

자동화된 변전소의 주변압기 사고복구를 위한 패턴인식기법에 기반한 실시간 모선재구성 전략 개발

論文

53A-11-3

Real-Time Bus Reconfiguration Strategy for the Fault Restoration of Main Transformer Based on Pattern Recognition Method

高 銳 錫[†]
(Yun-Seok Ko)

Abstract - This paper proposes an expert system based on the pattern recognition method which can enhance the accuracy and effectiveness of real-time bus reconfiguration strategy for the transfer of faulted load when a main transformer fault occurs in the automated substation. The minimum distance classification method is adopted as the pattern recognition method of expert system. The training pattern set is designed MTr by MTr to minimize the searching time for target load pattern which is similar to the real-time load pattern. But the control pattern set, which is required to determine the corresponding bus reconfiguration strategy to these trained load pattern set is designed as one table by considering the efficiency of knowledge base design because its size is small. The training load pattern generator based on load level and the training load pattern generator based on load profile are designed, which are can reduce the size of each training pattern set from $\max L^{(m+f)}$ to the size of effective level. Here, L is the number of load level, m and f are the number of main transformers and the number of feeders. The one reduces the number of trained load pattern by setting the sawmiller patterns to a same pattern, the other reduces by considering only load pattern while the given period. And control pattern generator based on exhaustive search method with breadth-limit is designed, which generates the corresponding bus reconfiguration strategy to these trained load pattern set. The inference engine of the expert system and the substation database and knowledge base is implemented in MFC function of Visual C++. Finally, the performance and effectiveness of the proposed expert system is verified by comparing the best-first search solution and pattern recognition solution based on diversity event simulations for typical distribution substation.

Key Words : Substation Automation, Bus Reconfiguration, Pattern Recognition Method, Substation Restoration

1. 서 론

일반적으로 배전용 변전소는 154KV를 수전하여 주변압기를 통해 22.9KV로 강압한 후 수용가 지역을 경유하는 배전선로들을 통해 일반 수용가들에 직접적으로 전력을 공급하기 때문에 변전소내 주변압기 사고는 일반 수용가들에 대한 엄청난 정전파급효과를 발생시킬 수 있다. 따라서 주변압기 사고나 모선사고시 그 파급효과를 최소화하기 위한 많은 노력들이 시도되고 있다. 전력사업자들은 이러한 시도의 일환으로써 전력 SCADA 시스템을 도입, 변전소내의 CB를 원격제어하고 있다. 그러나 임의의 부하패턴 시점에서 이벤트가 발생, 모선간 CB의 조작만으로는 효율적인 부하절체 전략을 기대할 수 없다. 따라서 사고파급효과를 최소화하기 위해서 변전소내의 CB 뿐만 아니라 라인 스위치 그리고 섹션 스위치들을 원격에서 조작하여 변전소 모선을 실시간으로 재구성할 수 있는 고도화된 SCADA 기능의 구현이 요구되고 있다. 무

엇보다도, 이러한 자동화된 환경하에서 변전소 운전의 안정성을 제고하기 위해서는 합리적인 모선 재구성 전략을 실시간으로 수립, 시스템 운영자에게 제공함으로써 시스템 운영자의 잘못된 판단으로 인한 사고파급효과를 최소화할 수 있는 실시간 부하절체 전략 수립기능이 실현되어야 한다. 그러나 이 문제는 변전소내의 CB, 섹션 스위치 그리고 라인스위치들의 조합 최적화 문제이기 때문에 최적의 해를 얻기 위해서는 상당한 탐색시간이 요구될 수 있다[1-8]. 지금까지 이 문제를 해결하기 위한 많은 노력들이 시도되었는데, [1,2,7,8]에서는 휴리스틱 탐색전략에 기반하여 탐색공간을 최소화함으로써 탐색시간을 최소화할 수 있는 실시간 모선 재구성 전략을 제안한다. 그러나 이들 기법들은 일반적으로 실시간으로 제안된 전략의 안정성을 검증해야 하는 어려움이 따른다. 사실 시스템 운전자가 다양한 부하조건과 모선구성하에서 제안된 제어 솔루션의 안정성을 실시간으로 검증하는 것은 대단히 어렵다. 따라서 소프트웨어의 신뢰성을 확보하기 위한 N버전 프로그래밍 등 다양한 접근법들이 제안될 수 있는데, 그중 하나의 프로그램으로 제안된 전략의 안전성을 확보하고 실시간 조건을 만족하기 위해서는 제안된 전략에 위해서 수립된 모선 재구성 전략을 사전에 충분히 검증할 필요가 있다. 따라서, 본 연구에서는 자동화된 변전소에서 주변압기 사고시 부하절체의 안전성과 효율성을 제고할 수 있는 패턴 인

[†] 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 : 2004年 7月 6日

最終完了 : 2004年 9月 7日

식기법에 기반한 실시간 모선 재구성 전략을 새롭게 제안한다. 패턴인식 기법으로는 변형된 최소거리 판별법이 적용된다. 학습 부하패턴 세트(Training Set)는 실시간 부하 패턴으로부터 유사한 목표패턴 탐색시간을 최소화하기 위해 주변압기 별로 설계된다. 그러나 이들 부하패턴세트들로부터 제어 전략을 결정하는 제어전략 패턴세트는 탐색시간에 영향을 미치지 않기 때문에 데이터베이스 설계의 효율성을 고려하여 한개의 테이블로 설계된다. 그리고 각 부하패턴세트의 규모를 최대 $m \times L^{(m)}$ 개에서 효율적인 수준으로 줄이기 위해서 부하패턴 변화에 기반한 학습패턴 생성기능과 선택된 기간의 부하이력에 기반한 학습패턴 생성기능이 설계된다.

전자는 유사한 부하패턴의 주변압기나 배전선로를 동일한 부하패턴으로 놓음으로써 학습 되어 할 부하패턴의 수를 줄이는 반면 후자는 주어진 기간동안 보여진 부하패턴만을 고려함으로써 학습 되어 할 부하패턴의 수를 줄인다. 여기서, L은 부하레벨의 수, m과 f는 각각 주변압기와 배전선로의 수를 의미한다. 제안된 전략에서 각 학습 부하패턴들에 대한 모선 재구성 전략은 Exhaustive 탐색모드에 의해서 얻어진다. 학습 부하패턴 데이터베이스와 실시간 모선재구성 전략 표시를 위한 MMI는 Visual C++의 MFC기능을 이용하여 설계, 구현된다. 끝으로, 대표적인 변전소에 대해 데이터베이스를 구축하고 학습 부하패턴 세트를 생성시킴과 동시에 수개의 실시간 이벤트를 모의함으로써 제안된 전략의 정확성과 유효성을 검증한다.

2. 문제 정의

배전 변전소는 송전선으로부터 154KV를 수전한 후, 주변압기를 통해 22.9KV로 강압하여 수용가 지역을 경유하는 배전선로들을 통해 일반 수용가들에 직접적으로 전력을 공급한다. 그런데, 변전소내 22.9KV 모선은 154KV 수전단과는 달리 병렬운전을 배제하고 단독운전에 기반한 수지상 구조로 운전되기 때문에 주변압기 사고시소속된 모든 일반 수용가들이 정전을 경험하는 대규모 정전문제를 발생시킬 수 있다.

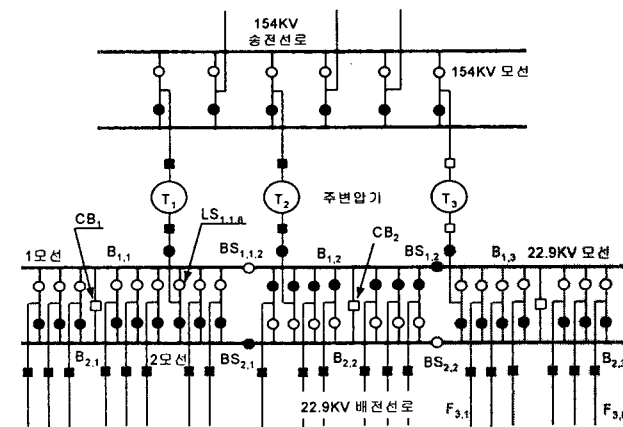


그림 1 배전 변전소 결선도
Fig. 1 Distribution substation diagram

따라서 주변압기 사고시 사고파급효과를 최소화하기 위해 22.9KV 모선은 2중으로 설계되며 모선상에는 CB나 섹션 스

위치 그리고 라인스위치들이 설치된다. 그림 1은 대표적인 154[KV]급 배전 변전소의 결선도를 보인다[8]. 배전 변전소의 모선은 그림 1에 보이바와 같이 부하절체가 가능하도록 2중화된 구조로 구성되는데, 전위에 위치하는 B_{1j}를 1모선, 후위에 위치하는 B_{2j}를 2모선이라 한다. 그리고 1, 2모선간에는 이벤트 발생시 피더 부하들을 1모선 또는 2모선에서 교차 모선 즉, 2모선 또는 1모선으로 절체하기 위한 라인 스위치를 LS_{ij,k}가 설치되며 모선구간들 사이에는 모선구간간 단로기들 BS_{ij,k}가 설치된다. 또한 필요시 신속한 모선간 부하절체를 위해 모선 타이 CB_j가 설치된다. 여기서 B_{j,k}는 j모선 k모선구간, LS_{ij,k}는 i모선 j모선구간 k번 라인 스위치를 나타낸다. 그리고 BS_{ij,k}는 i모선 j와 k모선구간사이의 섹션 스위치를, CB_j는 j모선간 차단기를 표시한다. ■, □는 차단기의 투입, 개방된 상태를, 반면에 ●, ○는 섹션 스위치나 라인 스위치의 투입, 개방 상태를 표시한다. 그림 1은 대표적인 배전 변전소 결선도를 보이는데 설비상태나 부하조건에 따라서 다양한 모선구성으로 운전이 가능하다.

주변압기 T₃에 사고 이벤트가 발생한 경우를 생각해 보자. 먼저 무부하 가압시험을 실시한다. 사고 주변압기 T₃가 전력을 공급하던 피더상의 CB들을 모두 개방하여 무부하 상태로 한 다음, 변압기 보호용 차단기를 재투입하여 그 성공여부를 확인한다. 만약 변압기 재투입에 성공하면 순시고장이나 실패하면 영구고장의 경우로 판정한다. 영구고장의 경우, 사고 피더들에 대한 부하절체를 시도한다. 이때, 사고 주변압기의 부하를 동일 변전소내의 타 뱅크로 절체하게 되는데, 이것은 동일 변전소내에서 문제를 해결함으로써 사고파급효과를 최소화시키고 동시에 전압문제를 방지하기 위한 것이다. 이때 기본적으로는 모선간 CB를 투입해서 사고 파급효과를 최소화하는 것을 원칙으로 하나 설비이력이나 변전소별로 부하조건에 따라 다양한 형태의 모선구성으로 운전이 가능하기 때문에 모선간 CB만을 투입해서 문제해결에 어려움이 있을 수 있다. 따라서 모선구간간 선로 스위치들 BS_{ij,k}와 LS_{ij,k}들이 이용되는데 이때, 운용목적은 모선조작의 신뢰성을 높이기 위해 개폐기 조작회수를 최소화할 수 있도록 해야 한다. 식 (1)은 이때의 운용목적을 보인다.

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

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

먼저 CB₃를 투입하여 정전피더들을 T₂로 절체하게 되는데, 이때 T₁의 부하가 최대허용용량을 초과하는 경우 정상상태의 두 변압기 T₁, T₂가 함께 부하를 분담하도록 CB₃를 투입하여 병렬운전을 실행한다. 그러나 부하추정에서 사고부하가 2대의 병렬분담용량을 초과하는 경우, 식 (2)를 만족하도록 사고선로들을 분리한다.

$$\min \sum_{i \in F_R} FAL_i \quad (2)$$

여기서, FAL_i : i번째 배전선로의 부하
F_R : 후보 MTr에 절체될 수 없는 정전선로 집합

다음, 섹션과 라인 스위치들 $BS_{i,j,k}$ 와 $LS_{i,j,k}$ 를 이용하여 정전부하를 최대허용용량 범위내에서 2대의 주변압기에 분담시키기 위한 부하절체 전략을 수립해야한다. 이때 식 (1)의 스위치 조작회수 최소화나 식 (3)의 부하 균등화가 정의된다.

$$\min(\sum (TIL_i - TAL_i)^2) \quad (3)$$

$$i \in T$$

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

그러나 중부하시나 피크부하시 한대의 주변압기로는 사고복구가 어렵기 때문에 2대이상의 타 변압기에 부하를 분담시키는데, 이 경우 개폐기의 조작회수보다는 가급적 피더부하들이 동일 변전소내에서 식 (3)의 운용목적에 근거하여 타뱅크에 균등하게 분담되도록 하는 것이 바람직하다. 이때 운용목적 (1)또는 (3)을 만족하는 실시간 모선재구성 전략을 얻는 문제는 $CB_j, BS_{i,j,k}$ 그리고 $LS_{i,j,k}$ 들의 조합 최적화 문제인데, 이 문제는 대규모의 탐색공간을 필요로 한다. 따라서 휴리스틱 탐색에 기반한 모선 재구성 전략이 활용되는데 이 경우 시스템 운전자가 수립된 전략의 안정성을 실시간으로 검증해야 한다. 그러나 시스템 운전자가 다양한 부하조건과 모선구성하에서 제안된 제어 솔루션의 안정성을 실시간으로 검증하는 것은 대단히 어렵다. 사실 변전소 사고는 그 파급효과가 심각하기 때문에 제안된 모선 재구성 전략의 안정성을 충분히 검증할 수 있어야 한다. 이 문제는 패턴인식기법을 이용하여 개선될 수 있다. 패턴인식기법은 이미 학습된 부하패턴 세트에 대해 부하조건과 모선구성조건을 충분히 검토한 후 실제통에 적용함으로써 실시간 운전중의 안전성을 확보할 수 있다.

3. 전문가 시스템 설계

본 연구에서 제안하는 전문가 시스템은 크게 지식 생성부와 직관적 추론부로 구성된다. 지식 생성부는 변전소 DB를 검색하여 해당 변전소의 전기적 연결성 표시하는 변전소 모델을 메모리에 구축하는 변전소 모델 구축자, 이 변전소 모델을 이용하여 지식베이스(KB)에 부하레벨에 기반한 부하패턴들을 생성시키는 부하레벨 기반 부하패턴 생성자, 지식베이스(KB)에 정해진 기간동안의 부하이력을 기반으로 부하패턴을 생성시키는 부하이력 기반 패턴 생성자 그리고 지식베이스에 각각의 부하패턴에 대한 모선 재구성 전략을 생성, 저장하는 제어패턴 생성자로 구성된다. 직관적 추론부는 패턴인식기법을 이용하여 실시간 이벤트와 가장 유사한 부하패턴을 탐색하고 지식베이스로부터 모선 재구성 전략을 실시간으로 수립하게 된다. 그리고 변전소 데이터베이스와 MMI를 포함한다. 변전소 데이터베이스는 주변압기, 개폐기, 모선, 모선바, 배전선 그리고 송전선 테이블로 구성된다. MMI는 모선 재구성 전략으로부터 스위칭 테이블을 표시한다.

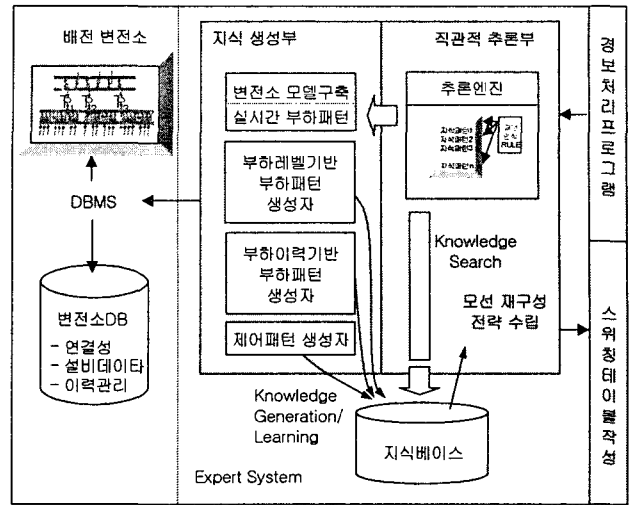


그림 2 전문가 시스템 구조 설계

Fig. 2 The expert system structure design

3.1 추론기관 설계

직관적 추론부는 이벤트 발생시 실시간 시스템과 미리 구축된 지식베이스내의 학습된 시스템을 비교하여, 목표상태와 동일하거나 또는 가장 유사한 시스템(nearest neighbors)을 직관적으로 추론, 대응하는 제어전략을 수립하도록 설계한다. 이 패턴 매칭 메커니즘은 식 (4)로 표시된다. 식 (1)은 "만약, 시스템의 이벤트가 p이고 목표 시스템 r이 학습된 시스템 s와 가장 유사하다면 제어전략은 z이다"를 의미한다.

$$\text{if } e \rightarrow p \text{ and } \max(r \equiv s) \text{ then } c \rightarrow z \quad (4)$$

이때, 지식베이스내에 구축되는 학습된 시스템 세트 규모와 목표 시스템을 학습된 시스템에서 탐색하는 과정이 직관적 추론의 성능과 정확성을 좌우한다. 식 (5)는 학습된 시스템 세트를 보인다.

$$\begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & \dots & S_{1m} \\ S_{21} & S_{22} & \dots & S_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{n1} & S_{n2} & \dots & S_{nm} \end{bmatrix} \quad (5)$$

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^n 개로 그 수가 폭발적으로 증가하게 되는데, 이때, 인공신경회로망의 경우 이러한 지식베이스에 대한 학습이 불가능하기 때문에 적용하기 어렵다[9-10]. 따라서 대규모 학습패턴 세트내의 학습된 시스템과의 유사성의 정도를 측정할 수 있는 효율적인 방법이 요구되는데 이 문제는 최소거리 판별법을 적용함으로써 해결될 수 있다.[11] 이 방법에서 유사성의 정도는 식 (6)으로 표시되는 유클리디언 거리 d_i 에 의해서 판별된다.

$$d_i = [w_1(r_{i1} - s_{i1})^2 + w_2(r_{i2} - s_{i2})^2 + \dots + w_m(r_{im} - s_{im})^2]^{1/2} \quad (6)$$

식 (6)에서, s_{ij} 는 지식베이스내에 기 구축된 i 번째 패턴의 j 번째 요소이며, r_{ij} 는 목표 시스템의 j 번째 요소이다. w_j 는 가중합수로써 예측된 결과의 정확성과 신뢰성을 증가시키기 위해서 도입되는데, 오차거리의 실시간 시스템에 대한 상대적 크기를 나타내기 위해서 $1/r_{ij}^2$ 으로 표시한다.

3.2 지식생성자 설계

지식 생성자는 구축된 변전소 모델을 이용하여 부하레벨에 기반한 부하패턴들을 생성시키는 부하레벨 기반 부하패턴 생성자, 일정기간동안의 부하이력을 기반으로 부하패턴을 생성시키는 부하이력 기반 부하패턴 생성자 그리고 너비제한을 가지는 전공간 탐색법에 의해 각 부하패턴에 대한 모션 재구성 전략을 생성, 저장하는 제어패턴 생성자로 구성된다.

3.2.1 부하레벨기반 부하패턴 생성자

부하레벨에 기반하여 부하패턴 생성자가 생성할 수 있는 부하패턴의 수는 $m \times L^{m \cdot f}$ 이다. 여기서 L 은 부하패턴의 최대치와 최소치를 레벨별로 구분한 수 즉 부하레벨 수이며 m 과 f 는 각각 주 변압기의 수와 배전선로의 수를 표시한다. 따라서 부하레벨의 수를 5로 가정해도 배전 변전소에서는 m 과 f 가 각각 4, 8 일 수 있으므로 지식베이스내의 학습패턴세트의 규모는 최대 4×5^{12} 이 됨으로써 엄청난 계산량을 요구할 수 있다. 따라서 식 (5)로 표시되는 학습패턴 세트의 규모를 합리적인 규모로 생성될 수 있도록 파라미터 값들을 설정하는 것이 필요하다.

3.2.2 부하이력기반 부하패턴 생성자

부하이력에 기반한 부하패턴 생성자가 생성할 수 있는 부하패턴의 수는 설정기간 수 $24 \times d$ 이다. 여기서 d 는 참고될 기간(일)이다. 이 생성자는 주어진 기간동안의 매 시간별 부하패턴을 학습될 패턴세트에 추가한다. 이 방법은 부하레벨에 기반한 부하패턴 생성자에 비해 학습패턴의 수를 획기적으로 줄일 수 있다. 그러나 부하패턴이 과거의 패턴과는 상이한 패턴을 보이는 경우 많은 경우에서 목표 시스템을 탐색하는데 실패할 수 있다.

3.2.3 제어패턴 생성자

제어패턴 생성자는 탐색너비제한을 가지는 휴리스틱에 기반한 전공간 탐색법을 채택한다. 그림 5는 지식 생성자의 추론구조를 보인다. 지식패턴 생성자는 식 (5)에 보이는 학습패턴별로 즉 이벤트별, 부하패턴 별로 순차적으로 그림 3의 추론기관을 호출하여 최적한 모션 재구성 전략을 수립하게 된다. 그리고 그 수립된 전략을 지식베이스내의 제어패턴 세트에 새로운 제어패턴으로 기록한다.

지식생성자는 각각의 패턴에 대해 다음과 같은 추론절차를 통해 제어패턴을 수립한다. 그림 5에서 \circ 는 부하절체 후의

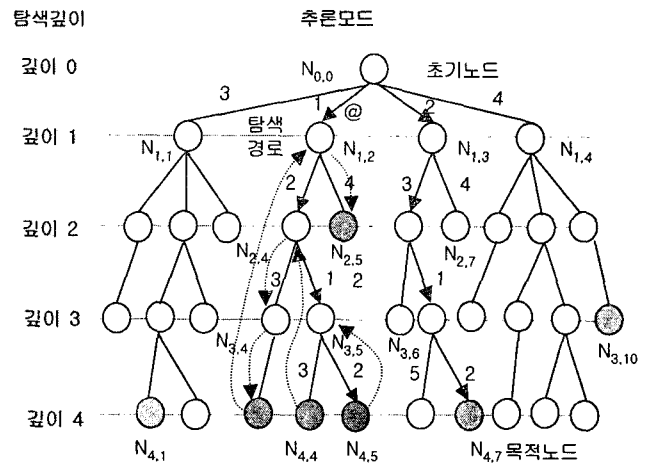


그림 3 제어패턴 생성자
Fig. 3 Bus reconfiguration strategy generator

모션구성, 그리고 브랜치는 스위칭을 의미한다. 먼저 초기노드에서 스위칭 후보 세트를 작성하고 휴리스틱 비용 @가 가장 작은 스위칭 후보를 선택, 부하절체를 시도한다. 그리고 그 결과로 깊이 1의 노드 $N_{1,2}$ 로 확장된다. 여기서 절체될 부하 LT가 0인지를 검사, 조건을 만족하지 않으면 새로운 스위칭 후보 세트를 작성한다. 그리고 비용 2를 가지는 스위칭 후보가 우선 선택되어 깊이 2의 $N_{2,4}$ 로 확장된다. 이 과정은 반복되어 깊이 4의 노드 $N_{4,5}$ 로 확장되는데, 여기서 $LT=0$ 인 것으로 가정되므로 노드 $N_{4,5}$ 가 첫 번째 목표노드가 되며 이 과정에서 얻어진 스위칭 후보들의 집합이 첫 번째 모션재구성 전략이 된다. 다음, 깊이 3으로 역추적하여 다음 우선순위의 스위칭을 시도함으로써 두 번째 목표노드 $N_{4,4}$ 가 얻어지고 두 번째 모션 재구성 전략이 얻어진다. 지식 생성자는 이러한 과정을 너비제한조건을 만족할때까지 반복하면서 시스템 운용조건을 가장 잘 만족하는 최적의 부하절체 전략을 수립하게 된다. 그리고 이 전략을 주어진 부하패턴에 대한 지식베이스의 스위칭 패턴으로 등록한다.

3.3 지식베이스 설계

지식베이스는 부하레벨에 기반한 부하패턴 생성자 설계과정에서 설명하였듯이 학습패턴세트의 규모를 줄이고 탐색의 효율성을 높일 수 있도록 설계되어야 한다. 따라서 그림 4에 보인바와 같이 지식베이스는 4개의 학습패턴세트가 설계되며 1개의 스위칭 패턴 세트가 설계된다. 각 부하패턴은뱅크패턴과 선로패턴으로 구성된다. 빈도는 사고발생빈도를 표시하며 CN은 대응하는 스위칭 패턴 번호를 표시한다.

만약 이벤트 e 가 MTR_i 사고이고 실시간 시스템이 RPT인 경우 전문가 시스템은 RPT를 부하패턴(사고 $MTR:MTR_i$)세트의 {뱅크패턴, 선로패턴}와 비교, 매칭 허용범위내에 있는 학습된 시스템을 목표 시스템으로 하게된다. 그림의 경우에는 $\{BPT_k, FPT_k\}$ 가 목표시스템으로 확인되므로 CN의 연계성을 추적하여 대응하는 제어패턴 $BRCP_k$ 를 실시간 모션 재구성 전략으로 결정하게 된다.

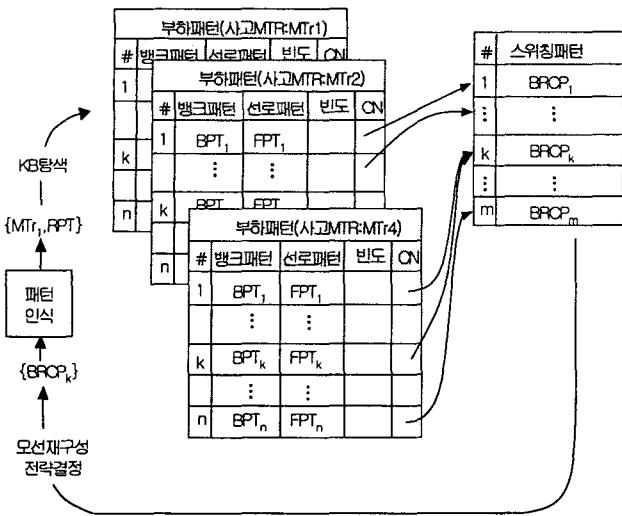


그림 4 지식베이스의 구조
Fig. 4 The structure of knowledge base

4. 문제해결전략

본 연구에서 제안하는 패턴인식기법을 이용한 전문가 시스템의 자동화 변전소에 대한 문제해결 전략은 그림 5에 보인 바와 같이 단계 1]에서 단계 7]로 설명될 수 있다.

단계 1] 전문가 시스템의 초기치를 설정한다. 그리고 부하패턴 학습모드와 부하레벨 그리고 학습기간을 설정한다. 그리고 단계 2]로 간다.

단계 2] 변전소 DB를 검색하여 전문가 시스템의 작업영역 내에 변전소의 전기적 연결성을 추적하기 위한 변전소 모델을 구축하고 주변압기별로 지식베이스내에 부하패턴 세트를 구축한다. 다음 단계 3]으로 간다.

단계 3] 지식 생성자를 통해 단계 2]에서 구축된 부하패턴 세트들에 대한 스위치 제어 패턴을 구축한다.

단계 4] 이벤트의 발생여부를 감시한다. 이벤트가 발생하면 경보처리 프로그램으로부터 사고 변압기를 확인하고 실시간 시스템을 확인한 후 단계 5]로 간다.

단계 5] 직관적 추론을 실시한다. 만약, 탐색결과 지식베이스내의 학습된 부하패턴 세트내에서 실시간 시스템과 $\min(d_i) < \epsilon$ 를 만족하는 부하패턴이 발견되는 경우 목표패턴으로 결정, 단계 7]로 가서 스위칭 테이블을 작성한다. 반면에 실패하는 경우 단계 6]으로 가서 논리적 추론을 실행하여 실시간 모션 재구성 전략을 수립할 수 있도록 한다.

단계 6] 논리적 추론을 통해 실시간으로 모션 재구성 전략을 수립한다.

단계 7] 스위칭 테이블을 작성, MMI에 표시한다.

5. 시뮬레이션 결과

본 연구에서는 패턴인식기법을 기반으로 하는 전문가 시스템을 제안하여 실시간 모션 재구성 전략의 안정성을 개선

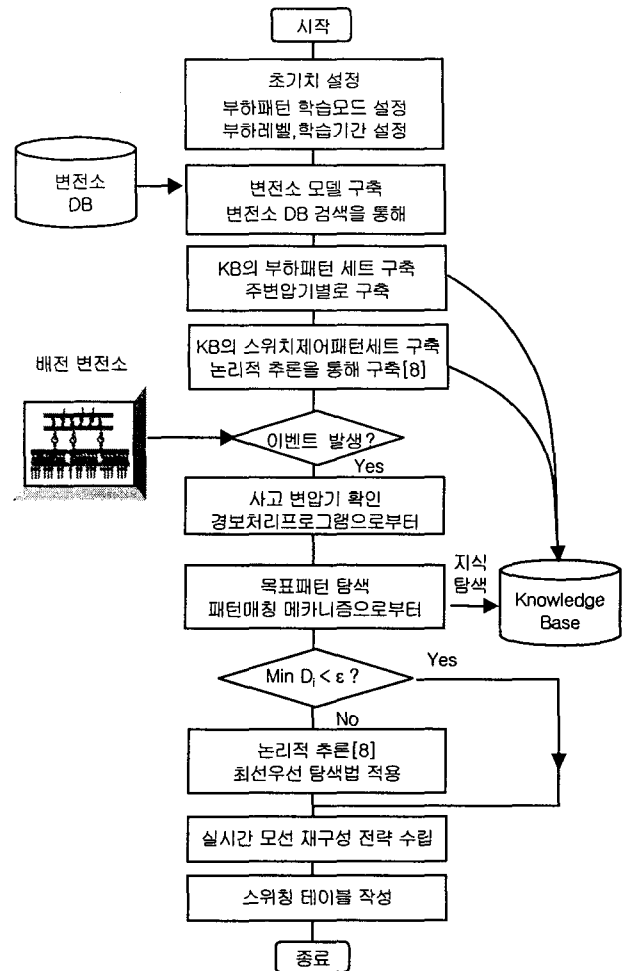


그림 5 문제해결전략
Fig. 5 Problem solving strategy

하고자 하였다. 기본적으로 패턴인식 기법은 학습과정과 그 학습패턴 세트를 검토함으로써 제어전략의 안정성을 확보할 수 있다는 장점을 가진다. 따라서 이러한 장점을 취하기 위해서는 기본적인 패턴인식의 정확도를 확인해야 한다. 따라서 제안된 기법의 유효성과 정확성을 검증하기 위해서 그림 6에 보인 대표적인 변전소를 도입하여 다양한 부하조건하에서 패턴 인식기법으로부터 얻어진 실시간 모션 재구성 전략의 최적해에 대한 성능을 비교해 보기로 한다. 도입된 배전 변전소는 대표적인 154KV 변전소의 구성을 보이는데, 모두 3대의 주변압기로 구성되며 각 주변압기는 7,7개의 배전선로들로 구성된다. 표 1은 각 주변압기들의 용량과 부하를 보이는데, 각 주변압기들에 대한 정격용량, 최대용량 그리고 부하이력으로부터 얻어지는 최대 및 최소부하를 보인다.

표 2는 주변압기 T₂에 속한 배전선로들의 최대, 최소용량과 기록된 기간동안의 이력데이터로부터 얻어지는 최대 및 최소 부하 데이터를 의미한다. 여기서 F_{ij}는 주변압기 T_i에 속하는 j번째 배전선로들을 의미한다.

먼저, 식 (5)로 표시되는 학습패턴 세트의 규모를 합리적인 규모로 줄이기 위해서 부하레벨의 수를 4로 구분하고 배전선로들 중 4 선로가 독립적인 부하패턴을 가진다는 가정하에서

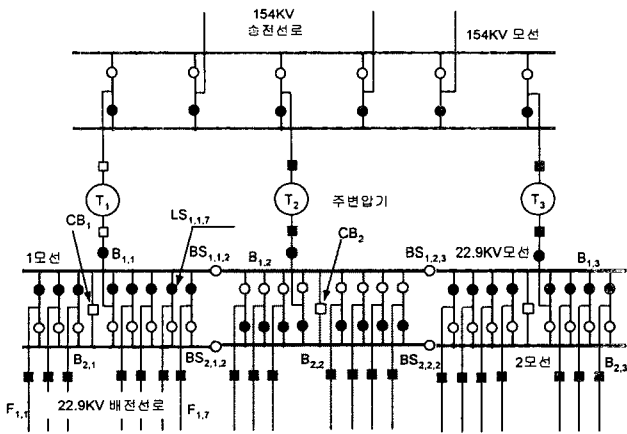


그림 6 성능평가를 위한 배전 변전소
 Fig. 6 Distribution substation for performance evaluation

표 1 주변압기들의 용량과 부하
 Table 1 The capacity and load of main transformers

주변압기	T ₁	T ₂	T ₃
정격용량 [KVA]	30,000	45,000	30,000
최대용량 [KVA]	40,000	60,000	40,000
피크부하 [KVA]	30,000	45,000	30,000
최소부하 [KVA]	10,000	15,000	10,000

표 2 배전선로들의 용량과 부하
 Table 2 The capacity and load of distribution lines

[KVA]	F ₁₁	F ₁₂	F ₁₃	F ₁₄	F ₁₅	F ₁₆	F ₁₇
정격용량	7,000	7,000	7,000	7,000	7,000	7,000	7,000
최대용량	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000
피크부하	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000
최소부하	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000

m과 f의 수를 각각 3과 4로 설정하였다. 이 경우 학습패턴 세트의 규모는 4×4^7 이 된다. 특히, 주변압기별로 학습 부하패턴 세트를 설계함으로써 패턴 생성자에서 의해서 생성되는 개별 학습 부하패턴 세트의 규모를 $4^7=16,385$ 개로 줄였다. 그리고 유사성을 확인하기 위해 ϵ 을 0.05로 설정하였다. 또한 전문가 시스템의 탐색너비를 1000으로 설정한 후 전문가 시스템의 전공간 탐색법을 이용해 학습 부하패턴 세트내의 각 개별 부하패턴에 대응하는 모선 재구성 전략을 수립, 지식베이스내의 제어패턴 세트에 기록하였다. 다음, 본 연구에서 제안된 패턴 인식기법의 유효성을 보이기 위해 최소부하 및 최대부하사이에서 랜덤변수를 이용하여 주변압기 T₁, T₂를 사고 주변압기로 하고 각각에 대해 100개씩 약 200개의 다양한 부하패

턴을 발생시켰다. 그리고 각각의 경우에 대해 최선우선 탐색법과 패턴인식 기법을 적용하여 실시간 모선 재구성 전략을 수립하였다. 표 3은 생성된 부하패턴 중 일부를 보이는데, 주변압기 T₁의 사고경우에 해당되며 앞에서부터 주변압기 T₁, T₂, T₃ 그리고 사고 주변압기 T₁에 속한 배전선로들의 부하값을 표시한다.

표 3 랜덤하게 발생된 이벤트 부하패턴
 Table 3 Event load patterns generated randomly

#	이벤트 부하패턴 [KVA]						
01	15018	36271	17899	6852	5510	4879	4101
02	17611	42178	25657	5081	3823	2089	2548
03	29827	33913	16786	2028	2053	4267	5189
04	17493	38260	21761	4112	2342	5646	6699
05	28139	39533	29338	7554	5236	2854	4772
06	26694	41873	29951	7998	5669	4354	3597
07	20637	26852	25158	2337	2052	7512	3655
08	27564	39529	22274	3232	6462	4810	4747
09	23985	32704	26025	5653	5434	4168	2909
10	22756	44799	26273	4073	3013	5943	4951
11	17212	43991	17123	7430	6157	3818	4559
12	17298	42545	27325	5492	3148	3067	6903
13	25980	33111	19193	5412	6093	6535	6331
14	27520	25701	22755	5977	4557	2628	7696
15	22075	32499	27704	3901	4736	3631	7897
16	17939	40226	27591	4385	5005	7340	2164
17	22969	28881	27645	5760	5945	3187	7052
18	19710	43821	19291	4017	2841	6398	7007
19	18790	27889	15024	2366	6837	7115	3263

표 3에 보인 각 패턴들에 대해서 패턴인식 기법을 적용, 지식베이스내에서 $\min(d_i) < \epsilon$ 을 만족하는 목표시스템을 확인한 후 대응하는 실시간 모선 재구성 전략들이 탐색되는데 첫 번째 경우(# 1)에 모선 재구성 전략은 표 4에 보인다. 제안된 전략은 먼저 표 3에 보인바와 같이 라인 스위치들의 조작을 통해 사고 주변압기 T₁에 속한 배전선로들 중 (F_{1,1}, F_{1,5}, F_{1,6}, F_{1,7})을 모선 B_{2,1}에 그리고 나머지 선로들 (F_{1,2}, F_{1,4})를 모선 B_{1,1}에 할당한다. 다음 섹션 스위치들을 조작하여 모선 B_{1,1}을 B_{1,3}에 그리고 B_{2,1}을 B_{2,2}에 전기적으로 연결함으로써 각각 주변압기 T₂와 T₃에 분담, 전력을 공급하게 된다. 여기서 D_i는 모선 B_{1,i} 또는 B_{2,i}에 대한 단로기이다.

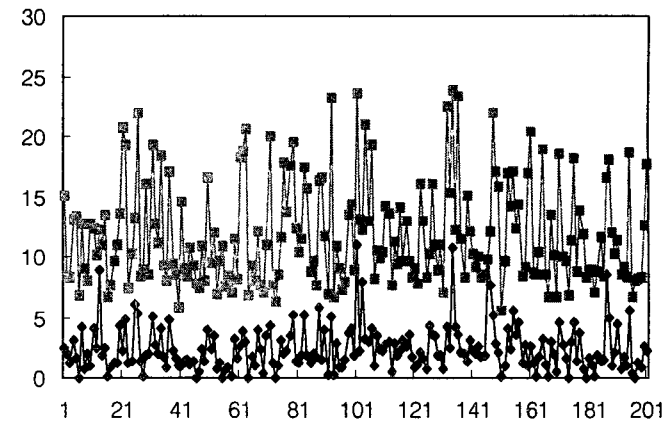


그림 7 모선 재구성 전략의 부하분담 균등화 지표
 Fig. 7 Load balancing index of reconfiguration strategy

그림 7은 각 패턴들에 대해 얻어진 모선 재구성 전략들의 부하분담 균등화 지표를 보이는데, ◆는 패턴인식 기법에 의해서 얻어진 해들에 대한 부하분담 균등화 지표값으로 최적해에 대한 상대적 거리를 나타내는 반면, ■는 최적해에 대한 최악의 경우에 대한 부하분담 균등화 지표값을 보인다. 그림에서 대부분의 경우에서 패턴인식 기법에 의해서 얻어진 부하분담 균등화 지표값이 최적에 가까운 값을 보임을 알 수 있다. 그림 8은 그림 7에 보인 각 모선 재구성 전략들에 대한 스위칭 조작 회수를 보인다.

표 4 경우 1 이벤트 부하패턴 1에 대한 모선 재구성 전략

Table 4 Bus reconfiguration strategy for load pattern of event case 1

#	고유번호	고유ID	타입	종류	자동/수동	제어상태
1	DS ₁	s000022	LS	DS	M	OPEN
2	LS _{1,1,1}	s000029	LS	DS	M	OPEN
3	LS _{2,1,1}	s000054	LS	DS	M	CLOSE
4	LS _{1,1,6}	s000031	LS	DS	M	OPEN
5	LS _{2,1,6}	s000056	LS	DS	M	CLOSE
6	LS _{1,1,7}	s000027	LS	DS	M	OPEN
7	LS _{2,1,7}	s000051	LS	DS	M	CLOSE
8	LS _{1,1,8}	s000025	LS	DS	M	OPEN
9	LS _{2,1,8}	s000049	LS	DS	M	CLOSE
10	LS _{1,1,3}	s000030	LS	DS	M	OPEN
11	LS _{2,1,3}	s000055	LS	DS	M	CLOSE
12	BS _{1,1,2}	s000076	BS	DS	M	CLOSE
13	BS _{1,1,3}	s000077	BS	DS	M	CLOSE
14	BS _{2,1,2}	s000078	BS	DS	M	CLOSE

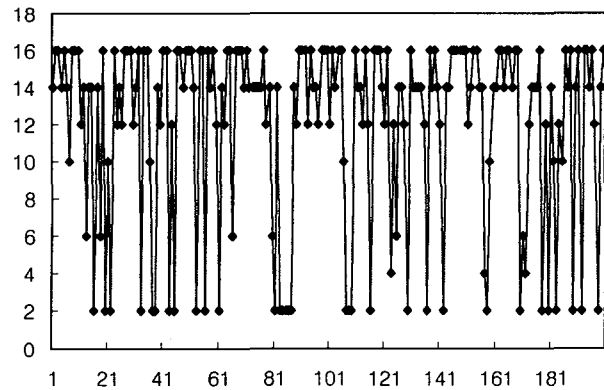


그림 8 모선재구성 전략들의 개폐기 조작회수
Fig. 8 Switching number of bus reconfiguration strategies

그림 9는 각 모선 재구성 전략에 대한 개폐기 조작회수를 보인다. 첫번째 경우는 표 4에 보인바와 같이 스위칭 회수가 14이다. 이와같이 표 4와 그림 8,9를 통해 제안된 전문가 시스템이 모선 재구성 전략을 정확히 수립할 수 있으며 또한 $\epsilon=0.05$ 로 하는 경우 인식된 목표 시스템의 성능이 거의 최적에 가까움을 확인할 수 있다.

6. 결론

본 연구에서는 자동화된 변전소에서 주변압기 사고시 부하절체의 정확성과 효율성을 제고할 수 있는 패턴 인식기법에 기반한 실시간 모선 재구성 전략을 제안하였다. 패턴인식 기법으로는 변형된 최소거리 판별법을 적용하였다. 학습부하패턴세트는 실시간 부하 패턴으로부터 유사한 목표패턴 탐색시간을 최소화하기 위해 주변압기 별로 설계하였다. 그러나 이들 부하패턴세트들로부터 대응하는 모선 재구성 전략을 결정하기 위한 제어전략 패턴세트는 탐색시간에 영향을 미치지 않기 때문에 데이터베이스 설계의 효율성을 고려하여 한개의 테이블로 설계하였다. 그리고 각 부하패턴세트의 규모를 최대 $m \times L^{(m \cdot f)}$ 개에서 효율적인 수준으로 줄이기 위해서 부하패턴 변화에 기반한 학습패턴 생성기능과 선택된 기간의 부하이력에 기반한 학습패턴 생성기능을 설계하였다. 전자는 유사한 부하패턴의 주변압기나 배전선로를 동일한 부하패턴으로 놓음으로써 학습되어야 할 부하패턴의 수를 줄이는 반면 후자는 주어진 기간동안 보여진 부하패턴만을 고려함으로써 학습되어야 할 부하패턴의 수를 줄일 수 있다. 여기서, L은 부하 레벨의 수, m과 f는 각각 주변압기와 배전선로의 수를 의미한다. 또한 각 학습 부하패턴들에 대한 실시간 모선 재구성 전략을 수립하기 위해 너비제한 전공간 탐색 모드에 기반한 제어패턴 생성자를 설계, 구현하였다. 전문가 시스템은 대표적인 배전 변전소에 대한 약 200개의 모의결과에서 최적에 가까운 부하분담 균등화 지표값을 보임으로써 차후 자동화된 변전소의 사고복구 처리에 적용되어 실시간 모선 재구성 전략의 안전성과 정확성을 확보할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

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

참고 문헌

- [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 Delivery, Vol. 3, No. 4, pp 1865-1872, October 1988.
- [3] 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.
- [4] Mori S., I.Hata, T.Usui and K. Morita, "Expert System Supporting Substation Service Restoration," ESAP IV, pp 131-136, January 1993.

- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [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] 고윤석, "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 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.