

## An Expert System for Fault Restoration using Tree Search Strategies in Distribution System

金世鎬\*·崔炳允\*\*·文永鉉\*\*\*

(Se-Ho Kim·Byoung-Yoon Choi·Young-Hyun Moon)

**Abstract**—This thesis investigates an expert system(ES) to propose fault restoration plan by utilizing tree search strategies. In order to cope with an extensive amount of data and frequent breaker switching operations in distribution systems, the database of system configuration is constructed by using binary trees. This remarkably enhances the efficiency of search algorithm and makes the proposed ES easily adaptable to system changes due to switching operations. The rule-base is established to fully utilize the merits of tree-structured database. The inferring strategy is developed mainly based on the best-first search algorithm to increase computation efficiency. The proposed ES has been implemented to efficiently deal with large distribution systems by reducing computational burden remarkably compared with the conventional ES's.

**Key Words** : Expert System, Binary Tree, Tree Structure, Best-first Search, Fault Restoration, Distribution system

### 1. 서 론

배전시스템의 운용은 기술적인 판단이 요구되며 운용방법이 전력의 질적향상과 에너지절감, 사고 예방 또는 사고과급 방지에 미치는 영향이 절대적이므로 숙련된 운전원의 확보가 매우 중요하나 방대한 규모와 설비의 현대화로 인하여 전문지식이 더욱 세분화, 복잡화되어 숙련된 운전원의 확보가 어려운 실정이다. 따라서 전문가의 경험적인 지식을 갖춘 전문가시스템의 개발 필요성이 증가되고 있다.

지금까지 배전계통에서 전문가시스템에 대한 연구는 다음과 같다. 1988년 K. Aoki등[1]이 사

고발생시 스위칭 조작에 의한 부하절환 알고리즘을 제안하였고, Liu등[2]이 전력손실 감소와 사고복구를 위한 운전지원 전문가시스템을 제안하였으나 2회이상 절환시 절환의 기준점을 고정시킴으로써 다양한 부하절환안을 검토하는 방안이 발표되었으나[10] 철저한 탐색기법을 사용하므로써 실제통에 사용하기에는 시간이 많이 걸리는 단점이 있다.

본 논문에서는 수지상 구조의 배전계통이 트리 형태인 점에 착안하여 데이터 베이스를 트리로 구성하여 데이터의 참조나 계통추적시에 탐색효율을 향상시키고자 하였다. 트리 형태는 인공지능에 많이 사용되는 2진 트리(binary tree)를 사용하여 데이터의 삭제나 추가 등이 용이하도록 하였으며, 많은 분기 선로가 존재하는 경우에는 너미(dummy) 뿌리를 가정하여 항상 2진 트리구조를 유지하도록 하였다. 또한 개폐기 조작 등의 계통 변화에 신속하게 대응하기 위하여 개폐기 조작 후에 변경되는 트리에 대해서는 조작 개폐기 사이의 경로만 탐색하여 경로의 역방향으로 트리를 구성하여 데이터베이스의 재구성

\*正 會 員 : 濟州大 工大 電氣工學科 專任講師·工博

\*\*正 會 員 : 韓電技術研究員 配電研究室 先任研究員·工博

\*\*\*正 會 員 : 延世大 工大 電氣工學科 副教授·工博

接受日字 : 1993年 10月 31日

1 次修正 : 1993年 7月 2日

2 次修正 : 1993年 12月 8日

시간을 감소시켰으며, 트리 탐색법을 이용하여 간단하게 조류계산을 수행하는 방안을 제시하였다.

또한 사고발생시에 사고구간을 고립시키고 복구 방안을 제시하는 사고복구 규칙베이스를 구성하였다. 사고복구를 위한 부하절환시에는 절환 후의 피더와 주변압기에 대한 부하율을 비용으로 산정하여 가장 적은 비용이 소요되는 방안을 우선적으로 선택하는 최적우선 탐색을 수행하여 복구방안을 제시하였으며 트리구조의 데이터베이스 탐색을 통하여 연계 개폐기와 절환 후의 공급 피더에 대한 정보를 신속하게 파악할 수 있음을 보였다.

### 2. 배전계통 전문가시스템

배전계통운용은 개폐기 동작들의 집합으로서 개폐기들의 개·폐상태를 결정하는 조합문제 (combinational problem)이다[6]. 그러므로 실제의 커다란 배전계통에서 최적해를 찾는것은 어려운 과정이며 또한 구간부하전류가 정확하게 추정되지 않기 때문에 정확한 최적기법을 사용하여 최적해를 찾는것도 비현실적이다. 따라서 계통운용시에는 개폐기 조작이 수시로 이루어지고 조작원칙은 운전원의 오랜 경험과 직관에 의존하므로 숙련된 운전원들이 계통운용 업무를

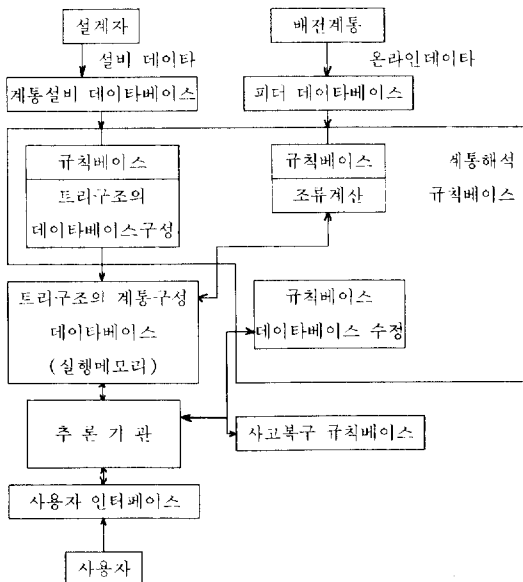


그림 2.1 전문가시스템의 구성도  
Fig 2.1 The structure of expert system

수행한다.

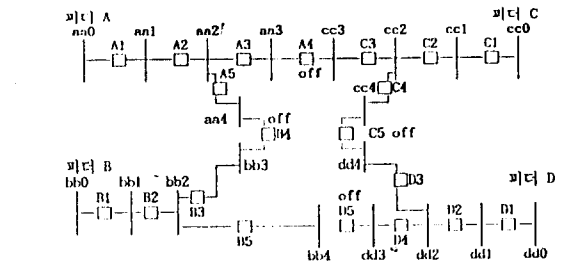
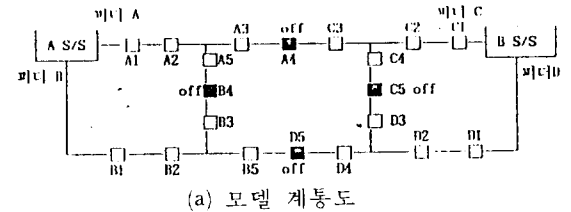
본 논문에서 제안하는 전문가시스템의 구성도를 그림 2.1에 표시하였다.

### 3. 트리구조의 배전계통 데이터베이스

배전계통은 선로와 개폐기가 연속적으로 연결되거나 구분개폐기를 포함하는 구간선로와 마디로 표현되는 모선이 연속적으로 연결되는 것으로 이해할 수 있으므로 개폐기 또는 모선이 트리의 구성요소가 되며 트리의 마디사이의 연결관계는 개폐기 또는 모선의 연결정보를 포함하는 선로 데이터로부터 파악할 수 있다.

모델계통에 대한 데이터베이스의 구성을 그림 3.1에 표시하였다.

그림 3.1의 (a)는 모델 계통도이고 (b)는 구간선로에 구분 개폐기가 존재하고 구간선로의 말단에 부하가 집중되어 있다고 가정한 (a)와 등가의 계통도이며 (c)는 (b)의 계통에 대한 트리구조의 데이터베이스이다.



tree(tree(tree(nil, aa3,nil), aa2, tree(nil, aa4, nil)), aa1, nil), aa0, nil)  
tree(tree(tree(nil, bb4,nil), bb2, tree(nil, bb3, nil)), bb1, nil), bb0, nil)  
tree(tree(tree(nil, cc3,nil), cc2, tree(nil, cc4, nil)), cc1, nil), cc0, nil)  
tree(tree(tree(nil, dd3,nil), dd2, tree(nil, dd4, nil)), dd1, nil), dd0, nil)

(c) 트리구조의 데이터베이스

그림 3.1 데이터베이스의 구성  
Fig 3.1 The construction of database

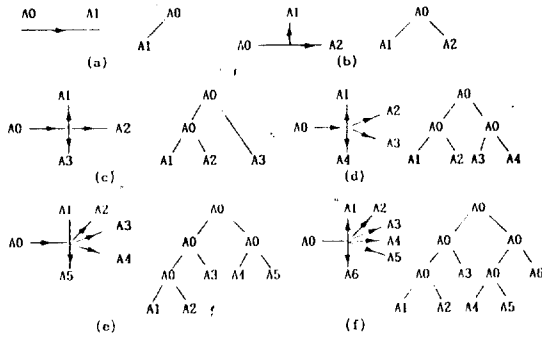


그림 3.2 2진 트리의 구성

Fig. 3.2 The composition of binary tree

트리구조의 데이터베이스 구성 규칙베이스

배전계통의 피더에는 분기선로가 존재하므로 데이터베이스 구성시에는 분기선로를 고려해야 한다. 두개의 분기선로까지는 2진 트리의 좌우측 부트리로 구성하면 되지만 3개 이상의 분기선로가 존재하는 경우에는 2진 트리로 구성할수가 없다. 따라서 3개 이상의 분기가 존재하는 경우에는 더미(dummy)뿌리를 가정하여 2진 트리구조를 유지하도록 하였다. 배전계통의 분기지점에 대해 2진 트리의 구성을 그림 3.2에 표시하였다.

그림 3.2의 구성방안을 이용하여 트리구조로 데이터베이스가 구성되면 탐색의 효율성을 높이기 위해 각 마디의 깊이를 고려하여 균형(balance)을 맞춰야 한다.

그림 3.2의 (e)를 다르게 트리구조로 표현하면 그림 3.3과 같다. 그림 3.3의 트리구조 중 어느 것을 선택할 것인가는 각 마디(A1, A2, A3, A4, A5)의 깊이와 관계가 된다. 즉 마디의 깊이가 A5, A4, A3, A2, A1의 순서로 깊이가 깊은 구조의 계통은 그림 3.3 (a)를, A1, A5, A4, A3, A2의 순서인 경우에는 (c)를, A3, A4, A5의 깊이가 A1, A2의 깊이보다 깊을 경우에는 (b)의 구조를 선택한다.

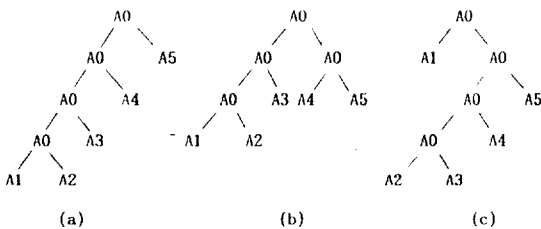


그림 3.3 그림 3.2(e)와 동가의 트리구조 표현

Fig. 3.3 The another representation of Fig. 3.2(e)

위의 예에서 보는 바와 같이 각 마디의 깊이 에 따라 균형을 고려하여 트리를 재 구성해야 한다.

균형을 고려하여 트리를 재구성하는 방법은 다음과 같다.

i : 임의의 마디에 연결된 분기선로의 수

$n_i$  : 마디  $A_i$ 의 깊이

라 하면 다음의 조건을 만족하도록 트리를 재구성한다.

$$n_1 \leq n_2 \leq \dots \leq n_n$$

트리구조의 데이터베이스를 구성하는 흐름도는 그림 3.4와 같다.

데이터베이스의 구성을 위한 계통 추적시에는 피더모션으로부터 추적을 시작하며 피더모션이 속한 구간선로 정보를 호출하여 구간선로내의 구분개폐기의 상태를 파악한다. 만약 구분개폐기가 개방상태이면 구분개폐기는 수직상 구조를 유지하기 위한 연계개폐기이므로 추적은 중단되며 투입상태이면 피더모션에 연결되는 분기수를 파악하여 피더모션의 좌측 또는 우측 부트리로 구성을 한다. 이때 삽입되는 좌측 또는 우측 부트리의 구조는 2진 트리구조를 유지하여야 한다. 좌측이나 우측 부트리에 삽입된 모션으로 출발하여 개방 상태의 연계 개폐기를 만날 때까지 위의 과정을 반복하면서 부트리를 구성한다.

일단 트리구성을 위한 계통 추적이 완료되면 균형을 맞추기 위하여 데이터베이스를 재구성하

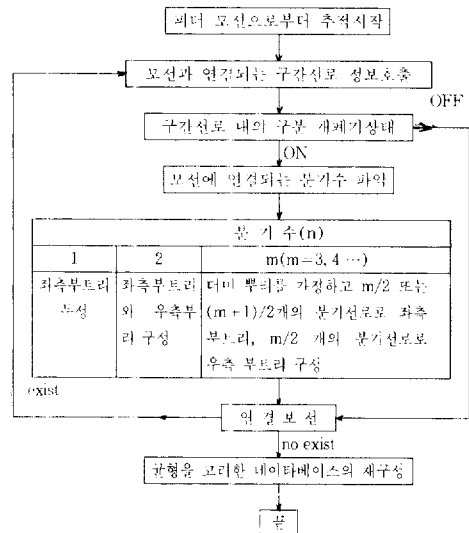


그림 3.4 트리구조 데이터베이스 구성의 흐름도

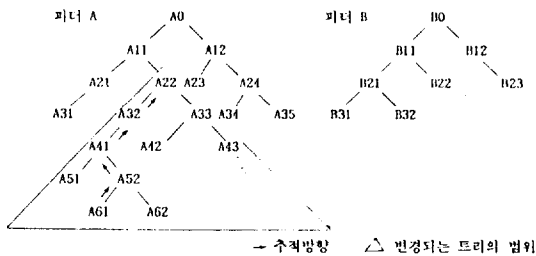
Fig. 3.4 The flow-chart for construction of tree-structured database

게 된다. 균형을 맞추기 위한 트리의 재구성  
말단에서부터 피더 모션까지 트리를 역으로 추  
적하여 트리의 재구성 조건을 만족시키면서 차  
레로 트리를 재구성한다.

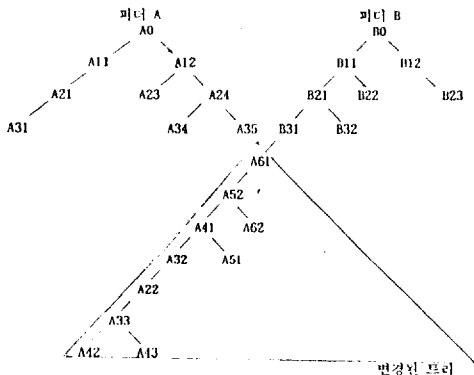
만약 계통의 구조가 한 쪽 방향으로 길게 계  
속해서 분기되는 경우에는 계통 재구성  
(reconfiguration)을 통하여 연계 개폐기의 위치  
를 다시 결정하여 계통 구조를 바꾸어야 한다.  
계통 재구성 후의 데이터베이스의 수정은 후술  
하는 데이터베이스 수정규칙에 의해 간단하게  
고쳐진다. 또한 농촌 등지의 지역에서는 한쪽 방  
향으로 길게 분기하는 경우가 발생할 수 있으며  
이와 같은 구조는 계통 자체의 구조에 관한 문  
제이므로 데이터베이스도 한쪽 부트리의 방  
향으로 길게 구성된다.

데이터베이스 수정 규칙베이스

배전계통은 개폐기의 상태가 수시로 변경되며  
개폐기의 상태변화는 구간선로의 사황에 영향을  
주고 선로의 공급피더가 변경되기도 한다. 따라  
서 개폐기의 상태가 변할 때마다 데이터베이스  
를 재구성하여야 하는데 모든 계통을 추적하면  
서 다시 구성하기에는 많은 시간이 소요되므로



(a) 개폐기 조작 이전의 데이터베이스



(b) 개폐기 조작 이후의 데이터베이스

그림 3.5 데이터베이스 수정 방안 I

Fig. 3.5 The database modification I

변경된 개폐기사이의 구간만을 추적하여 변경된  
공급피더의 데이터베이스에 삽입하여 계통구성  
의 변화에 대응하고자 한다. 조작 개폐기사이의  
경로 추적시 경로에서 분기되는 부트리는 추적  
할 필요없이 그대로 경로와 함께 저장하고 경로  
의 추적이 종결되면 경로의 역방향으로 트리를  
구성하여 변경된 공급피더의 데이터베이스에 경  
로의 역방향 트리를 삽입하면 데이터베이스의  
재구성은 종료된다.

데이터베이스의 수정방안을 그림 3.5와 3.6에  
표시하였다. 개폐기 조작시에는 조작 개폐기와  
연결된 뿌리 방향으로의 모션이 더미 뿌리인지  
를 판단하여야 한다. 더미 뿌리의 판단은 피더와  
조작 개폐기 사이의 경로 추적시 같은 이름의  
모션이 존재하는지를 판단하면 되므로 간단하게  
파악할 수 있다.

그림 3.5(a)에서 [A61, B31]의 구간선로에 존  
재하는 연계개폐기와 [A11, A22]의 구간선로내  
에 있는 구분 개폐기를 통해 개폐기 조작이 이  
루어진다고 하면 계통추적을 이용하여 A22와  
A61사이의 경로를 탐색하면서 경로에서 분기되  
는 부트리를 경로와 함께 저장하고 연계 개폐기  
B31의 부하측에 경로의 역방향 트리를 삽입하면  
(b)와 같은 형태의 데이터베이스로 수정이 된다.

조작 개폐기가 더미뿌리에 연결된 개폐기이면  
더미뿌리에 연결되는 분기수가 1만큼 감소하므  
로 조작후에 더미뿌리에 연결되는 분기수를 파  
악하여 더미뿌리의 존재여부를 파악하여야 한다.

더미뿌리에 연결된 개폐기의 조직예를 그림 3.  
6에 표시하였다. 그림 3.6(a)에서 A1과 A4사이,  
A1과 A5사이 또는 A1과 A3사이의 구분개폐기  
를 조작할 경우 모션 A1에 연결되는 분기수가 1

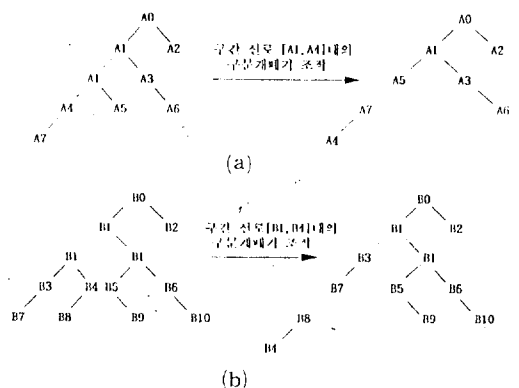


그림 3.6 데이터베이스의 수정방안 II

Fig. 3.6 The database modification II

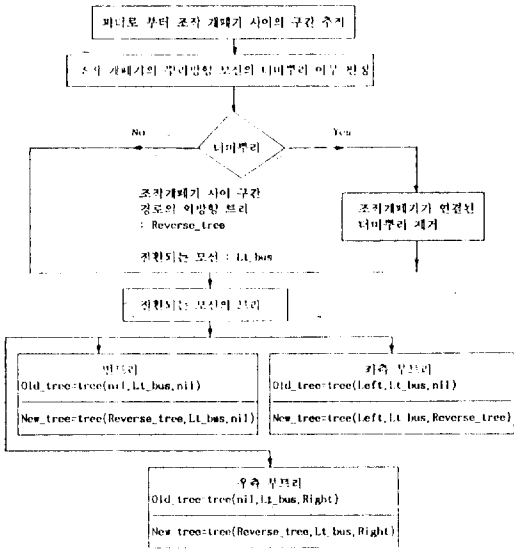


그림 3.7 데이터베이스 수정규칙의 구성도  
**Fig. 3.7** The rule configuration of database modification

만큼 감소하여 더이상 더미뿌리를 가정할 필요 없이 2진 트리구조를 유지하므로 더미뿌리를 제거하여야 한다. 마찬가지로 그림 3.6(b)와 같은 경우에도 더미뿌리에 연결된 개폐기를 조작하면 조작 개폐기의 방향으로의 더미 뿌리는 존재할 필요가 없다.

그림 3.5와 3.6의 데이터베이스 수정방안을 규칙으로 표현하기 위한 데이터베이스 수정규칙의 구성도를 그림 3.7에 표시하였다.

트리구조의 데이터베이스의 구성은 피더로 부터 출발하여 연계 개폐기를 만날 때까지 개폐기와 구간선로 데이터를 이용하여 좌측 부트리와 우측 부트리를 구성하면서 트리형태를 갖추게 되는데, 트리를 구성하는 것 자체로서 선로의 사황이 자동적으로 파악되게 된다. 따라서 트리구성시에 약간의 시간이 소요되지만 별도로 선로의 사황에 대한 계통추적이 불필요하며 일단 트리구조의 형태로 구성되기만 하면 개폐기 추적이나 데이터 탐색시에 불필요한 탐색 공간을 줄이게 된다.

또한 개폐기 조작시에 조작 개폐기 사이의 경로만을 추적하는데 이 경우에 경로에서 분기되는 부트리는 추적할 필요없이 그대로 경로와 함께 저장하고 경로의 추적이 종결되면 경로의 역방향으로 트리를 구성하여 변경된 공급 피더의

데이터베이스에 역방향 트리를 삽입하면 데이터베이스의 재구성이 종료되므로 계통 변경시에 신속한 대응이 가능하다.

#### 4. 조류계산 규칙베이스

선로손실을 무시할 경우 조류계산식은 다음과 같다.[4]

$$P_{i+1} = P_i - P_{Li+1} = \sum_{j=i+2}^n P_{Lj}$$

$$Q_{i+1} = Q_i - Q_{Li+1} = \sum_{j=i+2}^n Q_{Lj} \quad (4.1)$$

$$V_{i+1}^2 = V_i^2 - 2(r_i P_i + x_i Q_i)$$

부하조류는 각 부하의 설비용량을 기준으로 비례배분으로 할당할 수 있으며 관련식은 다음과 같다.

$$P_{Li} = \sqrt{3} V_i I_i \cos \theta_i$$

$$Q_{Li} = \sqrt{3} V_i I_i \sin \theta_i \quad (4.2)$$

$$V_i \approx V_o, I_i = I_F x \frac{L\alpha}{L_{sum}}, L_{sum} = \sum_{i=1}^N L\alpha$$

여기서  $P_{Li}$ : 모선  $i$ 의 부하유효전력 [kw],  $Q_{Li}$ : 모선  $i$ 의 부하무효전력 [KVar],  $I_i$ : 모선  $i$ 의 추정전류 [A],  $I_F$ : 피더의 공급전류 [A],  $L_{sum}$ : 피더가 담당하는 모선의 설비부하총계 [kVA],  $L\alpha$ : 모선  $i$ 의 설비부하 총계 [kVA],  $N$ : 해당피더에서 공급하는 모선의 총갯수,  $V_i$ : 모선  $i$ 의 전압 [kV],  $V_o$ : 변전소 인출전압 [kV],  $\cos \theta_i$ : 모선  $i$ 의 부하역률이다.

#### 모선전력 계산규칙

모선의 트리형태 표현으로부터 모선전력은 다음과 같이 쉽게 계산될 수 있다.

$$\text{tree}(\text{Left}, \text{Root}, \text{Right})$$

Left or Right : 모선 Root의 부하측 모선을 나타내는 부트리

$$P_{\text{Root}} = P_{L_{\text{Root}}} + P_{L_{\text{Left}}} + P_{R_{\text{Right}}} \quad (4.3)$$

$P_{\text{Root}}$  : Root의 전력,  $P_{L_{\text{Root}}}$  : Root의 부하전력  
 $P_{L_{\text{Left}}}$  : Left의 전력,  $P_{R_{\text{Right}}}$  : Right의 전력

식 (4.3)은 뿌리로 표현되는 모선의 전력은 모선의 부하전력과 좌·우측 부트리의 전력함으로 계산된다는 것을 나타낸다.

좌·우측 부트리의 전력은 이미 계산이 되어 있으면 그대로 사용할 수 있으며 계산이 되어 있지 않을 경우에는 좌·우측 부트리가 트리구조이므로 식(4.3)의 모선전력 계산식을 다시 호출하여 부트리의 전력을 계산한다.

모선전압 계산규칙

모선의 트리구조표현에서 뿌리로 표현되는 모선전압을 알고 있을때 뿌리의 좌·우측부트리인 부하측 모선의 전압은 뿌리와 좌·우측부트리로 표현되는 선로의 임피던스를 이용하여 추정되며 전압계산방안은 다음과 같다.

tree(Left, Bus, Right)

Left or Right = tree(L, L\_bus, R)

선로정보 ([Bus, L\_bus], r, x, d)

모선정보 (Bus, P1, Q1, V1)

모선정보 (L\_bus, P2, Q2, V2)

부하측 모선의 전압  $V2^2 = V1^2 - 2(r \cdot d \cdot P2 + x \cdot d \cdot Q2)$

피더손실 계산규칙

임의의 피더에 대한 손실은 피더에서 공급하는 전 구간선로의 전력손실을 누계하여 정하며 그 식은 다음과 같다.

$$L_{seed} = \sum_{i=1}^N L_i \quad (4.4)$$

$$L_i = r_i d_i (P_i^2 + Q_i^2) / V_i^2$$

여기서  $L_{seed}$ : 피더에서 공급하는 구간선로 손실누계[kW],  $L_i$ : 구간선로의 손실[kW],  $N$ : 해당 피더에서 공급하는 구간선로 수,  $r_i$ : 장주별 선로 저항[Ω/km],  $d_i$ : 구간선로의 공장[km],  $P_i$ : 모선  $i$ 의 유효전력[kW],  $Q_i$ : 모선  $i$ 의 무효전력[kVar],  $V_i$ : 모선  $i$ 의 전압[kV]이다.

피더손실은 모선과 모선사이의 연결관계를 나타내는 선로정보로부터 임피던스와 공장을 파악하고 모선의 전압, 전력을 이용하여 구하게 되며 트리구조를 이용한 손실계산 방안은 다음과 같다.

tree(Left, Feeder, Right)

Left or Right = tree(L, Root, R)

LOSSFeeder = LOSSLeft + LOSSRight (4.5)

LOSSLeft or LOSSRight =  $r \cdot d \cdot (P^2 + Q^2) / V^2 + LOSSL + LOSSR$

선로정보 ([Feeder, Root], r, d)

모선정보 (Root, P, Q, V)

피더손실은 피더와 좌·우측 부트리의 뿌리로 표현되는 모선으로 나타내어지는 구간선로의 손실을 구하고 좌·우측 부트리에서 발생하는 손실을 계산하여 합해주면 된다. 좌·우측 부트리의 손실계산시에는 부트리가 트리형태로 표현되므로 모든 구간선로의 손실이 계산될 때까지 계속해서 식 (4.5)의 손실계산 방안을 호출함으로써 구해진다.

전력이나 손실 계산시에는 조류를 구하고자

하는 모선으로 부터 출발하여 말단 모선까지 계통을 추적한 후 후향대입을 하면 모든 전력이나 손실이 계산되므로 단지 2회의 계통추적만이 행해진다. 또한 모선 전압을 계산하는 경우에는 변전소 인출점으로 부터 깊이우선 탐색으로 계통을 추적하면서 전압을 파악할 수 있으므로 단지 1회의 계통추적만이 필요하다.

따라서 조류계산을 수행하는 경우 트리를 이용함으로써 1회 또는 2회의 계통 추적만을 수행하므로 계산시간이 대폭 감소된다.

**5. 사고복구 규칙베이스**

개폐기 조작을 통하여 부하절환 방안을 제시하기 위한 절환가능 개폐기의 추적은 사고구간의 개폐기로부터 부하측으로 탐색을 시작하는데 데이터베이스가 트리구조이므로 아래 방향으로 좌우측 부트리를 깊이 우선탐색으로 계속 추적한다. 1회 절환방안이 구해지면 절환후의 공급피더와 주변압기에 대한 부하율을 비용으로 산정하여 최소비용이 드는 방안순으로 절환을 수행하여 계통운용 조건을 판단하고 계통운용 조건이 만족될 경우에는 절환방안으로 선정한다.

만일 1회의 개폐기 조작에 의한 절환방안이 계통운용 조건에 위배된다면 2회의 개폐기 조작에 의한 절환방안을 탐색해야 한다. 2회의 개폐기 조작에 의한 절환 방안은 1회의 절환가능 개폐기중에서 두개의 절환개폐기를 선정하여 일부 부하는 선정된 두개의 개폐기중 하나의 절환가능 개폐기를 통하여 절환하고 나머지 부하는 다른 하나의 절환가능 개폐기를 통하여 부하를 절환하는 것이다. 그러나 선정된 두개의 절환가능 개폐기 사이의 구간에는 많은 수의 구분개폐기가 존재하므로 어느 구분개폐기를 통하여 부하를 분담시킬 것인가 하는 것이 문제로 남게된다.

따라서 1회 절환방안의 절환후 공급피더중 가장 비용이 적은 두개의 피더를 선정하고 두 피더사이의 구분 개폐기를 2회 절환점으로 가정하여 비용을 산정하고 적은 비용순으로 계통운용 조건을 판단함으로써 절환 가능성을 검토한다.

각 절환방안에 대해 비용이 산정되는 계산식은 식(5.1)과 같이 표현되며 최적 우선 탐색(best-first search)의 트리구조를 그림 5.1에 표시하였다.

$$F(N) = \min \{ cost(N, Ni) + F(Ni) \} \quad (5.1)$$

여기서  $F(N)$ : 절환을 원하는 구간의 말단 개폐기의 비용,  $cost(N, Ni)$ :  $N$  개폐기로부터  $Ni$

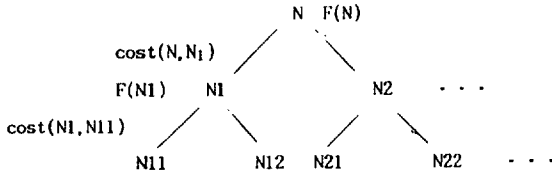


그림 5.1 최적우선 탐색의 트리구조도  
**Fig. 5.1** The tree structure of best-first search

개폐기까지 절환되는 경우의 비용(피더의 주변압기의 부하율),  $F(N_i) : N_i$  개폐기의 비용이다.

사고시 연계 개폐기를 통한 부하절환 방안을 마련하기 위하여 계통을 추적하는 경우 트리구조로 이루어진 데이터베이스를 탐색함으로써 신속한 절환방안을 구할 수 있으며 절환 후의 계통 운용 조건 검토시에도 빠른 데이터베이스의 탐색이 가능하다.

**6. 컴퓨터 해석**

컴퓨터 해석에 사용되는 모델 계통은 도심지역 선로를 대표할 수 있는 5개 변전소의 18개 피더로 구성하였으며 그림 6.1과 같다.

전문가시스템의 구성에 사용된 컴퓨터 기종은 32bit IBM-PC이며 UNIX환경하에서 수행되는 IF/Prolog를 이용하여 데이터베이스와 규칙베이스를 구성하였으며 실비데이터는 현장에서 적용되는 데이터를 참고하여 입력하였다.

**6.1 전문가시스템의 성능평가**

트리구조의 데이터베이스를 추적하여 계통을 해석함으로써 데이터의 탐색효율이 향상되고 신속한 조류계산이 가능하다는 것을 입증하기 위하여 부하절환을 위한 전문가시스템[10](종래의 방법)의 수행시간과 비교하여 표 6.1에 수록하였다.

부하절환 전문가시스템[10]은 데이터베이스가 운전원이 입력하기 쉽도록 구간선로와 개폐기의 정보만으로 구성되어 있다. 그러나 데이터 입력은 용이하나 계통추적시마다 구간선로 또는 개폐기의 정보를 발견할 때까지 데이터베이스를 탐색하여야 하므로 표 6.1에 나타나있는 바와 같이 선로전류나 개폐기의 전압을 계산하는 경우 많은 시간이 소요된다. 한편 본 논문의 트리탐색법을 이용한 전문가시스템은 트리구조의 데이터베이스 구성시에 약간의 시간이 소요되며 일단 데이터베이스의 구성이 종료되면 모선전력이나

전압의 계산은 신속하게 수행된다. 모선전력과 모선전압 계산시 시간차이는 모선전압 계산시에는 선로임피던스를 파악하기위해 선로데이터를 탐색하기 때문이다.

피더손실 계산시에는 부하절환을 위한 전문가시스템의 수행속도가 빠른 것을 알 수 있는데 그 이유는 선로사할 데이터베이스내에 공급피더 정보가 포함되어 있어 해당피더에 속한 모든 구간선로의 파악이 1회의 데이터베이스 추적만으로 가능하기 때문이다.

트리구조의 데이터베이스는 운전원이 쉽게 입력력한 개폐기와 구간선로의 정보를 이용하여 직

**표 6.1** 전문가시스템의 수행속도 비교표  
**Table 6.1** The execution time comparison table of expert system

종래의 방법[10]		트리탐색법을 이용한 방법	
선로사할 데이터 베이스 구성	14[sec]	트리구조의 데이터 베이스 구성	15[sec]
선로전류 계산	103[sec]	모선전력 계산	3[sec]
개폐기전압 계산	61[sec]	모선전압 계산	6[sec]
피더손실 계산	3[sec]	피더손실 계산	7[sec]

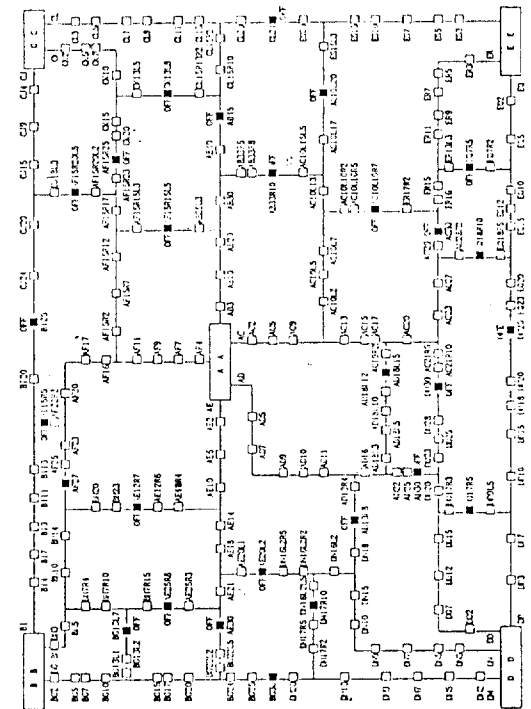


그림 6.1 모델 계통도.  
**Fig. 6.1** The model system

접 트리구조로 구성되며 선로사할 관정을 위한 계통 추적을 별도로 수행하지 않는다. 또한 일단 트리로 구성이 완료되면 트리탐색법을 이용하여 조류계산을 신속히 수행하게 된다.

**6.2 사고복구**

bg피더의 구간선로[bg7, bg10]에 사고가 발생한 경우 복구방안을 제시하기 위한 연계 개폐기와 절환 후의 공급피더는 다음과 같다.

(수행시간 : 종래의 방법 ⇒ 1[sec], 트리탐색법을 이용한 방법 ⇒ 1[sec])

- (i) bg1317을 투입하여 bh피더로 절환
- (ii) ae30을 투입하여 ae피더로 절환
- (iii) bg30을 투입하여 dm피더로 절환

위의 세가지 방안은 1회 부하절환 방안으로서 절환 후의 공급피더나 주변압기의 부하율을 비용으로 산정한 결과를 표 6.2에 수록하였다.

표 6.2로 부터 최소비용이 소요되는 방안 1을 1회의 부하절환 방안으로 선정하여 절환 가능성을 검토하게 되며 방안 2와 같이 비용이 1.0이상이면 절환후에 과부하가 발생하여 계통운용 조건에 위배된다. 방안 1과 3으로 사고복구를 수행한 결과를 표 6.3에 수록하였으며 방안 1이 복구방안으로 선택된다.

반일 1회 부하절환 방안이 존재하지 않는다면 2회 절환방안을 추적하게 된다. 2회 부하절환은 1회 절환방안의 절환 후 공급피더중 가장 비용이 적은 두개의 피더를 선정하고 두 피더 사이의 구분개폐기를 2회 절환점으로 가정하여 절환방안을 검토한다. 표 6.3으로 부터 2회 부하절환시의 공급피더를 bh, dm으로 선정하여 절환방안을 검토한 결과를 표 6.4에 수록하였다.

(수행시간 : 종래의 방법 ⇒ 4[sec], 트리탐색법을 이용한 방법 ⇒ 2[sec])

표 6.4에 나타난 바와 같이 2회 절환방안에 대하여 계통운용 조건을 검토하고 계통운용 조건을 만족하는 방안 1을 선택함으로써 124.7[kW]의 손실감소를 얻을 수 있다.

부하절환 방안 추출을 위한 계통 추적시 종래의 방법과 트리탐색법의 수행시간을 비교하면 1회 절환방안 추출시 보다 2회 절환방안 추출시에 수행시간 감소 효과가 큰 것을 알 수 있다. 그 이유는 1회 절환방안을 추출하기 위한 탐색 횟수에 비해 2회 절환방안 추출을 위한 데이터베이스의 탐색 횟수가 훨씬 많기 때문이다. 따라서 계통의 규모가 커질수록 트리탐색법을 이용

**표 6.2** 1회 부하절환을 위한 비용산정표

**Table 6.2** The cost computation table for single load transfer

방안	연계개폐기	절환후 공급피더	비용
1	bg1317	bh	0.84
2	ae30	ae	1.06
3	be30	dm	0.93

**표 6.3** 1회의 부하절환 방안

**Table 6.3** The single load transfer method

방안	연계개폐기	절환후공급피더	최대전압강하[V]	손실증감[kW]	
				절체전	절체후
1	bg1317	bh	1,516	bg	362.8
				bh	166.8
				bg	13.8
				bh	407.5
				-108.3	
2	bg30	dm	1,711	bg	362.8
				dm	85.0
				bg	13.8
				dm	416.7
				-17.3	

**표 6.4** 2회 부하절환방안 검토표

**Table 6.4** The examination table for second load transfer

방안	연계개폐기	구분개폐기	절환후공급피더	최대전압강하[V]	손실증감[kW]	
					절체전	절체후
1	bg1317 bg30	bg24	bh dm	1,455	절체전	537.9
					절체후	413.2
					-124.7	
2	bg1317 bg30	bg20	bh dm	1,714	절체전	537.9
					절체후	427.8
					-110.1	
3	bg1317 bg30	bg17	bh dm	1,840	절체전	537.9
					절체후	439.4
					-98.5	
4	bg1317 bg30	bg1311	bh dm	2,215	절체전	537.9
					절체후	496.8
					-41.1	
5	bg1317 bg30	bg15	bh dm	1,939	절체전	537.9
					절체후	506.3
					-31.6	

함으로써 데이터의 탐색시간이 대폭 감소됨을 알 수 있다.

위의 사례연구로 부터 사고발생시 복구방안을 제시하기 위한 연계 개폐기와 절환 후의 공급피더에 대한 정보는 트리 구조의 데이터베이스를 탐색하고, 복구 방안의 우선 순위 결정에서는 절환 후의 부하율을 비용으로 환산하여 최적 우선 탐색을 수행함으로써 신속하게 복구방안을 제시하게 된다.



## 7. 결 론

본 논문에서는 트리탐색법을 이용하여 계통을 해석하고 사고발생시에 신속하게 복구방안을 제안하는 전문가시스템을 구성하였다.

배전계통은 방대한 양의 데이터로 구성되고 개폐기의 조작이 수시로 이루어지므로 데이터의 탐색효율을 높이고 계통변화에 신속하게 대응하기 위하여 2진트리를 이용하여 계통구성 데이터베이스를 트리형태로 구성하였다. 트리구성시에는 많은 분기 선로가 존재하는 경우에도 2진 트리 구조를 유지할 수 있도록 더미뿌리를 도입하였다. 데이터베이스를 트리형태로 구성한 결과 계통 추적이 쉽고 신속하게 수행되었으며 개폐기 조작후에 변경되는 트리에 대해서는 모든 계통을 추적하지 않고 조작 개폐기 사이의 경로만 탐색하여 계통 변경시에 신속하게 적응하였다. 또한 트리구조의 데이터베이스를 탐색하는 트리탐색법을 이용하여 신속하게 조류계산을 수행할 수 있는 방안을 제시하였으며 사고발생시 복구방안을 제시할 수 있는 규칙베이스를 구성하였다. 제안한 전문가시스템은 트리탐색법과 최적우선탐색을 이용하여 구성됨으로써 기존의 전문가시스템과 비교하여 수치적인 계산부담이 감소되어 대규모 계통에서도 효율적인 운용이 가능하다.

## 참 고 문 헌

[1] K. Aoki, H. Kuwabara, T. Satoh and M. Kaneshashi, "An Efficient Algorithm for Load Balancing of Transformers and Feeders by Switch Operation in Large Scale Distribution System", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 3, No. 4, pp. 1865-1872, October 1988.

[2] C.C. Liu, S.J. Lee, S.S. Venkata, "An Expert system Operational Aid for Restoration and Loss Reduction of Distribution Systems", IEEE Trans. on Power Systems, Vol.3, No.2, pp.619-626, May 1988.

[3] K. Kamei, Y.Nakamura, S. Abe, S. Takeda, J. Tsukamoto, T. Kaga, "Highly Interactive Operator Workstation for Distribution Automation System Using Spatial Data Management", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 7, No.1 pp. 180-186, February 1992.

[4] M.E. Baran, F.F. Wu, "Network Reconfiguration in Distribution Systems for Loss Reduction and Load Balancing", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 4, No. 2, pp. 1401-1407, April 1989.

[5] U.R. Siddigi, L.L. Lubkeman, "An Automated Strategy for the Processing and Analysis of Distribution Automation Data", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 6, No. 3, pp. 1216-12223, July 1991.

[6] A.L. Morelato, A. Monticelli, "Heuristic Search Approach to Distribution System Restoration", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 4, No. 4, pp. 2235-2241, October 1989.

[7] C.C. Liu, S.J. Lee, K. Vu, "Loss Minimization of Distribution Feeders: Optimality and Algorithms", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 4, No. 2, pp. 1281-1289, April 1989.

[8] K.Aoki, M. Itoh, H.Kuwabara, M. Kaneshashi, "Voltage Drop Constrained by Switch Operation in Distribution System", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 3, No. 3, pp.1267-1274, Jul. 1988.

[9] W.F. Clocksin, C.S. Mellish: Programming In Prolog, Springer-Verlog, 1981.

[10] 문영현, 최병윤, 김세호, "배전계통에서의 최적 부하절체를 위한 전문가 시스템", 대한 전기학회, 제39권, 제9호, pp. 903-911, 1990. 9.

[11] 김세호, 류현수, 최병윤, 조시형, 문영현, "트리구조의 배전계통 데이터베이스 구성과 트리탐색 기법", 대한전기학회 '92 하계학술대회 pp. 172-175, 1992.7.

## 저 자 소 개

### 김세호(金世鎬)

전기학회 논문지 제43권 2호 참조.

### 최병윤(崔炳允)

전기학회 논문지 제43권 2호 참조.

### 문영현(文永鉉)

전기학회 논문지 제43권 2호 참조.