

# 대규모 시스템의 실시간 컴퓨터 제어를 위한 전문가 시스템

論 文

48A-6-16

## (An Expert System for the Real-Time Computer Control of the Large-Scale System)

高 鈞 錫  
(Yun-Seok Ko)

**Abstract** - In this paper, an expert system is proposed, which can be effectively applied to the large-scale systems with the diversity time constraints, the objectives and the unfixed system structure. The inference scheme of the expert system have the integrated structure composed of the intuitive inference module and logical inference module in order to support effectively the operating constraints of system. The intuitive inference module is designed using the pattern matching or pattern recognition method in order to search a same or similar pattern under the fixed system structure. On the other hand, the logical inference module is designed as the structure with the multiple inference mode based on the heuristic search method in order to determine the optimal or near optimal control strategies satisfying the time constraints for system events under the unfixed system structure, and in order to use as knowledge generator. Here, inference mode consists of the best-first, the local-minimum tree, the breadth-iterative, the tree-iterative, the limited search width/time method. Finally, the application results for large-scale distribution SCADA system proves that the inference scheme of the expert system is very effective for the large-scale system. The expert system is implemented in C language for the dynamic memory allocation method, database interface, compatibility.

**Key Words** : Large Scale System, Real-Time Expert System, Distribution SCADA System, Pattern Recognition

### 1. 서 론

전력 시스템, 철도 시스템, 그리고 개스, 송유 시스템 등과 같은 대규모 시스템들은 일반 수용가들에게 에너지나 교통편의등을 제공하기 위해 도십지등, 수용가 지역을 직접적으로 그리고 아주 폭넓게 경유한다. 따라서, 이들은 경유지역의 건설, 화재, 교통사고, 수용가 신설, 보수유지 그리고 자연재해등으로 인해 막대한 인명피해는 물론 심각한 경제적 손실, 환경오염 문제를 발생시킨다. 시스템 사업자들은 이와 같은 비상상태시 사고과급효과를 최소화하기 위해 컴퓨터 감시제어 시스템(SCADA)을 도입, 운용하고 있다. 일반적으로, SCADA 시스템은 다수개의 타스크들에 의해 수집되는 정보로부터 시스템의 상태를 표시, 진단하고 비상시, 시스템 안전도를 확보하기 위해 제어대상을 실시간으로 제어함으로써 사고과급효과를 최소화할 수 있는 실시간 제어전략 수립기능이 요구된다.[1-2] 그러나, 이들 시스템들에 대한 실시간 제어전략들은 시스템상에서 제어가능한 디바이스들에 대한 조합 최적화(combinatorial optimization) 문제에 속하기 때문에 대규모 시스템에 대한 시스템 재구성 전략을 실시간으로 결

정하는 것은 안전도 측면에서 사실상 불가능하다.[3-4] 이와 같은 조합문제를 해결하기 위해서 전력 및 배전 SCADA, 그리고 파이프 라인 SCADA 등 대규모 시스템들에 대한 전문가 시스템들이 실시간 제어전략으로 발표되었다.[5-10] 전문가 시스템은 휴리스틱 규칙에 근거하여 대규모 탐색공간에 대한 탐색시간을 최소화하고, 비상시 사례중심적으로 신속한 대응 전략을 제시함으로써 시스템의 안전도를 확보할 수 있는 실시간 제어전략으로 유용하게 적용될 수 있다. 그러나, 이들 시스템들은 시스템의 구조변경 빈도가 다르고 실시간 제약조건이 서로 상이할 수 있기 때문에 이들에 공통적으로 적용될 수 있는 체계화된 전문가 시스템 설계기법들은 제안되지 않고 있다. 결과적으로, 이들 시스템들을 포함한 대규모 시스템에 전문가 시스템을 적용하는 문제는 초기에 많은 시간비용과 시행오차를 요구함으로써 전문가 시스템의 적용연구를 어렵게 하고 그 유효성을 저하시키게 된다. 따라서, 본 연구에서는 시스템의 구조변경 빈도가 다르고 실시간 제약조건과 운용목적이 서로 상이할 수 있는 대규모 SCADA 시스템들에 효과적으로 적용될 수 있는 전문가 시스템이 설계된다. 전문가 시스템의 추론기관은 전문가의 직관적 추론과 논리적 추론에 근거를 두어 이중 추론구조로 설계한다. 직관적 추론기능은 운용이나 설계분야에서 기존에 구축된 지식베이스에 근거를 두어 직관적으로 문제를 해결함으로써 대규모 시스템의 이벤트들을 실시간으로 처리할 수 있도록 패턴인식 기법을 이용하여 설계한다. 반면에, 논리적 추론기능은 시스템의 구조를 동적으로 탐색하면서 시스템 이벤트들의 다양한 시간제약조건에 따라 합리적 추론이 가능하도록 최선우선 탐

正 會 員 : 南서울大 電子情報通信工學部 助教授 · 工博  
接受日字 : 1998年 5月 23日  
最終完了 : 1999年 1月 21日

색법, 실시간 처리시 보다 개선된 성능의 제어전략 수립이 가능한 준 최적 탐색법, 너비 반복 탐색법, 반복트리 탐색법 그리고 최적해의 수립이 가능한 탐색너비/시간 제한 소모적 탐색법등이 선택적으로 결정될 수 있는 다중 추론 메카니즘으로 설계한다. 또한, 논리적 추론부는 시스템의 구조가 자주 변경됨으로써 직관적 추론의 유효성이 심각하게 손상되는 경우나 전문가의 경험이 존재하지 않는 새로운 상황에서 새로운 지식의 생성자(knowledge generator)로 활용될 수 있도록 한다. 끝으로, 제안된 전문가 시스템 설계 접근법의 유효성을 검증하기 위해서 대규모 배전 SCADA 시스템에 적용하여 그 결과를 평가한다. 전문가 시스템은 기존 환경과의 인터페이스를 고려하여 C언어로 구현한다.

## 2. SCADA 시스템 운영환경

배전 시스템, 철도 시스템 등 대규모 시스템들은 트리 또는 네트워크 구조로 설계되는데, 시스템의 상태를 실시간으로 감시하기 위해 네트워크상에 감지기가 설치되며, 정상 또는 비정상상태시 주어진 운영목적이 얻어질 수 있도록 시스템을 재구성하기 위해 수십 또는 수백개의 제어대상 디바이스를 설치한다. 표 1은 대규모 SCADA 시스템들에 대한 감시제어 대상을 설명한다.

표 1. 대규모 시스템의 감시제어 대상  
Table 1. Examples of large-scale systems

| 시스템    | 계측대상                                      | 운영목적                               | 제어대상       |
|--------|---|------------------------------------|------------|
| 전력 시스템 | 차단기 상태<br>모선전압, 전류                        | ▽손실 최소화<br>▼공급신뢰도 최대화              | 차단기        |
| 배전 시스템 | 차단기 상태<br>개폐기 상태,<br>고장감지기 상태<br>모선전압, 전류 | ▽손실 최소화<br>▽부하분담 균등화<br>▼공급신뢰도 최대화 | 차단기<br>계폐기 |
| 철도 시스템 | 전철기 상태<br>케도상태<br>신호기 상태                  | ▽수송을 최대화<br>▼안전도 최대화               | 전철기<br>신호기 |
| 가스 시스템 | 밸브 상태<br>가스압                              | ▽가스압 균등화<br>▼공급신뢰도 최대화<br>▼안전도 최대화 | 밸브         |
| 송유 시스템 | 밸브 상태<br>유압                               | ▽유압 균등화<br>▼누유지역 최소화               | 밸브         |

시스템 사업자들은 정상상태시 시스템 운영목적에 따라 시스템을 최적하게 운영하고 비정상상태시 그 사고과급효과를 최소화하기 위해 컴퓨터 감시 제어 시스템이라 불리는 SCADA 시스템을 도입, 운용하고 있다. 시스템 운영자들은 SCADA 시스템 운영환경하에서 계측된 디바이스 상태나 동적 값들로부터 시스템의 상태를 판단한다. 시스템의 상태는 계측된 정보로부터 판별되는데, 전력 SCADA나 가스 SCADA의 경우 네트워크상에서 사고가 발생하면 네트워크 전체에 영향을 미쳐 동적 값들에 심각한 변화를 초래하기 때문에 동시에 많은 정보들이 발생함으로써 정확한 사고유형을 확인하기 어렵다. 또한, 전문지식의 부족이나, 문제의 불확실성, 디바이스나 통신결합, 전혀 예상치 못한 이벤트들의 발생이나 동일한 원인

을 가지는 이벤트들이 발생할 수 있기 때문에 불확실한 상황을 끊임없이 직면하게 된다. 정상상태의 경우, 전력, 배전, 가스 시스템과 같이, 부하에 따라 네트워크의 아날로그 계측치가 변화하는 시스템들은 시스템을 최적하게 운영하기 위해서 주기적인 네트워크 재구성이 이루어질 수 있다. 그러나, 철도 시스템과 같은 특수한 경우는 필요성이 요구되지 않으나, 안전도 측면에서 높은 신뢰성이 요구된다. 반면에, 시스템의 상태가 비정상상태로 확인되면 시스템 운영자들은 실시간 제약조건하에서 주어진 운영목적이 얻어질 수 있도록 신속하고 정확한 시스템 재구성 전략을 수립함으로써 시스템의 안전성을 확보해야 한다. 즉, 전력 시스템, 배전 시스템의 경우는 차단기가 트립되는 경우, 가스 시스템의 경우는 가스압의 현저한 변화가 있는 경우이며, 철도 시스템의 경우는 케도이상이나 전철기, 신호기가 정상적으로 제어되지 않는 경우등이다. 이러한 경우, 일차적으로 시스템 운영자들은 직관적 추론에 의해 제어전략을 수립한다.

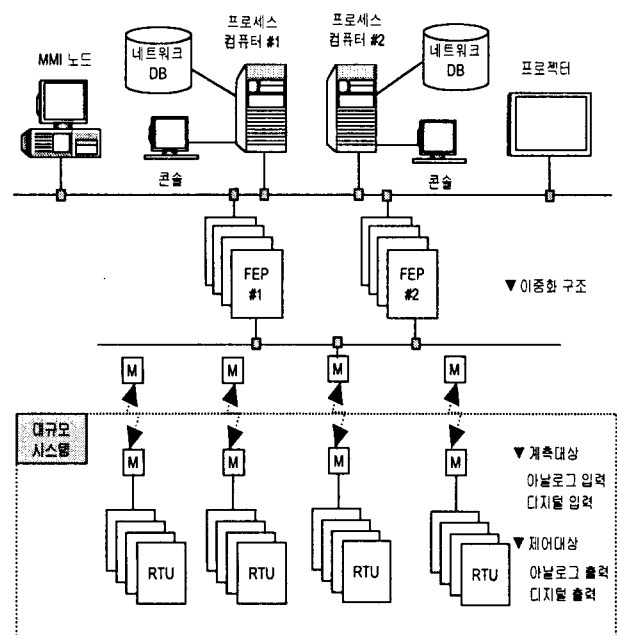


그림 1 대규모 SCADA 시스템 운영환경  
Fig. 1 The operational environments of the large-scale SCADA system

즉, 반복적이거나 오랜 경험에 의해서 축적된 지식에 근거하여 현재의 이벤트와 동일하거나 유사한 사례를 도출하여 대응하는 전략을 수립한다. 반면에, 직관적 추론에 실패하는 경우는 논리적 추론을 실시하게 된다. 논리적 추론은 시스템 트리나 네트워크를 추적하면서 휴리스틱적인 탐색법, 간략화된 추정법 그리고 시스템 해석도구를 이용하여 논리적으로 문제를 해결하는 심층적 추론(deep inference)에 의해서 시스템 재구성 전략을 수립한다. 따라서, 이러한 시스템 운영자들의 문제해결절차와 경험을 효과적으로 지원할 수 있도록 전문가 시스템을 설계한다면, 시스템 운영자의 판단 오류등으로 일어날 수 있는 사고를 미연에 방지하고 정상상태시는 시스

템을 최적하게 운영하고 비상시에는 시스템 제어전략 수립시간을 최소화함으로써 사고과급효과를 최소화할 수 있다. 그림 1은 대규모 SCADA 시스템과 그 운영환경을 보인다. 그림 1에서 FEP는 분산제어를 위해서 도입된 보오드 레벨 컴퓨터로서 시스템의 신뢰도 요구에 따라 다양한 하드웨어 구조를 가지며 분산제어 개념을 실현한다. 특히, 철도 시스템의 경우는 고도의 신뢰도를 보장할 수 있는 구조로 설계된다. 반면에 프로세스 컴퓨터레벨은 시스템 데이터의 관리 및 계층구조를 실현하며 상위 레벨 컴퓨터와 통신프로세스를 통해 데이터 교환 및 제어명령을 실현한다. 따라서, 대규모 시스템 지원을 위한 전문가 시스템은 시스템 운영자들의 문제해결 전략을 컴퓨터로 하여금 효과적으로 모의할 수 있도록 불확실성에 대한 지적 경보 처리 능력을 가져야 하며, 추론기관은 시스템의 구조적 특성에 따라 효과적으로 대응할 수 있도록 직관적 추론과 논리적 추론능력을 가져야 한다. 특히, 논리적 추론은 경험하지 못한 새로운 이벤트가 발생함으로써 직관적 추론에 실패하는 경우에 제어전략을 수립, 시스템의 안전도를 확보할 수 있음은 물론 시스템 구조 변경시에도 새로운 지식을 생성함으로써 기존 지식베이스에 새로운 지식을 추가하거나 갱신할 수 있는 지식 생성자(knowledge generator)의 역할을 할 수 있어야 한다. 실시간 제약조건은 시스템의 특성에 따라 다르게 정의될 수 있다. 배전 시스템의 선로사고, 개스 시스템의 누출사고, 철도 시스템의 전철기 고장등은 CB가 트립되거나 적색신호현시 보임으로써 사고를 차단한 후 시스템 재구성 전략을 처리하기 때문에 하드리얼이거 보다는 소프트리얼에 가깝다. 본 연구에서는 이러한 소프트리얼 문제를 해결하기 위해서 C언어의 연계구조체를 이용하여 연결성을 표시하며, 최소탐색공간을 필요로 하는 최선우선 탐색법 그리고, 추론시간을 시간제약조건내로 설정할 수 있는 시간/너비 제한 탐색법등이 채택된다.

3. 전문가 시스템 설계

추론기관은 시스템 상태판단 결과에 따라 시스템 재구성 전략을 수립하게 되는데, 대규모 시스템에서 이벤트 유형과 발생위치는 다양하며, 또한 구조적 특성과 타스크별 시간제약 조건, 그리고 운영목적이 상이할 수 있다. 따라서, 그림 2에 보인바와 같이, 대규모 시스템 상에서 발생할 수 있는 다양한 시스템 이벤트들에 대한 제어전략을 다양한 탐색전략하에서 추론할 수 있도록 통합된 추론구조로 설계한다.

3.1 직관적 추론

직관적 추론부는 이벤트 발생시 실시간 시스템과 미리 구축된 지식베이스내의 다량의 시스템을 비교하여, 목표상태와 동일하거나 또는 가장 유사한 시스템(nearest neighbors)을 직관적으로 추론할 수 있도록 설계한다. 지식베이스내의 동일한 패턴 확인은 패턴매칭 기법에 의해서 실행되며, 유사한 패턴은 패턴인식 기법에 의해서 탐색될 수 있도록 설계한다. 일반적으로, 시스템의 구간 수가 n, 각 구간에 대한 레벨의 정의가 m(퍼지논리인 경우 구간의 레벨에 대한 언어적 표현이 m)인 시스템의 조합 최적화 문제의 경우, 가능한 패턴 수는 m^n개로 그 수가 폭발적으로 증가하게 되는데, 이때,

인공신경회로망의 경우 이러한 대규모 지식베이스에 대한 학습이 불가능하기 때문에 적용하기 어렵다.[12-14] 따라서, 논리적 추론에 근거한 지식생성자에 의해 얻어지는 최적 제어 전략을 지식베이스에 추가하고, 구축된 지식베이스에 대해서 실시간 시스템에 대한 목표시스템을 신속하게 탐색할 수 있는 최소거리 판별기법이 적용된다.[10-11]

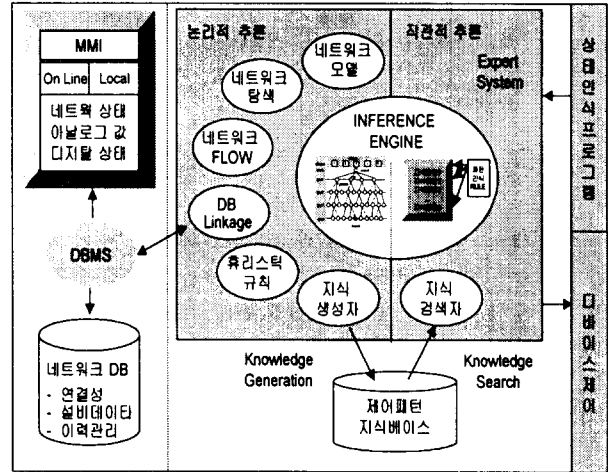


그림 2 전문가 시스템 구조 설계  
Fig. 2 The expert system structure design

3.1.1 패턴매칭 규칙

지식 베이스내의 패턴은 정상 또는 비정상상태하의 목표 시스템과 기정의된 시스템 그리고 대응하는 제어전략을 하나의 지식으로 표시한다. 만약, 실시간 이벤트가 발생하면 추론기관은 연역적 추론규칙에 의해 이벤트를 목표 시스템과 비교하고 동일한 목표 시스템을 확인하면 그 패턴에 대응하는 실행부를 제어전략으로 결정할 수 있다. 이 연역적 추론규칙은 식 (1)로 표시된다.

$$if e \rightarrow p \text{ and } s \rightarrow o \text{ then } c \rightarrow z \dots\dots\dots(1)$$

식 (1)은 “만약, 시스템의 이벤트가 p이고 목표 시스템이 o 이면, 제어전략은 z이다”를 의미한다. 따라서, 이벤트가 발생하면 패턴 매칭 규칙에 의해 시스템 재구성을 위한 제어전략 z를 얻을 수 있다.

3.1.2 패턴인식 규칙

만약, 지식베이스내에 목표 시스템과 동일한 시스템이 존재하지 않는 경우 패턴매칭 규칙을 실패한다. 이런 경우 시스템의 특성에 따라서 목표 시스템과 가장 유사한 패턴을 확인할 필요가 발생하는데, 이 문제는 패턴인식기법에 의해서 해결될 수 있다. 정상 또는 비정상상태하의 목표 시스템과 지식베이스내의 시스템을 선택된 상태변수들의 집합으로 정의하면 가장 유사한 패턴은 식 (2)로 표시되는 최소거리 판별

법에 의해서 탐색될 수 있다. 식 (2)는 “만약, 시스템의 이벤트가 p이고 목표 시스템이 o와 가장 유사하면 제어전략은 z이다”를 의미한다.

$$if\ e \rightarrow p\ and\ max(s \equiv o)\ then\ c \rightarrow z \dots\dots\dots(2)$$

따라서, 규칙 (2)를 이용하여 주어진 지식베이스내에서 가장 최적한 제어전략을 수립할 수 있다. 패턴인식에서 유사성의 정도는 식 (3)으로 표시되는 유클리디언 거리  $d_i$ 에 의해서 판별된다.

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

식 (3)에서,  $s_{ki}$ 는 지식베이스내에 기 구축된 i번째 패턴의 k번째 요소이며,  $o_{ki}$ 는 목표 시스템의 k번째 요소이다.  $w_i$ 는 가중함수로써 예측된 결과의 정확성과 신뢰성을 증가시키기 위해서 도입되는데, 오차거리의 실시간 시스템에 대한 상대적 크기를 나타내기 위해서  $o_{in}^2$ 으로 표시한다.

### 3.2 논리적 추론

논리적 추론은 직관적 추론과는 달리 이벤트 발생 시점에서 시스템 구조를 동적으로 탐색하면서 탐색트리를 발생시켜 시스템 재구성 전략을 실시간적으로 결정할 수 있기 때문에 시스템의 구조변경 빈도가 높은 경우에 아주 효과적이다. 논리적 추론에 의한 시스템 재구성 결정 문제는 초기 시스템 구성 정보로부터 출발하여 다단계 디바이스 탐색과정을 통해 시스템 운영제약조건을 만족하는 새로운 시스템 구성을 얻는 디바이스들에 대한 조합 최적화 문제이다. 따라서, 데이터 구동방식의 탐색트리 구조로 표시할 수 있다. 이 추론모듈은 시스템 초기 설정시나 지식베이스에 유사한 패턴이 존재하지 않는 경우 시간제약조건을 만족하는 제어전략을 신속하게 결정하여 디바이스를 제어함으로써 시스템을 재구성하게 되며, 동시에 지식베이스에 저장하여 지식 생성자의 역할을 하게 된다.

#### 3.2.1 탐색트리구조

논리적 추론을 위한 탐색트리는 노드와 분기(branch)로 구성된다. 초기노드는 이벤트 발생시점의 시스템 구성을 표시한다. 분기는 탐색해야 할 각각의 제어후보를 표시하며 깊이 1 이하의 노드들은 그 분기로 표시되는 제어후보 디바이스들에 대한 상태제어후의 시스템 구성을 표시한다. 그림 3은 시스템 재구성을 위한 탐색트리를 보이는데, ○는 탐색노드를, ●는 목표노드(최종 시스템 재구성)를 나타낸다. 만약, 이벤트 발생하면 전문가 시스템은 문제해소를 위해 제어대상을 탐색하게 되는데, 4현제상태에서 4개의 제어후보 디바이스가 존재한다면, 초기노드는 깊이 1에 4개의 노드그룹을 생성한다. 먼저, 전문가 시스템은 각각의 분기에 대해 휴리스틱 비용 @를 평가하는데, 이것은 휴리스틱 규칙들에 의한다. 이 휴리스틱 규칙들은 시스템별로 전문가 집단으로부터 얻을 수 있는 경험적 지식이거나 직관적인 규칙들이다. 다음, 시스템

운영제약조건이 만족여부가 검증되며, 만약, 제약조건을 위반하는 경우 노드의 확장은 중단된다. 반면에 각 노드에서는 문제가 완전히 제거되었는지를 검증하여 목표노드를 확인한다. 만약 문제가 제거되지 않은 경우 깊이 2의 노드들로 확장된다. 이와같이 상위노드(parent node)로부터 하위노드 확장은 목표노드를 만날때까지 계속되는데, 대규모 시스템의 경우 이벤트들이 다양한 시간제약조건을 요구하기 때문에 탐색공간을 선택적으로 제한할 수 있는 다중 탐색전략이 바람직하다.

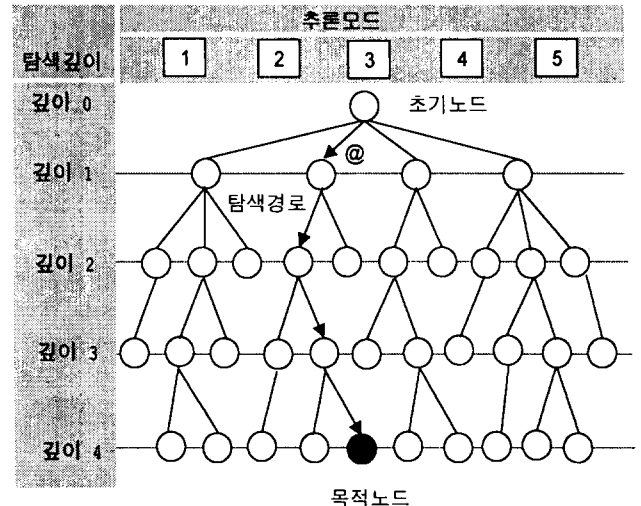


그림 3 논리적 추론을 위한 탐색트리 구조  
Fig. 3 The structure of search tree

#### 3.2.2 다중추론전략

본 연구에서는 대규모 시스템 이벤트들의 다양한 시간제약조건과 운영목적을 만족할 수 있도록 논리적 추론을 위해 5개의 다중탐색모드를 설계한다.

##### ① 최선우선탐색

탐색트리의 매 깊이에서 휴리스틱 평가비용이 최소가 되는 분기를 우선 선택하며, 첫 번째 목표노드가 발견되면 탐색을 종료한다. 최소의 탐색비용으로 실시간 탐색전략으로 바람직하다.

##### ② 준 최적 탐색법

깊이 0의 모든 분기들에 대해서 최선우선탐색법을 반복 적용하며, 얻어진 목표노드들 중 최소비용의 목표노드를 최소 탐색비용으로 함으로써 최적해에 대한 수렴률을 개선한다.

##### ③ 너비반복 탐색

먼저, 깊이 0의 모든 분기들 중 최소비용의 한 분기를 선택하여 탐색한다. 다음, 목표노드를 만날때까지 그 노드의 분기에 대해서만 탐색을 계속한다. 그러나, 만약, 이 과정에서 목표노드 탐색에 실패하는 경우 다시 깊이 0로 복귀하여 탐색너비를 2로 확장하여 탐색너비 1의 과정을 반복한다. 그림 4는 이 탐색너비 2일때의 탐색경로를 보인다. 이 과정은 목표노드를 만날때까지 반복한다.

④ 반복트리 탐색

먼저, 주어진 시스템 초기 운영계약 조건을 가지고 위의 탐색과정을 실행한다. 그러나, 이 조건에서 문제 해소에 실패하는 경우 초기 노드로 복귀한 다음 다시 새로운 운영계약 조건을 가지고 탐색과정을 반복한다.

⑤ 탐색너비/시간제한 탐색

이 탐색법은 주어진 탐색너비나 시간제한 조건내에서 가능한 모든 노드를 탐색하여 목표노드를 확인하며 최소비용의 목표노드를 최종 목표노드로 한다. 이때, 이 목표노드는 시간 제한을 없애는 경우 최적해일 수 있으며, 직관적 추론을 위한 지식 생성자로서 활용될 수 있다.

3.3 지식베이스 설계

지식베이스는 전문가 시스템의 실시간 제어전략 수립기능을 지원할 수 있도록 포인터 기능을 활용하여 연계되도록 설계된다. 타입( $E_{Type}$ )은 시스템 이벤트의 유형을 설명한다. 일단 사고가 발생하면, 해당하는 시스템의 이벤트로 가서 동일한 패턴을 탐색한다. 다음 이벤트 포인터에 의해 실시간 이벤트에 해당하는 지식베이스의 포인터로 가서 동일한 이벤트에 속하는 이벤트 패턴들에 대해 패턴매칭이나 패턴인식 기법에 의해 실시간 시스템과 동일하거나 유사한 패턴을 탐색하며, 발견하면 대응하는 시스템 재구성전략을 제어전략으로 결정한다. 반면에, 만족하지 않는 경우 2가지로 분류되는데, 패턴매칭인 경우 논리적 추론에 의해 실시간 이벤트  $E_{Type}$ ,  $E_n$  그리고 이벤트 패턴  $PT_n$ 에 대한 제어전략  $CS_n$ 을 취해서 새로운 지식으로 추가하며, 패턴인식의 경우는 실시간 이벤트  $e_{Type}$ ,  $e_m$  그리고 이벤트 패턴  $PT_m$ 에 대한 제어전략  $CS_m$ 을 취해서 그림의 하단부에 보인바와 같이 지식베이스에 추가한다. 그림 4는 전문가 시스템의 지식베이스 구조와 직관적 추론, 그리고 논리적 추론에 의한 지식 생성과정을 설명한다.

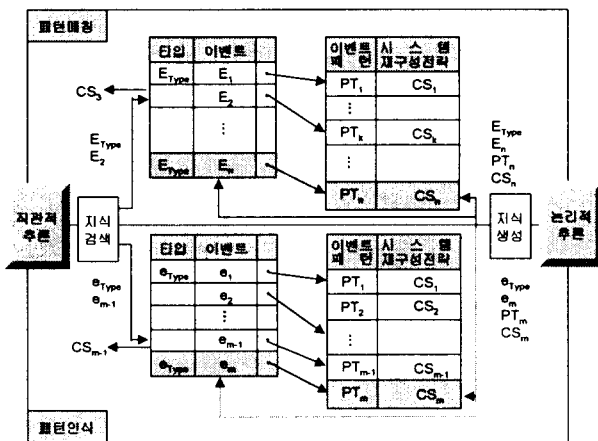


그림 4 지식베이스의 구조  
Fig. 4 The structure of the knowledge base

4. 문제해결전략

전문가 시스템의 문제해결전략은 다음과 같다. 먼저, 적

용 시스템의 특성에 맞는 추론모드 그리고 시간제한조건을 결정한다. 다음, DB로부터 시스템 데이터를 검색하여 C언어의 연계 구조체로 표시되는 실시간 연결성 모델로 표시한 후 이벤트를 감시한다. 그림 4는 전문가 시스템의 문제해결 전략을 설명한다. 만약, 이벤트가 발생하면, 직관적 추론에 들어간다. 만약, 지식베이스내에서 실시간 시스템과  $\min(D_i) > 0.1$ 의 허용범위내에 드는 지식패턴이 발견되는 경우 제어전략으로 결정하나 허용범위를 초과하거나 존재하지 않는 경우 논리적 추론으로 들어간다. 논리적 추론부는 사용자가 시스템 설정시에 시스템 시간제한 조건에 따라 결정한 추론모드에 따라 추론을 하게 된다. 만약, 실시간 조건이 엄격한 경우 최선우선 탐색법이나 시간제한조건이 설정되는 시간/너비 제한 탐색법이 논리적 추론이 선택되었을 것이다. 그리고 그 추론결과에 따라 제어대상을 제어하여 시스템을 재구성하게 되며, 제어 작업이 완료되면, 직관적 추론이나 논리적 추론의 경우가 비교된다. 만약 논리적 추론의 경우 실시간 시스템과 유사한 목표 시스템이 존재하지 않는 경우이므로 지식생성자가 실행된다.

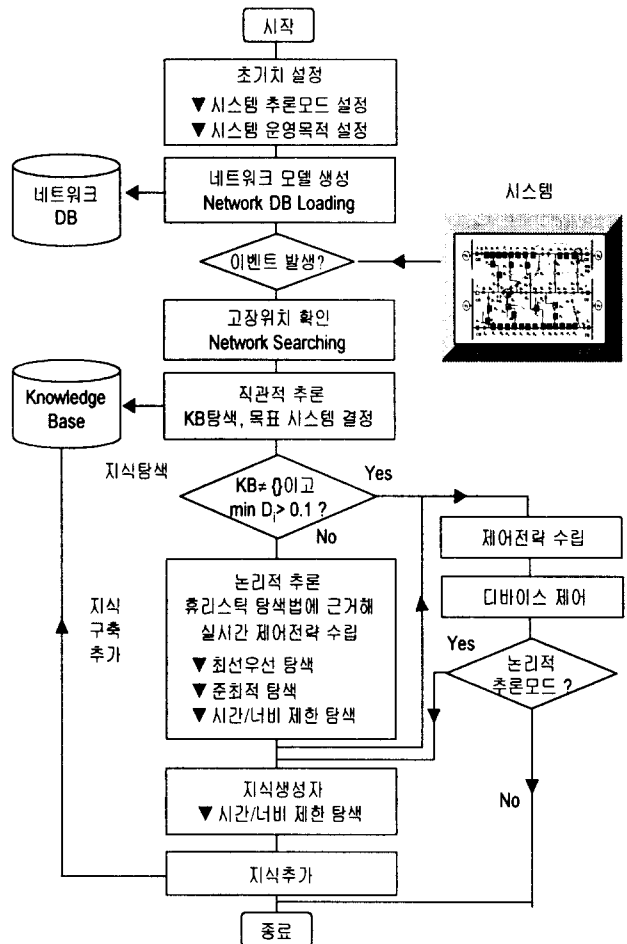


그림 5 문제해결전략  
Fig. 5 The problem-solving strategy

지식생성자는 정상상태에서 가급적 최적해가 얻어질 수 있도록 충분한 시간이 설정되는 시간/너비 제한 탐색법에 근거

해서 이벤트에 최적한 제어전략을 수립하게 된다. 그리고, 이 제어전략은 지식생성모듈에 의해이벤트 정보와 조합되어 지식베이스에 새로운 지식으로 추가된다. 그림 5는 전문가 시스템의 문제해결 전략을 설명한다.

5. 적용 사례

본 연구에서는 변전소내의 주변압기들로부터 인출되는 70-80개의 배전선로들상의 존재하는 수백개에 이르는 개폐기들을 감시 제어해야 하는 배전 SCADA 시스템에 대한 적용예를 통해 제안된 추론기능의 유효성과 그 적용방법을 설명한다.[18]

5.1 배전 시스템 모델

배전계통은 수직상 구조로 설계되며, 전력공급 신뢰도를 확보하기 위해 다분할 다연계 구조로 설계된다.[18] 또한, 농어촌 지역의 선로는 가공선로로 구성되나, 도심지역의 선로는 대부분이 지중계통이거나 가공계통을 일부 포함하는 혼계통계통구성을 보인다. 그림 6은 대표적인 배전계통 모델을 보인다.

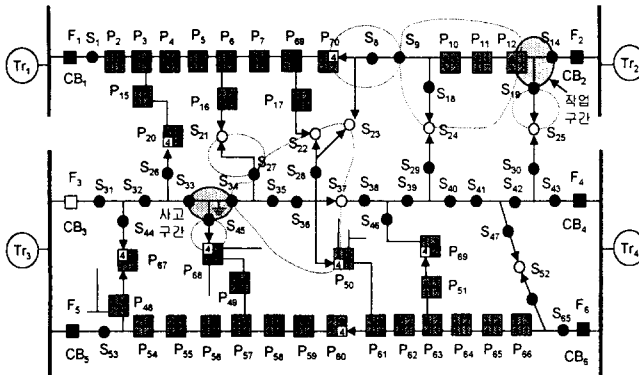


그림 6. 대표적인 배전계통 모델  
Fig. 6 Typical distribution system model

그림에서,  $F_i$ 는  $i$ 번째 배전선로를  $CB_i$ 는  $i$ 번째 선로 보호용 차단기를 나타내며,  $S_i$ 는  $i$ 번째 가공용 개폐기를 나타낸다.  $P_i$ 는  $i$ 번째 지중용 다회로 개폐기를,  $P_{ij}$ 는  $P_i$ 의  $j$ 번째 회로 개폐기를 표시하는데, 최대 4개의 분기회로를 가질 수 있기 때문에  $j=1-4$ 번으로 구성된다. 그림에서, □는 개방된 차단기나 개폐기를, ○는 개방된 개폐기를 표시하며, ■는 투입된 차단기나 개폐기를, ●는 투입된 개폐기를 표시한다. 화살표 표시는 계통의 절분점을 표시하는데, 절분점상의 개폐기들은 정상상태시 개방상태를 유지함으로써 계통을 수직상 구조로 유지하나, 비상시 투입되어 건전정전구간이 타 선로로부터 전력을 역송받도록 하기 때문에 연계용 개폐기라 한다.

5.2 추론모드 결정

배전 시스템상에서는 선로상에서 선로사고, 작업정전 이벤트가 발생할 수 있다. 본 연구에서는 제안된 전문가 시스템의 유용성을 검증하기 위해서 선로사고 및 작업정전에 대해

서 사고모의를 평가한다. 일단 배전 시스템 선로상에서 사고가 발생하면 시스템의 안전도를 보장하기 위해서 보호협조조직이 동작한다. 이때, 보호협조 조직은 10 사이클 이내에 사고를 제거해야만 하는 하드리얼 시스템인데, 로컬제어에 의해서 이루어진다. 보호협조 조직에 의해 CB가 차단되면 SCADA 시스템의 CB 감시정보로부터 고장을 감지하고 다음, 고장위치를 확인한 다음 고장구간 최소화하의 운용목적하의 제어전략을 수립하게 된다. 이때 전문가 시스템은 SCADA 정보로부터 제어전략을 수립하게 되는데, 이미 보호협조 조직에 의해서 CB가 차단됨으로써 안전도가 확보된 상태이기 때문에 이 문제는 하드리얼 문제가 아니라 가급적 시간제약조건을 맞추도록 설계함으로써 전원공급 신뢰도를 높이고자 하는 소프트리얼 문제이다. 본 연구에서는 이러한 소프트리얼 문제를 해결하기 위해 탐색공간을 최소화함으로써 탐색시간비용을 최소화할 수 있는 최선우선 탐색법을 추론모드로 선택한다. 시뮬레이션 결과는 선택된 추론모드로 시간 제약 조건(3초)을 만족하면서 만족할 만한 운용목적을 가지는 제어전략을 수립할 수 있음을 보인다.

5.3 시뮬레이션 결과

경우1)  $F_3$ 상의 사고정전 이벤트(사고구간 표시) 모의 선로  $F_3$ 상의 사고구간에서 사고가 발생하였을 때 전문가 시스템은 1차적으로 직관적 추론을 시도하게 되는데, 시스템 설치시에 지식베이스는 공집합이므로 논리적 추론을 시도한다. 이때, 선택된 추론모드가 최선우선 탐색법인데, 운용목적으로 부하분담 균등화가 선택되는 경우 전문가 시스템은 부록에 보인 부하분담 균등화와 관련된 휴리스틱과 운용목적하에서 문제를 풀게된다. 이 문제는 그림 7에 보이는 바와 같이 건전 정전구간들에 대한 구간 조합 최적화 문제이기 때문에, 가능한 조합들은 그림 7에 보인바와 같이 많은 수가 존재할 수 있다.

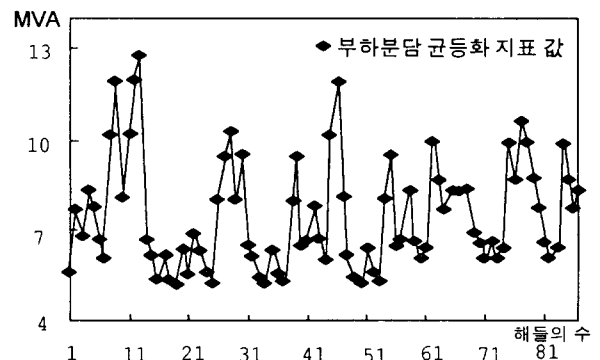


그림 7 사고정전 이벤트에 대한 시스템 재구성 전략들  
Fig. 7 Feasible solutions for a line fault event

그림 7에서, ◆는 가능한 모든 제어전략들에 대한 시스템 부하분담 균등화 지표를 나타내는데, 전문가 시스템은 최선우선 탐색 모드에 근거하여 첫 번째 해를 실시간 해로 결정하

게되며, 그림은 실시간 해가 최적해와 비교해서 near optimal 해임을 보인다. 제어전략은 표 2에 보인다.

표 2 사고정전 이벤트에 실시간 제어전략  
Table 2 Control strategy for a line fault event

| 번호 | 제어목적   | 개폐기 ID            | 제어모드 | 개폐기 타입 |
|----|--------|-------------------|------|--------|
| 1  | 고장구간분리 | S <sub>33</sub>   | off  | GAS개폐기 |
| 2  | 고장구간분리 | S <sub>34</sub>   | off  | GAS개폐기 |
| 3  | 고장구간분리 | S <sub>45</sub>   | off  | GAS개폐기 |
| 4  | 공급 재개  | CB <sub>3</sub>   | on   | 차단기    |
| 5  | 정전절체   | P <sub>68,4</sub> | on   | PAD개폐기 |
| 6  | 정전절체   | S <sub>77</sub>   | off  | GAS개폐기 |
| 7  | 정전절체   | S <sub>71</sub>   | on   | GAS개폐기 |
| 8  | 정전절체   | S <sub>72</sub>   | on   | GAS개폐기 |

경우 2) F<sub>2</sub>상의 작업정전 이벤트(작업구간 표시) 모의

본 모의경우는 무정전 상태에서 작업정전구간을 제외한 선로부하를 타선으로 절체한 후 작업구간을 분리하는 작업정전 문제이다. 이때, 작업정전 문제는 부하절체시 연계용 개폐기를 우선투입하고 구간 개폐기를 개방함으로써 무정전 부하절체를 시도하게 된다. 전문가 시스템은 지식베이스에 경험적 지식이 구축되어 있지 않으므로 논리적 추론에 근거하여 선택된 선로손실 최소화 운용목적하에서 문제해결을 시도한다. 시스템 운용목적이나 휴리스틱은 부록에 보이는데, 이 환경하에서 논리적 추론의 결과는 그림 8의 첫 번째 해(실시간 해)이며, 그림 6의 2번째 배전선로, F<sub>2</sub>상에서 점선으로 표시되는 3개의 타원들의 조합으로 표시된다.

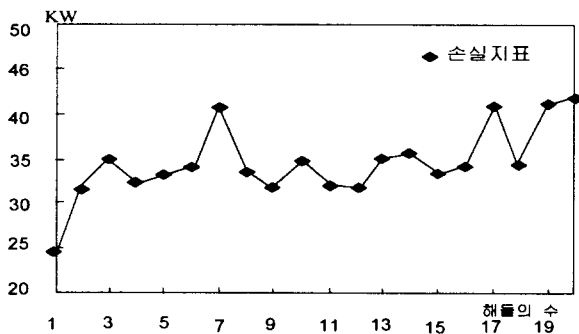


그림 8 작업정전 이벤트에 대한 시스템 재구성 전략들  
Fig 8 Feasible solutions for a scheduled outage event

그림 8에서 ◆는 가능한 모든 제어전략들에 대한 시스템 부하분담 균등화 지표를 나타내는데, 실시간 시스템 재구성 전략이 최적해임을 확인할 수 있다. 전문가 시스템에 의해서 제안된 실시간 해의 제어전략은 표 3에 보인다. 본 연구는 적용으로써 배전 SCADA 시스템에 대한 적용을 시도하였다. 모의 결과는 사용자의 선택에의해서 선택된 추론모드가 1초 미만내에 실시간 해를 제시함으로써, 배전 시스템의 소프트리

얼 조건을 만족하면서 near optimal해를 효과적으로 결정할 수 있음을 보인다.

표 3 작업정전 이벤트에 대한 제어전략  
Table 3 Control strategy for a scheduled outage

| 번호 | 제어목적    | 개폐기 ID            | 제어모드 | 개폐기 타입 |
|----|---------|-------------------|------|--------|
| 1  | 무정전부하절체 | P <sub>70,4</sub> | on   | PAD개폐기 |
| 2  | 무정전부하절체 | S <sub>9</sub>    | off  | GAS개폐기 |
| 3  | 무정전부하절체 | S <sub>24</sub>   | on   | GAS개폐기 |
| 4  | 무정전부하절체 | P <sub>12,1</sub> | off  | PAD개폐기 |
| 5  | 무정전부하절체 | S <sub>25</sub>   | on   | GAS개폐기 |
| 6  | 무정전부하절체 | S <sub>19</sub>   | off  | GAS개폐기 |
| 7  | 작업구간분리  | S <sub>14</sub>   | off  | GAS개폐기 |

### 6. 결론

본 연구에서는 대규모 SCADA 시스템에 효과적으로 적용될 수 있는 전문가 시스템의 구조를 설계하였다. 전문가 시스템의 추론기관은 대규모 SCADA 시스템의 운용제약조건을 효과적으로 지원할 수 있도록 직관적 추론 기능과 논리적 추론기능이 연동되도록 설계하였다. 직관적 추론기능은 연역추론 기법과 패턴인식 기법을 이용하여 설계하였다. 반면에, 논리적 추론기능은 시스템의 구조가 자주 변경되는 구조하에서 시스템 이벤트들의 시간제약조건에 따라 합리적 추론이 가능하도록 휴리스틱에 근거한 다중 추론 메카니즘으로 하였다. 다음, 배전 SCADA 시스템에 대한 구현 및 적용결과 평가를 통해 시간제약조건을 서로 달리하는 다양한 시스템 이벤트들에 대해서 다중 탐색전략에 따라 최적 또는 준최적의 제어전략을 실시간적으로 수립할 수 있음을 확인하였다. 그러나, 대규모 SCADA 시스템들은 다양한 특성을 지닐 수 있다. 비록, 실험평가에서 대규모 배전 SCADA 시스템에 효과적으로 적용되었지만 다른 SCADA 시스템들에 적용하기 위해서는 많은 연구가 필요하다. 특히, 논리적 추론이 효과적으로 적용될 수 있기 위해서는 시스템에 대한 네트워크 모델과, 시스템 운용제약조건, 네트워크 FLOW, 휴리스틱 탐색전략, 시간제약조건 등이 보다 정확하게 분석되어야 한다.

### 참고 문헌

- [1] T. W. Kay, "Microcomputer-Based SCADA at Commonwealth Edison Company", IEEE Computer Applications in Power, pp. 4-8, April 1988.
- [2] W. J. Ackerman and W. R. Block, "Understanding Supervisory Systems", IEEE Computer Applications in Power, pp. 37-40, October 1992.
- [3] W. B. Gevarter, "Expert System :Limited but Powerful", IEEE Spectrum, pp. 39-45, August 1993.
- [4] R. P. Schulte and G. B. Sheble, "Artificial Intelligence Solutions to Power System Operating Problems", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 2, No. 4, pp. 920-926, November 1987.
- [5] S. Moriguchi, T. Taniguchi, et. al., "A Large-Scale

SCADA System with Real-Time Knowledge-Based Functions", ESAP, pp. 21-27, July 1989.

[6] E. Chen and H. Ebenhoh, "The Implementation and Evoution of a SCADA System for a Large Distribution network", IEEE Trans. on Power System, Vol. 7, No. 1, pp. 320-326, Feb. 1992.

[7] C. H. III Heywood, "Pipe Line SCADA Systems : Yesterday, Today, Tomorrow", Pipe Line Ind, Vol. 67, No. 2, pp. 46,48,50, Aug.1987.

[8] A. Wike, "SCADA : Western European Style", Pipe Line Ind., Vol. 64, No. 5, pp 19-20, May 1986.

[9] K.M. Tsang, C. S. Chang, "Expert System in Station Management in Mass Transit. Railway Corporation", Hong Kong Engineer Vol. 21, No. 3, pp. 11-13,15, March 1993.

[10] D. Feucht, "Pattern Recognition : Basic Concepts and Implements", Computer Design, pp.57-68, December 1968.

[11] E.C. McClelland, P.R. Van Horne, "Fast Voltage Predication using a Knowledge based Approach", IEEE Trans. PAS, Vol. 102, No. 2, Feb. 1983.

[12] R. P. Lippmann, "An Introduction to Computing with Neural Nets, in V. Vemuri(Ed.), Artificial Neural Networks : Theoretical Concepts", IEEE Computer Society, 1988.

[13] H. Kim, Y. S. Ko and K. H. Jung, "Artificial Neural-Net Based Feeder Reconfiguration for Loss Reduction", IEEE Trans. on PWRD. Vol. 8, No. 3, pp. 1356-1366, July 1993.

[14] Y.S. Ko, et. al., "Artificial Neural Network Based On\_line Real Time Control Strategies for the ULTC of Substation Transformers", ESAP, pp 519-524, January 1993.

[15] Y. Y. Hsu, C. H. Cheng, "Design of Fuzzy Power System Stabilizers for Multimachine Power Systems", IEE Proceedings, Vol. 137, No. 3, pp.233-238. May 1990.

[16] 고윤석, 김호용, 장정태, 하복남, 이기서의 1인, "효율적 휴리스틱에 근거한 실시간 배전 SCADA 전문가 시스템", 전기학회논문지, Vol. 46, No.4, pp.461-467, 1995년.

부 록

1. 시스템 운영목적

1) 부하분담 균등화

$$Q_B = \sum_{i \in T} (TIL_i - TAL_i)^2 + \sum_{i \in F} (FIL_i - FAL_i)^2$$

여기서, T, F : 배전 시스템의 주변압기, 선로들의 집합

TAC<sub>i</sub>, FAC<sub>i</sub> : T<sub>ij</sub>, F<sub>j</sub>의 공급허용용량,

T, F : 시스템내의 주변압기, 배전선로들의 집합

2) 선로손실 최소화

$$P_L = \sum_{i \in T} \sum_{j=1}^{L_i} \frac{P_{ij}^2 + Q_{ij}^2}{V_{ij}^2} * r_{ij}$$

여기서, L<sub>ij</sub> : i번째 배전선로의 j번째 선로구간

P<sub>ij</sub>, Q<sub>ij</sub>, r<sub>ij</sub>, x<sub>ij</sub> V<sub>ij</sub> : L<sub>ij</sub>의 유효, 무효전력, 저항, 리액턴스, 모션전압

2. 휴리스틱 규칙(HR : Heuristic Rule)

1) 부하분담 균등화를 위한 휴리스틱

부하절체시 부하분담 변화분  $-2\sigma(\Delta T_s - \Delta T_r + \Delta F_s - \Delta F_r) + 4\sigma^2$  최소가 되는 부하절체 후보를 우선선택한다.[16]

2) 손실최소화를 위한 휴리스틱

부하절체시 손실 변화분,  $Re(2\Delta I_{sp}(E_q - E_p)*) + (\Delta I_{sp})^2$  R<sub>loop</sub>가 최소가 되는 부하절체 후보를 우선 선택한다.[16]

표 1 주변압기 용량[KVA]

| ID<br>[KVA] | T <sub>1</sub> | T <sub>2</sub> | T <sub>3</sub> | T <sub>4</sub> |
|-------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| 정격용량[KVA]   | 30,000         | 45,000         | 45,000         | 30,000         |
| 최대용량[KVA]   | 40,000         | 60,000         | 60,000         | 40,000         |
| 실제부하[KVA]   | 28,000         | 37,000         | 33,100         | 21,700         |

표 2 선로구간 전류[A]

| 구간<br>번호 | 개폐기 ID  | 구간<br>부하 | 구간<br>번호 | 개폐기 ID  | 구간<br>부하 |
|----------|---|----------|----------|---|----------|
| 1        | CB <sub>2</sub> , S <sub>14</sub>                   | 115      | 10       | CB <sub>3</sub> , S <sub>31</sub>                                     | 185.0    |
| 2        | S <sub>14</sub> , S <sub>19</sub> P <sub>12,1</sub> | 110      | 11       | S <sub>31</sub> , S <sub>44</sub> , S <sub>32</sub>                   | 179.3    |
| 3        | P <sub>11,1</sub> , P <sub>12,4</sub>               | 86       | 12       | S <sub>32</sub> , S <sub>26</sub> , S <sub>33</sub>                   | 149.4    |
| 4        | P <sub>10,1</sub> , P <sub>11,4</sub>               | 80.3     | 13       | S <sub>33</sub> , S <sub>45</sub> , S <sub>34</sub>                   | 131.0    |
| 5        | P <sub>10</sub> , S <sub>18</sub> , S <sub>9</sub>  | 58.3     | 14       | S <sub>34</sub> , S <sub>27</sub> , S <sub>35</sub>                   | 94.2     |
| 6        | S <sub>9</sub> , S <sub>8</sub>                     | 36.9     | 15       | S <sub>35</sub> , S <sub>36</sub>                                     | 78.3     |
| 7        | S <sub>8</sub> , S <sub>23</sub> , P <sub>70</sub>  | 22.4     | 16       | S <sub>36</sub> , S <sub>37</sub> , S <sub>28</sub> , P <sub>50</sub> | 43.9     |
| 8        | S <sub>18</sub> , S <sub>24</sub>                   | 4.5      | 17       | S <sub>44</sub> , P <sub>67,4</sub>                                   | 5.5      |
| 9        | S <sub>19</sub> , S <sub>25</sub>                   | 10.4     | 18       | S <sub>28</sub> , S <sub>22</sub> , S <sub>23</sub>                   | 17.6     |

저 자 소 개



고 윤 석(高 鈞 錫)

1984년 광운대 공대 전기공학과 졸업.  
1986년 동대학원 전기공학과 졸업(석사).  
1996년 동대학원 전기공학과 졸업(공학박).  
1986년~1996년 한국전기연구소 선임연구  
원. 1996년~1997년 포스코경영연구소 연

구위원. 1997년~현재 남서울 대학교 전자공학과 조교수.

Tel : 0417-580-2115

E-mail : ysko@nsu.ac.kr