

# 고도화된 자동화 변전소의 사고복구 지원을 위한 지식학습능력을 가지는 전문가 시스템의 개발

論 文
53A-12-1

## Development of An Expert system with Knowledge Learning Capability for Srevice Restoration of Automated Distribution Substation

高 鈺 錫<sup>†</sup> · 姜 泰 圭<sup>\*</sup>  
(Yun-Seok Ko · Tae-Gue Kang)

**Abstract** - This paper proposes an expert system with the knowledge learning capability which can enhance the safety and effectiveness of substation operation in the automated substation as well as existing substation by inferring multiple events such as main transformer fault, busbar fault and main transformer work schedule under multiple inference mode and multiple objective mode and by considering totally the switch status and the main transformer operating constraints. Especially inference mode includes the local minimum tree search method and pattern recognition method to enhance the performance of real-time bus reconfiguration strategy. The inference engine of the expert system consists of intuitive inferencing part and logical inferencing part. The intuitive inferencing part offers the control strategy corresponding to the event which is most similar to the real event by searching based on a minimum distance classification method of pattern recognition methods. On the other hand, logical inferencing part makes real-time control strategy using real-time mode(best-first search method) when the intuitive inferencing is failed. Also, it builds up a knowledge base or appends a new knowledge to the knowledge base using pattern learning function. The expert system has main transformer fault, main transformer maintenance work and bus fault processing function. It is implemented as computer language, Visual C++ which has a dynamic programming function for implementing of inference engine and a MFC function for implementing of MMI. Finally, it's accuracy and effectiveness is proved by several event simulation works for a typical substation.

**Key Words** : Substation Automation, Bus Reconfiguration, Knowledge Learning, Pattern Recognition Expert System

### 1. 서 론

전력계통은 전력에너지를 수용가에 공급하는 제반설비로써 이들에 대한 안정성과 경제성은 국가산업발전과 국제경쟁력 제고에 심대한 영향을 미친다. 따라서 선진 기술국들은 자국의 국가산업 경쟁력 확보를 위해 전력계통의 안정성과 경제성 그리고 효율성을 확보하기 위해 많은 투자와 노력을 기울이고 있다. 그리고 그 일환으로 EMS, SCADA, ADS 등 발전에서 송변전 그리고 배전에 이르기까지 전체 전력계통에 대한 종합 자동화를 추진, 운영하고 있다.

전력 SCADA는 배전 변전소의 CB 상태를 원격에서 감시, 제어하기 위해 도입되었으며 이를 기반으로 변전소 무인화가 점진적으로 추진되고 있다. 일반적으로 배전용 변전소는 154KV를 22.9KV로 강압하여 일반 수용가에 직접적으로 전력을 공급하기 때문에 변전소내 모선이나 주변압기 사고시와 같은 비상시는 물론 주변압기 과부하시 및 교체시 일반수용

가들에 대한 엄청난 정전과급효과를 발생시킬 수 있다, 따라서 정상 또는 비상시 특히 무인화되는 변전소 조건하에서 전력공급의 안정도를 확보하기 위해서는 신속하고 완전하게 모선상의 CB나 단로기들에 대한 원격제어가 가능해야 한다. 그러나 현재 SCADA 시스템은 CB의 감시 제어기능만을 가지고 있다. 따라서 무인화되는 변전소 운영환경하에서 변전소 운전의 안정성과 신뢰성을 제고하기 위해서는 모선상의 섹션스위치를 CB화하고 라인스위치와 함께 원격감시 제어기능이 부여될 필요가 있다. 또한 시스템 운영자의 잘못된 판단으로부터 과급효과를 최소화하기 위해 변전소내에서 발생할 수 있는 다양한 이벤트들에 대해 일관적으로 정확한 모선 재구성 전략을 수립, 운영자에게 제공할 수 있어야 한다. 지금까지 이러한 문제에 대한 다수의 연구가 있었다[1-8]. 그러나 실제 변전소에서 설비나 부하조건에 따라 다양한 모선구성이 가능하기 때문에 운용목적을 만족하는 최적한 해를 얻기 위해서는 상당한 탐색비용이 요구되는 모선상의 CB나 섹션스위치 그리고 라인 스위치들의 조합 최적화 문제를 풀어야 한다. 따라서 휴리스틱 기반 탐색법들이 제안된다[1,4,8]. 그러나 이들 논문에서는 변전소내의 주변압기 및 모선사고 그리고 주변압기 작업계획 등에 대해 종합적으로 대처할 수 있는 접근법을 제시하지 못하고 있음은 물론 모선구조에 기반한 휴리스틱들을 채택함으로써 프로그램의 복잡성으로 인해 확장성 측면에서 효율성이 심각하게 저하될 수 있다. 또

<sup>†</sup> 교신전자, 正會員 : 남서울大學 電子情報通信工學部 副教授 · 工博  
Email : ysko@nsu.ac.kr

<sup>\*</sup> 正會員 : 光云大 大學院 制御計測工學科 碩士課程  
接受日字 : 2004年 7月 6日  
最終完了 : 2004年 9月 18日

한 휴리스틱 기반 접근법의 경우 제어전략에 대한 검증이 실시간으로 이루어져야 하기 때문에 안정성의 저하를 가져올 수 있다. 따라서 본 연구에서는 변전소내의 주변압기 사고, 모선사고 그리고 주변압기 및 모선 작업계획 이벤트에 대해서 다중 추론모드, 다중 운영목적하에서 선택적으로 추론하도록 함으로써 변전소 운전의 안정성과 효율성을 제고할 수 있는 전문가 시스템을 제안한다. 특히 실시간 전략으로 해의 성능을 보장할 수 있는 준최적 탐색법과 패턴인식 기법이 채택된다. 패턴인식기법의 경우 패턴세트에 대한 충분한 검토가 사전에 이루어지기 때문에 이벤트 발생시 해에 대한 신뢰성을 제고할 수 있다. 제안되는 전문가 시스템은 직관적 추론부와 논리적 추론부로 구성되는데 직관적 추론부는 패턴인식기법 중 최소거리 판별법에 기반하여 실시간 패턴과 가장 유사한 패턴에 대응하는 제어전략을 실시간으로 제공한다. 논리적 추론부에서는 실시간 모드로 준최적 탐색법을, 그리고 학습모드로 너비제한 전공간 탐색법이 채택된다. 실시간 모드는 이벤트 발생시 직접적인 실시간 전략으로 활용될 수 있음은 물론 직관적 추론 실패시 실시간 제어전략 수립을 지원한다. 반면에 학습모드는 최적해를 수립하여 초기 지식베이스를 구축하거나 유사패턴 탐색에 실패하는 경우 새로운 지식을 지식베이스에 추가한다. 운영목적은 이벤트별로 선택하도록 개폐기 조작회수 최소화나 부하분담 균등화 모드로 구성된다. 전문가 시스템은 Visual C++의 MFC로 개발된다.

2. 문제 정의

전력 SCADA 시스템은 원격감시기능을 이용하여 각 변전소내의 CB상태나 모선전압, 주파수 등을 실시간으로 감시하며 동시에 CB에 대한 제어기능을 가지기 때문에 무인화되는 변전소 운영환경하에서 이벤트 발생시 사고파급효과를 최소화하기 위한 핵심적인 역할을 담당하게 된다.

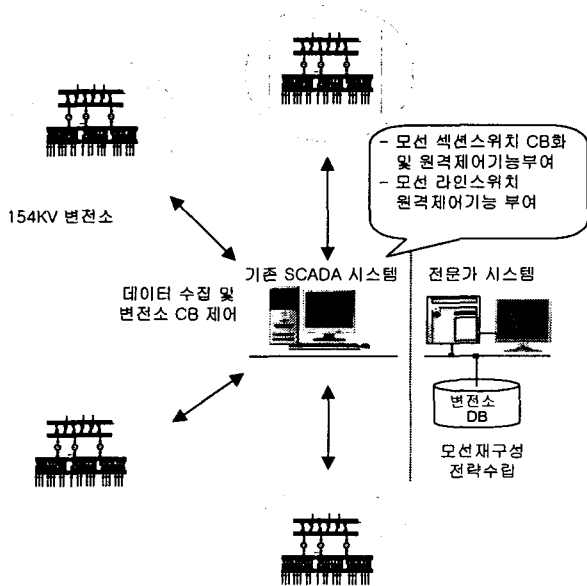


그림 1 전력 SCADA 시스템의 구성  
Fig. 1 Congiguration of power SCADA system

모선 재구성은 모선상의 CB, 섹션 스위치 그리고 라인 스위치들을 조작하여 가능한데, 현재 SCADA 시스템은 CB의 감시 제어기능만을 가지고 있다. 따라서 무인화되는 변전소 운영환경하에서 변전소 운전의 안정성과 신뢰성을 제고하기 위해서는 그림 1에 보인바와 같이 모선상의 섹션 스위치를 CB화하고 라인스위치와 함께 원격감시 제어기능이 부여될 필요가 있다. 또한 사고파급효과를 최소화하기 위해 변전소내에서 발생할 수 있는 다양한 이벤트들에 대해 일관적으로 정확한 모선 재구성 전략을 수립, 변전소 운영자에게 제공할 수 있어야 한다. 주변압기 영구 이벤트가 발생한 경우 사고 주변압기의 부하를 변전소내의 타 뱅크로 신속하게 절체하게 된다. 먼저 CB를 투입하여 정전선로들을 건전 타 뱅크로 절체하게 되는데, 모선구성의 경우가 다양하기 때문에 CB만을 가지고는 문제해결이 어려울 수 있다. 따라서 섹션 스위치와 라인 스위치들을 이용하게 되는데 이때의 운용목적은 개폐기 조작회수를 최소화할 수 있도록 해야 한다. 식 (1)은 이때의 운용목적을 보인다. [8]

$$\min(N_{CB} + N_{BS} + N_{LS}) \tag{1}$$

여기서,  $N_{CB}$  : 모선 재구성시 조작되어야 할 모선 CB  
 $N_{SS}$  : 모선 재구성시 조작되어야 할 섹션스위치 수  
 $N_{LS}$  : 모선 재구성시 조작되어야 할 라인스위치 수

만약 정전부하를 2대의 주변압기에 분담시켜야 할 경우 식 (2)의 부하분담 균등화가 정의될 수 있다.[8]

$$\min(\sum_{i \in T} (TIL_i - TAL_i)^2) \tag{2}$$

여기서, T : 변전소내의 주변압기들의 집합  
 $TIL_i, TAL_i$  : i번째 주변압기 이상부하와 실제부하  
 $TNC_i, TMC_i$  : i번째 주변압기 정격용량과 최대용량  
 $TAC_i$  : i번째 주변압기의 가용용량  
 $TIL_i : LF * TNC_i$  또는  $LF * TMC_i$   
 $LF : \sum_{i \in T} TAL_i / \sum_{i \in T} TAC_i$

그런데 이 문제는 식 (1) 또는 (2)를 만족하는 스위치들에 대한 조합최적화 문제로써 상당한 탐색비용을 요구한다. 더구나 다양한 이벤트들에 대해 (1)과 (2)에 대한 해를 얻는 과정에서 시스템 운영자의 잘못된 판단으로 사고파급효과를 심각하게 확대시킬 수 있다. 따라서 변전소 운전의 안정성과 효율성을 제고하기 위해서는 다양한 변전소 운전조건하에서 주변압기나 모선사고 그리고 주변압기 작업계획등의 이벤트들에 대해 종합적으로 적용될 수 있음은 물론, 특히 실시간 조건을 만족하고 그 해에 대한 신뢰성을 확보할 수 있는 접근법들이 개발되어야 한다.

3. 전문가 시스템 설계

본 연구에서 제안하는 전문가 시스템은 크게 추론기관, 지식베이스, 변전소 데이터베이스 그리고 MMI로 설계된다. 추론기관은 직관적 추론부와 논리적 추론부로 구성된다. 직관적 추론부는 경보처리 프로세스로부터 제공되는 이벤트 정보,

실시간 부하패턴 정보로 구성되는 실시간 패턴으로부터 패턴 인식기법에 근거하여 지식베이스를 탐색, 목표패턴을 얻을 수 있도록 하는 패턴인식자가 설계된다.

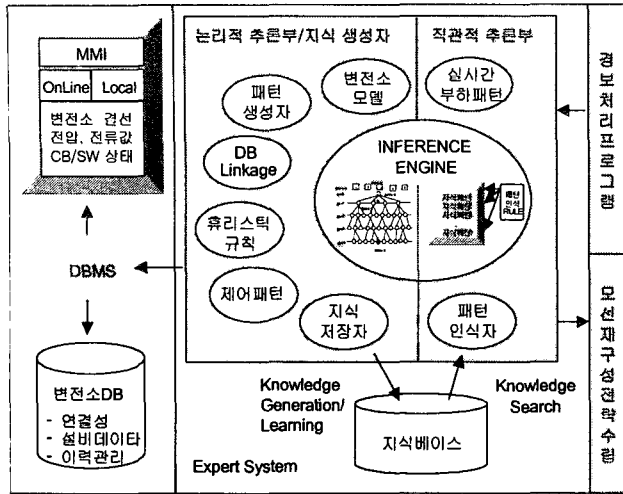


그림 2 전문가 시스템 구조 설계  
Fig. 2 The expert system structure design

반면에 논리적 추론부는 변전소 DB linkage를 통해 DB로부터 메모리내에 변전소 연결성 추적을 위한 변전소 모델로 구축한 다음, 다음 2가지 역할을 수행한다. 논리적 추론부로 동작하는 경우 이벤트 발생시 이벤트 정보를 확인하여 부하 절체가 가능한 스위칭 후보들을 작성한 다음, 추론모드에 따라 허용되는 탐색공간내에서 휴리스틱 규칙에 기반하여 우선되는 스위칭 후보를 우선적으로 탐색함으로써 합리적인 모션 재구성 전략을 수립하게 된다. 반면에 지식 생성자로 동작하는 경우 2개의 패턴 생성자 즉, 구축된 변전소 모델을 이용하여 부하레벨에 기반한 부하패턴들을 지식베이스에 생성시키는 부하레벨 기반 부하패턴 생성자, 일정기간동안의 부하이력을 기반으로 부하패턴을 지식베이스내에 생성시키는 부하이력 기반 부하패턴 생성자 중 하나의 패턴 생성자를 이용하여 학습될 부하패턴 세트를 지식베이스에 구축한다.

표 1 전문가 시스템의 기능설계  
Table 1. Function of expert system

전문가 시스템 기능 설계					
이벤트 처리능력	운영 목적	추론기능		지식학습기능	
		직관적 추론	논리적 추론	부하패턴 생성기능	제어패턴 생성기능
주변압기 사고	개폐기 조작회수 최소화	패턴인식 기법	실시간 모드	부하레벨기반 부하패턴 생성기능	제어패턴 생성
주변압기 작업계획	부하분담 균등화		학습 모드	부하이력기반 부하패턴생성 기능	지식기록 기능
모션사고					

그리고 너비제한을 가지는 전공간 탐색모드하에서 구축된

부하패턴 세트내의 각 부하패턴들에 대응하는 모션 재구성 전략을 수립한 후 스위칭 패턴세트에 지식 저장자를 통해서 저장한다. 또한 직관적 추론 실패시 사고시 부하패턴에 대한 실시간 모션 재구성 전략을 수립, 새로운 지식패턴으로 지식 베이스에 학습시킨다. 변전소 데이터베이스는 앞에 기술된 바와 같이 변전소의 전기적 연결성과 이력을 표시할 수 있는 데이터 파일들로 구성된다. 끝으로, 그림 2는 고도화된 자동화변전소의 운전지원을 위해 설계된 지식학습기능을 가지는 전문가 시스템의 구성을 보이며, 표 1은 제안된 전문가 시스템의 기능구성을 보인다.

### 3.1 직관적 추론부[10]

직관적 추론부는 이벤트 발생시 실시간 시스템과 미리 구축된 지식베이스내의 다량의 시스템을 비교하여, 실시간 시스템과 동일하거나 또는 가장 유사한 시스템 즉 목표 시스템을 직관적으로 추론할 수 있도록 패턴인식 기법에 기반하여 설계한다. 이 방법에서 유사성의 정도는 대규모 학습패턴 세트에 대해서 효과적으로 적용될 수 있는 최대거리 판별법을 적용하여 식 (3)으로 표시되는 유클리디언 거리  $d_i$ 에 의해서 판별되도록 한다.

$$d_i = [w_1(s_{i1} - o_{i1})^2 + w_2(s_{i2} - o_{i2})^2 + \dots + w_m(s_{im} - o_{im})^2]^{1/2} \quad (3)$$

식 (3)에서,  $o_{ij}$ 는 학습패턴세트내에 기 구축된  $i$ 번째 패턴의  $j$ 번째 요소이며,  $s_{ij}$ 는 목표 시스템의  $j$ 번째 요소이다.  $w_j$ 는  $j$ 번째 요소의 가중함수로써 실시간 시스템에 대한 오차거리의 상대적 크기를 나타내며  $1/r_d^2$  으로 표시한다.

### 3.2 논리적 추론부(실시간 모드/학습모드)[9,10]

실시간 모드로는 준최적 탐색법이 학습모드로는 너비제한 전공간 탐색법이 채택된다. 탐색트리는 노드와 분기로 구성되는데, 노드는 모션상태를 브랜치는 스위칭후보에 의한 부하 절체를 의미한다. 초기노드  $N_{0,0}$ 는 이벤트 발생시점의 모션구성을 표시하는 반면, 깊이 1 이하의 노드들은 그 분기로 표시되는 스위칭 후보들에 대한 상태 제어후에 재구성되는 모션구성을 표시한다. 그림 3은 모션 재구성을 위한 탐색트리를 보이는데, ○는 탐색노드를, ●는 목표노드(최종 모션 재구성)를 나타낸다. 만약 주변압기 사고 이벤트가 발생하면 전문가 시스템은 문제해결을 위해 변전소 연결성을 추적, 현재의 모션구성(초기노드  $N_{0,0}$ 에 해당) 으로부터 사고 주 변압기의 정전선로들을 탐색한 후, 정전선로들의 절체가 가능한 모든 스위칭 후보 세트를 결정한다. 이때, 전문가 시스템은 휴리스틱 규칙들에 기반하여 확장 후보노드들에 대한 휴리스틱 비용 @를 평가한다. 이 휴리스틱 규칙들은 개폐기 조작횟수, 부하분담비 등에 영향을 미칠 수 있는 지식들이다. 그림 5는 가능한 확장노드가 4개( $N_{1,1}$ ,  $N_{1,2}$ ,  $N_{1,3}$ ,  $N_{1,4}$ )이며 이들에 대한 휴리스틱 비용 @가 각각 {3,1,2,4}임을 표시한다. 다음 최소의 @를 가지는 브랜치(스위칭 후보)가 우선 선택된다. 동시에 시스템 운전조건의 만족여부가 검증된다. 만족하는 경우 스위칭 후 노드  $N_{1,2}$ 로 확장된다. 다음 부하절체 완료여부가

확인되는데, 미완인 깊이 1의 노드  $N_{1,2}$ 에서 가능한 새로운 스위칭 후보세트들이 탐색되어 깊이 2의 노드들  $\{N_{2,4}, N_{2,5}\}$ 로 확장된다. 이때 @가 각각 {2,4}임을 확인할 수 있다. 따라서 최소비용 @를 가지는 스위칭 후보가 선택되어  $N_{2,4}$ 가 얻어진다. 그리고 이와 같은 경로 탐색과정은 목표노드를 만날 때까지 계속되는데 그림에서 부하절체가 완료되는 첫 번째 목표노드는  $N_{4,5}$ 이다. 따라서 초기노드에서 경로  $\{N_{1,2}, N_{2,4}, N_{3,5}, N_{4,5}\}$ 를 거쳐 목표노드를 얻기까지 탐색과정에서 선택된 스위칭 정보가 최종 부하절체 전략이 된다.

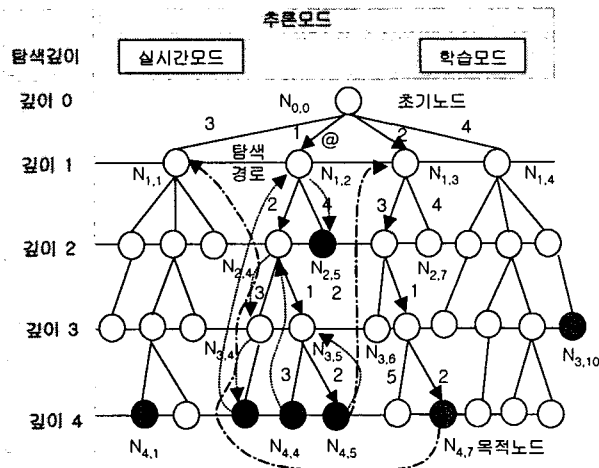


그림 3 논리적 추론을 위한 탐색트리 구조  
Fig. 3 Structure of search tree for the logical inference

준최적 탐색법은 이 과정을 1점 선택으로 표시된 바와 같이 깊이 0의 모든 노드들에 대해서만 확장 적용한다. 즉, 목표노드  $N_{4,5}$ 에서 깊이 0으로 역추적하여 두 번째 우선 순위의 스위칭 후보를 선택, 노드  $N_{4,7}$ 을 얻는다. 두 번째 목표노드  $N_{4,7}$ 을 얻기까지의 경로  $\{N_{1,3}, N_{2,6}, N_{3,7}, N_{4,7}\}$ 에서 선택된 스위칭 후보들의 집합이 두 번째 부하절체 전략이 된다. 그리고 첫 번째 얻어진 부하절체 전력과 비교하여 최적한 성능의 것을 새로운 부하절체 전략으로 한다. 다시 깊이 0의  $N_{1,1}$ 으로 역추적하여 다음 목표노드  $N_{4,1}$ 을 탐색, 부하절체 전략을 작성하고 이전의 것과 성능을 비교 우수한 성능의 부하절체 전략을 새로운 부하절체 전략으로 한다. 이 과정이 끝나면  $N_{1,4}$ 로 역추적하여 4번째 목표노드  $N_{3,10}$ 을 탐색하고, 같은 과정을 적용하여 최적한 부하절체 전략을 얻게된다. 이와 같이, 준최적 탐색법은 탐색공간을 다소 확장함으로써 만족할 만한 성능의 부하절체 전략을 얻을 수 있다. 여기서 다소 확장되는 탐색공간은 전체 탐색공간에 비해 무시할 수 있는 수준이다. 끝으로 학습모드인 너비제한 전공간 탐색법은 점선으로 표시된 바와 같이  $N_{4,5}$ 에서 깊이 3으로 역추적하여 다음 우선 순위의 목표노드  $N_{4,4}$ 를 얻는다. 그리고 이 과정을 주어진 탐색너비 제한을 만족할때까지 반복, 적용함으로써 최적 해를 얻을 수 있다. 이 모드는 지식생성자의 추론모드로 활용된다.

3.2.1 휴리스틱 규칙

본 연구에서는 휴리스틱들이 모션구조에 기반하여 설계됨으로써 발생하는 복잡성과 확장성 제한 그리고 프로그램 보

수유지의 어려움 등 문제를 해소하기 위해 전기적 연결성을 추적하는 일반화된 스위칭 알고리즘에 기반한 휴리스틱들이 채택된다. 본 연구에서 제안되는 휴리스틱들은 개폐기 조작 회수 최소화(1)의 운용목적에 영향을 미치는 HR 1-3], 그리고 부하분담 균등화 운용목적에 영향을 미치는 휴리스틱 HR 4]가 채택된다.

HR 1] 절체 부하가 큰 후보가 우선 선택된다. 이 규칙은 부하절체가 가능한 스위칭 후보들의 집합에서 절체될 부하가 큰 스위칭 후보를 우선 선택함으로써 가급적  $\min(N_{CB} + N_{SS} + N_{LS})$ 을 얻기 위한 규칙이다.

HR 2] 부하 중요도가 높은 후보가 우선 선택된다. 이 규칙은 스위칭 후보들의 집합에서 부하 중요도가 높은 스위칭 후보를 우선 선택함으로써 부하중요도가 높은 부하를 가급적 신속하게 복구하기 위한 규칙이다.

HR 3] 개폐기 조작회수가 작은 후보가 우선 선택된다. 이 규칙은 스위칭 후보들의 집합에서 스위칭 횟수가 작은 스위칭 후보를 우선 선택함으로써 차단기나 개폐기 조작으로 인한 복구시간 지연이나 안전사고를 방지하기 위한 규칙이다.

HR 4] 부하분담 균등화 변화량  $\Delta S$ 가 작은 후보가 우선 선택된다. 이 규칙은 스위칭 후보들의 집합에서 스위칭으로 인한 부하분담 평등화 지표  $\Delta S$ 가 작은 스위칭 후보를 우선 선택함으로써 사고부하를 동일변전소내의 건전 타 뱅크에 적절하게 분담함으로써 변전소 운전의 안정성을 제고하기 위한 규칙이다. 만약, 절체될 부하 TL이  $\sigma$ [KVA]인 경우 시스템의 부하 균등화 지표 변화  $\Delta S$ 는 절체전과 절체후의 부하 균등화 지표의 차, 식 (4)로 표시된다. 여기서,  $E_i = TIL_i - TAL_i$ 이다.

$$\Delta S_i = E_i^2 - (E_i - \sigma)^2 = 2E_i\sigma - \sigma^2 \tag{4}$$

3.3 지식베이스 설계

지식베이스의 학습부패턴 세트는 탐색의 효율성을 제고하기 위해 이벤트 종별에 관계없이 주변압기별로 설계된다. 따라서 변전소에서 가능한 주변압기 최대 수에 따라 총 4개의 학습패턴세트가 설계된다. 그리고 모션 재구성 전략 정보를 포함하는 스위칭 패턴 세트는 주변압기 수와는 관계없이 이벤트 종별로 설계된다. 따라서 주변압기 사고, 모션사고, 주변압기 작업계획에 대응하여 총 3개가 설계된다. 그림 4에서 각 부패턴은 뱅크패턴과 선로패턴으로 구성된다. 빈도는 사고발생빈도를 표시하며 CN은 대응하는 이벤트 타입  $e_1$ 에 대한 스위칭 패턴 번호를, 반면에 BN은 이벤트 타입  $e_2$ 에 대한 스위칭 패턴 번호를 표시한다. 논리적 추론부는 필요에 따라 실시간 전략을 수립하며 학습모드를 통해 새로운 이벤트에 대한 최적한 모션 재구성 전략을 수립하여 지식베이스에 저장한다. 그림 6은 지식베이스의 구조와 추론기관의 지식베이스 탐색과정을 설명한다.

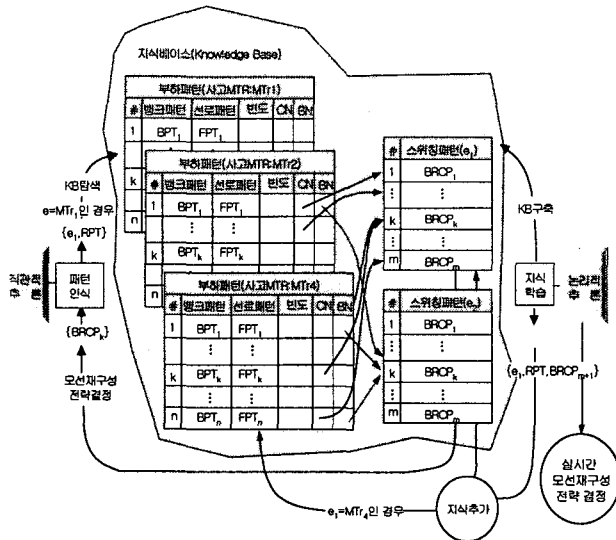


그림 4 지식베이스 구조  
Fig. 4 Knowledge base structure

#### 4. 문제해결전략

본 연구에서 제안하는 지식학습 기능을 가지는 전문가 시스템의 이벤트들에 대한 문제해결전략은 다음과 같이 단계 1]에서 단계 8]로 설명될 수 있다.

단계 1] 먼저 전문가 시스템 추론모드와 부하레벨 기준을 설정한 다음, 변전소 DB로부터 데이터를 검색하여 변전소 연결성과 설비 이력을 표시하는 실시간 데이터베이스를 구축한다. 그리고 단계 2]로 간다.

단계 2] 전문가 시스템 논리적 추론부의 추론모드를 학습모드로 하여 가능한 모든 이벤트들에 대해 정해진 부하레벨 패턴들에 대한 모션 재구성 전략을 수립, 지식베이스를 구축한 다음 단계 3]로 간다.

단계 3] 변전소 이벤트를 감시한다. 만약, 이벤트가 발생하면, 정보처리 프로그램으로부터 이벤트 타입, 이벤트 설비, 실시간 부하패턴 등을 포함하는 이벤트 정보를 확인한다. 즉 실시간 시스템을 확인한 다음 그리고 단계 5]로 간다.

단계 4] 패턴 인식 기법에 기반하여 직관적 추론에 들어간다. 만약, 지식베이스내에서 실시간 시스템과  $\min(d_i) < \epsilon$ 를 만족하는 지식패턴이 발견되는 경우 목표패턴으로 결정, 단계 6]으로 가서 스위칭 테이블을 작성한다. 반면에  $\min(d_i) < \epsilon$ 를 만족하는 지식패턴이 존재하지 않는 경우 단계 7]로 가서 논리적 추론을 실행한다.

단계 5] 모션 재구성을 위한 스위칭 테이블을 작성한다. 그리고 그 결과를 MMI에 제공한 다음, 해당 이벤트에 대한 이벤트 발생횟수를 갱신한다. 그리고 이벤트 발생빈도에 따라서 해당하는 이벤트 그룹에 대한 지식패턴 재배열 작업을 실행한다. 이 작업은 새로운 이벤트 발생시 발생빈도가 높은 이벤트를 우선 탐색하게 함으로써 목표시스템 탐색을 신속하게 하기 위한 작업이다. 그리고 단계 4]로 가서 변전소 이벤트 감시를 계속한다.

단계 6] 논리적 추론부는 사용자가 시스템 설정시에 결정

한 추론모드에 근거하여실시간 모드나 너비제한 탐색모드하에서 추론을 실행, 새로운 이벤트에 대한 실시간 모션 재구성 전략을 수립한다. 그리고 이 전략을 단계 6]에 제공하여 스위칭 테이블을 작성하도록 하며, 단계 8]로 가서 새로운 이벤트에 대한 지식패턴을 생성하게 된다.

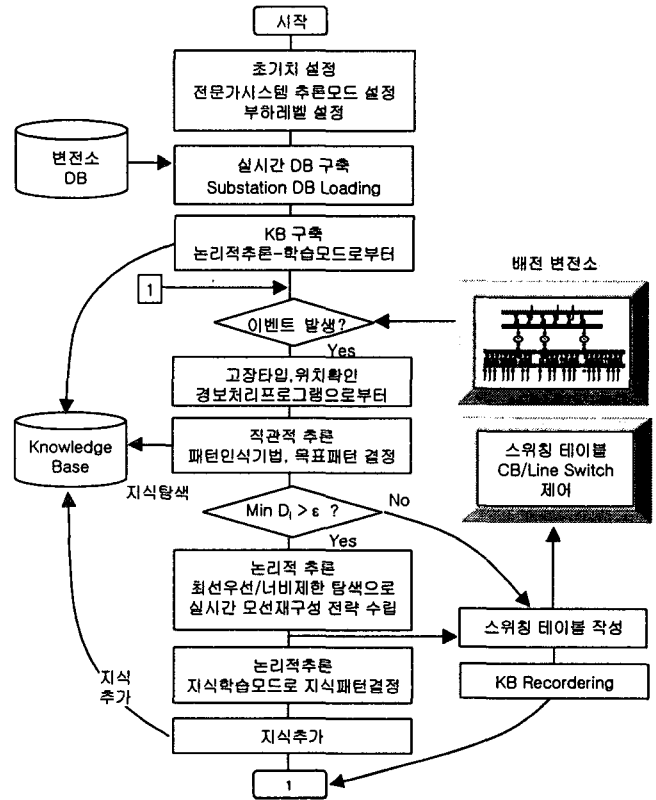


그림 5 문제해결전략  
Fig. 5 Problem solving strategy

단계 7] 논리적 추론모드를 지식학습모드로 한 다음, 새로운 이벤트에 대한 최적 모션 재구성 전략을 생성한다. 그리고 얻어진 새로운 지식을 지식베이스에 학습시킨 후, 단계 4]로 가서 이벤트 감시를 계속한다. 그림 5는 본 연구에서 제안된 지식학습 기능을 가지는 전문가 시스템의 문제해결전략을 보인다.

#### 5. 시뮬레이션 평가

본 연구에서는 자동화된 변전소 운전의 안전성과 효율성을 개선하기 위한 전문가 시스템을 제안, 개발하였다. 전문가 시스템은 윈도우즈 운영환경하에서 비주얼 C++을 이용하여 멀티 태스킹 프로그램으로 개발되었다. 전문가 시스템은 이벤트 환경에 최적하게 추론모드를 설정할 수 있도록 추론기능을 설계하였다. 추론모드는 실시간 모드와 학습모드로 설계되었으며 운영목적은 개폐기 조작횟수 최소화과 부하분담 균등화로 하였다. 특히 최소거리 판별법을 이용한 직관적 추론부에 기반한 실시간 문제해결능력과 변전소 모델로부터 연결성을 추적하여 새로운 지식베이스를 구축하거나 새로운

이벤트에 대한 지식학습능력이 설계되었다. 따라서 전문가 시스템의 유효성과 정확성을 검증하기 위해서 직관적 문제 해결능력과 논리적 문제해결능력이 각각 검증된다. 그림 6은 전문가 시스템 평가를 위해 도입된 대표적인 변전소 구성을 보인다. 모델 변전소는 3개의 주변압기로 구성되며 각각 7개의 배전선로들로 구성된다.

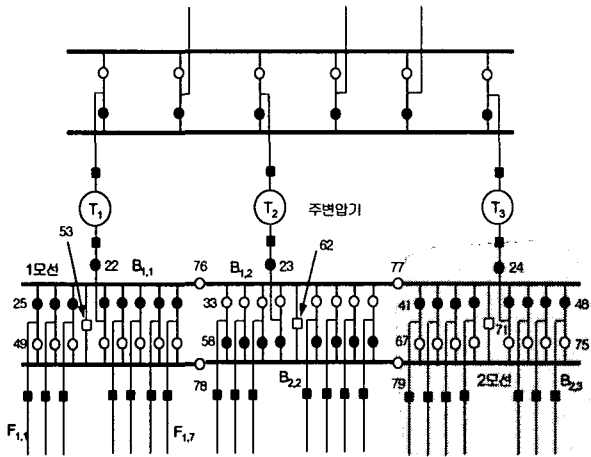


그림 6 시험 변전소  
Fig. 6 Distribution substation for test

5.1 데이터베이스 구축

먼저 주어진 배전 변전소가 모델링되어 데이터베이스가 구축된다. DB는 관계형 모델로 개발되었으며 주변압기, 모선봉, 모선, 개폐기, 배전선 그리고 송전선 테이블로 구성된다. DB에 구축된 주변압기들 T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub>, T<sub>3</sub>의 정격용량은 각각 30,000, 45,000, 30,000이고 최대용량은 각각 40,000, 60,000, 40,000이다. 최대부하[KVA]와 최소부하[KVA]는 각각 30,000, 45,000, 30,000과 10,000, 150,000, 10,000이며 실제부하[KVA]는 각각 30,040, 40,050, 26,020이다. F<sub>i,j</sub>의 정격용량, 최대용량, 피크부하, 최소부하는 각각 7,000[KVA], 10,000 {KVA}, 8,000[KVA] 그리고 2,000[KVA]이다. 그리고 각 선로의 실제부하[A]는 표 2에 보인다. 여기서 F<sub>i,j</sub>는 주변압기 T<sub>i</sub>에 속하는 j번째 배전선로들을 의미한다.

표 2 배전선로들의 실제부하  
Table 2 The actual load of distribution lines

배전선로 [KVA]	F <sub>1,1</sub>	F <sub>1,2</sub>	F <sub>1,3</sub>	F <sub>1,4</sub>	F <sub>1,5</sub>	F <sub>1,6</sub>	F <sub>1,7</sub>
T <sub>1</sub>	156	87	169	235	119	179	146
T <sub>2</sub>	187	109	135	219	97	56	287
T <sub>3</sub>	169	135	125	188	31	128	120

5.2 전문가 시스템의 추론환경과 지식베이스 구축

먼저, 전문가 시스템의 문제해결 능력을 검증하기 위해서 추론엔진의 추론모드를 설정하고 지식베이스를 구축해야 한

다. 이벤트별 추론모드와 운용목적은 이벤트 모의 경우 별로 설정한다. 부하레벨의 수는 4로 구분하고 배전선로들 중 4선로가 독립적인 부하패턴을 가진다는 가정하에서 m과 f의 수를 각각 3과 4로 설정, 학습패턴세트의 규모를 4×4<sup>7</sup>으로 결정한다. 그리고 패턴인식 메커니즘의 유사성 허용오차 ε을 0.05로 설정하고 전문가 시스템의 탐색너비를 1000으로 설정한다. 다음 지식 생성자의 부하레벨기반 패턴생성자, 제어패턴 생성자를 이용하여 지식베이스를 구축한다. 그림 7은 전문가 시스템의 지식 생성자에 의해서 지식베이스내에 구축된 부하패턴 학습세트를 보인다. 본 연구에서 제안된 문제해결 전략과 전문가 시스템의 정확성과 유효성을 검증하기 위해서 주변압기 사고, 모선사고 그리고 주변압기 작업계획 등의 이벤트를 모의한다. 이벤트는 모의는 그림 8에 보인 전문가 시스템의 추론엔진 윈도우상에서 이벤트와 추론모드를 설정함으로써 실행되며 모선재구성 전략은 화면에 표시된다.

그림 7 지식 생성자로부터 생성된 부하패턴  
Fig. 7 Load pattern generated from KB generator

5.3 전문가 시스템의 문제해결 전략 검증

경우 1] 주변압기 T<sub>1</sub> 사고 경우를 모의한다. 이때, 추론모드는 직관적 추론모드이다 이때 전문가 시스템이 제시한 모선 재구성 전략은 표 3에 보인다. 전문가 시스템은 사고 주변압기 T<sub>1</sub>에 속한 선로들 중 {F<sub>1,4</sub>, F<sub>1,6</sub>, F<sub>1,3</sub>, F<sub>1,1</sub>, F<sub>1,5</sub>}를 주변압기 T<sub>2</sub>에 할당하고 나머지 선로세트 {F<sub>1,2</sub>, F<sub>1,7</sub>}을 T<sub>3</sub>에 할당하는 부하분담 전략을 제안한다. 표 3에 보인 순서대로 먼저 라인 스위치 LS들을 조작하여 정전부하를 모선 B<sub>1,1</sub>과 B<sub>1,2</sub>에 분할한 다음 색선 스위치 76, 77을 투입하여 {F<sub>1,2</sub>, F<sub>1,7</sub>}을 주변압기 T<sub>3</sub>에 그리고 색선 스위치 78을 투입하여 {F<sub>1,4</sub>, F<sub>1,6</sub>, F<sub>1,3</sub>, F<sub>1,1</sub>, F<sub>1,5</sub>}를 주변압기 T<sub>2</sub>에 연결하여 전력이 공급되도록 한다.

경우 2] 모선 B<sub>2,2</sub>에서 사고가 발생한 경우를 모의한다. 이때, 추론모드는 준최적 탐색법이며, 운용목적은 부하분담 균등화이다. 이때, 전문가 시스템이 모선 재구성 전략은 표 4에 보인다. 모선 사고의 경우 사고모선과 전기적으로 분리되어야 하기 때문에 하나의 주변압기만이 허용가능하다. 전문가 시스템은 모선 B<sub>2,2</sub>에 대한 사고복구 전략으로 배전선로들 {F<sub>2,1</sub>,

F<sub>2,3</sub>, F<sub>2,2</sub>, F<sub>2,7</sub>)을 주변압기 T<sub>3</sub>에 할당한다. 따라서 나머지 배전선로들 (F<sub>2,4</sub>, F<sub>2,5</sub>, F<sub>2,6</sub>)은 용량 제약조건에 근거하여 T<sub>3</sub>가 분담할 수 없는 정전부하들로 배전 자동화 시스템의 협조를 얻어 타 변전소의 뱅크들에 절체되어야 한다.

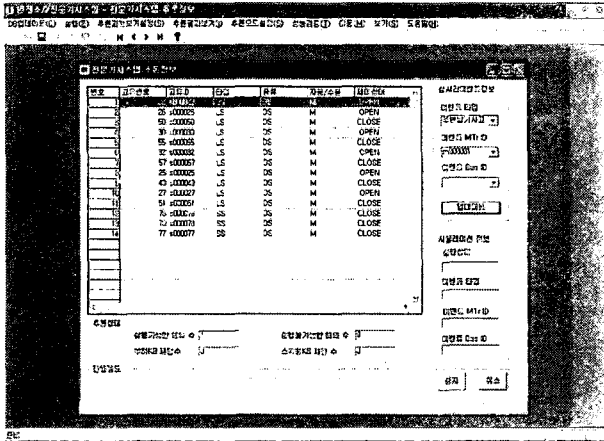


그림 8 전문가 시스템의 추론기관 윈도우  
Fig. 8 Inference engine window of expert system

표 3 주변압기 T<sub>1</sub>의 사고 이벤트를 위한 모선 재구성 전략

Table 3 Bus reconfiguration strategy for a MTr 1 fault

#	고유번호	고유ID	타입	종류	자동/수동	제어상태
1	22	s000022	LS	DS	M	OPEN
2	29	s000029	LS	DS	M	OPEN
3	54	s000054	LS	DS	M	CLOSE
4	31	s000031	LS	DS	M	OPEN
5	56	s000056	LS	DS	M	CLOSE
6	27	s000027	LS	DS	M	OPEN
7	51	s000051	LS	DS	M	CLOSE
8	25	s000025	LS	DS	M	OPEN
9	49	s000049	LS	DS	M	CLOSE
10	30	s000030	LS	DS	M	OPEN
11	55	s000055	LS	DS	M	CLOSE
12	76	s000076	LS	DS	M	CLOSE
13	77	s000077	LS	DS	M	CLOSE
14	78	s000078	LS	DS	M	CLOSE

표 4. 모선 B<sub>2,2</sub> 사고에 대한 모선 재구성 전략

Table 4. Bus configuration strategy for busbar B<sub>2,2</sub> fault

#	고유번호	고유ID	타입	종류	자동/수동	제어상태
1	22	s000022	LS	DS	M	OPEN
2	58	s000064	LS	DS	M	OPEN
3	33	s000038	LS	DS	M	CLOSE
4	60	s000065	LS	DS	M	OPEN
5	35	s000039	LS	DS	M	CLOSE
6	59	s000059	LS	DS	M	OPEN
7	34	s000034	LS	DS	M	CLOSE
8	66	s000060	LS	DS	M	OPEN
9	40	s000035	LS	DS	M	CLOSE
10	76	s000058	LS	DS	M	CLOSE

경우 3] 주변압기 T<sub>3</sub>의 작업정전을 모의한다. 추론모드로

는 실시간 조건이 아니기 때문에 최적한 해를 얻을 수 있는 학습모드 즉, 논리적 추론의 너비제한 전공간 탐색법이 채택되며 운용목적은 부하분담 균등화이다. 이때, 전문가 시스템이 수립한 모선 재구성 전략은 표 5에 보인다. 먼저 섹션 스위치 77, 76을 투입하여 B<sub>1,3</sub>로부터 B<sub>1,2</sub>, B<sub>1,1</sub>을 연결한다. 다음 섹션 스위치 79를 투입하여 B<sub>2,3</sub>와 B<sub>2,2</sub>를 전기적으로 연결한다. 다음 표 5에 보인 순서대로 라인 스위치들을 조작하여 작업 주변압기 T<sub>3</sub>의 부하 중 {F<sub>3,4</sub>, F<sub>3,1</sub>, F<sub>3,2</sub>}를 변압기 T<sub>2</sub>로 절체함으로써 나머지 부하 {F<sub>3,3</sub>, F<sub>3,5</sub>, F<sub>3,6</sub>, F<sub>3,7</sub>}가 T<sub>1</sub>에 할당되도록 한다. 이와같이 전문가 시스템은 무정전으로 작업 주변압기의 부하를 T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub>에 적절하게 분담함으로써 변전소 운전의 안정성을 기할 수 있도록 한다.

표 5 주변압기 T<sub>3</sub>의 작업계획을 위한 모선 재구성 전략  
Table 5. Control strategy for scheduled work of MTr 3

#	고유번호	고유ID	타입	종류	자동/수동	제어상태
1	76	s000076	SS	DS	M	CLOSE
2	79	s000079	SS	DS	M	CLOSE
3	77	s000077	SS	DS	M	CLOSE
4	70	s000070	LS	DS	M	CLOSE
5	44	s000044	LS	DS	M	OPEN
6	67	s000067	LS	DS	M	CLOSE
7	41	s000041	LS	DS	M	OPEN
8	68	s000068	LS	DS	M	CLOSE
9	42	s000042	LS	DS	M	OPEN
10	24	s000024	DS	DS	M	OPEN

경우 4] 랜덤하게 발생되는 약 200개의 부하패턴들에 대한 패턴인식기법과 준최적 탐색법의 정확성을 검증한다. 그림 9는 200개의 다양한 부하패턴들에 대해 패턴인식 기법 그리고 준최적 탐색법에 의한 모선 재구성 전략들의 부하분담 균등화 지표를 보인다. ■, ◆, ▲는 각각 최적해를 기준으로 준최적 탐색법, 패턴인식기법 그리고 최악의 해에 대한 부하분담 균등화 지표의 상대적 차이[MVA]를 보인다.

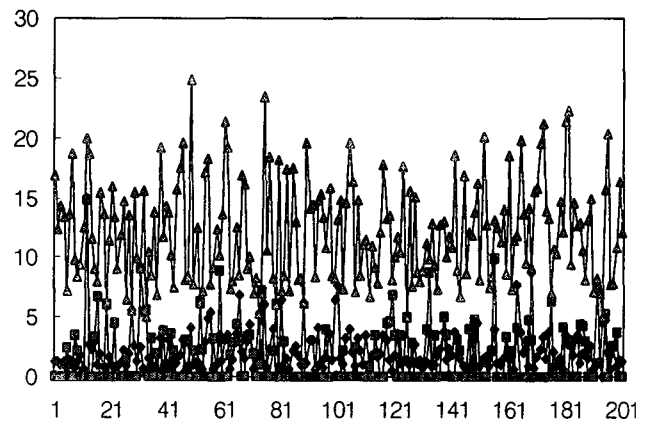


그림 9 채택된 기법들의 부하분담 균등화 지표  
Fig. 9 Load balancing indexes of adopted approaches

준최적 탐색법이나 패턴인식기법이 거의 최적해에 가까운

해를 보임으로써 상당히 만족스러운 성능을 보여준다. 여기서 패턴인식기법은  $\epsilon$ 의 값을 보다 작게 해주면 최적 해도 얻을 수 있다. 이와같이 전문가 시스템은 그림 표 2, 3, 4에서 다양한 이벤트들에 대해서 정확한 모션 재구성 전략을 수립할 수 있음은 물론 그림 11에서 패턴인식기법과 준최적 탐색법이 최적해 또는 최적에 가까운 준최적해를 제시할 수 있음을 보임으로써 제안된 전문가 시스템이 변전소의 다양한 부하조건과 이벤트들에 대해서 정확한 모션 재구성 전략을 수립할 수 있음을 확인할 수 있다.

## 6. 결 론

본 연구에서는 변전소내의 주변압기 사고, 모선사고 그리고 주변압기 작업계획 이벤트 들에 대해서 다중 추론모드, 다중 운영목적하에서 선택적으로 추론하도록 함으로써 그리고 모선 CB, 단로기 그리고 변압기 운전조건등을 종합적으로 고려함으로써 무인화된 운영환경하에서 변전소 운전의 안정성과 효율성을 제고할 수 있는 전문가 시스템을 제안한다. 특히 실시간 전략의 성능을 보장할 수 있는 추론전략들이 채택되었다. 전문가 시스템의 추론엔진은 직관적 추론부와 논리적 추론부로 구성하였는데, 직관적 추론부는 패턴인식기법 중 최소거리 판별법에 기반하여 지식베이스를 탐색하도록 함으로써 실시간 이벤트와 가장 유사한 이벤트에 대응하는 제어전략을 실시간으로 제공할 수 있도록 하였다. 반면에 논리적 추론부는 실시간 모드와 학습모드로 설계하였는데 실시간 모드를 이용, 실시간 제어전략 수립하는 것을 지원함은 물론 직관적 추론 실패시 학습모드에 기반하여 지식베이스를 구축하거나 새로운 지식을 지식베이스에 추가할 수 있도록 하였다. 끝으로, 개발된 전문가 시스템은 주변압기 사고, 모선사고 그리고 주변압기 작업 이벤트에 대한 평가작업에서 정확한 모션 재구성 전략을 수립할 수 있음을 보였다. 또한 다양한 부하조건하의 평가작업에서 실시간 탐색법으로 채택된 패턴인식기법과 준최적 탐색법이 최적에 가까운 목적지표를 보임으로써, 앞으로 자동화된 변전소의 안정성과 효율성 개선에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

### 감사의 글

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력연구원 (R-2003-B-390) 주관으로 수행된 과제임.

### 참 고 문 헌

- [01] C.S. Chang, T.S.Chung, "An Expert System for On-Line Security-Economic Load Allocation on Distribution Systems," IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 5, No. 1, pp 467- 469, January 1990.
- [02] Aoki, K., H. Kuwabara, T. Satoh, and M. Kanezashi, "An Efficient Algorithm for Load Balancing of Transformers and Feeders by Switch Operation in Large Scale Distribution Systems," IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 3, No. 4, pp 1865-1872, October 1988.
- [03] Taylor T. and D. Lubkeman, "Implementation of Heuristic Search Strategies for Distribution Feeder Reconfiguration," IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 5, No. 2, pp 239-246, January 1990.
- [04] Mori S., I.Hata, T.Usui and K. Morita,"Expert System Supporting Substation Service Restoration," ESAP IV, pp 131-136, January 1993.
- [05] Bernard J. P. and D. Durocher,"An Expert System for Fault Diagnosis Integrated in Existing SCADA Systems," IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 9, No. 1, pp 548-554, February 1994.
- [06] Power System Restoration Working Group, "Special Consideration in Power System Restoration : The Second Working Group Report", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 9, No. 1, February 1994.
- [07] Yang, Hong-Tzer, Wen-Yeay Chang, Ching-Lien Huang, "On-Line Fault Diagnosis of Power Substation Using Connectionist Expert System", IEEE Trans on Power Systems," Vol. 10, No. 1, February 1995.
- [08] Kim, H., Y. Ko, and K. H. Jung, "Algorithm of Transferring the Load of the Faulted Substation Transformer using the Best-First Search Method," IEEE Trans. on PWRD, Vol. 7 No. 3, pp 1434-1442 ,July 1992.
- [09] Luger, G.F. and Stubblefield, W.A. ARTIFICIAL INTELLIGENCE AND THE DESIGN OF EXPERT SYSTEM, the Beniman/Cummings Publishing Company, Inc.
- [10] 고유석, "대규모 SCADA 시스템을 위한 실시간 전문가 시스템", 전기학회논문지 Vol. 48A, No. 6, pp 781-788, 1999년 6월.

## 저 자 소 개

### 고 윤 석(高 銳 錫)



1984년 2월 광운대 공대 전기공학과 졸업. 1986년 2월 광운대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 2월 광운대 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1986년 3월~1996년 3월 한국 전기연구소 선임연구원. 1996년 4월~1997년 2월 포스코 경영연구소 연구위원. 1997년 3월~현재 남서울대학교 전자정보통신공학부 부교수.

### 강 태 규(姜 泰 圭)



2003년 2월 광운대학교 제어계측공학과 졸업. 2003년 3월~현재 광운대학교 대학원 제어계측공학과 석사과정.