

## Development of Educational Simulator for Novel Network Reduction

김현홍\* · 이우남\*\* · 김욱\*\*\* · 박종배† · 신중린§  
 (Hyun-Houng Kim · Nam-Woo Lee · Wook Kim · Jong-Bae Park · Joong-Rin Shin)

**Abstract** - This paper presents a graphical windows-based program for the education and training for novel network reduction. The object of developed simulator is to provide users with a simple and useable tool for gaining an intuitive feel for power system analysis. The developed simulator consists of the main module (MMI,GUI), the location marginal price module (LMP), the clustering module and network reduction module. Each module has a separate graphical and interactive interfacing window. The developed simulator needs with the PSS/E input data format, generator cost function, location information. Line admittances of reduced network was determined by using the power flow method(Newton-Raphson). So line flow of reduced network is almost same to original power system. Results of reduced network are compared on the window in the tabular format. Therefore, the developed simulator can be utilized as a useful tool for effective education and training for power system analysis.

**Key Words** : Education simulator, Network reduction, Clustering, LMP, Line admittance

### 1. 서론

산업의 발달에 따라 전력 수요는 급격하게 증가하고 있으며, 전력 수요의 증가에 따라 전력시스템은 점진적으로 대형화, 복잡화되어 가고 있다. 이러한 전력시스템의 대형화 및 복잡화는 전력 시스템의 증설 및 해석에 어려움으로 작용하고 있다. 또한 한국 전력시장의 메커니즘의 변화에 따라 단일시장(zonal)에서 전력시장의 참여자에게 지역적 신호를 줄 수 있는 지역별시장(nodal)으로 진화 되어가고 있다. 전력시장의 메커니즘 변화와 전력시스템의 대형화로 인하여 전력 시스템을 보다 간편하게 해석할 수 있는 송전망 축약이 매우 중요한 사안으로 인지 되어 가고 있으며, 이에 대한 연구가 진행되어 왔다[1-4]. 초기의 연구에서는 송전망 축약보다는 다수 발전기의 특성을 고려하면서 어떻게 발전기를 통합할 것인가에 대한 연구가 주를 이루고 있으나, 최근에는 다수의 발전기가 하나의 모선에 접속되어 있는 형태의 송전망 개념을 이용하여 어떻게 원시 송전망의 특성을 유지하면서 송전망을 축약 할 것인가에 대한 연구가 이루어지고 있다[5-6]. 특히, 원시 송전망의 특성을 유지하기 위하여 많이 사용하는 방법이 선로조류의 변화를 이용하는 방법론이다. 선로조류를 이용한 방법론은 지역의 특성을 반영하기 위하

여 지역을 내부와 외부의 그룹으로 할당하여 내부와 외부 그룹간의 선로 조류의 변화 따라 모선을 축약하는 방법론으로, 그룹을 할당하기 위한 topology로 물리적 지역 데이터를 사용한다. 그러나, 지역별 데이터 하나만 고려할 경우 지역적 가격신호를 고려할 수 없으며, 지역적 가격신호와 지역별 데이터를 동시에 고려하여도 두 개 데이터간의 상호 가중치에 의하여 일부 특정 모선이 가중치에 의하여 계속 그룹을 움직일 수 있는 문제점을 가지고 있다. 참고문헌[13]에서는 이러한 문제점을 해결하기 위하여 모선들의 그룹을 할당하기 위한 클러스터링 기법을 제시하였다. 본 논문에서는 참고문헌[12] 및 [13]에서 제시된 두가지 지역별 클러스터링 방법론을 병합하는 새로운 방법을 채택하여 시뮬레이터에 구현하였다. 또한, 참고문헌 [9]에서 제시한 지역별 가격신호(LMP)을 계산하는 방법론을 이용한다. 이러한 방법론을 근거하여 선로조류의 변화를 이용하여 송전망을 축약할 수 있는 학부수준의 교육용 시뮬레이터를 제시한다. 2장에서는 본 논문에서 사용한 알고리즘에 대해서 설명하며, 3장에서는 교육용 축약 프로그램, 4장에서는 제시한 알고리즘의 타당성을 증명한다.

### 2. 본론

앞에서 언급한 바와 같이 송전망을 축약하는 방법론에서 가장 중요한 과정은 축약할 모선들의 그룹을 설정하는 것이다. 이러한 그룹 설정이 잘못될 경우 모선간의 topology등의 영향에 의하여 유사측도에 의한 축약에 제약을 줄 수 있으며, 지역적 특성을 반영하지 못할 가능성이 있다. 본 논문에서는 이러한 문제를 해결하기 위하여 모선별 한계가격과 지역적 정보를 활용하여 그룹을 나누는 방법론을 이용하여 지역을 그룹화한다.

† 교신저자, 정회원 : 건국대학 전기공학과 부교수 · 공박

E-mail : jbaepark@konkuk.ac.kr

\* 정 회원 : 건국대학 전기공학과 박사과정

\*\* 정 회원 : 건국대학 전기공학과 박사과정

\*\*\* 정 회원 : 건국대학 전기공학과 교수 · 공박

§ 정 회원 : 한국남부발전(주) 발전처 과장 · 공박

접수일자 : 2009년 2월 9일

최종완료 : 2009년 9월 2일

### 2.1 모션별 한계가격

선진전력시장에서는 총괄 비용법에 의한 가격결정 방법론에서 경제적 측면의 최적성이나 제반 계통운용 조건을 반영할 수 있는 한계 비용법으로 접근하고 있어 점진적으로 우리나라의 전력시장도 이러한 방향으로 발전할 가능성이 있다. 이러한 변화의 가장 큰 목적은 시장참여자에게 시간과 위치에 따른 시장가격(Location Marginal Price:LMP) 신호를 제공할 수 있다는 것과 시장참여자로 하여금 경제적인 사업운영을 할 수 있는 기반을 제공하기 때문이다[7]. 모션별 한계가격에 대한 대부분의 이론들은 잠재가격(Shadow Price)에 기반을 두고 있으며, 이는 라그랑지 승수를 등식 및 부등식 제약조건, 즉 전력수급조건, 안정도, 신뢰도 및 품질 개선을 위한 제약 요소 등의 수치화를 의미하였다[7-8]. 참고 문헌 [9]에서는 모션별 한계가격을 세 가지 구성요소, 손실비용, 혼잡비용, 전압품질비용으로 분해할 수 있는 방법론을 제안하였으며, 모션별 한계가격을 포함한 등식과 부등식 제약조건에 대한 잠재가격을 도출하였다.

### 2.2 모션별 한계가격의 정식화

다음의 식 (1), (2)는 AC최적 조류계산의 목적함수와 등식 및 부등식 제약조건을 나타낸다. 참고문헌 [9]에서는 일반화된 잠재가격을 도출하기 위하여 라그랑지안 함수를 이용하여 해를 구하였다. 본 논문에서는 [9]에서 제시한 잠재가격 도출방법론을 사용하여 해를 구하였다.

$$\min \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^n C_k(P_{t,k}^g) \quad (1)$$

subject to

$$\begin{aligned} P_{t,i}^L - P_{ij}(X) - \sum_{k \in \Omega_i^G} P_{t,k}^g &= 0 \\ Q_{t,i}^L - Q_{ij}(X) - \sum_{k \in \Omega_i^G} Q_{t,k}^g &= 0 \\ P_k^{gMIN} \leq P_{t,k}^g \leq P_k^{gMAX} \\ P_{ij}^{MIN} \leq P_{ij} \leq P_{ij}^{MAX} \\ V_i^{MIN} \leq V_i \leq V_i^{MAX} \end{aligned} \quad (2)$$

여기서,

- $C_k(P_{t,k}^g)$  : t시간대의 발전기-k의 입찰함수
- $P_{t,k}^g, Q_{t,k}^g$  : t시간대의 발전기-k의 유·무효 발전량
- $P_{t,i}^L, Q_{t,i}^L$  : t시간대의 모션-i에 연결된 유·무효 부하량
- $P_{ij}(X), Q_{ij}(X)$  : 선로-ij의 유·무효 선로조류 손실
- $X$  : 각 모션의 상태변수, 즉 모션별 전압크기와 위상각
- $P_k^{gMIN}, P_k^{gMAX}$  : 발전기-k의 최소, 최대출력
- $P_{ij}^{MIN}, P_{ij}^{MAX}$  : 선로-ij의 유효 조류량의 최소, 최대량
- $V_i^{MIN}, V_i^{MAX}$  : 모션-i의 전압크기의 최소, 최대값
- $\Omega_i^G$  : 모션-i에 연결된 발전기 집합.
- $n$  : 기준계통의 총 발전기 수.
- $m$  : 총 입찰부하의 수
- $I$  : 총 Scheduling 기간

### 2.3 모션별 한계가격 유도

본 논문에서 일반화된 잠재가격을 도출하기 위하여 라그랑지안 함수를 이용하여 식(3)과 같이 표현하였다.

$$\begin{aligned} L = & \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^n C_k(P_{t,k}^g) \\ & + \sum_{i=1, i \neq R}^n \lambda_i^P \left( P_{t,i}^L - \sum_{j \in \Omega_i} P_{ij}(X) - \sum_{k \in \Omega_i^G} P_{t,k}^g \right) \\ & + \sum_{i=1}^n \lambda_i^Q \left( Q_{t,i}^L - \sum_{j \in \Omega_i} Q_{ij}(X) - \sum_{k \in \Omega_i^G} Q_{t,k}^g \right) \\ & + \lambda_R^P \left( P_{t,R}^L - \sum_{j \in \Omega_R} P_{Rj}(X) - \sum_{k \in \Omega_R^G} P_{t,k}^g \right) \\ & + \sum_j \bar{\rho}_j^{P_{ij}^{max}} (P_{ij} - P_{ij}^{MAX}) + \sum_j \bar{\rho}_j^{P_{ij}^{min}} (P_{ij}^{MIN} - P_{ij}) \quad (3) \\ & + \sum_i \bar{\rho}_i^{V_i^{max}} (V_i - V_i^{MAX}) + \sum_i \bar{\rho}_i^{V_i^{min}} (V_i^{MIN} - V_i) \\ & + \sum_k \bar{\rho}_{Pg,k}^{max} (P_{t,k}^g - P_{t,k}^{g,MAX}) + \sum_k \bar{\rho}_{Pg,k}^{min} (P_{t,k}^{g,MIN} - P_{t,k}^g) \end{aligned}$$

- $R$  : 기준모션
- $\Omega_i$  : 모션-i에 연결된 모션들의 집합,
- $\Omega_i^G$  : 모션-i에 연결된 발전기들의 집합,
- $\Omega_R$  : 기준모션에 연결된 모션들의 집합,
- $\Omega_R^G$  : 기준모션에 연결된 발전기들의 집합,
- $\lambda_i^P$  : 모션-i에 대한 유효전력 수급방정식에 대한 잠재가격,
- $\lambda_i^Q$  : 모션-i에 대한 무효전력 수급방정식에 대한 잠재가격,
- $\lambda_R^P$  : 기준모션에 대한 유효전력 수급방정식에 대한 잠재가격
- $\bar{\rho}_{Pg,k}^{max}, \bar{\rho}_{Pg,k}^{min}$  : 발전기-k의 발전량이 최대, 최소 발전제약에 의해 제약이 발생할 때의 잠재가격
- $\bar{\rho}_{ij}^{P_{ij}^{max}}, \bar{\rho}_{ij}^{P_{ij}^{min}}$  : 선로-ij의 선로 조류량이 최대, 최소선로제약에 의해 제약이 발생할 때의 잠재가격
- $\bar{\rho}_i^{V_i^{max}}, \bar{\rho}_i^{V_i^{min}}$  : 모션-i의 전압크기가 최대, 최소전압제약에 의해 제약이 발생할 때의 잠재가격

상기 라그랑지안 함수를 이용하여 최적화 문제를 수행하였을 때 최적해 조건하에서 라그랑지안 함수의 라그랑지안 승수 즉, 등식 및 부등식 제약조건에 대한 잠재가격은 아래 식과 같은 방법을 이용하여 도출할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial L}{\partial \Theta} \\ \frac{\partial L}{\partial X} \\ \frac{\partial L}{\partial P_{g,Y}} \\ \frac{\partial L}{\partial Q_g} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_G^P & A_G^Q & A_G^P & A_G^Q & 0 & 0 \\ A_V^P & A_V^Q & A_V^P & A_V^Q & A_V^P & 0 \\ A_G^P & A_G^Q & 0 & 0 & 0 & A_G \\ 0 & 0 & A_G^Q & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_R^P \\ \lambda_R^Q \\ \lambda^Q \\ \bar{\rho}_{P_{ij}^{max}, P_{ij}^{min}} \\ \bar{\rho}_{V_i^{max}, V_i^{min}} \\ \bar{\rho}_{P_{g,k}^{max}, P_{g,k}^{min}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -\frac{dM(P_{g,Y})}{dP_{g,Y}} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$\frac{\partial L}{\partial \Theta}$  : 기준모션을 제외한 모션의 위상각으로 라그랑지안 함수를 미분한 선형방정식 벡터

$\frac{\partial L}{\partial V}$ : 모선전압으로 라그랑지안 함수를 미분한 선형방정식 벡터

$\frac{\partial L}{\partial P_g}$ : 발전기, 부하자원의 유효 발전변수로 라그랑지안 함수를 미분한 선형방정식 벡터

$\frac{\partial L}{\partial Q_g}$ : 발전기의 무효 발전변수로 라그랑지안 함수를 미분한 선형방정식 벡터

$A_G^{P_g}$ :  $\partial L/\partial \theta$ 의  $\lambda_R^{P_g}$ 의 계수

$A_G^P$ :  $\partial L/\partial \theta$ 의  $\lambda^P$ 의 계수

$A_G^Q$ :  $\partial L/\partial \theta$ 의  $\lambda^Q$ 의 계수

$A_G^{\rho}$ :  $\partial L/\partial \theta$ 의  $\rho_{ij}^{P_g, \max}$ 와  $\rho_{ij}^{P_g, \min}$ 의 계수

$A_V^P$ :  $\partial L/\partial V$ 의  $\lambda^P$ 의 계수

$A_V^Q$ :  $\partial L/\partial V$ 의  $\lambda^Q$ 의 계수

$A_V^{P_g}$ :  $\partial L/\partial V$ 의  $\lambda_R^{P_g}$ 의 계수

$A_V^{\rho}$ :  $\partial L/\partial V$ 의  $\rho_{ij}^{P_g, \max}$  혹은  $\rho_{ij}^{P_g, \min}$  변수의 계수

$A_V^{\nu}$ :  $\partial L/\partial V$ 의  $\rho_{ij}^{\nu, \max}$  혹은  $\rho_{ij}^{\nu, \min}$  변수의 계수

$A_G^{P_g}$ :  $\partial L/\partial P_g$ 의  $\lambda_R^{P_g}$ 의 계수

$A_G^P$ :  $\partial L/\partial P_g$ 의  $\lambda_i^P$ 의 계수

$A_G^Q$ :  $\partial L/\partial Q_g$ 의  $\lambda_i^Q$ 의 계수

$A_G$ :  $\partial L/\partial P_g$ 의  $\bar{\rho}_{P_g}^{\max}$  혹은  $\bar{\rho}_{P_g}^{\min}$ 의 계수

$\lambda^P$ : 기준모선을 제외한 유효 등식제약조건에 대한 잠재가격 벡터

$\lambda^Q$ : 모든 모선의 무효 등식제약조건에 대한 잠재가격 벡터

$\lambda^{P_g}$ : 기준모선의 유효 등식제약조건에 대한 잠재가격 벡터

$\bar{\rho}_{P_g}^{\max}, \bar{\rho}_{P_g}^{\min}$ : 최대, 최소 선로제약이 발생한 제약조건에 대한 잠재가격 벡터

$\bar{\rho}^{\nu, \max}, \bar{\rho}^{\nu, \min}$ : 모선별 최대, 최소 전압제약이 발생한 제약조건에 대한 잠재가격 벡터

$\bar{\rho}_{P_g}^{\max}, \bar{\rho}_{P_g}^{\min}$ : 발전기별 최대, 최소 발전제약이 발생한 제약조건에 대한 잠재가격 벡터

식 (4)에서 모선별 한계가격에 영향을 줄 수 있는 등식 및 부등식 제약조건의 잠재가격을 도출하기 위해서는 모선별 전압과 위상각의 크기와 각 발전기의 발전량 정보만 주어지면 된다. 또한 마찬가지로 모든 모선에 가상의 발전기가 달려있다고 가정할 때 모선의 등식 제약조건에 대한 잠재가격은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial L}{\partial P_g} = [A_G^{P_g} \ A_G^P] \begin{bmatrix} \lambda^{P_g} \\ \lambda^P \end{bmatrix} + A_G(\rho_{P_g}^{\max} \text{ or } \rho_{P_g}^{\min}) = -\frac{dM(P_g)}{dP_g} \quad (5)$$

## 2.4 지역적 그룹핑을 위한 클러스터링

현재 많은 연구에서 지역별 전력수급의 상관관계에 의해 비용과 손실등과 같은 동적 그룹화를 중심으로 연구가 이루어져 왔으며, 일부 논문에서는 동적 그룹화의 방법에 모선의

물리적 거리를 반영한 연구가 이루어지고 있다[10-11]. 동적 그룹화와 같은 특정 유사측도에 의한 그룹화는 송전망을 비현실적으로 나누는 경우가 발생하고 이러한 비현실적인 문제를 해결하기 위해 지역정보를 통해 현실화하고 있다. 참고문헌 [12]은 두 가지(모선별 한계가격, 물리적 지역정보)의 유사측도를 퍼지 엔트로피(FCM)를 이용하여 지역을 그룹화하는 방법론을 제시하였다. 그러나 두 가지의 유사측도를 이용한 방법론은 두 가지 정보를 이용하는 특성상 가중치에 의하여 일부 모선들이 움직이는 문제점을 가지고 있다. 참고문헌 [13]에서는 송전망 이용률, 물리적 지역정보, 모선별 한계가격을 이용한 순차적 클러스터링 기법을 제시하였다. 일반적으로 모선별 한계가격은 AC조류계산을 이용한 방법론에서는 모선별 한계가격은 에너지비용, 송전망 혼잡비용, 손실비용으로 나눌 수 있으며, DC조류계산에서는 에너지비용, 송전망 혼잡비용으로 나눌 수 있다. 각각의 비용 중 송전망에 혼잡이 발생하게 되면 송전망 혼잡비용은 모선별 한계에 가장 큰 영향을 주게 된다. 송전망 혼잡비용은 송전망 이용률에 영향을 많이 받게 되므로, 참고문헌 [13]에서는 순차적으로 송전망 혼잡비용, 물리적 지역정보와 지역별 한계가격을 이용하는 방법론을 제시하였다. 본 논문에서 제시한 시뮬레이터는 참고문헌 [12],[13]에서 제시한 방법론을 이용하였다. 두 가지의 서로 다른 방법론을 이용하여 사용자로 하여금 경험적 해석방법과 수치적 해석방법간의 차이를 경험할 수 있다.

## 2.5 모선간 유사지수를 이용한 송전계통 축약 기법

### 2.5.1 유사지수

유사지수는 임의의 두 모선의 물리적 변화가 전력계통에 미치는 영향이 얼마나 유사한가를 판단하는 지수이다. 여기서는 지역별 그룹의 차이로 발생하는 지역에서, 각 지역의 내부 모선의 물리적 변화가 다른 지역의 모든 선로조류(Line Flow)에 얼마나 영향을 미치는가를 판단하는 도구로써 유사지수가 사용되고 있다. 즉, 같은 지역의 임의의 두 모선의 물리적 변화가 다른 지역에 얼마만큼의 영향을 주고 있는지를 유사지수로 판단하는 것이다. 만약 두 모선이 유사한 영향을 준다고 판단될 때 이 두 모선은 유사성이 있다고 본다. 여기서의 물리적 변화는 모선의 유효전력의 변화를 의미한다.

### 2.5.2 송전계통 축약 알고리즘의 단계

참고문헌 [6]에서는 송전망 축약을 위한 한가지 알고리즘이 제시되고 있는데, 이는 유사모선그룹을 기존연구와는 달리 모든 유사모선그룹을 만들어 축약계통을 구성하였으며, 축약 계통의 선로 어드미턴스를 최소 자승법을 이용하여 송전망을 축약하는 방법을 사용하고 있다. 특히, 선로어드미턴스를 계산하기 위하여 축약계통의 발전량과 부하량을 일정한 비율로 변화시켜 전압과 위상을 계산한 후 최소자승법을 이용하여 선로 어드미턴스를 계산하였다. 그러나 위의 방법론은 결국 기존의 계통과 유사한 선로 어드미턴스를 찾는 것으로 계통의 운전상황이 변화하게 되면 선로조류의 오차

가 점점 커지는 문제를 발생하게 되었다. 본 논문에서는 이러한 문제를 해결하기 위하여 축약 후 계통내의 전압과 위상을 축약되는 모선들의 평균을 이용하여 초기값으로 계산한 후 계통이 축약 된 후에도 선로 조류량은 동일하여야 하므로, 전력방정식의 선로 조류식을 이용하여 기지수는 전압, 위상, 선로조류, 미지수는 선로 어드미턴스를 Newton-Raphson법을 이용하여 역으로 추적하는 방법론을 사용하였다. 그림 1은 송전망 축약 알고리즘의 순서도 이다.

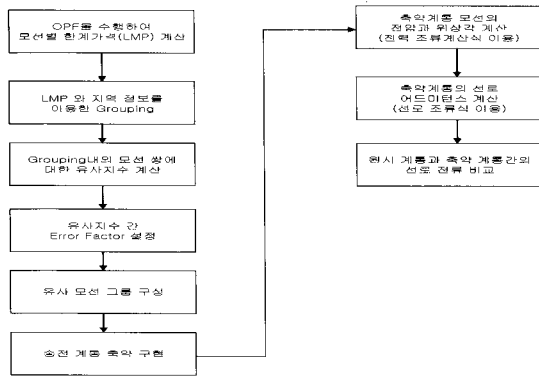


그림 1 송전 계통 축약 알고리즘 순서도  
Fig. 1 Flowchart of Network Reduction Algorithms

그림 1에서 볼 수 있듯이 본 논문에서 제시한 알고리즘은 전력시스템의 정보를 이용하여 2.3절에서 제시한 기법을 이용하여 모선별 한계가격을 계산한다. 이후 2.4절의 알고리즘을 이용하여 지역별 그룹핑을 실시한 후, 2.5절에서 제시한 선로조류의 유사지수를 이용한 지역별 축약기법을 이용하여 송전망을 축약한다.

### 3. 송전망 축약 시뮬레이터

#### 3.1 송전망 축약 시뮬레이터의 구성

송전망축약프로그램은 마이크로소프트(MS)의 Windows OS를 기반으로 운영되며, 프로그램 개발언어는 C와 C++를 사용하고 있으며, 조류계산 파일(PSS/E Raw Data 파일), 지역정보 데이터, 발전기비용함수 파일을 입력으로 처리하고, LMP 계산, 계통축약 클러스터링 및 송전계통축약 수행을 통해 계산된 결과는 Access DB로 저장된다. 송전망축약 프로그램의 구조도는 그림 2와 같다.

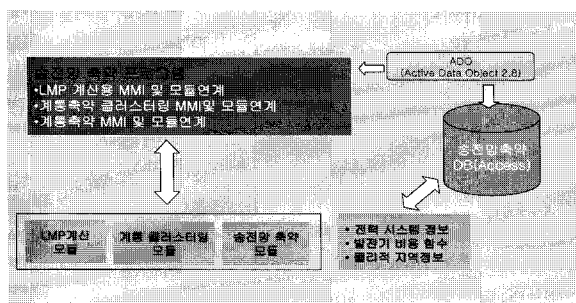


그림 2 송전망 축약 시뮬레이터 구성도  
Fig. 2 Composed of the Proposed Educational Simulator

#### 3.2 데이터베이스 관리

본 교육용 시뮬레이터에서는 사용자 입력의 편의성을 제고하기 위해서 주요 입력요소인 입력데이터를 마이크로 소프트웨어 EXCEL을 이용하여 입력을 할 수 있도록 구성하였다. 주요 입력데이터는 전력계통 자료(PSS/E Raw Data File), 발전기 비용함수, 지역정보 파일이며, 출력 데이터는 LMP 계산, 원시 계통에 대한 전력조류 계산 결과, 계통축약 클러스터링, 송전 계통 축약 결과, 축약 계통의 모선 및 선로데이터를 Access DB에 저장 혹은 Excel로 출력하게 된다. 그림 3은 제안된 시뮬레이터의 데이터베이스 테이블 관계도 이다.

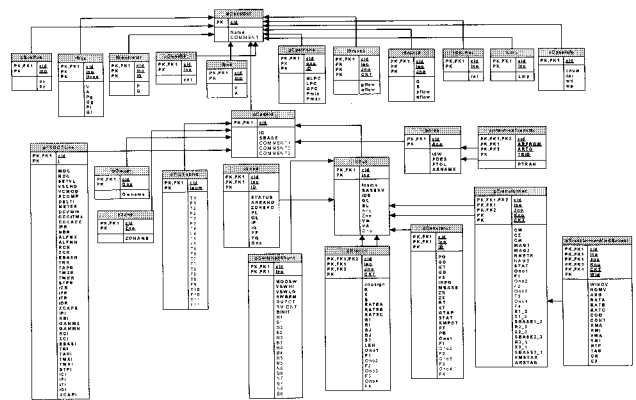


그림 3 데이터베이스 테이블 관계도  
Fig. 3 Relation Diagram of Database Tables

#### 3.3 입력 기능

본 교육용 시뮬레이터의 입력데이터는 3가지로 구성되어 있다. 모선별 한계가격을 구하기 위하여 선로 용량이 포함된 전력 계통자료(PSS/E Raw Data), 발전기 비용함수, 지역정보 파일이며, 사용자의 편의를 위하여 EXCEL을 이용한 입력 및 수정 할 수 있도록 구성하였다. 그림 4는 데이터의 자료 입력 화면이다.

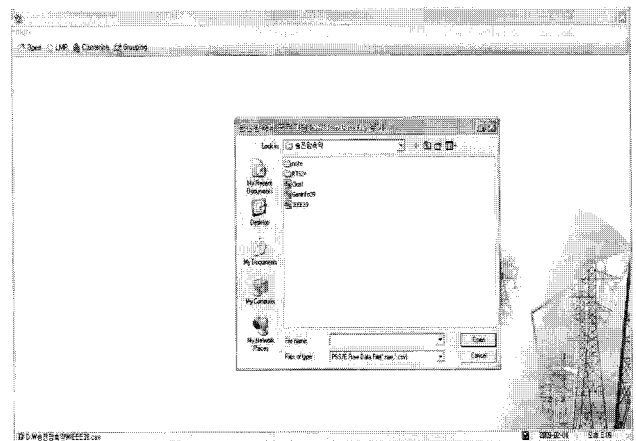


그림 4 자료입력 화면  
Fig. 4 Input Window of Technical Data

### 3.4 분석 기능

본 교육용 시뮬레이터의 분석 기능은 3가지로 구성되어 있다. 첫째로 LMP 모듈은 원시 전력계통에 대한 모션별 한계가격, 전력 조류계산 결과를 나타내며, 둘째 Clustering 모듈은 원시계통의 모션별 그룹을 나타낸다. 마지막으로 Grouping 모듈은 계통 축약에 대한 결과와 축약 계통의 모션, 선로 데이터를 나타낸다.

#### 3.4.1 LMP 모듈

본 교육용 시뮬레이터는 2.2절에서 소개한 모션별 한계가격을 계산하기 위하여 AC OPF를 수행 하며, 이 결과를 그림 5와 같이 출력한다. 또한 원시 계통과 축약 계통과의 결과를 비교하기 위하여 원시계통에 대한 선로 간 조류를 그림 6과 같이 출력 한다.

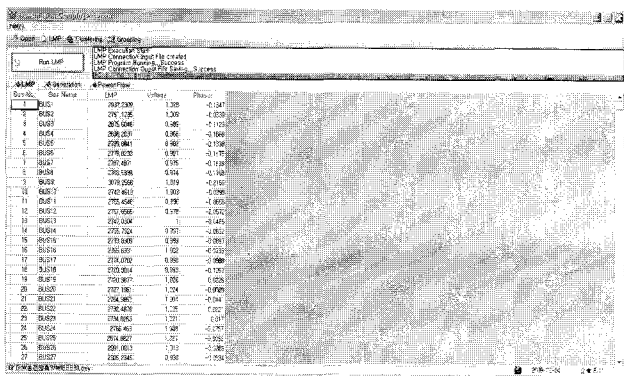


그림 5 모션별 한계가격 및 전력조류 계산 결과  
Fig. 5 Results of LMP and Power System Analysis

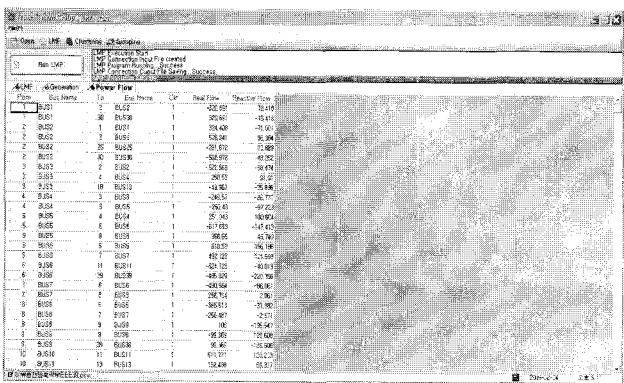


그림 6 모션별 선로조류 결과  
Fig. 6 Results of Power flow for Each nodes

#### 3.4.2 Clustering 모듈

LMP모듈을 통한 계산 이후 clustering모듈에서는 모션별 한계가격의 결과와 지역정보 데이터를 이용하여 2.3절에서 소개한 지역적 그룹 알고리즘을 이용하여 사용자가 입력하는 그룹 개수를 기준으로 그룹을 실시하게 된다. 그림 7에서 볼 수 있듯이 사용자는 그룹의 개수를 정할 수 있다. 본 논문에서 사용한 지역적 그룹 알고리즘은 모션별 한계가격

과 지역 정보를 동시에 퍼지 엔트로피를 이용하여 풀이하기 때문에 사용자는 두 가지의 데이터중 하나의 데이터에 보다 많은 가중치를 줄 수 있다.

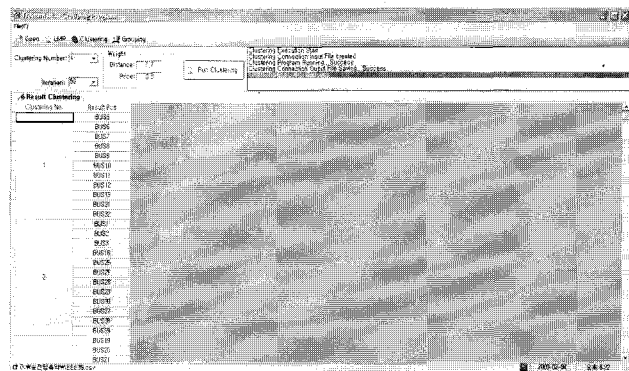


그림 7 모션별 한계가격과 지역정보를 이용한 지역 클러스터링 결과(그룹)  
Fig. 7 Results of Clustering using LMP and Location Information

#### 3.4.3 Grouping(Network Reduction) 모듈

그룹 모듈에서는 최종 송전계통 축약 결과를 확인 할 수 있다. 그림 8에서 볼 수 있듯이 윈도우 화면의 왼편에는 계통 축약된 모션의 개수와 축약 모션에 해당되는 원시 계통의 모션번호를 표시하고 있으며, 오른편 창에서는 축약된 계통의 모션데이터와 선로 데이터를 확인 할 수 있다. 모션데이터와 선로 데이터는 IEEE Format을 기준으로 출력하게 된다. 윈도우 화면 하단의 저장 아이콘을 클릭하게 되면 축약된 계통의 결과를 EXCEL을 이용하여 출력하게 된다.

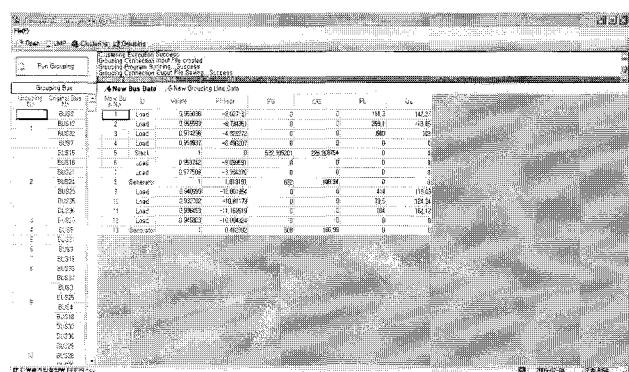


그림 8 송전계통 축약 결과  
Fig. 8 Results of Network Reduction

### 4. 사례연구

본 논문에서 개발한 교육용 송전계통 축약 시뮬레이터의 타당성을 입증하기 위해서 사례계통에 대한 사례연구를 수행하였으며, 사례계통은 IEEE RTS 39을 이용하여 사례연구를 수행 하였다. IEEE RTS 39모션은 10개의 발전기 모션과 47개의 선로로 구성되어 있다.

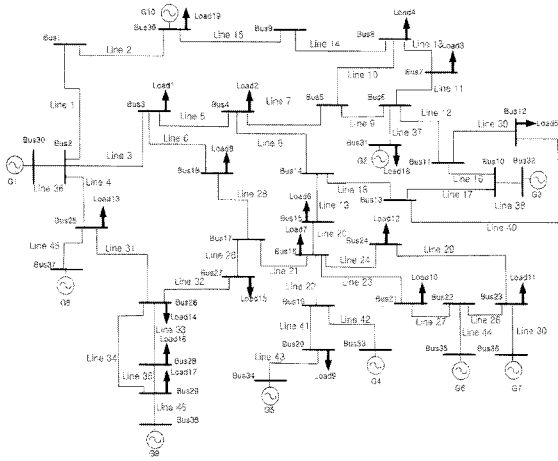


그림 9 IEEE RTS 39모선  
Fig. 9 IEEE RTS 39 Buses

그림 9의 테스트 시스템은 각 모선은 모선데이터, 선로 데이터, 지역정보를 지니고 있다. 표 1은 전력 계통의 데이터를 바탕으로 LMP모듈을 통한 모선별 한계가격을 계산한 값과 지역 정보를 나타내고 있다. 지역정보는 모선이 위치하고 있는 정도, 위도를 의미한다.

표 1 각 모선의 위치적 가격과 위치 정보  
Table 1 location information and price for buses

	locational price (\$/kWh)	Location (per unit)	Bus	locational price (\$/kWh)	Location (per unit)
BUS1	29.21	( 0.9, 9 )	BUS20	45.84	(6.9, 1.7)
BUS2	28.53	(0.6, 6.2)	BUS21	45.84	(8.7, 2.8)
BUS3	31.40	(3, 7.5)	BUS22	45.84	(10, 2.8)
BUS4	32.78	(4.7, 7.5)	BUS23	45.84	(11.1, 2.8)
BUS5	37.57	(7, 7.6)	BUS24	45.84	(8.2, 4.3)
BUS6	38.26	(8.5, 7.6)	BUS25	24.98	(1.4, 4.7)
BUS7	37.81	(9.6, 8.4)	BUS26	55.00	(2.7, 3)
BUS8	37.35	(8.5, 9.1)	BUS27	51.45	(4.6, 3.5)
BUS9	30.56	(6.1, 9.5)	BUS28	55.00	(2.7, 1.5)
BUS10	40.00	(10.8, 5.8)	BUS29	55.00	(2.7, 0.8)
BUS11	39.42	(9.7, 6.3)	BUS30	28.53	(0, 6.2)
BUS12	40.00	(11.1, 7.1)	BUS31	38.26	(8.3, 6.6)
BUS13	40.58	(8.5, 5.5)	BUS32	40.00	(11.3, 5.8)
BUS14	41.74	(6.6, 6)	BUS33	45.84	(8, 1.7)
BUS15	43.79	(6.6, 4.9)	BUS34	45.84	(5.5, 1)
BUS16	45.84	(6.5, 4)	BUS35	45.84	(10, 1.6)
BUS17	47.90	(5, 4.5)	BUS36	45.84	(11.1, 1.6)
BUS18	46.40	(4.2, 2.8)	BUS37	24.98	(0.7, 3.7)
BUS19	45.84	(6.9, 2.8)	BUS38	55.00	(2.7, 0)
			BUS39	29.88	(3.4, 9.5)

LMP 모듈의 결과를 바탕으로 clustering 모듈에서는 사용자의 입력 개수에 따라 클러스터링을 수행하게 된다. 본 논문에서 제안한 시뮬레이터의 클러스터링 타당성을 증명하기 위하여 참고문헌 [12]과 비교하였으며, 표 2와 같다. 표 2에서 볼 수 있듯이 본 논문에서 제안한 시뮬레이터의 클러스터링 결과가 기존 연구의 결과와 비슷한 것을 알 수 있다.

표 2 IEEE39 모선의 클러스터링 결과  
Table 2 Results of clustering IEEE 39-bus

기존 연구			제안된 클러스터링		
Zone A	Zone B	Zone C	Zone A	Zone B	Zone C
Bus 1	Bus 15	Bus 5	Bus 1	Bus 16	Bus 5
Bus 2	Bus 16	Bus 6	Bus 2	Bus 17	Bus 6
Bus 3	Bus 17	Bus 7	Bus 3	Bus 19	Bus 7
Bus 4	Bus 19	Bus 8	Bus 4	Bus 20	Bus 8
Bus 18	Bus 20	Bus 9	Bus 18	Bus 21	Bus 9
Bus 25	Bus 21	Bus 10	Bus 25	Bus 22	Bus 10
Bus 30	Bus 22	Bus 11	Bus 30	Bus 23	Bus 11
Bus 37	Bus 23	Bus 12	Bus 37	Bus 24	Bus 12
Bus 39	Bus 24	Bus 13	Bus 39	Bus 26	Bus 13
	Bus 26	Bus 14		Bus 27	Bus 14
	Bus 27	Bus 31		Bus 28	Bus 15
	Bus 28	Bus 32		Bus 29	Bus 31
	Bus 29			Bus 33	Bus 32
	Bus 33			Bus 34	
	Bus 34			Bus 35	
	Bus 35			Bus 36	
	Bus 36			Bus 38	
	Bus 38				

4.1 원시 전력계통과 축약 계통의 비교

4.1절에서는 원시계통과 축약 계통의 특성을 비교하여 타당성을 증명한다. 표 3은 원시 송전계통의 축약 후 축약 계통의 모선변화를 나타내고 있다. 표 3에서 볼 수 있듯이 원시 계통이 39모선이 송전계통 축약 알고리즘에 의하여 13모선, 47선로는 15선로로 축약되고 있다.

표 3 송전계통 축약 결과

Table 3 Results of Network Reduction

축약 계통	원시 계통
BUS1	BUS 6, BUS7, BUS8, BUS10, BUS11, BUS12, BUS32
BUS2	BUS14, BUS15, BUS16, BUS21, BUS22, BUS23, BUS24, BUS35, BUS36
BUS3	BUS20, BUS34
BUS4	BUS5
BUS5	BUS31
BUS6	BUS9
BUS7	BUS19
BUS8	BUS33
BUS9	BUS1, BUS2, BUS3, BUS4, BUS18, BUS25, BUS30, BUS37
BUS10	BUS26, BUS27, BUS28, BUS29, BUS38,
BUS11	BUS13
BUS12	BUS17
BUS13	BUS39

본 논문에서 제시한 송전계통 축약 알고리즘의 타당성은 계통 축약한 후에도 원시 계통과 비교하여 선로의 조류와 수급이 동일하여야 한다. 표 4는 원시 계통과 축약계통의 모선데이터를 나타내고 있다. 표 4에서 볼 수 있듯이 발전기 모선이 10개에서 3개로 변화하고 있는 것을 알 수 있다. 왜냐하면, 표 3에서 볼 수 있듯이 송전계통 축약 과정에서 부하모선과 발전기 모선이 하나의 모선으로 합쳐짐에 따라 발전량과 부하량의 차이에 의하여 모선의 종류가 변화하기 때문이다. 그러나 원시계통의 총 예비력과 축약 계통의 예비력은 각각 12.80MW, 11.44MW로 1.37MW의 차이를 가지

고 있다. 결국 원시 계통과 축약계통의 선로조류가 1.37MW 만큼 차이를 가지고 있는 것을 알 수 있다. 그러나 총 발전력 대비 0.02%의 오차율을 가지기 때문에 본 논문에서 제안한 교육용 송전망 축약 시뮬레이터의 비교오차율이 작은 것을 알 수 있다.

표 4 원시 계통과 축약 계통간의 모선데이터 비교

Table 4 Comparison table for original bus data and reduction bus data

원시 계통				
Bus Name	V[pu]	Phasor	PG	QG
BUS1	1.028	-0.1647		
BUS2	1.009	-0.0339		
BUS3	0.989	-0.1123		
BUS4	0.966	-0.1668		
BUS5	0.982	-0.1338		
BUS6	0.987	-0.1175		
BUS7	0.975	-0.1639		
BUS8	0.974	-0.1763		
BUS9	1.019	-0.2159		
BUS10	1.003	-0.0398		
BUS11	0.996	-0.0656		
BUS12	0.978	-0.0572		
BUS13	1	-0.0465		
BUS14	0.997	-0.0602		
BUS15	0.989	-0.0897		
BUS16	1.002	-0.0733		
BUS17	0.998	-0.0888		
BUS18	0.993	-0.1057		
BUS19	1.026	0.0226		
BUS20	1.024	-0.0009		
BUS21	1.004	-0.0441		
BUS22	1.025	0.0221		
BUS23	1.021	0.017		
BUS24	1.008	-0.0757		
BUS25	1.027	-0.0089		
BUS26	1.013	-0.0389		
BUS27	0.998	-0.0834		
BUS28	1.021	0.0308		
BUS29	1.029	0.0823		
BUS30	1.023	0.0661	568.978	106.249
BUS31	1.05	0.1078	495.129	298.495
BUS32	1.05	0.1133	774.26	304.06
BUS33	1.05	0.0822	696.034	173.714
BUS34	1.05	0.0954	503.279	145.527
BUS35	1.05	0.1347	551.366	206.318
BUS36	1.05	0.1228	465.386	129.436
BUS37	1.05	0.2046	613.311	130.577
BUS38	1.042	-0.2402	852.763	149.189
BUS39	1.05	0	685.128	380.816

축약 계통							
Bus	ID	V[pu]	Phasor	PG	QG	PL	QL
BUS1	Load	0.9531	-8.0272	0	0	114.3	142.3
BUS2	Load	0.9556	-8.7344	0	0	269.1	-18.9
BUS3	Load	0.9743	-4.82827	0	0	680	103
BUS4	Load	0.9509	-8.49021	0	0	0	0
BUS5	Slack	1	0	532.34	225.21	0	0
BUS6	Load	0.9537	-9.89959	0	0	0	0
BUS7	Load	0.9775	-3.38438	0	0	0	0
BUS8	Generator	1	1.819191	632	108.94	0	0
BUS9	Load	0.9410	-10.802	0	0	414	118.0
BUS10	Load	0.9327	-10.8117	0	0	79.5	124.3
BUS11	Load	0.9365	-11.1626	0	0	104	162.1
BUS12	Load	0.9458	-10.0043	0	0	0	0
BUS13	Generator	1	0.482392	508	166.99	0	0

표 5는 축약 계통의 선로 데이터와 선로 조류를 나타내고 있다. 2.4.2절에서 설명하였듯이 축약 계통이 원시계통과 같

은 특성을 갖기 위해서는 선로 어드미턴스가 중요하다. 본 논문에서는 선로 어드미턴스를 계산하기 위하여 유사지수를 사용하여 축약 모선을 결정한 후 원시 계통의 어드미턴스를 이용하여 축약 계통의 전압과 위상각을 구한 후 전력 조류식을 이용하여 역으로 추적하는 방법을 사용하였다. 표 5는 원시계통과 축약 계통의 선로 데이터선로 조류를 나타내고 있다. 표에서 볼 수 있듯이 선로조류는 거의 유사하나 선로 어드미턴스는 많은 차이를 가지고 있다. 이는 원시계통과 축약 계통간의 선로조류 값을 동일하게 만들기 위하여 선로 어드미턴스를 역추적하기 때문이다. 원시계통의 모선번호는 축약 계통의 모선번호를 기준으로 선로의 어드미턴스를 전부 더한 값이다.

표 5 원시계통과 축약 계통의 선로데이터, 선로 조류 결과  
Table 5 Line data and power flow of network reduction system and original system

원시 계통				
모선 번호	G	B	Real Power	Reactive Power
1	-1.59744	39.9361	126.379	11.71037
2	-1.59744	39.9361	-571.030	249.7035
3	-1.7385	27.43806	-13.662	-188.322
4	-3.03741	30.65883	-450.738	-41.5618
5	-4.86381	77.82101	298.521	-42.1369
6	-3.79643	45.76804	-505.425	-82.8539
7	-10.3352	121.069	-638.852	355.5708
8	0	40	-14.085	-346.027
9	-6.34518	88.83249	174.802	24.61226
10	-8.78294	111.6688	-628.976	-79.1348
11	-4.17962	50.93911	-336.258	-648.634
12	-3.46312	70.25182	57.349	-2.13084
13	-3.66627	72.2778	118.442	35.07557
14	-2.77085	55.41701	264.127	10.59925
15	-4.31922	57.4789	33.801	-47.6209

축약 계통					
From Bus	To Bus	G	B	Real Power	Reactive Power
1	2	31.46909	105.7179	126.2875	10.3445
1	5	-28.0921	35.43754	-571.121	248.3376
1	6	-63.8951	-4.22704	-13.7532	-189.687
2	7	-4.91549	50.81077	-450.829	-42.9277
2	12	-75.653	112.8112	298.4293	-43.5027
3	13	-3.47812	55.25488	-505.516	-84.2197
4	1	-669.495	692.6144	-638.943	354.2049
6	11	-99.0821	-91.2342	-14.1764	-347.393
7	3	-0.91749	72.67201	174.7105	23.24639
7	8	-5.083	69.92736	-629.067	-80.5007
9	4	149.295	128.8573	-336.35	-650
9	10	-73.4061	-3.07105	57.25806	-3.49671
9	11	-65.1671	163.0163	118.3512	33.7097
12	9	-63.3483	189.4361	264.0357	9.233378
12	10	-33.1877	-6.19628	33.7097	-48.9868

### 5. 결 론

본 논문에서는 전력시스템을 위한 기본이론 학습과 다양한 환경변수 및 전력계통의 변화를 고려하여 전력시스템의 설계 및 분석을 위한 교육용 시뮬레이터를 개발하였다. 개발한 교육용 송전계통 축약 시뮬레이터는 사용자가 쉽게 접

할 수 있도록 Window기반으로 개발하였으며, 모선별 한계 가격, 발전기 비용함수, 지역정보를 이용하여 계통을 해석함으로써 다양한 교육적 목적으로 활용될 수 있다. 이를 위하여 잠재가격 기반의 모선별 한계가격을 계산하였으며, 모선별 한계가격과 지역정보를 이용한 클러스터링 기법, 순차적 클러스터링 기법을 사용하였다. 마지막으로 송전계통 축약을 위해 유사지수를 이용한 방법론을 사용하였으며, 기존의 연구와 달리 원시계통의 선로조류를 일정하게 유지하지 위하여 선로 어드미턴스를 역으로 추적하는 기법을 사용하였다. 본 논문에서 개발된 시뮬레이터의 타당성을 증명하기 위하여 IEEE RTS를 이용하여 원시계통과의 비교를 통하여 타당성을 증명하였다. 본 논문에서 개발된 교육용 시뮬레이터는 전력시스템의 대응화 및 전력시장의 변화에 따른 영향 분석을 위한 기초자료로 사용할 수 있으며, 교육목적으로 다양하게 활용할 수 있다. 향후 시뮬레이터의 완성도를 제고하기 위하여 원시계통과 축약계통을 비교할 수 있는 GUI모듈을 개발할 예정이다.

**감사의 글**

본 논문은 지식경제부의 에너지자원 인력양성 학술진흥 사업(과제번호:2007-E-NC03-P-01-0-000)에 의해 수행되었으며, 관계기관에 감사드립니다.

**참 고 문 헌**

[1] M. I. Alomoush and S. M. Shahidehpour, "Fixed Transmission rights for zonal congestion management", IEE Proc.-Gener., vol. 146, No. 5, pp.471-479, Sep. 1999

[2] A. Konak, "Combining network reduction and simulation to estimate network reliability", IEEE proceedings of the Winter simulation conference, pp.2301-2305.9-12 Dec. 2007

[3] J.P.Yang, G.H. Cheng, Z.Xu, "Dynamic reduction of large power system in PSS/E", IEEE/PES Transmission and Distribution Conference & Exhibition, pp. 1-4, 2005

[4] R. Arunachalam, R.Singh, B.A. Mork, L.J. Bohman and D. Ishchenko, " Network reduction and time-domain simulation approaches for increased system security", Power symposium, pp.211-2117, 17-19 Sep, 2006

[5] M. J. Ogrady and R. W. Krug, "Network reduction program maintains external area integrity", IEEE Computer application in Power, Vol. 4, Issue 4, pp.27-30, Oct. 1991

[6] 이동수, 전영환, "모선 간 유사지수에 근거한 새로운 계통 축약 기법", Trans. KIEE, Vol. 55A, No. 4, Apr. 2006

[7] T. Wu, Z. Alaywan, and A. Papalexopoulos, "Location Marginal Price Calculation Using the Distributed-Slack Power Flow Formulation", IEE Trans. on Power System, Vol. 20, No. 2, May. 2005.

[8] L. Chen, H. Suzuki, T. Wachi, and Y. Shimura, "Components of Nodal Prices for Electric Power Systems", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 17, no. 1, Feb. 2002.

[9] 김현홍, 김진호, 박종배, 신중린, "경쟁시장내의 수요자원 입찰을 고려한 모선별 한계가격의 구성요소 산정기법", Trans. KIEE, Vol. 57, No. 7, Jul. 2008

[10] Liu Xuecheng, "Entropy, distance measure and similarity measure of fuzzy sets and their relations, Fuzzy Sets and Systems, 52, 305-318, 1992

[11] Jiulun Fan, Weizin Xie, "Distance measure and induced fuzzy entropy", Fuzzy Sets and Systems, 104,305-314, 1999

[12] S.H. Lee, J.H. Kim, S.H. Jang, J.B. Park, Y. H. Jeon, S. Y. Sohn, "An Advanced Fuzzy C-Mean Algorithm for Regional Clusering of Interconnected Systems", LNAI, pp606-615, 2007

[13] 김현홍, 이우남, 박종배, 신중린, 김진호, "순차적 클러스터링 기법을 이용한 송전계통의 지역별 그룹핑", 대한전기학회 전력기술부분A, Vol.58, no. 5, May, 2009

**저 자 소 개**



**김 현 홍 (金 鉉 烘)**

1977년 12월 28일생. 2004년 전주대 공대 전기공학과 졸업. 2006년 건국대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 건국대학교 대학원 전기공학과 박사과정.  
Tel : 02-458-4778, Fax : 02-444-1418  
E-mail : hhblue@konkuk.ac.kr



**이 우 남 (李 雨 南)**

1979년 6월 19일생. 2005년 건국대 공대 전기공학과 졸업. 2007년 건국대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 건국대학교 대학원 전기공학과 박사과정.  
Tel : 02-458-4778, Fax : 02-444-1418  
E-mail : mansmind@konkuk.ac.kr



**김 우 (金 煜)**

1968년 2월 11일생. 1990년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1992년 동 대학원 전기공학부 졸업(석사). 1997년 동 대학원 전기공학부 졸업(박사). 현재 한국남부발전 발전처 과장  
Tel : 070-7713-8414  
E-mail : dr.wookim@gmail.com





**박종배 (朴宗培)**

1963년 11월 24일생. 1987년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1989년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 건국대학교 공과대학 전기공학과 부교수.

Tel : 02-450-3483, Fax : 02-444-1418

E-mail : jbaepark@konkuk.ac.kr



**신중린 (慎重麟)**

1949년 9월 22일생. 1977년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1984년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1989년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 건국대학교 공과대학 전기공학과 교수.

Tel : 02-450-3487, Fax: 02-444-1418

E-mail : jrshin@konkuk.ac.kr