

# 패턴 클러스터링 기법에 기반한 배전 변전소 주변압기 사고복구 전략 설계

論 文
55A-10-2

## Design of Main Transformer Fault Restoration Strategy Based on Pattern Clustering Method in Automated Substation

高 鈞 錫<sup>†</sup>  
(Yun-Seok Ko)

**Abstract** - Generally, the training set of maximum  $m \times L(m+f)$  patterns in the pattern recognition method is required for the real-time bus reconfiguration strategy when a main transformer fault occurs in the distribution substation. Accordingly, to make the application of pattern recognition method possible, the size of the training set must be reduced as efficient level. This paper proposes a methodology which obtains the minimized training set by applying the pattern clustering method to load patterns of the main transformers and feeders during selected period, and to obtain bus reconfiguration strategy based on it. The MaxMin distance clustering algorithm is adopted as the pattern clustering method. The proposed method reduces greatly the number of load patterns to be trained and obtain the satisfactory pattern matching success rate because that it generates the typical pattern clusters by applying the pattern clustering method to load patterns of the main transformers and feeders during selected period. The proposed strategy is designed and implemented in Visual C++ MFC. Finally, availability and accuracy of the proposed methodology and the design is verified from diversity simulation reviews for typical distribution substation.

**Key Words** : Pattern Clustering, Pattern Recognition, Substation Automation System, Main Transformer Fault

### 1. 서 론

배전변전소는 폭 넓게 분산 배치되는 수십개의 배전선로들에 직접 전력을 공급하기 때문에 변전소 내의 설비고장은 심각한 사고파급 효과를 초래하는데, 특히 주변압기 사고는 그 설비로부터 전력을 공급받는 모선에 연결된 모선 배전선로들에 정전을 발생시키기 때문에 그 파급효과가 심각하다.

전력사업자들은 이러한 문제를 해소하기 위해서 전력 SCADA 시스템을 도입, 주변압기 사고시 모선 CB를 원격 제어하여 정전부하를 동일변전소내의 다른 주변압기에 할당함으로써 정전파급효과를 최소화한다. 그러나 최근 토지비용 상승이나 주민 민원으로 변전소 신설이 어려워지고 지연되어 점차 높은 변전소 부하율이 요구되고 있다. 이러한 환경 하에서 주변압기 사고의 경우 사고 주변압기의 정전부하를 건전 운용중인 2대 이상의 주변압기들에 분담해야 하는 문제가 발생할 수 있다. 이때 사고파급효과를 최소화하기 위해서는 정확하고 안전한 모선 재구성 전략이 실시간으로 수립되어야 하고, 또한 이 전략을 기반으로 실시간으로 모선 재구성이 이루어져야 하는데 현재, 변전소 아이소레이터들은 수동조작만이 가능하여 작업원이 직접 모선 재구성을 해야 하는 어려움이 따른다. 특히, 이 문제는 변전소 무인화시 교통체증 문제

등으로 현장 출동에 의한 직접 조작이 지연되어 전력공급 신뢰도를 심각하게 저하시킬 수 있기 때문에 원격제어가 가능한 아이소레이터를 기반으로 하는 변전소 자동화가 고려되고 있다[1-2].

지금까지 이러한 자동화된 변전소에서 사고파급효과를 최소화하기 위한 실시간 모선 재구성 전략들이 연구되었는데, 변전소내의 CB와 아이소레이터들의 조합 최적화 문제이기 때문에 최적한 해를 얻기 위해 상당한 탐색시간이 요구될 수 있다[1-2]. 먼저, 참고문헌[3-7]에서는 휴리스틱 탐색전략에 기반하여 탐색공간을 최소화함으로써 탐색시간을 최소화할 수 있는 실시간 모선 재구성 전략들을 제안하는데 최적해를 보장하기 어렵다. 다음, 참고문헌[8]에서는 패턴인식 기법에 기반한 실시간 모선 재구성 전략을 제안한다. 최대  $m \times L(m+f)$ 개의 학습 부하패턴 세트(TS: Training Set)의 규모를 효율적인 수준으로 줄이기 위해서 유사한 부하패턴의 주변압기나 배전선로를 동일한 부하패턴으로 놓음으로써 학습해야 할 부하패턴의 수를 줄인다. 여기서, L은 부하레벨의 수, m과 f는 각각 주변압기와 배전선로의 수를 의미한다. 그러나 현실적으로 제안된 방법에 의한 TS도 무시할 수 없는 규모가 되기 때문에 탐색의 효율성을 저하시킬 수 있다.

따라서 본 연구에서는 선택된 기간 동안의 주변압기나 배전선로 부하패턴들로부터 패턴 클러스터링 기법을 적용하여 최소화된 TS를 얻기 위한 방법론과 이를 이용한 모선 재구성 전략을 새롭게 제안한다. 실제로 배전계통의 부하패턴은 거의 유사한 형태를 취하기 때문에 클러스터링 기법을 도입하여 부하패턴수를 크게 줄일 수 있으며, 특히, 발생할 확률이 매우 높은 그리고 유사한 부하패턴들에 대한 클러스터를

<sup>†</sup> 교신저자, 正會員 : 남서울大學 電子情報通信工學部  
副教授 · 工博

E-mail : ysko@nsu.ac.kr

接受日字 : 2006年 6月 30日

最終完了 : 2006年 8月 18日

기반으로 하기 때문에 사고 시 탐색시간을 최소화하고 탐색 성공률을 매우 높일 수 있다. 또한 기존의 부하패턴과는 상이한 부하패턴의 경우, 너무제한 탐색기반 제어전략 생성부에 의해서 문제해결을 시도한 후, 새로운 부하패턴을 새로운 클러스터 추가하고 이때의 모선재구성 전략을 새로운 클러스터에 대한 지식으로 학습한다. 패턴 클러스터링 기법으로는 최대최소거리 클러스터링 기법이 적용된다. 제안된 전략은 Visual C++의 MFC로 설계, 구현되며, 끝으로, 대표적인 변전소에 대해 데이터베이스를 구축하고 학습 부하패턴 세트를 생성시키과 동시에 수개의 실시간 이벤트를 모의함으로써 제안된 전략의 정확성과 유효성을 검증한다.

## 2. 기본 개념

### 2.1 문제정의

배전 변전소는 154KV 수전전압을 주변압기를 통해 22.9KV로 강압하여 배전선로들을 통해 일반 수용가들에 전력을 공급한다. 따라서 전력공급의 안정성을 유지하기 위해서는 적절한 부하율을 유지해야 한다. 그런데 최근 토지비용 상승이나 주민 민원으로 변전소 신설이 어려워지고 지연되어 점차 높은 변전소 부하율이 요구되고 있다. 이러한 환경 하에서 주변압기 사고의 경우 사고 주변압기의 정전부하를 건전 운용중인 2대 이상의 주변압기들에 분담해야 하는 문제가 발생할 수 있다. 이때 부하분담을 위한 모선 재구성은 식 (1)로 표시된 부하 균등화 지표가 최소가 되도록 이루어지는 것이 바람직하다.

$$\min(\sum_{i \in T} (TIL_i - TAL_i)^2) \quad (1)$$

여기서, T : 변전소내의 주변압기들의 집합

TIL<sub>i</sub>, TAL<sub>i</sub> : i번째 주변압기의 이상부하, 실제부하

TNC<sub>i</sub>, TMC<sub>i</sub> : i번째 주변압기의 정격 및 최대용량

TAC<sub>i</sub> : i번째 주변압기의 가용용량

TIL<sub>i</sub>: LF \* TNC<sub>i</sub> 또는 LF \* TMC<sub>i</sub>

LF:  $\sum_{i \in T} TAL_i / \sum_{i \in T} TAC_i$

특히, 배전 자동화 시스템이 도입되어 운용되고 있는 환경 하에서는 실시간 부하 데이터를 기반으로 실시간으로 2대의 변압기에 부하를 할당한 후, 과부하 분을 배전자동화시스템을 이용하여 선로상에서 절제하는 협조제어전략이 바람직하다. 이 경우 실시간 모선 재구성 전략의 수립이 요구되는데 운용 목적 (1)을 만족하는 모선재구성 전략 문제가 (CB, BS, LS)의 조합 최적화 문제이기 때문에 대규모의 탐색공간이 요구돼 최적 해를 얻는데 상당한 시간비용이 요구된다. 여기서 CB, BS, LS 모선간 차단기, 모선색선간 스위치 그리고 모선과 피더간의 라인 스위치를 표시한다.

### 2.2 부하레벨기반 학습세트 정의

{CB, BS, LS}의 조합 최적화 문제에 대한 탐색비용을 최소화하기 위한 방법들이 제안되었는데, 휴리스틱 탐색전략 및 패턴인식기법 등이 제안된다[3-8]. 그러나 휴리스틱 탐색전략은 최적 해를 보장하기 어렵고, 반면에 패턴인식기법을 실시간 모선 재구성 문제에 적용하면 최대  $m \times L(m+f)$ 개의 부하패

턴들을 포함하는 학습세트(TS: Training Set)가 요구된다. 이 경우 학습세트의 규모가 지나치게 크기 때문에 현실적으로 실현이 불가능하다. 따라서 패턴인식기법의 적용을 가능케 하기 위해서는 학습패턴의 수를 효율적인 수준으로 줄여야 한다. 물론 유사한 부하전류 트렌드를 보이는 주변압기나 배전선로들의 부하패턴을 동일한 패턴으로 설정함으로써 학습해야 할 부하패턴의 수를  $m \times L(m-p_1+f-p_2)$ 까지 줄일 수 있다[8]. 여기서 p<sub>1</sub>, p<sub>2</sub>는 각각 m개의 주변압기 들 중 유사한 부하전류 트렌드를 보이는 주변압기들의 수와 f개의 배전선로들 중 유사한 부하전류 트렌드를 보이는 배전선로들의 수를 표시한다. 그러나 이 경우에도 학습패턴의 수는 상당한 규모이다.

### 2.3 클러스터링 기반 학습세트 구축

현재, 변전소의 주변압기 및 배전선로별 부하 데이터는 부하변화의 트렌드를 분석하기 위해 SCADA 시스템에 의해서 원격에서 일정한 주기로 감시되어 데이터베이스에 기록되고 있다. 또한 디지털 변전소의 경우에도 이들 데이터는 동일한 방법으로 감시, 저장되어 질 것으로 예상된다. 특히 이들 데이터는 "년/월/일/시간"대 별로 감시, 기록되고 있기 때문에 다양한 기간대별로 부하데이터 세트의 선택이 가능하다. 즉, 주어진 기간을 선택하면 선택기간내의 부하 데이터 세트를 검색할 수 있다. 기본적으로 주변압기나 배전선로들은 연차별로 자연적인 부하증가가 이루어지는 가운데, 계절별, 요일별 등으로 유사한 부하패턴을 보인다. 따라서 각각의 선택된 기간대별 부하패턴 세트를 계절별, 요일별로 분류, 클러스터링 기법을 적용하여 대표적인 클러스터들로 구분하면 학습세트의 규모가 기존의 부하레벨 기반의 학습세트 구축 방법에 비해 크게 줄여질 수 있다. 식 (2)가 변전소 DB에서 저장된 06년 6월 2일의 시간대별 데이터라고 가정하자.

$$\begin{bmatrix} 10 & 10 & 10 & 17 & 20 & 30 & 30 & 20 & 20 & 10 \\ 12 & 12 & 15 & 22 & 32 & 28 & 18 & 22 & 10 \\ 20 & 20 & 30 & 40 & 40 & 30 & 40 & 40 & 20 & 20 \\ 22 & 22 & 32 & 38 & 42 & 28 & 38 & 38 & 20 & 18 \\ 28 & 28 & 20 & 40 & 40 & 60 & 60 & 58 & 40 & 30 \end{bmatrix} \quad (2)$$

실제로 부하 데이터는 계절별, 요일별로 식 (2)에서 보인바와 같이 상당한 유사성을 보일 수 있다. 즉, p<sub>1</sub>과 p<sub>2</sub>, p<sub>3</sub>과 p<sub>4</sub>와 같이 상당한 유사성을 보일 수 있다. 이들 부하 세트는 3개의 상이한 특성을 보이는 3개의 클러스터로 분류할 수 있다. 여기서 p<sub>i</sub>는 학습세트내의 i번째 부하패턴을 표시한다.

$$\begin{bmatrix} 11 & 11 & 11 & 16 & 21 & 31 & 29 & 19 & 21 & 10 \\ 21 & 21 & 31 & 39 & 41 & 29 & 39 & 39 & 21 & 19 \\ 28 & 28 & 20 & 40 & 40 & 60 & 60 & 58 & 40 & 30 \end{bmatrix} \quad (3)$$

다음, 식 (3)으로 주어진 학습세트내의 각 부하패턴 p<sub>i</sub>에 대해 최적한 제어전략을 결정해서 지식 {p<sub>i</sub>, c<sub>i</sub>}를 작성, 지식 베이스에 구축한 후, 실시간 이벤트 발생시 실시간 부하패턴과 식 (3)을 비교하여 가장 유사한 패턴을 확인함으로써 만족할 만한 해를 신속하게 얻을 수 있다. 여기서 c<sub>i</sub>는 학습세트내의 i번째 패턴 p<sub>i</sub>에 대한 최적 해를 표시한다. 특히, 각 부하패턴 p<sub>i</sub>에 대한 최적해를 구하는 문제에 있어, 너무제한 탐색법은 휴리스틱 기반으로 수백 개 이내에서 최적 해를 얻

을 수 있기 때문에 최선우선 탐색 법에 비해 보다 개선된 목적지표를 가지는 부하절체 전략을 얻을 수 있으며 동시에, 전 공간 탐색법의 경우에 비해 탐색공간을 크게 줄일 수 있다. 따라서 너비제한 탐색법이 오프라인으로 지식베이스를 구축하는 문제에 있어 합리적인 시간 내에서 임의의 부하패턴 pi에 대한 최적해를 얻을 수 있다는 측면에서 매우 효율적이다. 그리고 주기적으로 수집되는 부하패턴들에 대해 학습세트내의 클러스터들을 기반으로 계속적으로 클러스터링 기법을 적용시켜, 클러스터의 중심점을 이동시키게 되면 자연부하 증가 및 부하변화에 대한 학습세트의 유효성을 증가시키고 패턴 인식률을 제고할 수 있다.

### 3. 실시간 모선 재구성 솔루션 설계

실시간 모선 재구성 솔루션은 지식 생성부와 직관적 추론부로 구성된다. 지식 생성부는 먼저 변전소 DB로부터 메모리 영역에 변전소 객체 모델을 구축한다. 그리고 검색기간을 설정하여 변전소 DB로부터 주변압기와 배전선로들의 부하패턴들을 변전소 객체 모델에 기록하고, 클러스터링 기법을 적용하여 최소규모의 학습세트를 생성한다. 논리적 추론부는 클러스터링 기법에 기반하여 작성된 학습세트의 각 부하패턴 클러스터들에 대해 너비제한 탐색법에 기반하여 최적한 모선 재구성 전략을 실현하는 제어패턴을 생성한다. 그리고 최종적으로 지식 생성부는 {부하패턴 클러스터, 모선재구성 패턴}으로 구성되는 지식패턴을 생성한다.

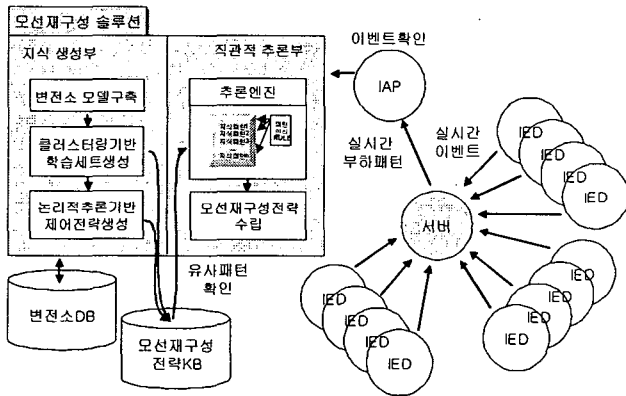


그림 1 실시간 모선재구성 솔루션 구성  
Fig. 1 Real-time bus reconfiguration solution structure

IED는 변전소내의 주변압기나 차단기들에 부속되는 데 만약, 차단기가 동작하면 실시간으로 이벤트를 서버에 전송하게 되고, 지능경 경보 추론기 IAP(Intelligent Alarm Processor)는 그 이벤트를 확인, 주변압기 사고인 경우 모선 재구성 솔루션의 직관적 추론부에 그 이벤트 내용을 전송한다. 이때 직관적 추론부는 실시간 부하패턴과 유사성을 가지는 목표패턴을 확인, 모선재구성을 추론하게 된다. 그림 1은 본 연구에서 제안되는 실시간 모선 재구성 솔루션의 구성을 보인다.

#### 3.1 클러스터링 기반 학습패턴 생성부 설계[9-10]

클러스터링 기법은 다량의 패턴들중 유사성을 가지는 패턴들만을 하나의 집단으로 분류하는 기법으로써 클러스터 중심

점으로 표시되는데, 임계값(Threshold) 알고리즘, 최대최소거리 알고리즘, k-평균화 알고리즘 등이 존재한다. 최대최소거리 알고리즘은 임계값 알고리즘의 단점을 개선하기 위해서 유클리디언 거리 개념의 최대최소 거리를 이용하며, 클러스터간의 평균거리를 기반으로 클러스터를 합리적이고 자율적으로 확장시켜 나갈 수 있는 장점을 가진다.

먼저, 임의적으로 하나의 패턴 x1을 선택하여 초기집단 중심점 z1으로 정한다. 다음, 임계값 알고리즘의 경우, 임의의 패턴으로부터 식 (2)로 표시되는 x2까지의 거리 Di가 임계값 T보다 큰 경우 그 패턴을 새로운 군집 중심점으로 정하며 모든 패턴들에 대해 이 과정을 반복함으로써 클러스터링을 실행한다.

$$D_i = [w_1(z_{1i} - x_{1i})^2 + w_2(z_{2i} - x_{2i})^2 + \dots + w_n(z_{mi} - x_{mi})^2]^{1/2} \quad (2)$$

식 (2)에서 wi는 I번째 가중함수이다. 그러나 임계값 알고리즘의 경우 클러스터링 과정이 T 값에 심각하게 영향을 받는 단점을 가지기 때문에, 최대최소거리 알고리즘이 제안된다. 최대최소거리 알고리즘은 패턴 x1으로부터 가장 먼 패턴을 z2로 선택한 후, 최소거리 판별기를 이용하여 나머지 패턴들에 대해서 식 (2)로 표시되는 거리를 계산하여 어느 군집에 속하는 지를 결정한다. 다음, 클러스터의 중심점들을 zi를 구한다. 이때, i번째 군집의 군집 중심점(cluster center)은 군집내의 패턴이 N개 그리고 형상소의 수가 n이라면 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$z_i = \frac{1}{N} \left[ \sum_{j=1}^N x_{1j} \quad \sum_{j=1}^N x_{2j} \quad \dots \quad \sum_{j=1}^N x_{nj} \right] \quad (3)$$

다음에 각 군집들에 대해 소속패턴들 중 클러스터 중심점으로부터 가장 먼 패턴의 클러스터 중심점까지의 거리를 클러스터 중심점들 사이의 평균거리와 비교한다. i, k번째 군집 중심점들 사이의 평균거리는 식 (4)로 표시한다.

$$AvgD = \frac{1}{2} [(z_{1i} - z_{1k})^2 + (z_{2i} - z_{2k})^2 + \dots + (z_{mi} - z_{mk})^2]^{1/2} \quad (4)$$

만약, 최대거리가 이 평균거리보다 크면 이 패턴은 새로운 클러스터 중심점이 된다. 이 클러스터링 과정은 모든 클러스터들에 대해서 실시되며, 임의의 새로운 클러스터 중심점들이 나타나지 않을 때까지 반복된다.

#### 3.2 너비제한탐색 기반 제어전략 생성부 설계

제어전략 생성부는 너비제한 탐색법을 이용하여 설계된다. 그림 5는 추론엔진에 의해서 생성되는 탐색트리를 보이는데, ○는 디바이스 제어후 계통구성을, ●는 목표노드(최종 시스템 재구성)를 나타낸다. 먼저 추론엔진은 주변압기 사고를 해소하기 위해 그림 5에 보인바와 같이 직접적 또는 단계적으로 이벤트 해소에 영향을 미치는 CB나 아이소레이터들을 탐색, 깊이 1의 하위노드(children node)들을 구성한다. 만약 주변압기사고 발생시 문제를 가능케 하는 해소할 수 있는 4개의 제어후보가 존재한다면 초기노드는 깊이 1에 4개의 하위노드들 {N1,2, N1,3, N1,3, N1,4}로 확장된다. 각 브랜치들에

대한 탐색과정에서는 먼저, 해당 제어후보에 대한 제어비용 즉, CB나 아이소레이터 제어 후 시스템의 부하분담 균등화 지표가 휴리스틱 규칙[HR]에 근거하여 추정된다.

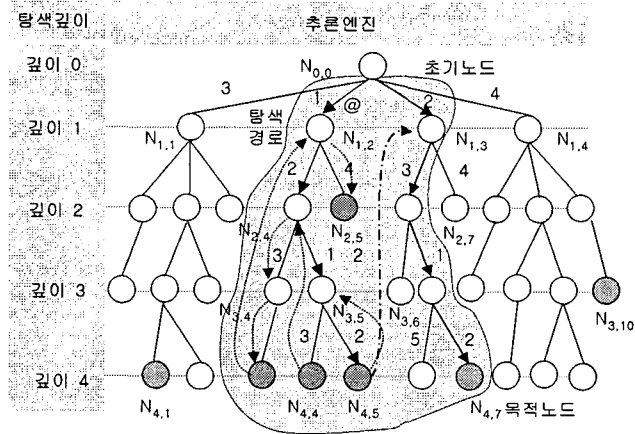


그림 2 너비제한 탐색법  
Fig. 2 Breadth-limit search method

HR] 부하분담 균등화 지표 변화량  $\Delta S$ 가 작은 후보를 우선, 선택한다. 이 규칙은 부하절체로 인한 부하분담 평균화 지표  $\Delta S$ 가 작은 부하절체 후보를 우선적으로 선택하여 과부하분을 가급적 경부하 주변압기들에 적절하게 분담시킴으로써 변전소 운전의 안정성을 제고하기 위한 규칙이다. 만약, 절체될 부하 TL이  $\alpha$ [KVA]인 경우 시스템의 부하 균등화 지표 변화  $\Delta S$ 는 절체전과 절체후의 부하 균등화 지표의 차, 식 (5)로 표시된다. 여기서,  $E_i = TIL_i - TAL_i$ 이다.

$$\Delta S = (T_{bala} + F_{bala}) - (T'_{bala} + F'_{bala}) \quad (5)$$

$$= -2\sigma(\Delta T_s + \Delta F_s) - 2\sigma(\Delta T_r + \Delta F_r) + 4\sigma^2$$

다음 최소 부하분담 균등화 지표를 가지는 브랜치들이 우선적으로 선택되는데, 깊이 1의 노드들 중 최소의 휴리스틱 탐색비용을 가지는 노드 {N1,2}가 선택된다. 따라서 CB나 아이소레이터를 가상적으로 제어한 후 부하계산을 실시함으로써 식 (6)으로 표시되는 시스템 운영제약조건의 만족여부가 검증하게 되는데,  $TNC_i$ ,  $TAL_i$ 는 각각  $T_i$ 의 정격용량과 실제 부하를 표시한다.

$$TAL_i \leq TNC_i, \quad i \in T \quad (6)$$

만약 제약조건을 위반하는 경우 노드의 확장이 중단되나, 제약조건을 만족하는 경우 주변압기 사고부하가 완전히 절체되었는지 검사된다. 즉 각 노드에서 목적노드 조건이 검사된다. 그림에서는 사고문제가 완전히 해소되지 않은 경우이기 때문에 깊이 2의 노드들{N2,4, N2,5}로 확장된다. 다음 동일하게 휴리스틱 비용이 추정되며 최소비용을 가지는 노드 {N2,5}가 우선, 선택된다. 다음 부하계산을 실시한 후 시스템 운영제약조건과 목적노드 조건이 검사되는데 만약 노드 {N2,5}가 두 조건을 모두 만족하는 경우, 목적노드로 확인된다. 이때 목적노드에 이르기까지의 탐색경로가 주변압기 사고문제 해소를 위한 첫 번째 해가 되는데, 이 해를 주변압기

사고 해소전략으로 채택하는 경우 최선우선 탐색법이 된다. 그러나 이 경로가 최적 해를 보장하기 어렵기 때문에 이 해를 지식베이스의 제어전략으로 채택할 수 없다. 따라서 탐색 트리를 역추적하여 다음 목적노드를 탐색하게 된다. 노드 {N2,5}가 탐색되나 목적노드가 아니기 때문에 깊이 3의 노드들{N3,4, N3,5}로 확장된다. 여기서 최소비용의 노드 {N2,5}가 우선, 선택되나 목적노드가 아니기 때문에 다시 깊이 4의 노드들 {N4,4, N4,5}로 브랜치가 확장된다. 그리고 가상적인 부하절체 및 부하계산 후 시스템 운영제약조건과 목적노드 조건을 검사한다. 그림에서 노드 {N4,5}가 목적노드로 선택된다. 그리고 초기노드에서 노드 {N4,5}까지의 탐색경로가 두 번째 주변압기 사고부하 절체전략이 된다. 이 과정은 제한된 탐색 너비 수에 이르기까지 반복되는데 그림에서와 같이 탐색너비를 5로 제안한 경우 목적노드들 {N4,5, N3,4, N4,7}를 탐색하게 되며, 이들 중 최소의 부하분담 균등화 지표를 가지는 노드(경로)를 주변압기 사고 해소를 위한 최종 부하절체 전략으로 선정한다. 이러한 전략을 너비제한 탐색법이라 하며 최선우선 탐색법에 비해 보다 개선된 목적지표를 가지는 부하절체 전략을 얻을 수 있다. 특히, 전 공간 탐색법의 경우 탐색공간이 대규모이며 일반적으로 주변압기 사고 문제의 경우 휴리스틱 탐색기만으로 수백개 이내에서 최적해를 얻을 수 있기 때문에 너비제한법이 임의의 부하패턴에 대한 최적해를 얻는 데 매우 효율적이다.

### 3.3 패턴 인식부 설계

직관적 추론부의 패턴 인식부는 이벤트 발생시 실시간 시스템과 미리 구축된 지식베이스내의 학습된 시스템을 비교하여, 가장 유사한 시스템(nearest neighbors)을 직관적으로 추론, 대응하는 제어전략을 수립하도록 설계한다. 여기에서는 실시간 부하패턴과 유사한 부하패턴을 얻기 위해 최소거리 판별법을 적용한다. 이 방법에서 유사성의 정도는 식 (4)로 표시되는 유클리디언 거리  $D_i$ 에 의해서 판별된다.

$$D_i = [w_1(r_{1i} - s_{1i})^2 + w_2(r_{2i} - s_{2i})^2 + \dots + w_n(r_{ni} - s_{ni})^2]^{1/2} \quad (7)$$

식 (7)에서,  $s_{ij}$ 는 지식베이스내에 기 구축된  $i$ 번째 패턴의  $j$ 번째 요소이며,  $r_{mj}$ 는 목표 시스템의  $j$ 번째 요소이다.  $w_j$ 는 가중함수으로써 예측된 결과의 정확성과 신뢰성을 증가시키기 위해서 도입되는데, 오차거리의 실시간 시스템에 대한 상대적 크기를 나타내기 위해서  $1/r_{mi}^2$  으로 표시한다.

### 4. 주변압기 사고 처리 전략 설계

본 연구에서 제안하는 클러스터링 기반 주변압기 사고 이벤트 처리 전략은 그림 3에 보인바와 같이 변전소 DB로부터 데이터베이스를 구축하는 단계로부터 모션 재구성 테이블 작성까지 크게 11 단계로 구성된다.

단계 1] 변전소 DB를 구축한다. 변전소내의 주변압기, 배전선로, 모선, 차단기 및 아이소레이터들의 전기적 연결성은 물론 부하 데이터 정보를 입력한다.

단계 2] 실시간 DB를 구축한다. 변전소 DB로부터 주변압기, 배전선로, 모선, 차단기 및 아이소레이터들의 전기적 연결성을 메모리 공간내에 변전소 객체 모델을 구축한다.

단계 3] 운전 솔루션의 초기치를 설정한다. 변전소 DB에 기록된 부하패턴들 중에서 검색하고자 하는 검색기간을 설정하고 다음, 너비제한 탐색법을 위한 최대너비를 설정한다.

단계 4] 설정기간 부하패턴 세트를 구축한다. 변전소 DB로부터 단계 3]에 의해 설정된 초기 설정치에 근거하여 설정기간 동안의 주변압기 및 배전선로들의 부하패턴 데이터 세트를 주 변압기별로 구축한다.

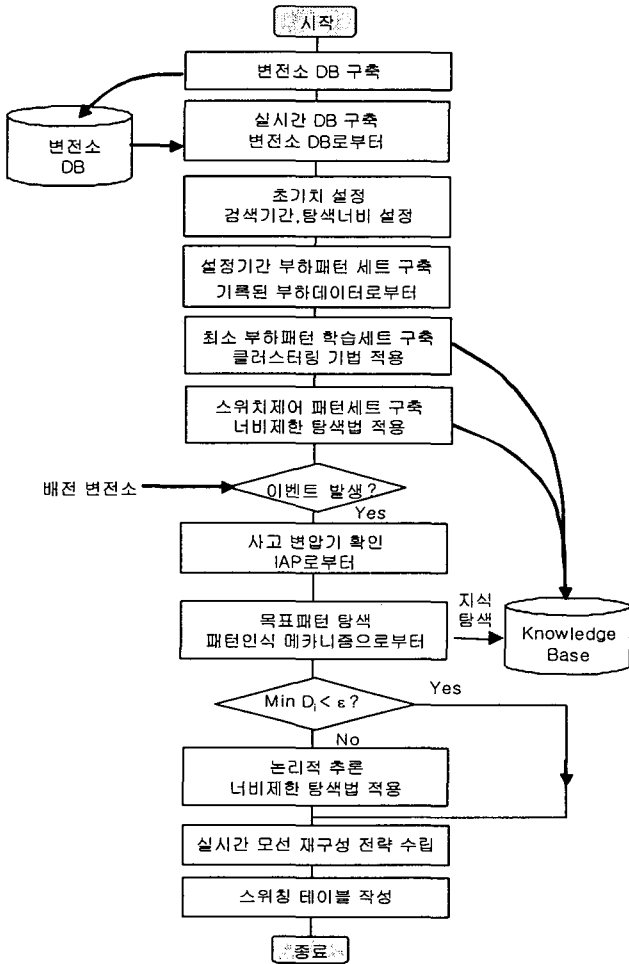


그림 3 클러스터링 기반 주변압기 사고 이벤트 처리 전략  
Fig. 3 Clustering-based MTr. fault event processing strategy

단계 5] 최소 부하패턴 학습세트를 구축한다. 단계 4]에 의해서 얻어진 부하패턴에 대해 변압기 별로 최대최소거리 클러스터링 기법을 적용하여 클러스터 센터들로 구성되는 최소화된 부하패턴 학습세트를 구축한다.

단계 6] 스위치제어 패턴세트를 구축한다. 단계 5]에 의해서 구축된 최소 부하패턴 학습세트내의 각 클러스터 기반 부하패턴에 대해 너비제한 탐색법에 근거하여 최적의 모션 재구성 전략을 수립한다. 그리고 {클러스터기반 부하패턴, 스위치제어 패턴}으로 구성되는 지식을 지식베이스에 저장한다.

단계 7] 이벤트 감시모드하에서 이벤트가 발생하면 단계 8]로 가서 IAP를 통해 주변압기 사고 이벤트를 확인한다.

단계 8] 주변압기 사고 이벤트를 확인한다. 지적정보처리 기(IAP)는 이벤트 정보로부터 변압기 사고 및 사고 변압기의

ID를 확인한다.

단계 9] 패턴인식 기법을 적용하여 클러스터 기반 부하패턴과 실시간 부하패턴 사이의 오차가 최소인 즉,  $\text{Min}(D_i) \leq \epsilon$ 를 만족하는 클러스터를 확인한 후, 단계 10]으로 가서 대응하는 모션 재구성 전략을 수립한다. 반면에  $\text{Min}(D_i) > \epsilon$ 인 경우, 단계 11]로 간다.

단계 10] 모션 재구성 스위칭 테이블을 작성한다. 모션 운전 조건을 고려하여 안전한 모션 재구성 테이블을 작성한다. 프로그램 종료를 원하면 종료한다. 아니면 단계 7]로 가서 이벤트 감시모드로 동작한다.

단계 11] 실시간 모션 재구성 전략을 수립한다. 실시간 부하패턴에 대해 너비제한 탐색법 기반 제어전략 생성부를 실행시켜 최적의 모션 재구성 전략을 수립한다. 그리고 실시간 부하패턴을 추가하여 {클러스터기반 부하패턴, 스위치제어 패턴}으로 구성되는 새로운 지식을 지식베이스에 저장한다. 그리고 단계 10]으로 가서 모션 재구성 테이블을 작성한다.

### 5. 시뮬레이션 평가 및 결과분석

본 연구에서는 설정기간 동안의 부하패턴 세트로부터 패턴 클러스터링 기법을 적용하여 얻어진 최소화된 학습세트를 기반으로 하는 실시간 모션 재구성 전략의 유효성을 확인하기 위해 그림 4와 같은 대표적인 배전 변전소모델을 도입, 제안된 접근법을 적용, 평가한다.

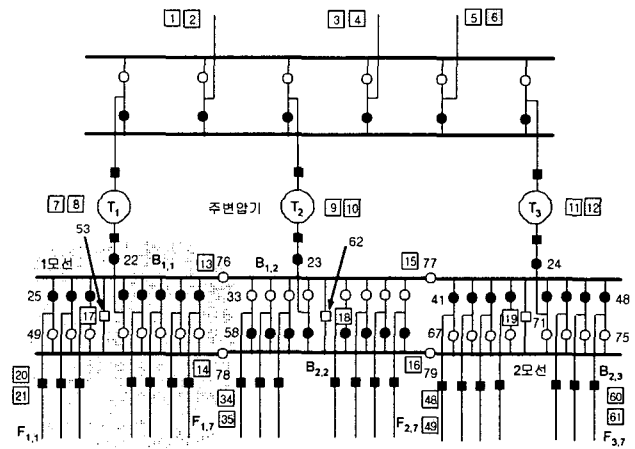


그림 4 배전 변전소 모델  
Fig. 4 Distribution substation model

그림 4에서  $B_{j,k}$ 는 j모션 k모션구간,  $LS_{i,j,k}$ 는 i모션 j모션 구간 k번 라인 스위치를 나타낸다. 그리고  $BS_{i,j,k}$ 는 i모션 j와 k모션구간사이의 섹션 스위치를,  $CB_j$ 는 j모션간 차단기를 표시한다. ■, □는 차단기의 투입, 개방된 상태를, 반면에 ●, ○는 섹션 스위치나 라인 스위치의 투입, 개방 상태를 표시한다. □안의 숫자는 IED의 번호를 표시한다.

#### 5.1 데이터베이스 구축

시뮬레이션을 위해 그림 4에 보인 대표적인 배전 변전소 모델에 대한 주변압기, 배전선로, 모션, 연결선, 개폐기 등의 파일로 구성된 데이터베이스를 구축한다. 그림 5는 입력된

데이터베이스 파일 중 24시간 주변압기 부하패턴 데이터를 MFC 화면을 통해 보인다.

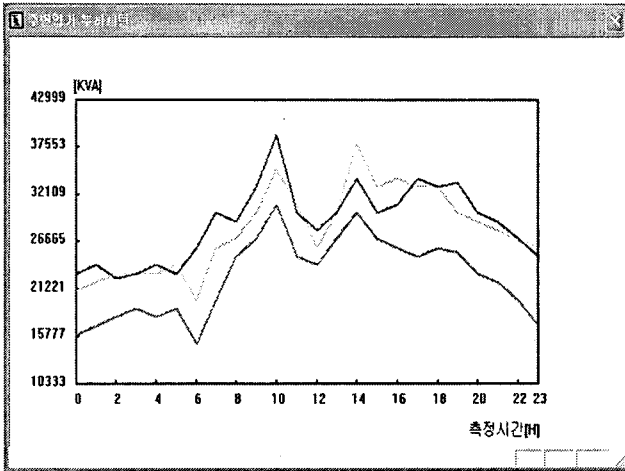


그림 5 주변압기 부하패턴들  
Fig. 5 Main transformer load patterns

그림 6은 입력된 데이터베이스 파일 중 24시간 배전선로의 부하패턴 데이터를 MFC 화면을 통해 표시한다.

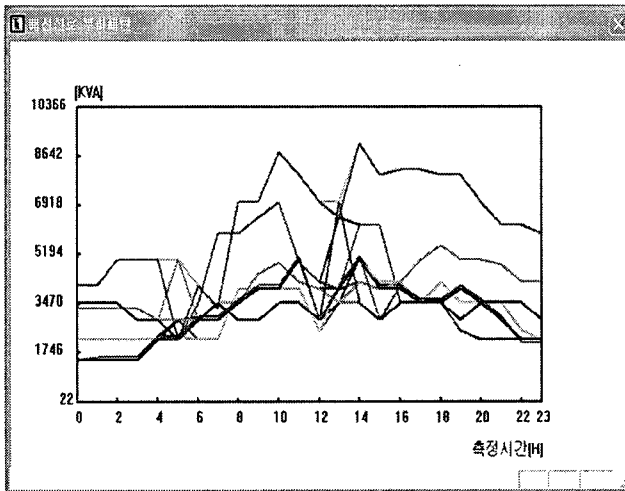


그림 6 배전선로 부하패턴들  
Fig. 6 Distribution line load patterns

5.2 부하패턴 세트 구축

부하패턴 검색기간을 3일로 설정하여 3일간의 부하패턴 세트를 구축하였다. 그림 7은 주변압기 1의 KB에 저장된 3일간의 부하패턴들 즉, 총 72개의 부하패턴들 중 28개의 부하패턴들을 보인다. KB는 기본적으로 학습패턴의 규모를 최소화하기 위해 주변압기별로 구축된다. KB1은 주변압기 T<sub>1</sub> 사고시 부하절제를 위해 요구되는 부하패턴들을 보인다. 그림 7에서 각 패턴들은 NUMBER 필드를 제외하고 총 10개의 PATTERN 필드들로 구성되는데 PATTERN 1-3은 주변압기 T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub>, T<sub>3</sub>의 부하패턴을 표시하는 반면에 PATTERN 4-10은 주변압기 T<sub>1</sub>에 연결된 배전선로 F<sub>1,1</sub>,...,F<sub>1,7</sub>의 부하패턴 데이터를 보인다.

NUMBER	PATTE	PATTE	PATTE	PATTE	PATTE	PATTE	PATTE	PATTE	PATTE	PATTE
0	1900.000	2100.000	2300.000	2200.000	2200.000	4100.000	3300.000	3500.000	1500.000	1500.000
1	1700.000	2200.000	2400.000	2200.000	2200.000	4100.000	3300.000	3500.000	1500.000	1500.000
2	1800.000	2300.000	2500.000	2200.000	2200.000	5000.000	3300.000	3500.000	1500.000	1500.000
3	1900.000	2300.000	2500.000	2200.000	2200.000	5000.000	3300.000	3500.000	1500.000	1500.000
4	1800.000	2300.000	2400.000	2200.000	2200.000	5000.000	2900.000	2900.000	2200.000	2300.000
5	1900.000	2400.000	2300.000	2200.000	2200.000	5000.000	2900.000	2900.000	2300.000	2300.000
6	1500.000	2000.000	2300.000	2500.000	2200.000	4100.000	3300.000	3500.000	2300.000	3000.000
7	2000.000	2600.000	3000.000	5000.000	2200.000	3300.000	3500.000	3500.000	2900.000	3000.000
8	2500.000	2700.000	2500.000	5000.000	4000.000	7000.000	3500.000	2900.000	2900.000	3500.000
9	2700.000	3000.000	3300.000	6500.000	4000.000	7000.000	4500.000	2900.000	4000.000	4100.000
10	3100.000	3500.000	3500.000	7000.000	4000.000	6800.000	4000.000	3500.000	4000.000	4100.000
11	2500.000	3100.000	3000.000	4900.000	4000.000	8000.000	4200.000	3500.000	5000.000	5100.000
12	2400.000	2800.000	2800.000	4200.000	2500.000	7000.000	4000.000	2900.000	2900.000	2900.000
13	2700.000	3000.000	3000.000	6500.000	3500.000	7000.000	4000.000	3500.000	4000.000	4100.000
14	3000.000	3800.000	3400.000	6200.000	5000.000	5100.000	4200.000	5000.000	5000.000	5100.000
15	2700.000	3300.000	3000.000	6200.000	4200.000	6000.000	4000.000	2900.000	4000.000	4100.000
16	2600.000	3400.000	3100.000	3500.000	4200.000	8200.000	4200.000	3500.000	4000.000	4100.000
17	2500.000	3300.000	3400.000	3500.000	3500.000	8200.000	5000.000	3500.000	3500.000	3500.000
18	2600.000	3300.000	3300.000	3500.000	3500.000	4200.000	6000.000	3500.000	3500.000	3500.000
19	2500.000	3000.000	3350.000	2500.000	3500.000	8000.000	5000.000	2900.000	4000.000	4100.000
20	2300.000	2500.000	3000.000	2200.000	3500.000	7000.000	5000.000	3500.000	3500.000	3500.000
21	2200.000	2800.000	2900.000	2200.000	3500.000	6200.000	4800.000	3500.000	2900.000	3000.000
22	2000.000	2700.000	2700.000	2200.000	2500.000	6200.000	4200.000	3500.000	2200.000	2100.000
23	1700.000	2500.000	2900.000	2200.000	2200.000	5300.000	4200.000	2900.000	2200.000	2100.000
24	16991.952	22636.957	23534.797	2340.411	2250.967	4193.884	3620.443	3598.611	1503.433	1615.363
25	17256.109	22109.330	24822.193	2276.686	2341.654	4240.725	3436.806	3545.781	1513.661	1687.229
26	19258.666	23777.365	23979.424	7392.734	7317.805	5235.012	3917.816	3663.021	1538.998	1698.298
27	20640.342	24119.197	23201.102	2824.473	2856.069	5389.232	3656.194	3146.660	1543.951	1738.300

그림 7 KB1의 부하패턴 세트  
Fig. 7 Load pattern set of KB1

5.3 클러스터 세트/제어패턴 세트 구축

각각의 KB에 구축된 부하패턴 세트에 최대최소 클러스터링 기법을 적용하여 최소화된 부하패턴 세트를 구축하였다. 기법을 적용한 결과 KB1,...,KB3에 구축된 각각 72개의 부하패턴들을 49, 42, 36개의 클러스터들로 축소하였음을 확인할 수 있다. 그림 8은 최소화된 클러스터 세트 중 KB1의 클러스터들을 보인다.

NUMBER	PATTE	PATTE	PATTE	PATTE	PATTE	PATTE	PATTE	PATTE	PATTE	PATTE
21	39280.549	35512.539	33129.113	3645.634	4593.172	8054.201	5590.675	3573.948	3540.921	3812.301
22	28951.238	33007.520	33374.613	5143.645	4195.737	8240.010	4439.482	3662.369	5315.302	5204.694
23	26300.000	34000.000	31000.000	3500.000	4200.000	8200.000	4300.000	3500.000	4000.000	4100.000
24	26311.744	35154.258	32165.279	3545.001	4547.477	8811.305	4574.279	3725.165	4280.237	4319.997
25	26194.006	34617.541	33036.055	3644.083	4517.240	8251.890	4242.702	3648.099	4211.175	4315.243
26	25000.000	33000.000	34000.000	3500.000	3500.000	8200.000	5000.000	3500.000	2500.000	3500.000
27	25247.320	30673.426	30603.613	2294.064	3723.254	7196.464	5253.953	3652.236	3714.767	3721.156
28	25000.000	31000.000	30000.000	4900.000	4000.000	8000.000	4200.000	3500.000	5000.000	5100.300
29	27000.000	34000.000	30000.000	6500.000	3500.000	7000.000	4000.000	3500.000	4000.000	4100.000
30	24304.955	25435.369	23091.606	4305.430	2620.460	7231.241	4393.291	3632.364	2325.994	2363.978
31	25348.080	28712.520	30536.164	6489.259	4195.370	7156.353	3625.245	3125.825	3679.689	3773.916
32	16000.000	21000.000	23000.000	2200.000	2200.000	4100.000	3300.000	3500.000	1500.000	1500.000
33	16163.091	21664.367	23003.104	2361.234	2256.956	4192.295	3375.453	3566.150	1629.310	1614.495
34	17080.536	23063.105	24134.770	2411.473	2218.699	4391.646	3617.843	3700.365	1631.799	1655.393
35	16920.563	22636.957	23534.797	2340.411	2250.967	4193.884	3620.443	3598.611	1503.433	1615.363
36	20000.000	27000.000	27000.000	2200.000	2500.000	6200.000	4200.000	3500.000	2200.000	2100.000
37	23000.000	25000.000	30000.000	2200.000	3500.000	7000.000	5000.000	3500.000	3500.000	3600.000
38	23259.797	23651.186	23762.367	2242.534	3515.182	6678.127	5185.296	3808.364	2300.513	3134.587
39	22000.000	29000.000	29000.000	2200.000	3500.000	6200.000	4800.000	3500.000	2900.000	3000.000
40	17246.291	28275.705	26520.279	2372.404	2243.306	6156.595	4519.944	3925.666	2340.622	2268.959
41	15801.733	25195.344	24398.111	2284.182	2291.164	5170.279	3925.632	3134.348	1500.228	1615.941
42	26641.054	33207.525	32348.637	6991.284	4063.354	7919.483	4820.234	3189.637	4310.232	4363.077
43	28274.645	33937.721	33745.611	7108.658	3992.105	7236.577	4328.976	3706.973	4351.961	4425.978
44	27000.000	33000.000	30000.000	6200.000	4200.000	8000.000	4200.000	2900.000	4200.000	4100.000
45	23949.375	32765.361	36328.498	2564.745	3636.905	8049.513	5461.889	2943.013	4357.103	4247.361
46	25000.000	30000.000	33500.000	2500.000	3500.000	8000.000	5000.000	2900.000	4200.000	4100.000
47	23161.236	33445.760	31302.955	2384.199	3670.338	6713.225	5068.236	3931.575	3000.000	3616.242
48	25510.740	23365.925	23662.629	4626.725	2826.365	7342.575	4179.888	3197.900	3172.715	2353.049

그림 8 KB1의 클러스터 기반 학습세트  
Fig. 8 Cluster-based training set of KB1

그림 8의 각 줄어진 부하패턴들은 공통필드를 통해 그림 9에 보인 모션 재구성을 위한 스위치 제어패턴들과 1:1로 연계된다.

NUMBER	SW1	SW2	SW3	SW4	SW5	SW6	SW7	SW8	SW9	SW10
0	3000	5401	2600	5001	3100	5501	2500	4301	2400	4801
1	2400	4801	2800	5201	2900	5301	3000	5401	3100	5501
2	2900	5301	2900	5301	3000	5401	3000	5401	3100	5501
3	2500	4901	3000	5401	2400	4801	3100	5501	2500	5001
4	2500	4901	3000	5401	2400	4801	3000	5401	2300	5301
5	3100	5501	2600	5001	2400	4801	3000	5401	2500	4901
6	3000	5401	3100	5501	2800	5001	2400	4801	2500	4901
7	3100	5501	2800	5001	2400	4801	2500	4901	3000	5401
8	3000	5401	2600	5001	3100	5501	2400	4801	2500	4901
9	2400	4801	2800	5201	3000	5401	3100	5501	2200	5301
10	3000	5401	2600	5001	3100	5501	2500	4901	2400	4801
11	2400	4801	2600	5001	2500	4901	3000	5401	3100	5501
12	3000	5401	2800	5001	2400	4801	2500	4901	3100	5501
13	2100	2900	5301	2900	5001	3000	5401	2500	4901	5801
14	2100	2900	5301	2900	5001	2800	5301	5201	7101	-1
15	2100	2900	5301	2900	5001	2500	4901	3000	5401	3100
16	2100	2900	5301	2900	5001	3000	5401	2300	5201	3100
17	2100	3000	5401	2600	5001	3100	5501	2400	4901	2500
18	2100	2400	4801	2600	5001	2900	5301	2500	4901	3000
19	2100	2000	5001	3000	5401	2900	5301	2400	4901	3100
20	2100	2900	5301	2400	4801	2500	4901	2800	5201	3100
21	2100	2600	5001	2400	4801	3000	5401	3100	5501	2500
22	2100	2600	5001	2400	4801	2900	5301	3000	5401	3100
23	2400	4801	2600	4901	2900	5301	2800	5201	3000	5401
24	2100	2400	4801	2600	5001	3000	5401	2500	4901	2900
25	2100	2400	4801	2600	5001	2900	5301	3100	5501	2500
26	2100	2600	5001	2900	5301	2900	5301	2400	4901	3100
27	2100	2900	5301	3100	5501	2500	4901	3300	5401	2400
28	2500	4901	2800	5001	3000	5401	3100	5501	2300	5301

그림 9 KB의 모선재구성 스위치 제어패턴  
Fig. 9 Switch control pattern for bus reconfiguration of KB1

5.4 주변압기 T<sub>1</sub>의 사고 이벤트 모의

주변압기 T<sub>1</sub>의 사고 이벤트를 모의한다. 그림 10에 보인 IED 시뮬레이터를 이용하여 다양한 차단기 상태를 모의한다. IED를 감시진단 모드로 설정한다. 감시모드는 실측 데이터 모의내용의 변화를 감시하며 변화시 실시간으로 상태를 반영하여 추론결과를 표시한다. IED 번호를 7번, 차단기상태를 "OFF" 그리고 계전기 상태를 "TRIPED"로 하면 IED는 차단기 내부상태를 추론한다. 그리고 이벤트를 IAP로 전송한다.

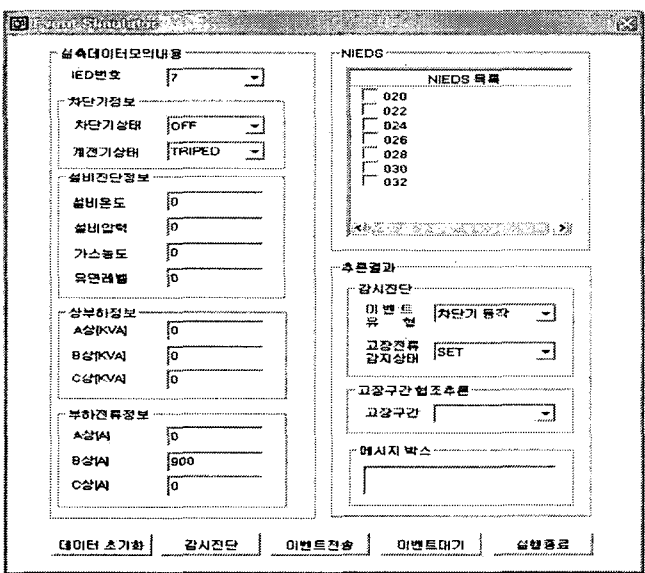


그림 10 개폐기 IED 시뮬레이터  
Fig. 10 Switch IED Simulator

다음 IAP는 IED 시뮬레이터로부터 전송되는 데이터를 접수하여 사고이벤트의 유형을 추론한다. 그림 11은 IAP의 추론결과를 보이는데 주변압기 T<sub>1</sub>의 사고가 발생하였음을 추론한다. 이때 주변압기 T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub>, T<sub>3</sub>용량은 30/40, 45/60, 30/40[MVA]이고 부하패턴 세트는 {25040, 43040, 25020, 3572, 4511, 4328, 3091, 3183, 2038, 3343}이다. 부하패턴세트

내의 부하단위는 [KVA]이다. 그리고 패턴매칭 허용오차는 0.1로 하였다.

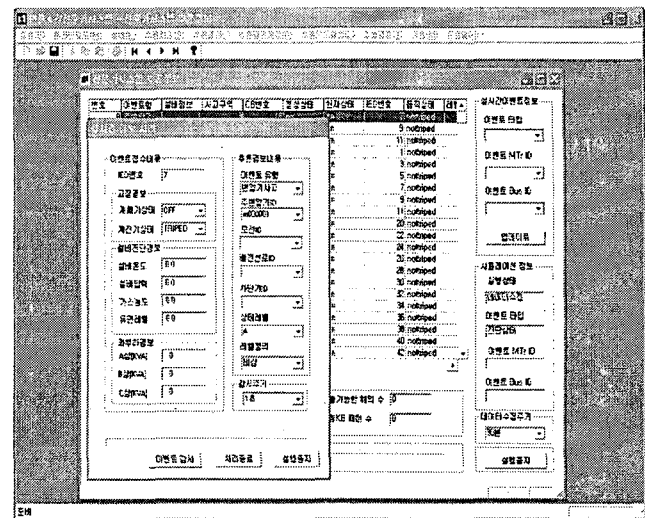


그림 11 IAP 추론결과  
Fig. 11. IAP inference results

다음 최소거리 판별법을 이용한 패턴인식결과에 근거한 모선 재구성 전략은 그림 12와 같다.

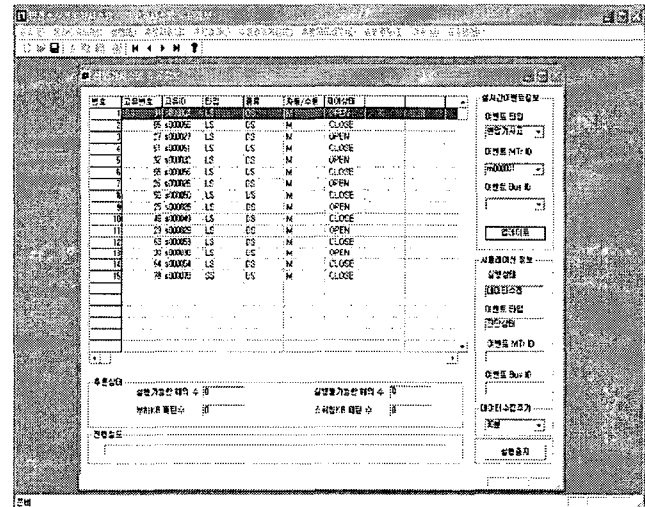


그림 12 최소거리 판별기반 패턴인식 결과  
Fig. 12 Minimum distance classification based pattern recognition results

6. 결론

본 연구에서는 선택된 기간 동안의 주변압기나 배전선로 부하패턴들로부터 패턴 클러스터링 기법을 적용하여 최소화된 부하패턴 학습세트(TS)를 얻기 위한 방법론과 이를 이용한 모선 재구성 전략을 제안하였다. 패턴 클러스터링 기법으로는 최대최소거리 클러스터링 기법을 채택하였다. 제안된 기법은 주어진 기간 동안 얻어진 부하패턴 세트에 패턴 클러스터링 기법을 적용, 대표적인 패턴 클러스터들을 생성하기

때문에 학습해야 할 부하패턴의 수를 크게 줄이면서 만족할 만한 패턴매칭 성공률을 얻을 수 있다. 대표적인 배전 변전소 모델에 대한 평가결과에서 클러스터링 적용결과는 KB1, KB2, KB3에 저장되는 3일간의 72개의 부하패턴들에 대해 각각 49, 42, 36개의 클러스터 규모를 보임으로써 학습패턴의 규모를 상당한 수준으로 줄일 수 있음을 확인하였다. 또한 이를 기반으로 하는 주변압기 사고 모의에서 최소거리 판별법에 기반한 직관적 추론에서 정확하게 해를 추론할 수 있음을 확인하였다. 제안된 전략은 Visual C++의 MFC로 설계, 구현되었다.

**감사의 글**

이 논문은 2006년도 남서울대학교 교내 연구비의 지원에 의하여 연구되었음

**참 고 문 헌**

[1] 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.

[2] 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 Systems.

[3] Mori S., IHata, T.Usui and K. Morita, "Expert System Supporting Substation Service Restoration," ESAP IV, pp 131-136, January 1993.

[4] 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.

[5] 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.

[6] 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.

[7] 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.

[8] 고윤석 "자동화된 변전소의 주변압기 사고복구를 위한 패턴 인식 기법에 기반한 실시간 모션 재구성 전략 개발", 전기학회논문지, Vol. 53, No. 11, pp.596-603, 2004년 11월.

[9] Luger, G.F. and Stubblefield, W.A. ARTIFICIAL INTELLIGENCE AND THE DESIGN OF EXPERT SYSTEM. the Beniman/Cummings Publishing Company, Inc.

[10] Patterson, Dan W, INTRODUCTION TO ARTIFICIAL INTELLIGENCE AND EXPERT SYSTEMS, Prentice-Hall International Inc.

[11] SIMENS, IEC61850을 적용한 변전소 자동화 파일럿 프로젝트.

**저 자 소 개**



**고 윤 석 (高 鈞 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 한국전기연구소 선임연구원. 1996년 4월~1997년 2월 포스코 경영연구소 연구위원. 1997년 3월~현재 남서울대학교 전자정보통신공학부 부교수.