위상각 변화 ($\Delta\delta$)를 나타내는 벡터이며, 어드미턴스 행렬의 증분은 없다고 가정하였다. 식(4), (5), (6)을 정리하면 식(7)과 같은 전체 계통의 상태행렬 방정식을 얻을 수 있으며 상태행렬 A 는 식(8)과 같이 주어진다[8].

$$\dot{X} = AX \tag{7}$$

$$A = J_A - J_B(J_D - Y)^{-1}J_C \tag{8}$$

3. 관계 정도와 관계 오차

앞서 유도된 상태 방정식을 살펴보면 각 발전기들의 위상각 간의 관계를 표현하고 있음을 알 수 있다. m 개의 발전기가 있는 계통에서 i 번째 발전기와 j 번째 발전기에 대한 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{d^2}{dt^2} X_i = A_{i1}X_1 + A_{i2}X_2 + \dots + A_{ij}X_j + \dots + A_{im}X_m$$

$$\frac{d^2}{dt^2} X_j = A_{j1}X_1 + A_{j2}X_2 + \dots + A_{ji}X_i + \dots + A_{jm}X_m$$

여기서 A_{ij} 는 j 번째 발전기의 위상각의 변화가 i 번째 발전기의 위상각의 가속도에 미치는 영향을 반영하고 있으며 반대로 A_{ji} 는 i 번째 발전기의 위상각의 변화가 j 번째 발전기의 위상각의 가속도에 미치는 영향을 반영하고 있다. 그러므로 i 번째 발전기와 j 번째 발전기간에 서로의 관계 정도를 다음과 같이 정의한다.

$$r_{ij} = A_{ij}A_{ji} \tag{9}$$

식(9)에서 계산되어지는 관계정도 r_{ij} 는 i 번째 발전기와 j 번째 발전기가 서로 얼마만큼의 영향을 미치는지를 나타내게 된다. 만일 $r_{ij} > r_{ik}$ 라면 i 번째 발전기는 k 번째 발전기보다 j 번째 발전기와 위상각 변화에 더 큰 영향을 주고받음을 알 수 있다. 모든 발전기들에 대하여 i 번째 발전기의 관계 정도를 계산하면 다음과 같은 관계 벡터를 얻을 수 있다.

$$r_i = [r_{i1} \ r_{i2} \ \dots \ r_{im}] \tag{10}$$

이와 같이 얻어진 관계 벡터 r_i 는 발전기간의 관계정도가 절대적인 수치로 표현되어 있는데 이를 정규화하여 상대적인 관계 정도를 나타내는 관계 행렬을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$R = [R_1 \ R_2 \ \dots \ R_m] = \left[\begin{array}{ccc} \frac{r_{11}}{r_{1s}} & \frac{r_{12}}{r_{2s}} & \dots & \frac{r_{1m}}{r_{ms}} \end{array} \right] \tag{11}$$

여기서 R_i 는 각 발전기들에 대한 i 번째 발전기의 정규화된 관계 벡터를 나타내고, $r_{is} (= \sum_{k=1}^m |r_{ik}|)$ 는 r_i 의 각 원소들의 합이다. 주어진 계통에 대하여 $1 \leq i < j \leq m$ 라고 할 때 R_i 와 R_j 는 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} R_i &= [R_{i1} \ \dots \ R_{ii} \ \dots \ R_{ij} \ \dots \ R_{im}] \\ R_j &= [R_{j1} \ \dots \ R_{ji} \ \dots \ R_{jj} \ \dots \ R_{jm}] \end{aligned} \tag{12}$$

식 (12)는 세가지 경우로 나누어 생각해 볼 수 있다. 그 첫 번째 경우로 $k \neq i, j$ 인 k 에 대하여 R_{ik} 와 R_{jk} 는 각각 i

주어진 대상 계통에 대한 관계 오차를 계산하고 발전기군을 식별하여 각 관계 오차에 대한 축약 계통의 크기(발전기 수)를 구하여 그림 2에 나타내었다. 관계오차는 축약 계통의 크기와 반비례의 관계가 있는데 즉, 관계오차가 작아지면 축약 계통의 크기는 커지고 축약 계통의 크기를 줄이려면 관계 오차가 커지게 된다. 그림1을 살펴보면 축약 계통의 발전기 수가 105개 이상이면 관계 오차가 매우 작은 값을 가짐을 알 수 있다. 이것은 이 범위에서 동적 축약을 시행하면 축약 계통의 크기와 거의 무관하게 원 계통과 일치하는 축약 계통을 구성할 수 있음을 의미한다. 발전기 수가 30개에서 105개 사이인 축약 계통을 구성하는 것은 축약 계통의 크기가 작아질수록 관계 오차의 크기가 커지므로 이러한 상관 관계를 염두에 두고 동적 축약을 시행하여야 한다. 발전기의 수가 30개 미만의 축약 계통은 그에 따른 관계 오차가 매우 급속히 증가하므로 이 범위에서 구성된 축약 계통은 원 계통과 많은 차이를 보이게 된다.

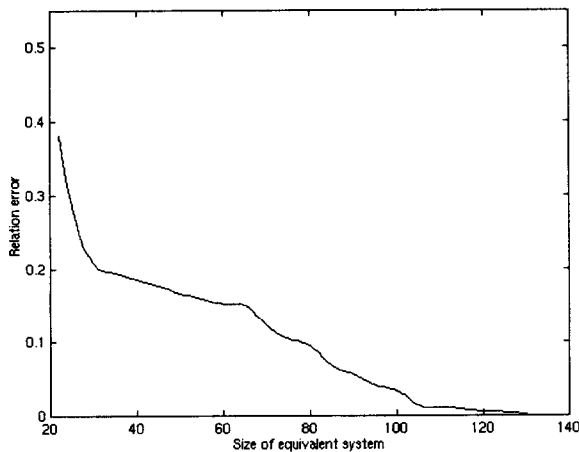


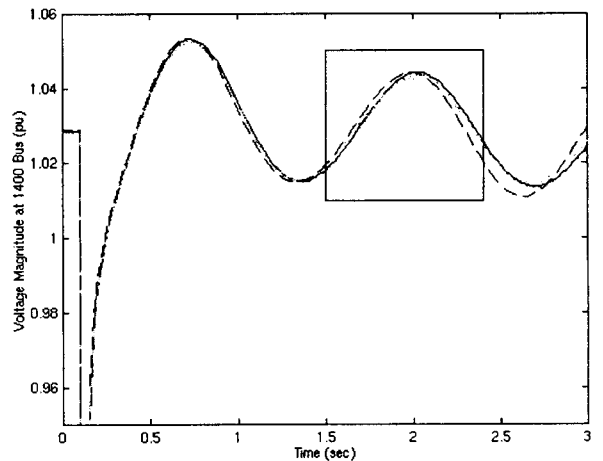
그림 2 관계오차와 축약 계통의 크기
Fig. 2 Relation factor vs. scale of reduced system

제시한 축약 방법의 타당성을 검증하기 위하여 세 개의 축약 계통을 구성하여 동일한 상정사고에 대하여 그 응답 특성을 원 계통과 비교하였다. 첫 번째 축약 계통 ES1은 최대 허용 관계 오차를 0.01로 하여 구성된 계통이며 두 번째 축약 계통 ES2는 최대 허용 관계 오차를 0.05로 하여 구성된 계통이며 세 번째 축약 계통 ES3는 축약 계통의 크기를 70으로 제한하여 구성된 계통이다. 원 계통 및 각 축약 계통에 대하여 표 1에 정리하였다. 이중 전체적으로 그룹핑이 어떻게 이루어졌는가를 알아보기 위해서 70기로 구성되어 있는 축약 계통에 대하여 적은 발전기가 묶인 몇 가지 그룹을 제외한 각 그룹을 하나의 오각형으로서 그림 1에 나타내었다.

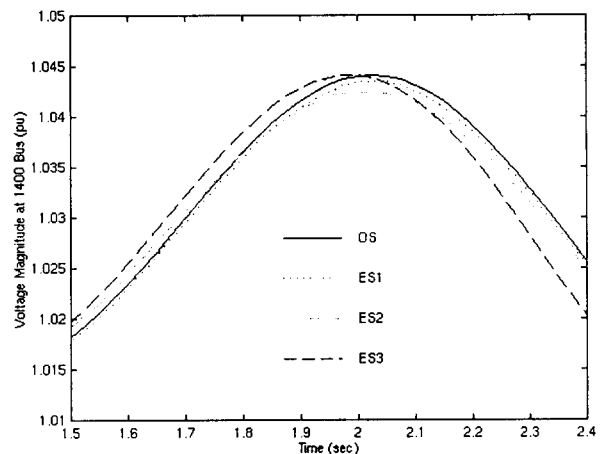
표 1 원계통 및 축약 계통
Table 1 Original and reduced system description

계통 모델	발전기수	관계 오차	모선수	선로수
OS	272	-	1199	2572
ES1	112	0.00986	935	2070
ES2	93	0.04427	836	1869
ES3	70	0.12304	774	1777

표 1에 나와있는 네 개의 계통에 대하여 345kV 모선인 1400모선(양주3)에 삼상 사고를 인가하고 0.05초후에 제거하였을 때 1400모선에서의 전압의 크기를 3초간 동적 모의한 결과를 그림 3에 나타내었다. 각 축약 계통이 원 계통과 얼마만큼의 오차를 보이는지를 자세히 살펴보기 위하여 그림 3(a)에 있는 사각 영역을 확대하여 그림 3(b)에 도시하였다. 그림 3(a)에서 세 개의 축약 계통이 원 계통의 응답 특성을 정확하게 반영하고 있음을 알 수 있다. 그림 3(b)에서 각 축약 계통이 가지는 관계오차가 커짐에 따라 원 계통과의 차이도 더 커짐을 알 수 있다. 축약 계통 ES1은 원 계통과 거의 차이를 보이지 않으며, ES2는 미세한 차이를 보인다. ES2에 비해 3배 정도의 관계 오차를 가지고 있는 ES3는 다른 두 축약 계통들보다 큰 차이를 보이나 그림 3(a)에서 볼 수 있듯이 전체적인 원 계통의 응답 특성을 잘 반영하고 있음을 알 수 있다.



(a) 3초간 시뮬레이션 비교 결과



(b) 0.9초간 시뮬레이션 비교 결과

그림 3 1400모선의 전압의 크기

Fig. 3 Voltage magnitude at the bus # 1400

그림 4에는 345kV 모선인 1400모선(양주3)과 또 다른 345kV 모선인 1500모선(의정부3)에 흐르는 유효 전력의 크기를 비교한 결과를 나타내었고 그림 5에는 1400모선에서의 주파수를 비교한 결과를 나타내었다. 또한 각 축약 계통에서

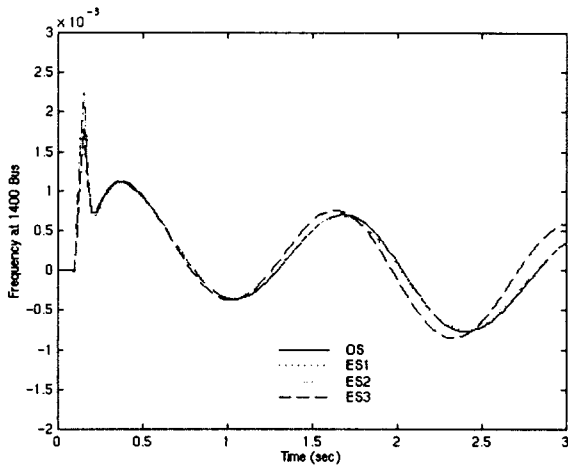


그림 4 1400모선에서의 주파수 변동 비교
Fig. 4 Frequency deviation at the bus # 1400

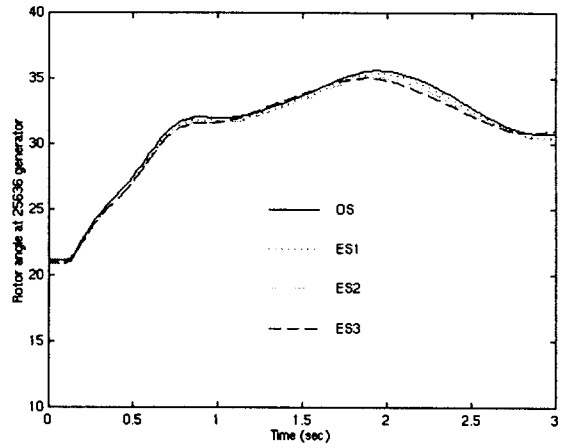


그림 6 25636 모선(영월#1) 발전기의 위상각
Fig. 6 Generator angle at the bus # 25636

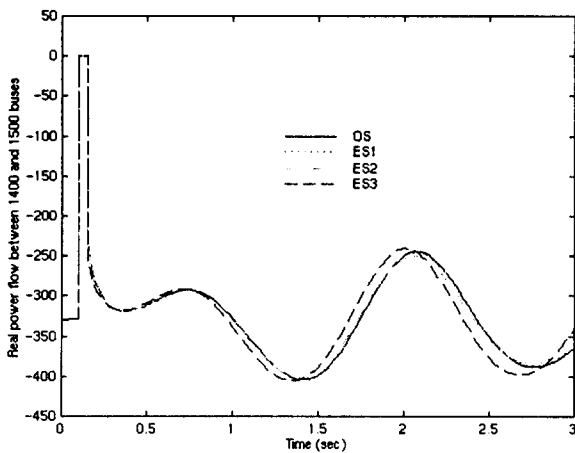


그림 5 1400모선과 1500모선 사이에 흐르는 유효 전력
Fig. 5 Power flow between buses #1400 and 1500

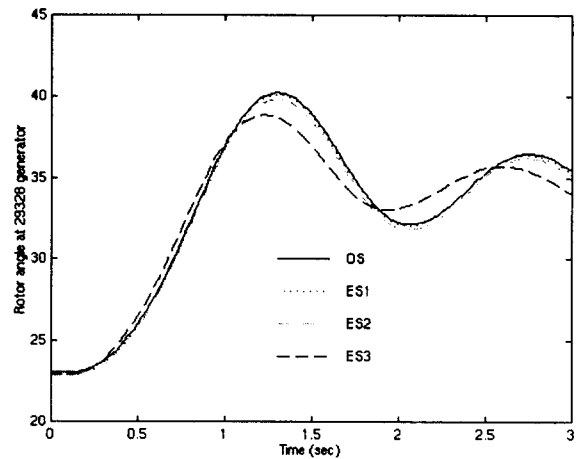


그림 7 29328 모선(울산-S/T) 발전기의 위상각
Fig. 7 Generator angle at the bus #29328

하나의 발전기가 발전기군을 형성한 25636모선(영월#1)의 발전기와 29328모선(울산-S/T)의 발전기 위상각에 대하여 각 축약 계통과 원 계통의 응답 특성을 비교한 결과를 그림 6와 그림 7에 나타내었다.

제안한 알고리즘을 사용하여 구한 세가지 축약 계통들은 원 계통의 전압 크기, 주파수, 전력 조류 및 발전기 위상각 등의 전체적인 응답 특성을 적절히 반영하며 관계 오차가 작은 축약 계통일수록 더욱 동일한 특성을 보임을 알 수 있다.

6. 결 론

규모가 크고 서로 긴밀히 연결되어 있는 망구조 계통에서는 지리적인 조건이나 경험에 의한 지식만으로 계통을 축약하는 데에는 한계가 있다. 본 연구에서는 발전기들 사이에 존재하는 연결 관계를 수치적인 값(관계 오차)으로 표현함으로써 비슷한 특성을 보이는 발전기들을 식별하여 계통을 축약할 수 있음을 보였다. 또한 각 발전기군에 대한 발전기들

의 참여수를 사용하여 정확한 통합과정이 이루어질 수 있도록 하였으며 관계 오차와 그에 따른 축약 계통의 크기가 미리 계산되어짐으로 어느 정도의 축약 계통을 구성할 것이며 그 계통이 원 계통과 비교하여 어느 정도의 차이를 가지는지 쉽게 판별할 수 있도록 하였다. 서로 다른 세 개의 축약 계통을 구성하여 그 응답특성을 원 계통과 비교하여 봄으로써 제안한 알고리즘의 유용성을 확인하였다. 향후 이종 제어기들의 통합 등 축약 알고리즘의 개선이 요구되며 비관심 지역을 축약함으로써 관심지역에 대한 통합적인 계통 해석이 보다 효율적으로 이루어질 수 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] J.M. Undrill, and A.E. Turner, "Construction of Power System Electromechanic Equivalents," IEEE Trans. on PAS, Vol. 90, September/October 1971, pp. 2049-2059.
- [2] W.W. Price, E.M. Gulachenski, P. Kundur, F.J. Lange,

- G.C. Loehr, B.A. Roth, and R.F. Silva, "Testing of the Modal Dynamic Equivalents Technique," IEEE Trans. on PAS, Vol. 97, No. 4, July/August 1978, pp. 1366-1372.
- [3] Robin Podmore, "Identification of coherent Generators for Dynamic Equivalents," IEEE Trans. on PAS, Vol. 97, No. 4, July/August 1978, pp. 1344-1354.
- [4] J. Lawler, R.A. Schlueter, P. Rusche, and D.L. Hackett, "Modal-Coherent Equivalents Derived From an RMS Coherency Measure," IEEE Trans. on PAS, Vol. 99, No. 4, July/August 1980, pp. 1415-1424.
- [5] L. Rouco, and I.J. Pérez-Arriaga, "Multi-area Analysis of Small Signal Stability in Large Electric Power Systems by SMA", IEEE Trans. on PWRs, Vol. 8, No. 3, August 1993, pp. 1257-1265.
- [6] A. J. Germond, R. Podmore, "Dynamic Aggregation of Generating Unit Models", IEEE Transaction on PAS, Vol. 97, No. 4, July/August 1978, pp. 1060-1069.
- [7] Kundur, P., *Power System Stability and Control*. New York: McGraw-Hill Inc.
- [8] Development of Dynamic Equivalents for Transient Stability Studies, Report No. EL-2778, Electric Power Research Institute, 1977.

저 자 소 개



김형준 (金亨俊)

1971년 12월 24일생. 1995년 연세대 전기공학과 졸업. 1997년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 LG산전 전력연구소 시뮬레이터팀 주임연구원

Tel : 043-261-6506, Fax : 043-261-6630
E-mail: hjkimc@lgis.com)



윤용범 (尹用範)

1958년 9월 28일생. 1984년 부산대 전기공학과 졸업. 1986년 서울대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1996년 MIT Visiting Scientist로 근무. 현재 한국전력공사 전력

연구원 전력계통연구실 책임연구원
Tel : 042-865-5851, Fax : 042-865-5844
E-mail: ybyoon@kepri.re.kr)



장길수 (張吉洙)

1967년 10월 26일생. 1991년 고려대 전기공학과 졸업. 1994년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1997년 Iowa 주립대 전기공학과 졸업(공학박사). 1997년-1998년 Iowa 주립대 Scientist. 1998년-2000년 한전 전력연구

원 선임연구원. 현재 고려대 전기전자전파공학부 조교수
Tel : 02-3290-3246, Fax: 02-921-0544
E-mail : gjang@elec.korea.ac.kr)



이진 (李 鎭)

1963년 1월 12일생. 1985년 서울대 전기공학과 졸업. 현재 LG산전 전력연구소 시뮬레이터팀 책임연구원

Tel : 043-261-6500, Fax : 043-261-6629
E-mail : jinlee@lgis.com)