

# 전력계통 운용 및 제어에 대한 교육 및 훈련용 대화식 그래픽 소프트웨어 개발

論 文  
48A-8-3

## Development of an Interactive Graphic Software for the Education and Training of Power System Operation and Control

愼重麟\* · 李旭和\*\*

(Joong-Rin Shin · Wook-Hwa Lee)

**Abstract** - This paper discusses the development of an interactive and graphic software for the education and training of power system operation and control, especially for students and beginners. This software has a lot of functions for users to simulate the power system operation and control with ease. These functions included in this software are followings. First, this software includes a Graphic User Interface (GUI) - which contains interactive simulation scheme, Windows dialog box, graphic representations, and graphic icons - so that users can handle the software in user-friendly environments. Second, it uses a graphic editor so that users can easily edit the one-line diagram of the power system. Third, it prepares a database system so that users can manage the power system data for simulation easily. Fourth, the application modules included in the software are the Economic Dispatch (ED) and the Automatic Load-Frequency Control (ALFC). These application modules are designed as independent modules. Using the ED module, users can understand the basic concepts of the ED with ease. And using the ALFC module, they can easily acquire the basic understanding of the response of the ALFC between the two-area systems. The proposed software is tested on both the 16 bus and the two-area sample system. The test has confirmed the functions of the developed software. It is anticipated that the software will be useful for the education and training of power system operation and control for the power engineering study at university or for the training of the beginner at power industry.

**Key Words** : Power system operation and control, GUI, interactive, education, training

### 1. 서 론

오늘날의 전력계통은 전력수요의 폭발적 증대, 첨단 고정밀 제어장치의 증대 등에 따라 복잡화, 다양화, 대형화되어 가고 있다. 이러한 전력계통을 보다 효율적으로 운용하여 요구되는 전력에너지를 고품질로 경제적으로 공급하는 것이 전력계통의 운용 및 제어의 목표이며, 이를 달성하기 위해 수행되는 계통운용 및 제어 기술들은 전력에너지의 고품질적인 측면에서, 규정주파수 및 전압을 유지하기 위한 자동 부하-주파수 제어 (ALFC : Automatic Load Frequency Control) 방식과 전압 무효전력 제어 방식 등이 활용되고 있으며, 전력의 경제적인 생산과 공급운용 측면에서는 경제성을 갖도록 발전기의 출력을 최적 배분하는 경제급전 (ED : Economic Dispatching) 방식이 활용되고 있다. 현재의 전력계통은 이와 같은 제어 장치들로 구성되어 있으며, 또한 상호 연계 되어 있어서 그 규모가 방대하며 다양한 돌발적인 사고 가능성이 항상 존재한다.

복잡한 전력계통의 효율적인 운용을 위해서는, 실제로 계통을 운전하는 운전원들이 전력계통 운용 및 제어의 가장 중요한 기술인 자동 부하-주파수 제어 및 경제급전 등의 기본 개념에 익숙해 있어야 할 것이다. 특히 전력계통 운전원의 기초훈련 및 대학 학부생의 교육과정에서 이 부분이 매우 실재적으로 다루어져야 할 것이다. 그러나 현재 대부분의 현장 및 대학에서는 교재 위주의 교육으로 전력계통 운용기술의 기본 개념조차 훈련자들에게 전달하기 어려운 실정에 있다. 이러한 교육적 어려움을 극복하기 위해서 전력계통 운용 및 제어 분야의 교육용 소프트웨어 개발의 연구가 시작되었으나 타 분야에 비하여 출발단계에 있는데, 연구의 동향을 살펴보면 다음과 같다. Yu[1]은 단순한 그래프 기능을 통한 교육용 프로그램 개발을 발표했으며, Daneshdoost[2]는 도스에서 동작하는 통합환경을 갖춘 소프트웨어를 개발하였다. 그리고 Overbye[3]은 동화상을 제공하는 교육용 운용 소프트웨어를 개발하여 발표하였는데, 다중 연계된 복잡한 전력계통을 구성함으로써 소프트웨어의 사용자 범위를 전문가 수준으로 제한하였다. 이와 같이 교육용 소프트웨어의 필요성을 인식하여 몇몇 연구가 보고되고 있으나 여러 가지 미비한 점들이 있어 큰 교육 효과를 거두지 못하고 있다. 기존연구에서 특히 미비점으로 지적할 수 있는 사항들은 그래픽적인 요소의 많은 제한, 텍스트 위주의 시뮬레이션 기능, 그리고 데이터 입·출력의 지루한 단순

\* 正 會 員 : 建國大 電氣工學科 副教授 · 工博

\*\* 正 會 員 : 建國大 電氣工學科 大學院 卒業 · 工博

接受日字 : 1999年 2月 3日

最終完了 : 1999年 6月 23日

작업 요구 등이다. 그러므로 보다 다양한 그래픽 표현과 사용자/컴퓨터간의 그래픽 사용자 인터페이스 기능이 강화된 전력계통 운용 및 제어의 교육 및 훈련을 위한 소프트웨어의 개발이 필요하다[4].

본 논문에서는 이러한 필요에 따라, 전력계통 운용 및 제어의 가장 중요한 부분인 경제급전 및 자동 부하-주파수 제어 분야를 '학부 수준이하의 초보자' 대상으로 교육 및 훈련할 수 있는 대화식 그래픽 기능을 갖춘 교육용 소프트웨어를 개발하였다. 개발된 소프트웨어는 특히 2 지역으로 연계된 전력계통에서의 ALFC의 특성을 손쉽게 이해할 수 있도록 하였고 송전손실을 고려한 경제급전의 등중분 연료비 운전의 기본 개념 및 계산과정에 대한 이해를 사용자로 하여금 가시적으로 얻을 수 있도록 하였다. 그리고 전력계통의 단선도를 손쉽게 구성할 수 있는 그래픽 편집기와 전력계통 데이터의 손쉬운 관리를 위해서 데이터베이스 시스템을 포함하고 있다. 소프트웨어 개발에 사용된 도구로는 GUI 및 데이터베이스 구성을 위해서 볼랜드 C++ 빌더를 사용하였고 수치연산 엔진은 C/C++로 작성하였다. 개발된 소프트웨어에서 요구되는 하드웨어로는 IBM PC 486이상으로 16메가바이트의 메모리, 그래픽 출력을 지원하는 칼라 그래픽 카드 및 마우스가 요구된다. 그림 1은 개발된 소프트웨어의 구성도를 나타내고 있다.

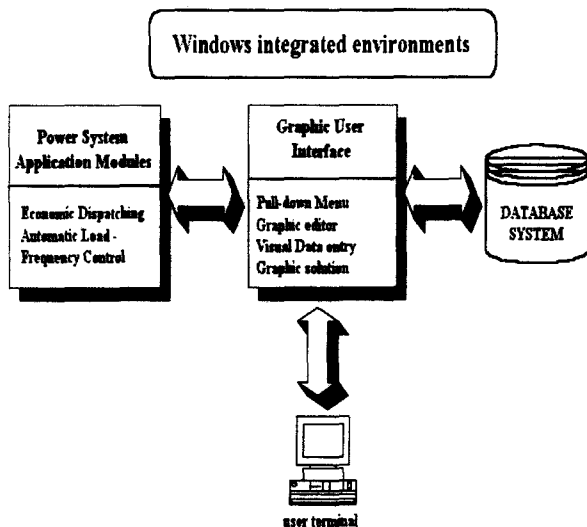


그림 1 개발된 교육용 소프트웨어의 구성도  
Fig. 1 The diagram of the developed educational software.

## 2. 경제급전 및 부하 주파수 제어 모듈

### 2.1 경제급전 모듈

본 경제급전 모듈은 송전손실을 고려하며 발전 비용(연료비)을 최소화되도록 각 발전기의 유효 전력을 배분하는 경제급전의 기본 개념 및 계산 과정 등을 쉽게 이해할 수 있도록 대화식 모의 기능, 경제급전 계산시 주요 변수의 변화 과정의 그래픽 출력 기능 등을 포함하고 있다. 구성된 경제급전 모듈의 특징과 구성을 살펴보면 다음과 같다.

### 2.1.1 경제급전 모듈의 특징

#### (1) 대화식 경제급전 모의 기능

사용자가 대화식으로 경제급전 모의를 수행할 수 있도록 모의 조건을 지정할 수 있다. 대화식으로 조작할 수 있는 조건들로는 첫째, 발전기들의 유효 전력의 초기 값을 지정할 수 있도록 하였다. 이를 통하여 사용자가 임의로 정한 각 발전기의 유효전력의 초기 값에서 출발하여 최적의 발전량으로 배분되는 과정을 학습할 수 있도록 하였다. 둘째, 발전기의 특성을 조작할 수 있다. 즉, 각 발전기의 최대 및 최소 출력값, 각 발전기의 중분 연료비 특성 상수값 등을 사용자가 임의로 지정할 수 있다. 그 외 모의를 위한 여러 실행메뉴들이 그래픽 아이콘으로 구성되어 있다.

#### (2) 경제급전 계산 과정의 그래픽 출력 기능

경제급전의 계산 과정을 가시화하기 위하여 주요 변수들의 변화 과정을 그래픽으로 출력시켰다. 그래픽으로 출력되는 변수의 종류로는, 발전기의 지정된 출력을 내는데 필요한 연료비들의 총합계인 총 운용 비용 (total operation costs), 계통의 총 손실 전력 (total system losses), 반복 계산의 수렴 특성을 나타내는 수렴 오차 (mismatch) 등이다. 그리고 텍스트 형태로 매 반복 계산시 마다, 각 발전량이 최적으로 배분되었음을 알 수 있는 미정 계수 ( $\lambda$ ), 중분송전효율을 나타내는 페널티 계수 등을 텍스트 형태로 출력한다. 그리고 모의가 종료되면 계산 결과로써 각 발전기들의 최적 발전량이 대화식 상자에 나타난다.

### 2.1.2 경제급전 모듈의 구성

경제급전 모듈은 두 부분으로 이루어져 있는데 즉, 사용자가 실제로 여러 가지 조작을 통하여 급전 모의를 수행하며 그 결과를 그래픽 또는 텍스트로 가시화할 수 있는 전용 윈도우와 경제급전의 계산을 수행하는 수치 연산 모듈 등이다.

#### (1) 전용 윈도우의 구성

실제적으로 경제급전 모의를 수행할 수 있는 전용 윈도우는 모의실행을 위한 푸시 버튼, 모의 조건을 지정하는 윈도우즈 상자, 모의 결과를 출력하는 부분 등으로 구성되어 있다. 푸시 버튼들은 시뮬레이션 실행을 위한 "Run", 실행 취소를 위한 "Cancel", 모의 결과의 화면 인쇄를 위한 "Print", 시뮬레이션 종료에 해당하는 "Close" 등이 제공된다. 조건 지정 기능으로써 발전기들의 유효 전력의 초기 값을 지정할 수 있는 텍스트 상자가 제공된다. 또한, 각 발전기의 중분 연료비 특성 상수, 최대 및 최소 출력량 등은 그래픽 단선도상에서 마우스를 이용하여 지정할 수 있다. 한편, 모의 결과를 출력하는 부분 중 텍스트 출력으로써, 경제급전 계산 후의 주요 결과인 각 발전기의 최적 발전량, 페널티 계수, 미정 계수 등은 전용 윈도우의 텍스트 상자로 출력된다. 그리고 그래픽 출력으로써, 경제급전 계산의 주요 변수들인 수렴 오차, 총 운용비, 계통 총손실량 등은 매 반복 계산시 마다 그래프도 윈도우즈 화면에 동시에 출력된다. 그리고 윈도우즈 화면에 자동 스케일 (autoscale) 기능을 삽입하여서 수치 데이터의 크기에 따라 범위가 자동적으로 조절되어 데이터 변화를 쉽게 인식할 수 있도록 하였다. 한편,

전용 윈도우 하단의 가장자리에는 경제급전의 주요 결과들인 선로 손실값, 유·무효 전력 손실값, 총 운용비 등이 표시된다.

(2) 수치 연산 모듈

본 경제급전 모듈의 연산 알고리즘으로는 송전손실을 고려한 등중분 연료비 운용 기법을 사용하였다. 그리고 송전손실은 유효전력의 2차 함수의 송전손실 방정식으로 나타내었고 송전손실 방정식의 B 계수의 계산은 일련의 조류계산을 통한 근사적인 형태로 B계수를 구하는 Hill-Stevenson법 [6]을 사용하였다.

2.2 ALFC 모듈

본 ALFC 모듈에서는 사용자로 하여금 2 지역으로 연계된 전력계통에 적용된 자동 부하-주파수 제어 시스템의 기본 특성을 손쉽게 이해할 수 있도록 대화식 모의 기능, 모의 결과의 그래픽 출력 기능 등을 포함하고 있다. 특히 사용자에게 돌발적 부하 변동으로 인한 계통주파수 및 연락선 조류의 변동 등에 대응하는 ALFC의 특성에 대한 물리적인 이해를 갖도록 구성되어 있다. 개발된 ALFC 모듈의 특징 및 구성은 다음과 같다.

2.2.1 ALFC 모듈의 특징

(1) 대화식 모의 기능

일반적으로 계통주파수는 계통 전체의 발전력과 수요 전력과의 사이에 불평형이 생겼을 경우에 변동하게 된다. 즉, 임의의 부하, 일정 주파수로 운전되고 있는 계통에 부하가 갑자기 감소했다면, 조속기의 응답 전에 부하 감소에 따른 주파수가 상승하게 된다. 본 모듈에서는 이러한 주파수의 변화를 초래하는 부하 변동을 사용자가 손쉽게 모의할 수 있는 기능을 포함하고 있다. 또한, ALFC 시스템의 주요 파라미터 - 조속기 및 터빈의 시정수, 적분제어기의 적분율, 조정상수 (regulation)값 - 등을 대화식으로 조작할 수 있는 기능을 사용자 인터페이스에 포함시켰다. 그리고 모의 시간 및 적분시간 간격 등도 사용자가 대화식으로 조작할 수 있다.

(2) 그래픽 출력 기능

ALFC 모의 과정에서 생성되는 주파수 편차 (frequency deviation), 지역제어오차 (ACE : Area Control Error), 연락선 편차 (power line error) 등의 변동 특성을 윈도우즈 화면에 그래프로 가시화시켜 사용자로 하여금 자연스럽게 제어 파라미터들의 변화에 따른 계통의 영향 및 부하 변동에 대응하는 ALFC의 제어 특성 등에 대한 직관적인 이해를 가능케 하였다. 또한, ALFC 모의 결과의 수치 데이터를 텍스트 형태로 출력할 수 있는 윈도우즈 화면도 제공한다.

2.2.2 ALFC 모듈의 구성

본 모듈의 구성 요소들로는 ALFC 모의를 수행하며 그 결과를 그래픽 및 텍스트로 가시화 하는 전용 윈도우와 ALFC의 수치 연산을 수행하는 모듈 등으로 되어 있다.

(1) ALFC 모의를 위한 전용 윈도우

전용 윈도우는 손쉽게 ALFC 모의를 수행할 수 있도록 5개의 윈도우 페이지를 포함하고 있는데 즉, "System", "Text Output", "Frequency Deviation", "Power Line Error", "ACE" 등이다. 여기서 실제적으로 모의를 수행하는 윈도우 페이지는 "System"이다. 그 외의 페이지는 모의 결과 후의 주요 계통 정보들을 그래픽으로 가시화 한다. 물론 임의의 페이지에서도 ALFC 모의는 가능하다. 각 윈도우 페이지에 대하여 구체적으로 살펴보면 다음과 같다.

먼저, "System" 윈도우 페이지에는 ALFC 시스템의 주요 파라미터 값들을 대화식으로 지정할 수 있는 텍스트 상자가 제공되는데, 종류로는 조속기의 시정수인 'T<sub>ss</sub>', 조속기의 조정 상수인 'R', 터빈 시스템의 시정수인 'T<sub>t</sub>', 전력계통의 시정수인 'T<sub>p</sub>', ALFC의 비례 적분 제어의 이득 계수인 'K<sub>i</sub>' 등을 포함하고 있다. 그리고 사용자가 임의로 제어 대상 지역에 돌발적인 부하 변동량을 지정할 수 있도록 'Disturbance' 라는 텍스트 상자를 제공한다. 그 외에 모의 계통의 베이스 값을 지정할 수 있는 'power base', ALFC의 모의 시간과 적분 제어에서 사용되는 수치 적분의 구간을 선정하는 'Time setting' 등이 있다. 이상의 텍스트 상자에 입력 값들을 제공함으로써 2지역으로 연계된 계통에서의 ALFC 모의를 위한 운전 시나리오의 준비가 모두 끝난다. 이후 사용자는 "System" 윈도우 하단에 위치한 'Run' 아이콘을 클릭 하면 ALFC의 시뮬레이션이 수행되는데, 모의가 수렴된 경우는 윈도우 아래쪽의 가장 자리에 수렴 시간 및 오차가 표시된다. 그렇지 못할 경우, 사용자는 새로운 조건을 지정하여 다시 모의를 시도해야 한다.

사용자가 모의 결과를 출력하려면 원하는 결과를 나타내는 윈도우 페이지를 선택하면 된다. 제공되는 윈도우 페이지들로는 부하 변동에 따른 주파수 및 연락선 전력조류의 변동을 ALFC가 제어하는 과정을 그래프 나타내는 "Frequency Deviation" 및 "Power Line Error" 윈도우 페이지가 있으며, 주파수 및 연락선 전력 등의 변동을 동시에 검출하여 이들의 선형적 결합으로 구성된 지역 제어 오차의 제어 과정을 그래프로 나타내는 "ACE" 윈도우 페이지 등이 존재한다. 제공되는 모든 윈도우 페이지는 결과 데이터의 크기에 따라 자동 스케일이 되어 사용자가 모의 결과를 관찰하기에 용이하도록 되어 있다. 또한, ALFC 모의 결과의 수치 데이터를 텍스트 형태로 출력하는 "Text Output" 윈도우 페이지를 제공한다. 이 페이지에는 모의 시간 동안의 주파수 편차, 연락선 전력조류 편차, ACE 등에 해당하는 수치 데이터들이 모의 시간 별로 자세히 수록되어 있어서 사용자로 하여금 모의 결과에 대한 정밀한 분석을 가능케 한다. 그리고 모든 윈도우 페이지에서 ALFC의 모의를 손쉽게 수행할 수 있도록 모의실행을 위한 "Run", 모의 종료를 위한 "Close", 결과 출력을 위한 "Print" 등의 그래픽 아이콘이 배치되어 있다.

(2) 수치 연산 모듈

전력계통에서 시시각각으로 변동하는 부하로 인한 주파수 및 연계된 계통의 연락선 조류의 변동을 규정값 이내로 유지하도록 제어하는 ALFC의 제어 방식은 여러 가지 있는데, 일반적으로 정주파수 제어, 정연락선전력 제어 및 주파수편의 연락선전력 제어라는 세 가지 방식이 주로 이용되고 있

다. 본 ALFC 모듈은 주파수 변화 및 연락선 전력 변화를 동시에 검출해서 이를 제어 신호로 변환 후 제어 지역의 각 발전단들의 조속기에 전송하여 발전력을 조정함으로써 주파수 편차, 연락선 전력조류의 편차, 그리고 지역제어오차 등을 최소화시키는 비례 적분 제어 방식을 갖춘 ALFC 모듈을 선택하였다[7]. 그리고 지역 제어의 연계 범위가 2 지역간으로 고정된 지역 제어 모델을 사용하였는데, 이는 본 모듈이 주지하다시피 교육용이기 때문에 연계된 계통의 특성을 교육하기 위해서 굳이 다중 지역 제어 같은 대규모 지역 제어 모의를 할 필요가 없을 뿐더러 2 지역 제어도 연계된 전력 계통의 특성을 대부분 가지고 있기 때문에, 본 모듈의 교육 대상인 초보자를 위한 ALFC 교육용으로 충분하리라 생각된다.

### 3. 그래픽 사용자 인터페이스

개발된 소프트웨어의 그래픽 사용자 인터페이스(GUI) 구성은, 사용자가 소프트웨어의 여러 요소에 쉽게 접근할 수 있도록 하는 풀-다운 방식의 주 메뉴, 전력계통의 단선도 작성을 위한 그래픽 편집기, 윈도우즈 환경의 데이터베이스 시스템 등으로 되어있다. 또한, 사용자 편의를 최대로 하기 위하여 그래픽 아이콘, 마우스 구동 방식, 푸시 버튼, 프린터 기능 등을 포함하고 있다.

#### 3.1 주 메뉴

교육용 소프트웨어의 풀-다운 형식의 주 메뉴는 4개의 메뉴를 가지고 있는데 첫째, 자유로운 파일 관리를 위한 "File" 메뉴. 둘째, 모의 계통의 데이터를 관리하는 "Data" 메뉴. 셋째, 전력계통의 그래픽 단선도 구성을 위한 그래픽 편집기와 전력계통 운용 및 제어 모듈 등을 포함한 "Training" 메뉴. 넷째, 사용자들에게 소프트웨어에 대한 주위사항 및 여러 가지 도움말 기능을 담당하는 "Help" 메뉴 등이다. 그리고 각 메뉴들에 해당하는 푸시 버튼들이 주메뉴 하단에 배치되어 있어서 사용자는 신속하게 원하는 메뉴를 선택할 수 있다.

#### 3.2 그래픽 편집기

모의 대상 전력계통의 단선도를 작성할 수 있는 그래픽 편집기를 구성하였다. 구성된 편집기는 저자들의 이전 연구 [5]에서 이미 개발된 것으로 단선도 작성을 위한 여러 기능 및 특성들이 포함되어 있는데 첫째, 윈도우즈 환경에서 전력 계통 단선도를 작성할 수 있게 하므로 윈도우즈 시스템이 제공하는 모든 사용자편의를 이용할 수 있도록 하였다. 둘째, 그래픽 편집기의 메뉴들을 전부 푸시 버튼 형태로 처리하였기 때문에 사용자는 마우스 클릭으로 원하는 메뉴에 쉽게 접근할 수 있다. 따라서, 단선도 구성의 시간적인 효율, 편집 및 수정이 용이하다. 셋째, 전력계통의 기본적인 구성 요소들 - 발전기, 변압기, 모선, 차단기, 선로 - 등을 그래픽 아이콘으로 형상화하여 도구상자(Toolbox)로 구성하였다. 따라서, 사용자가 단선도를 구성할 경우, 도구상자에 속한 그래픽 아이콘을 마우스로 포인팅하여 윈도우즈 도면 상의

원하는 위치에서 클릭을 놓는 동작을 반복함으로써 손쉽게 단선도를 작성할 수 있다. 그리고 그래픽 단선도의 구성 범위는 학부생 교육에 적합한 30 모선, 5 대의 발전기를 포함하는 정도의 계통 규모로 제한되어 있다.

### 3.3 윈도우즈 환경의 데이터베이스

전력계통의 교육용 소프트웨어에서는 데이터의 전송, 모의결과 데이터의 출력 및 저장 등과 같은 데이터 처리 작업이 빈번히 발생한다. 특히, 전력계통은 소규모 계통도 상당한 양의 입력 데이터를 요구하기 때문에, 모의를 위한 데이터 준비작업에 많은 시간과 노력이 소모되어 실제 교육과정에서 중요한 시뮬레이션 결과에 대한 평가 및 이해에 충분한 시간을 할애할 수 없었다. 본 연구에서는 이러한 어려움을 해결하기 위하여 윈도우즈 환경의 데이터베이스 관리 시스템(Data Base Management System : DBMS)을 구성하였다. 구성된 DBMS는 저자들의 이전 연구[5]에서 개발된 것으로, 관계형 데이터베이스 관리 시스템 엔진인 파라독스 시스템을 내장하고 있어서 소프트웨어에 포함된 모듈간에 체계적이고 논리적인 방법으로 데이터를 공유할 수 있다. 또한 볼랜드 C++ 빌더의 데이터베이스 엔진을 사용하여 구성된 가시적인 데이터 입·출력을 위한 인터페이스가 제공되어 사용자로 하여금 모의 전력계통의 데이터를 손쉽게 관리할 수 있도록 한다. 이와 같은 특징을 갖는 데이터베이스 시스템의 구성과 인터페이스를 살펴보면 다음과 같다.

#### 3.3.1 데이터베이스의 구성

본 연구에서 사용되는 DBMS의 엔진이 관계형 데이터베이스 시스템이기 때문에 다음과 같은 관계형 데이터베이스의 구성 절차가 수행되었다. 첫째, 소프트웨어 내에서 사용되는 데이터 항목을 조사하여 이들에 해당하는 데이터 개체(Entity)와 속성(attribute)을 추출하고 이들 상호관계를 개체-관계도(Entity-Relational Diagram : ERD)로 구성하였다[9]. 둘째, 얻어진 개체-관계도를 기반으로 데이터베이스 관리 시스템에서 사용되는 관계형 스키마(Schema)를 생성하였다.

##### (1) 데이터 개체 및 관계 분석

데이터 개체 및 관계 분석과정은 시스템에서 사용하고 있는 자료 항목 및 그들간의 관계를 정확하게 정의하고 설계 단계에서 사용하기 편리한 형태로 문서화하는 작업 단계이다. 본 논문에서는 초심자를 위한 전력계통 기술 교육용 소프트웨어 개발이기 때문에 사용되는 데이터 항목을 전력계통 모의를 위한 가장 기본적인 요소들인 발전기, 선로, 변압기, 모선 등으로 제한하였고 이들을 소프트웨어 내에서 사용될 데이터 개체로 선정하였다. 표 1은 선정된 데이터 개체 및 속성들을 나타내고 있는데 데이터 개체들간에 관계성이 존재함을 쉽게 알 수 있다. 여기서 개체간의 관계성은 대응비(cardinality ratio)로 나타내는데 그 종류로는 일대일(1:1), 일대다(1:N), 다대다(N:m)에 따라 레이블을 붙인다. 하나의 관계는 둘 이상의 개체 집합이 관련된 다원 관계일 수 있으며, 또 두 개체 집합간에 둘 이상의 다중 관계가 존재할 수도 있다. 이러한 방식으로 개체들을 분석하여 개체간에 존재하는 관계성을 추출한 결과를 나타내면 다음과 같다.

표 1 데이터 개체 및 속성  
Table 1 Data entity and attribute

개체	속성
발전기	발전기 번호, 정격출력, 정격전압, 정격주파수, 최소 무효전력 발전량, 최대 무효전력 발전량, 관성상수, 차과도 리액턴스, 시퀀스 리액턴스, 중성점 접지 리액턴스, 증분 연료비 특성 파라메트
변압기	1차측 연결 모선번호, 2차측 연결 모선번호, 변압기 임피던스, 탭비, 영상분 리액턴스, 정상분 리액턴스, 중성점 리액턴스, 1차측 결선 방식, 2차측 결선 방식
선로	선로 연결 시작모선, 선로 연결 끝모선, 선로 임피던스, 선로 어드미턴스, 영상분 리액턴스, 정상분 리액턴스
모선	모선번호, 모선전압, 발전모선 유효 및 무효 전력, 부하모선 유효 및 무효전력

즉, 모선과 발전기 개체의 관계는 일대다이며, 모선과 변압기 개체의 관계도 일대다이다. 그리고 모선과 선로의 관계도 일대다의 관계를 갖는다. 이러한 데이터 개체들의 관계성은 데이터베이스의 스키마 구성을 위한 매우 중요한 정보가 된다[9].

(2) 관계형 스키마 생성

관계형 스키마의 생성은 앞절에서 제시된 개체-관계 모델로부터 여러 개의 릴레이션 관계 정의를 구성함으로써 얻어진다. 여기서 릴레이션 관계 정의란 각 데이터 개체 상호간의 연관 관계를 테이블(스키마)로 표현하는 것을 말한다. 본 연구의 데이터베이스 구성에서 제공되는 관계형 스키마는 발전기, 선로, 변압기, 모선 등이다. 이때 스키마의 실제적인 구성은 각 개체들의 속성들을 열에 배치하고 행에는 각 속성에 해당하는 실제 데이터값을 삽입함으로써 이루어진다. 본 연구에서 이러한 스키마의 구성을 볼랜드 C++ 빌드의 데이터베이스 데스크탑이라는 툴을 이용하여 수행하였다.

3.3.2 가시적인 데이터 입·출력 인터페이스

본 연구에서는 사용자로 하여금 데이터 개체를 직접 조작함으로써 원하는 데이터 처리 작업을 수행하도록 하는 가시적 형태의 데이터 입·출력 인터페이스를 볼랜드 데이터베이스 엔진을 통하여 구현하였다. 구현된 인터페이스는 두 가지로 나눌 수 있는데, 전력계통 데이터베이스 구축을 위한 가시적 데이터 입력 (visual data entry) 기능과 윈도우즈 상자를 이용한 데이터 출력 기능이다. 이들 기능들에 대한 설명은 다음과 같다.

(1) 가시적 데이터 입력 기능

사용자가 전력계통 단선도상에서 데이터 개체를 직접 조작하여 데이터 입력, 수정 등을 가능케 하는 가시적 데이터 입력 기능이 구현되었다. 즉, 그래픽 편집기의 단선도상에 존재하는 발전기, 선로, 모선, 변압기 등의 데이터 개체를 사용자가 마우스로 클릭함으로써 대화식 상자를 출력시켜 해당 개체에 데이터 값을 손쉽게 입력할 수 있다. 또한, 데이터의

변경, 수정/검색 등과 같은 데이터 조작도 대화식으로 할 수 있다.

(2) 윈도우즈를 통한 데이터 출력 기능

사용자가 전력계통 단선도상에서 데이터 개체의 값을 즉석에서 확인할 수 있는 윈도우를 통한 데이터 출력 기능이 구현되었다. 즉, 사용자가 데이터베이스에 저장된 모의 계통과 관련된 데이터를 출력하려면 단선도상에 존재하는 발전기, 선로, 모선, 변압기 등의 그래픽 심벌을 마우스로 클릭함으로써 해당 데이터 개체의 '출력 윈도우'를 발생시키면 된다. 발생된 윈도우에는 해당 데이터 개체의 값이 출력되어 사용자가 즉석에서 데이터 개체의 정보를 확인 및 수정할 수 있다.

4. 사례 연구

본 연구에서 개발된 전력계통 운용 및 제어에 대한 교육 및 훈련용 대화식 그래픽 소프트웨어의 특성과 기능들을 확인하기 위하여 발전기 3대, 변압기 7대 등으로 구성된 16모선 전력계통[8] 및 2지역으로 연계된 계통을 모델 계통으로 선정하여 사례 연구를 수행하였다. 사례 연구에서 수행된 절차는 다음과 같다. 첫째, 그래픽 편집기를 이용하여 모델 계통의 그래픽 단선도를 구축하는 과정을 나타내었다. 둘째, 모의에 필요한 계통 데이터를 데이터베이스화하는 작업 과정 및 결과를 나타내었다. 셋째, 16모선 모델 계통에 대하여 경제급전 모의를 수행하여 그 결과를 나타내었고 또한, 2 지역 연계된 계통의 자동 부하-주파수 제어에 대한 모의를 수행하여 그 결과를 나타내었다.

4.1 모델계통의 그래픽 단선도 구성

그래픽 편집기에서 수행된 16모선 모델 계통의 단선도 구성 과정을 순서대로 나타내면 다음과 같다. 먼저, 주 화면의 "File" 메뉴를 마우스로 클릭 하여 새로운 윈도우즈 도면을 출력시킨다. 이제 사용자는 그래픽 편집기의 도구상자에 포함된 여러 그래픽 객체들을 이용하여 모델 계통의 단선도를 도면 위에서 구성할 수 있는데, 구성에 앞서 도면의 모드를 편집 가능 모드로 전환하기 위하여 주 화면에 있는 연필 모양의 "도면구성" 아이콘을 클릭 한다. 그 결과로 도구상자의 여러 객체들은 활성화되어 편집 가능하게 되었다. 편집 가능한 환경 하에서 그래픽 단선도를 구성한 예를 살펴보면 다음과 같다.

먼저 모델 계통의 발전기는 3 대이므로 도구상자에서 발전기 객체를 선택하고 복사하여 계획된 위치에 발전기의 그래픽 심벌을 위치시키는 과정을 세 번 반복함으로써 모델계통의 발전기들을 단선도에 구현하였다. 다음 발전기들을 기점으로 수행된 모선의 구현 과정을 살펴보면 다음과 같다. 사용자가 도구상자에서 모선의 그래픽 심벌을 마우스로 클릭 하면 마우스 화살표 끝에 그래픽 모선 심벌이 발생하고 이를 도면의 계획된 위치까지 왼쪽 마우스를 누른 채로 끌고 가서 다시 클릭 하면 굵은 단선 형태의 모선이 발생된다. 생성된 모선은 연결되는 선로 수에 따라 그 길이를 자유롭게 조절할 수 있어서 모선과 선로의 연결을 용이하도록 하

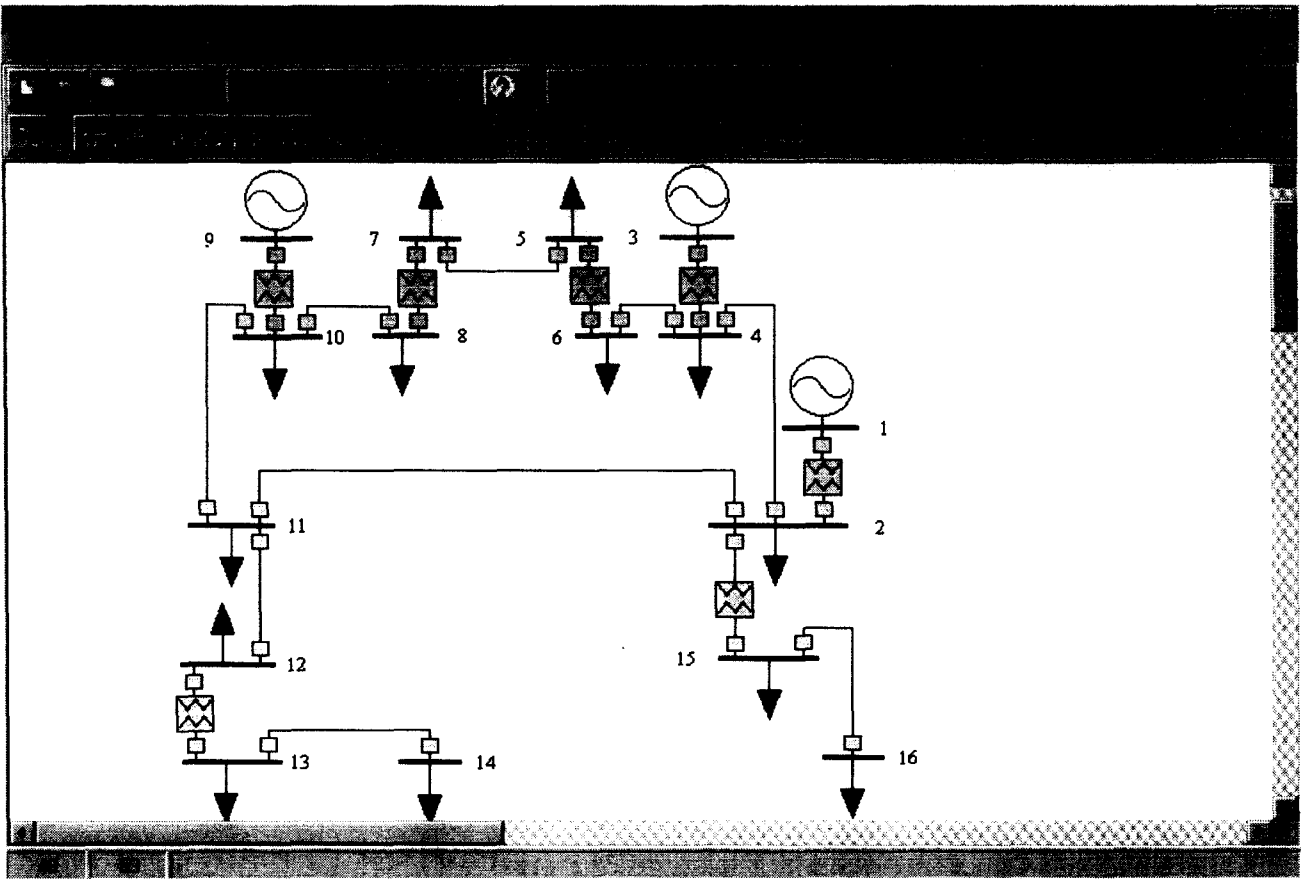


그림 2 모델 계통의 그래픽 단선도  
 Fig. 2 The graphic one-line diagram of the sample system.

있다. 구성된 모선과 발전기 사이에 차단기를 설치하려면 도구상자의 차단기 심벌을 마우스로 클릭 하여 지정된 위치에 놓고 클릭을 풀면 된다. 변압기 객체를 도면에 표시하는 방법도 차단기의 경우와 같다. 그리고 모선과 모선사이 선로를 구성하려면 도구상자에서 선로 객체를 선택하고 시작점에서 클릭하고 끝지점에서 이중 클릭을 하면 모선간에 선로가 발생한다. 서술된 구현 과정을 거쳐서 구성된 16모선 모델 계통의 그래픽 단선도 화면이 그림 2에 나타나 있다.

4.2 데이터베이스 구성

16모선 모델 계통과 관련된 데이터의 데이터베이스화 과정을 살펴보면 다음과 같다. 먼저, 전력계통 설비와 관련된 데이터를 데이터베이스에 입력하기 위해서는 그래픽 단선도 상에서 계통 설비의 그래픽 심벌을 마우스로 클릭 함으로 윈도우 대화식 상자를 중첩시켜 해당 설비의 데이터를 입력하면 된다. 이렇게 입력된 데이터는 즉석에서 데이터 객체의 '출력 윈도우'를 화면에 생성시키므로 신속하게 확인 또는 변경할 수 있다. 이와 같이 가시적으로 모델 계통의 경제급전 모의를 위하여 데이터베이스를 구성한 예를 나타내면 다음과 같다.

모델계통의 발전기들의 데이터를 입력하는 과정을 살펴보면 다음과 같다. 먼저, 모델 계통의 9번 모선의 발전기의 데이터를 데이터베이스에 입력하기 위해서, 단선도상에서 해당

발전기를 마우스로 클릭 하면, 발전기의 데이터를 입력할 수 있는 윈도우 대화식 상자가 주 화면에 중첩된다. 생성된 대화식 상자에서 요구하는 정보인 발전기 모선의 정보, 해당 발전기의 연료 특성 상수, 발전기 최대 및 최소 출력량 등을 입력하였다. 그리고 이와 동일한 방법으로 나머지 2 대의 발전기의 데이터를 모두 입력하였다. 그림 3은 발생된 윈도우 대화식 상자에 9번 모선 발전기의 최소 및 최대 출력량, 연료 특성 상수값 등을 입력한 상태를 보이고 있다. 한편, 모델 계통에는 7대의 변압기가 있는데, 변압기의 데이터를 데이터베이스에 입력한 과정은, 발전기와 동일하게 단선도상의 변압기를 차례로 마우스로 클릭 함으로 개별 변압기의 윈도우 대화식 상자를 중첩시켜 각 변압기의 연결 모선 번호, 변압기 저항, 리액턴스, 권수비, 대칭분 리액턴스값들을 입력하였다. 그리고 모델 계통의 발전 모선을 제외한 모든 부하 모선을 차례로 클릭 하여 개별 부하 모선의 윈도우 대화식 상자에 모선 번호, 초기 전압 크기 및 위상각, 부하 유효 및 무효 전력값 등을 입력하였다. 마지막으로 모델 계통을 연결시키는 선로 데이터 입력을 위해서 대화식 상자를 발생시켜 모델 계통의 모든 선로들의 연결상태, 임피던스값, 대칭분 리액턴스값 들을 입력하였다. 이와 같이 그래픽 단선도 상에서 직접 전력계통 설비와 관련된 데이터를 윈도우 대화식 상자에 입력함으로 경제급전 모의를 위한 데이터베이스를 매우 편리하게 구축할 수 있었다.

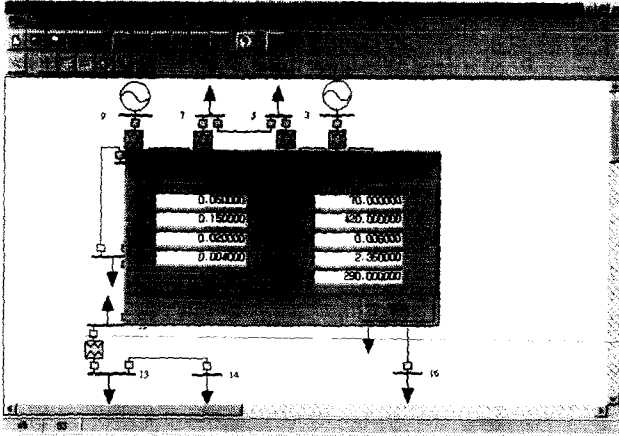


그림 3 윈도우즈 상자를 이용한 발전기 데이터 입력  
Fig. 3 input of generator data by windows box.

### 4.3 경제급전 모듈

경제급전 모듈에서 수행된 사례 연구를 살펴보면 다음과 같다. 주 화면에서 경제급전에 해당하는 푸시 버튼을 클릭하여 그림 4의 전용 윈도우를 중첩시켰다. 이와 동시에 모델 계통의 단선도 구성 시에 입력된 각 발전기의 연료 특성 상수, 최대 및 최소 전력량 등 경제급전 모의에 필요한 데이터들은 데이터베이스로부터 자동적으로 경제급전 모듈로 넘어감으로 모의를 위한 데이터 입력이 완료되었다. 이후, 전용 윈도우의 대화식 지정 상자에서 각 발전기의 유효 전력의 초기 값을 임의로 선정 후 전용 윈도우즈 왼쪽 하단의 "Run" 아이콘을 클릭 함으로 경제급전 계산을 실행시켰다. 그 결과, 경제급전의 주요 변수값의 변화과정이 그래프 및 수치 데이터로 출력되었고 8번의 반복 계산만에 계산 오차가 허용범위 안에 들어와서 수렴되었음을 그림 4가 보여주고 있다. 모의 결과를 살펴보면, 모든 발전기의 미정 계수값이 491.5로 수렴되어 등중분 연료비운전 조건을 만족시킴으로 각 발전기에 경제적으로 부하가 배분되었는데, 그 결과는 1모선의 발전기는 140.21[MVA], 3번 모선의 발전기는 102.60[MVA], 9번 모선의 발전기는 191.79[MVA]로 각 발전기들의 출력값이 지정되었다. 여기서, 각 발전기의 미정계수 및 발전기의 출력값은 전용 윈도우의 텍스트 상자에 나타나 있다. 그리고 각 발전기의 출력값을 발생하는데 필요한 연료비들의 총합인 전체 운용비용은 2276.539 (\$/h)가 필요한 것으로 계산되어 윈도우즈 하단에 표시되었다.

그림 4의 전용 윈도우즈는 추가적인 정보를 보여주고 있는데 먼저, 경제급전 계산이 진행되면서 전체 운전비용이 계속적으로 적어지는 것을 볼 수 있다. 이는 경제급전의 목적인 연료비를 최소화하는 발전량 배분이라는 계산 논리를 가시화하고 있음을 확인할 수 있었다. 또한, 전체 시스템 손실값은 계산이 진행되면서 일정한 값으로 수렴함을 알 수 있다. 끝으로 경제급전 계산의 수렴 횟수 및 수렴오차를 나타내고 있다. 이상의 정보를 표현하는 전용 윈도우즈 화면은 표시되는 데이터 값의 크기에 따라 자동으로 표현범위가 조절되어 사용자로 하여금 데이터 관찰을 매우 용이하게 하였음을 확인할 수 있었다. 한편, 사용자가 새로운 운전 조건으로 재모의를 실행하기 위해서는, 소프트웨어의 주 화면으로

복귀하여 모델 계통 단선도상에서 계통 설비의 데이터 변경을 시도한 후 이를 저장한 다음 위와 동일한 순서로 모의를 수행하면 된다. 그러나 사용자가 모의를 종료할 경우에는 전용 윈도우 하단의 "Close" 아이콘을 클릭 하므로 경제급전 모듈을 빠져 나올 수 있다.

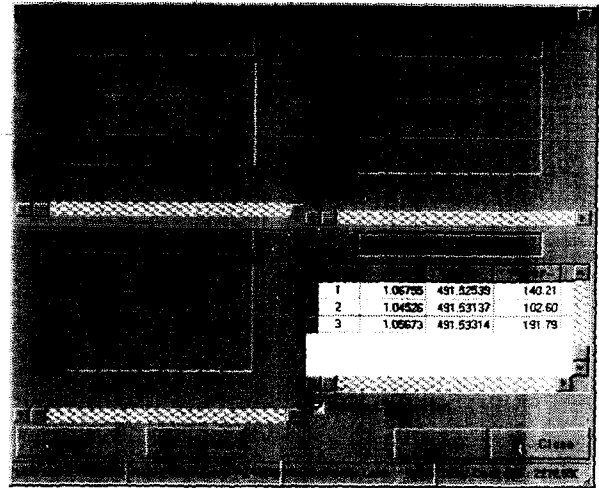


그림 4 전용 윈도우에서 경제급전 모의 화면  
Fig. 4 The screen of the ED simulation on the private window.

### 4.4 ALFC 모듈

본 모듈의 사례 연구에서는 계통 운용 시나리오 및 시스템 파라미터를 작성하여 이를 2지역으로 연계된 모델 계통의 ALFC에 적용하여 그 결과를 그래프 및 텍스트 형태로 출력하였다. 이 과정을 살펴보면 다음과 같다. 먼저, 운용 시나리오는 모의 시작 직후에 연계된 계통의 지역 1에서 200MVA의 돌발적인 부하의 변동이 발생하며 이 변동은 모의가 끝날 때까지 지속되며 모의 시간은 5 초로 되어 있다. 한편, 양쪽 지역은 동일한 시스템 파라미터를 갖는다고 가정하였다. 즉, 양 제어 지역의 조속기의 시정수 및 조정 상수는 각각 0.4 과 3 이고 터빈 발전기의 시정수 및 전력계통의 시정수는 각각 0.5 과 20 이다. 여기서 모든 값은 단위법으로 되어 있다. 그리고 양 지역의 제어 적분률을 나타내는 이득 계수인  $K_i$  는 각각 0.09를 갖으며 전체시스템의 전력기준값은 2000MVA로 하였다.

작성된 계통 운용 시나리오 및 시스템 파라미터를 ALFC 전용 윈도우의 텍스트 상자에 입력한 후, 전용 윈도우에서 실행 아이콘인 "Run"을 마우스로 클릭 하여 시뮬레이션을 실행하였다. 그림 5은 ALFC의 전용 윈도우 상에서 모의를 수행한 후 성공한 경우를 나타내고 있는데 모의 결과를 분석하면 다음과 같다. 동일한 특성을 갖는 연계된 계통의 지역 1에서 돌발적인 부하의 증가 (200MVA)가 발생될 때, 양 지역의 발전단은 동일한 발전 특성을 가지고 있기 때문에 양 지역에서 균등하게 각각 100MVA 씩 부하 증가를 분담한다. 또한, 양 지역간의 연락선은 기존의 연락선 전력에 100MVA가 증가된 전력 조류를 경험한다. 즉, 지역 1에서의 200MVA의 돌발적인 부하 증가는 지역 1의 자체 발전단에서 생산된 100MVA와 연락선을 통하여 들어오는 전력조류

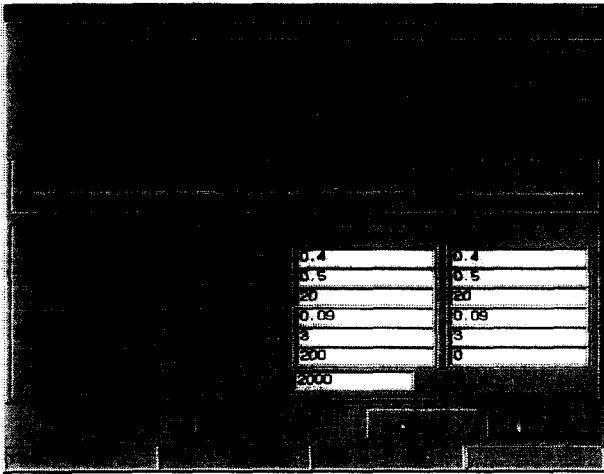


그림 5 2지역 계통의 ALFC 모의를 위한 전용 윈도우  
 Fig. 5 The private window for the two-area ALFC simulation.

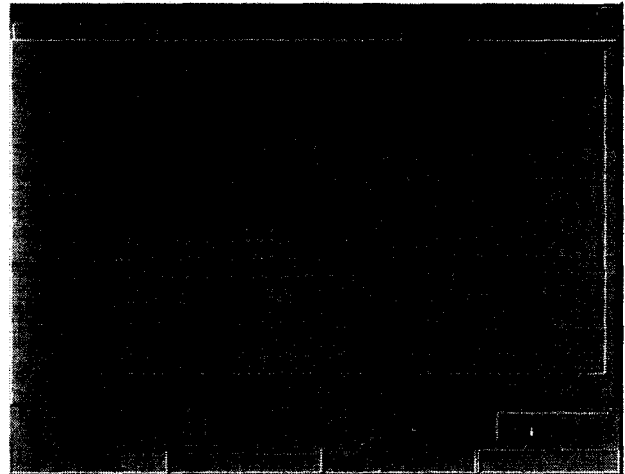


그림 8 ALFC에 의한 ACE의 제어 과정의 윈도우  
 Fig. 8 The window of the ACE control by the ALFC.

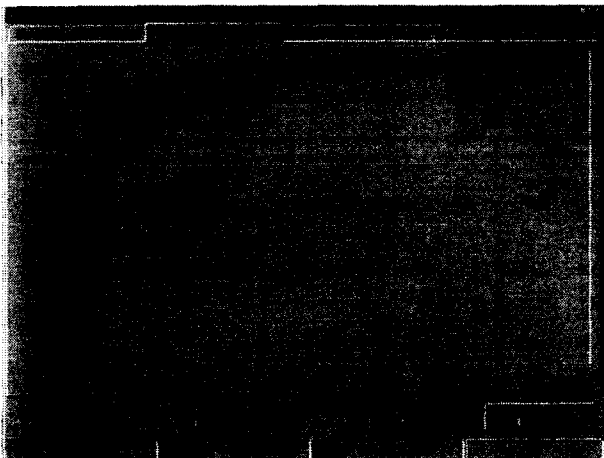


그림 6 ALFC에 의한 주파수 제어 과정의 윈도우  
 Fig. 6 The window of the frequency control by the ALFC.

3.10	0.00046	-0.00691	0.00404	-0.00384	-0.00637
3.20	0.00039	-0.00611	0.00369	-0.00352	-0.00626
3.30	0.00040	-0.00547	0.00338	-0.00321	-0.00571
3.40	0.00052	-0.00501	0.00310	-0.00289	-0.00523
3.50	0.00056	-0.00455	0.00283	-0.00259	-0.00476
3.60	0.00052	-0.00406	0.00259	-0.00237	-0.00431
3.70	0.00051	-0.00365	0.00237	-0.00215	-0.00392
3.80	0.00054	-0.00332	0.00217	-0.00194	-0.00358
3.90	0.00055	-0.00302	0.00198	-0.00175	-0.00327
4.00	0.00052	-0.00271	0.00181	-0.00159	-0.00296
4.10	0.00049	-0.00244	0.00166	-0.00145	-0.00270
4.20	0.00049	-0.00221	0.00152	-0.00131	-0.00246
4.30	0.00048	-0.00201	0.00139	-0.00119	-0.00224
4.40	0.00045	-0.00181	0.00127	-0.00108	-0.00204
4.50	0.00043	-0.00163	0.00116	-0.00098	-0.00186
4.60	0.00041	-0.00148	0.00106	-0.00089	-0.00169
4.70	0.00040	-0.00134	0.00097	-0.00080	-0.00154
4.80	0.00037	-0.00121	0.00089	-0.00073	-0.00141
4.90	0.00035	-0.00110	0.00081	-0.00067	-0.00128
	0.00033	-0.00099	0.00075	-0.00060	-0.00117

그림 9 ALFC 모의 결과의 텍스트 출력 윈도우  
 Fig. 9 The window for the text result of the ALFC simulation.

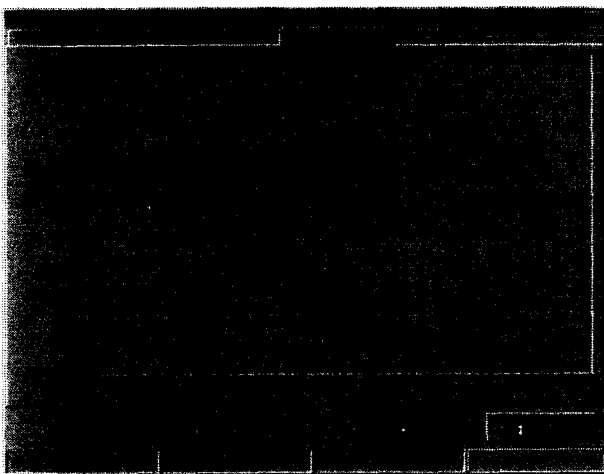


그림 7 ALFC에 의한 연락선 오차의 제어 과정의 윈도우  
 Fig. 7 The window of the tie-line error control by ALFC.

(100MVA)의 합에 의하여 안정적으로 공급된다.

그러나 돌발적인 부하 증가로 계통의 주파수, 연락선 조류 및 ACE 등이 변동하는데 이를 각각 윈도우즈 페이지에 그래프로 출력시켰다. 즉, 그림 6은 지역 1에서 200MVA의 돌발 부하로 인한 양 지역에서의 주파수 변동을 ALFC가 규정된 오차의 한계값 안으로 제어하여 모의 시간의 끝에는 발생한 주파수 오차를 거의 '0'으로 만들고 있음을 볼 수 있다. 그리고 그림 7은 동일한 부하 변동으로 발생하는 연락선의 전력 조류의 변동을 ALFC가 제어하는 과정을 보이고 있다. 그림 8은 부하 변동으로 발생한 지역 제어 오차(ACE)를 ALFC의 적분 제어 장치가 매우 강력하게 제어함으로써 오차를 거의 '0'으로 만드는 과정을 보이고 있다. 즉, 지역 제어 오차가 '0'에 근접되도록 계속하여 발전량을 투입함으로 연계된 계통을 안정화시키고 있음을 가시적으로 이해할 수 있다. 마지막으로 그림 9은 사례 연구에서 수행된 ALFC 모의의 여러 결과 데이터를 텍스트 형식으로 보이고 있다. 여기서, 모의 시간 동안에 발생한 주요 계통 변수 값



들을 일렬로 표현함으로 세밀하게 서로 비교할 수 있는 기회를 제공한다. 그리고 한 화면에 모든 데이터를 나타낼 수 없을 경우는 스크롤 기능을 이용하여 사용자가 원하는 부분을 마우스로 찾아 볼 수 있도록 되어 있다.

### 5. 결론

본 연구에서는 전력계통 운용 및 제어에 대한 교육 및 훈련용 대화식 그래픽 소프트웨어를 개발하였다. 개발된 소프트웨어는 윈도우즈 환경에서 전력계통의 단선도를 구성할 수 있는 그래픽 편집기와 복잡한 전력계통 운용 데이터의 손쉬운 관리를 위한 데이터베이스 시스템을 포함한다. 특히, 다양한 그래픽 및 대화식 기능이 부가된 그래픽 사용자 인터페이스를 구성하여 사용자로 하여금 전력계통 운용 및 제어의 가장 중요한 기술인 경제급전 및 자동 부하 주파수 제어에 대한 기본 개념 및 물리적인 이해를 손쉽게 습득할 수 있도록 하였다. 이와 같은 특성들을 확인하기 위하여, 16모선 계통 및 2지역으로 연계된 계통에 대한 사례 연구를 수행하여 제시된 소프트웨어의 기능 및 특징들을 확인할 수 있었다. 본 연구에서 개발된 소프트웨어는 대학에서의 전력계통 운용 및 제어의 실습에서 교육용 프로그램으로써 또는 전력 산업의 현장에서 미숙련자의 전력계통 운용의 기초기술 습득을 위한 훈련용 프로그램으로써 상당한 역할을 할 것으로 기대된다.

본 연구는 1997년도 한국과학재단 연구비 지원에 의한 결과임. (과제번호 : 971-0909-056-1)

### 참 고 문 헌

[1] D.C. Yu, S.T. Chen, R.F. Bishke, "A PC Oriented Interactive and Graphical Simulation Package for Power System Study", IEEE Transaction on power Systems, Vol. 4, No. 1, pp.353-360, Feb., 1989

[2] M. Daneshdoost, R. Shaat, "A PC Based Integrated Software for Power System Education", IEEE Transaction on Power Systems, Vol. 4, No. 3, pp.1285-1292, August, 1989

[3] T.J. Overbye, et al., "A User-friendly simulation program for teaching power system operations", IEEE Transaction on Power System, Vol.10, pp.1725-1733, Nov., 1995

[4] Gilberto Pires de Azevedo, et al., "Enhancing the human-computer interface of power system application", IEEE Transaction on Power System, Vol. 11, No.2, pp.646-653, May, 1996.

[5] 신중린, 이욱화, 임동해, "그래픽통합환경을 갖춘 전력시스템 해석과 운용을 위한 교육용 패키지", 한국조명·전기설비학회 논문지, 12권, 2호, pp.45-53, 1998.

[6] E. F. Hill, W. D. Stevenson, "A new Method of determining Loss Coefficients", IEEE Transaction on PAS, Vol. PAS-87, No. 7, pp.1548-1553, July, 1968

[7] O.I. Elgerd, Electric Energy Systems theory, second edition, McGraw -Hill Inc., pp. 299 ~ 350, 1971.

[8] Chrales A. Gross, Power System Analysis, John wily and Sons, pp. 285~293, 1979.

[9] C.J. Date, An introduction to database systems, sixth edition, Addison-wesley Publishing, Inc., 1995.

## 저 자 소 개



### 신 중 린 (愼 重 麟)

1949년 9월 10일 생. 1977년 서울대 전기공학과 졸업. 1984년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1989년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 1977년~1984년 한전 전원계획처(부장대리). 1984년~1990년 한전 연구원 선임연구원. 1990년~1994년 건국대학교 전기공학과 조교수. 1994년~ 현재 건국대학교 전기공학과 부교수  
Tel : (02) 450-3487  
E-mail : jrshin@kkucc.konkuk.ac.kr



### 이 욱 화 (李 旭 和)

1969년 3월 27일 생. 1991년 건국대 전기공학과 졸업. 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학).  
Tel : (02) 338-1621  
E-mail : wookwha@hanmail.net