배전계통의 다양한 이벤트들을 고려한 선로자동화 소프트웨어 개발

論 文
52A-8-5

Development of Feeder Automation Software Considering the Diversity Events of Distribution Systems

高 銑 錫*
(Yun-Seok Ko)

Abstract - This paper proposes an expert system, which is able to determine the problem-solving strategy for diversity events occurred on the distribution system. The events include events related to the fault, scheduled outage and optimal operating task such as feeder line fault, line scheduled outage, line overload, system load balancing, system loss minimization, main transformer fault, main transformer scheduled outage, main transformer overload, main transformer protection control. The expert system enhances the reliability of software designed by the integrated concept for the diversity events. The expert system is implemented in C language. And the effectiveness and accuracy for the expert system is verified by simulating the event cases for typical distribution model.

Key Words : Distribution Automation System, Feeder Automation, Expert System, Artificial Intelligence

1. 서 론

배전계통은 일반 수용가들에게 전력을 공급하기 위해 배전변전소내의 주변압기들로부터 인출되어 지상 또는 지중으로 수용가 지역을 경유하는 수십개의 배전선들로 구성된다. 이들 선로들은 경제적 이유로 인해 수지상 구조로 운전되는데 수지상 운전구조는 공급 신뢰도 측면에서 취약한 구조이기 때문에 비교적 안정적 전력확보가 가능하도록 개폐기들을 근거로 한 다분할 다연계 구조로 설계된다.

전력 사업자들은 이들 개폐기들을 효과적으로 제어하기 위해 배전 SCADA 시스템을 도입하여 운용하고 있다. 배전 SCADA 시스템은 상태감시 및 계측기능에 의해 수집된 정보로부터 시스템의 상태를 판별하고, 이벤트 발생시 이벤트에 대응하여 이들 선로상의 개폐기들에 대한 제어전력을 신속하게 결정, 실시간으로 개폐기를 제어함으로써 시스템 운영자가 당황하지 않고 고장파급효과를 최소화할 수 있도록 지원한다. 지금까지 배전 SCADA 시스템은 고장시 개폐기들을 원방에서 제어할 수 있는 개폐기 원격제어 기능을 실현하고 있다. 논문 [1]은 선로자동화를 위한 기본 방법론을 제안하며, 논문 [2,5]는 휴리스틱 탐색전략을 위한 선로과부하 해소전략을 다룬다. [4]에서는 인공신경회로망을 이용한 실시간 선로재구성 알고리즘을 제안하며, [2,5]에서는 휴리스틱 탐색전략을 이용한 선로과부하 해소전략을, [3,6]은 휴리스틱 탐색전략을 이용한 주변압기 사고처리전략을 제안한다. [8]에서는 정상상태시의 부하분담 균등화 및 선로손실 최소화를 위한 실시간 전문가 시스템을 제안하며, [9,10]에서는 배전 SCADA 정보로부터 고장타입 및 고장위치를 확인하는 전문가 시스템을 제안한다. 그러나 인공신경회로망을 이용한 문헌[4]는 현실적으로 실현이 불가능하며, 휴리스틱 탐색전략 [2,3,5,6]는 실시간성을 추구함으로써 실시간은 보장되나 최적해가 보장되기 어려우며 또한 배전계통의 다양한 사업소 규모에 적합한 합리적인 해를 제시하기 어렵다. 특히 [3,6]은 변전소 모선재구성 문제만을 다룸으로써 주변압기 사고시 선로상의 개폐기들을 활용한 정전선로 처리전략을 제시하지 못한다. 더구나 이들 논문들은 선로상에서 발생할 수 있는 선로사고, 주요행사, 선로 작업정전, 선로과부하, 부하분담 균등화, 선로손실 최소화, 주변압기 사고, 주변압기 작업계획, 주변압기 과부하 등 부하절체를 요구하는 다양한 이벤트들에 대한 종합적이고 체계적인 선로상의 부하절체 방법론을 제시하지 못함으로써 시스템 운영자들의 교대 근무시 시스템 운영자의 잘못된 조작으로 인해 대규모 정전사고는 물론 인명피해까지도 야기할 수 있다. 이러한 문제에 적극적으로 대응하기 위해서는 사업소 규모별로 실시간 최적해를 보장할 수 있으며 다양한 이벤트들에 대해 종합적이고 체계적으로 대처함으로써 안전성과 신뢰성을 고도화할 수 있는 부하절체 전략이 요구된다.

따라서 본 연구에서는 사업소 규모에 적합한 탐색전략을 선택, 실시간을 보장하면서 해의 성능을 크게 제고할 수 있도록 최선우선 탐색, 준최적 탐색, 반복제한 소모적 탐색 메카니즘을 통합 추론기관으로 설계, 구현하며, 선로상의 다양한 이벤트들에 대해 선로상의 개폐기들을 활용한 종합적이고 체계적인 부하절체 전략을 수립하도록 함으로써 전력공급의 안정성과 신뢰성을 제고할 수 있는 전문가 시스템을 제안한다. 여기서 준최적 탐색법, 반복제한 소모적 탐색법은 제한적인 추가탐색을 허용함으로써 실시간 범위내에서 해의 성능을 크게 제고한다. 이벤트들은 선로사고, 주요행사, 선로 작업정전, 선로과부하, 부하분담 균등화, 선로손실 최소화, 주변압기 사고, 주변압기 작업계획, 주변압기 과부하 등 사고 및 작업계

* 正 會 員 : 남서울大學 電子情報通信工學部 副敎授 · 工博
接受日字 : 2002年 12月 30日
最終完了 : 2003年 6月 9日

획, 최적운용과 관련하여 선로상에서 발생할 수 있는 다양한 이벤트들을 포함한다. 전문가 시스템은 탐색의 효율성을 제고하기 위해 다중탐색전략으로 설계되며 C언어로 구현된다. 또한 다양한 이벤트들에 대해서 통합적인 개념으로 설계됨으로써 소프트웨어 설계의 신뢰도를 제고한다. 끝으로, 대표적인 배전계통 모델에 대한 다양한 평가결과에서 그 유용성과 정확성을 입증한다.

2. 배전계통 이벤트 분석

2.1 배전계통 상태 정의

배전계통의 상태는 정전구간의 유무, 용량제약조건 위반여부 그리고 절분점의 이동사항등을 고려하여 정상상태, 비정상상태, 비상상태로 구분된다. 그림 1은 배전계통의 시스템 상태와 상태별 수립전략을 설명한다.

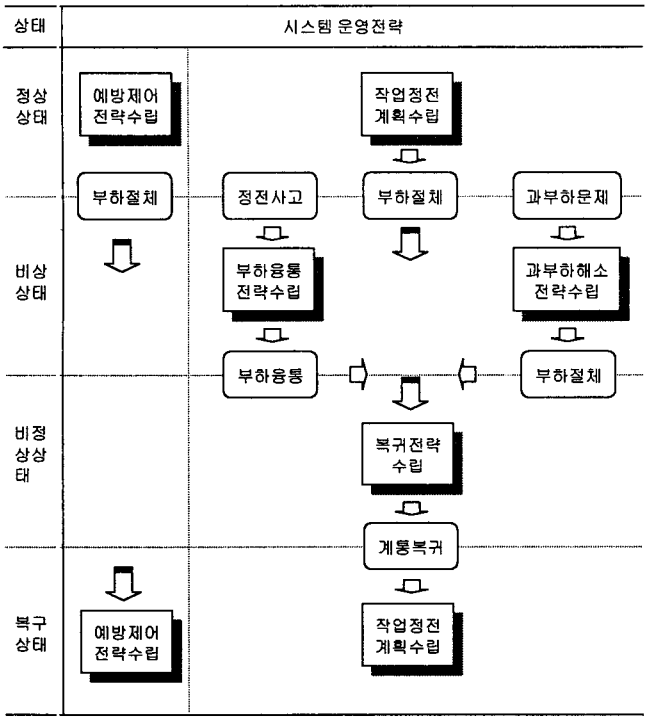

그림 1 배전계통 운영전략
Fig. 1 Distribution System Operating Strategy

비상상태는 정전사고나 과부하문제가 발생한 상태를, 비정상상태는 작업정전이나 부하융통 후 작업구간이나 사고구간이 복구되기까지의 상태를 말한다.

2.2 배전계통 이벤트 분석

배전계통에서 발생할 수 있는 이벤트들은 다양하다. 이들 이벤트들은 문제의 성격에 따라 정전사고나 계획정전 그리고 과부하 이벤트들로 구분되며 발생원인에 의해서 배전선로 이벤트들과 변전소 이벤트들로 분류할 수 있다. 선로상의 이벤트들은 보선 사령실내에서 처리되는 이벤트들이므로 배전 SCADA 시스템 단독으로 처리가 가능하지만 변전소내에서 발생하는 이벤트들은 배전사령실과 보선사령실과의 협조하에 처리되는 이벤트들이므로 전력 SCADA 시스템과의 연계처리가 요구된다. 표 1은 배전계통 이벤트 분석결과를 보인다.

표 1 배전계통 이벤트 분석
Table 1 Event analysis of distribution system

#	이벤트	상태	이벤트 처리전략
1	선로사고	비상	고장구간 분리후 건전정전구간을 타선로로 절체하고 고장선로에 대한 공급을 재개한다.
2	선로 과부하	비상	선로 과부하해소분을 경부하의 타선로로 절체한다.
3	선로 작업정전	비정상	작업구간의 부하측 구간들을 타 선로로 절체하고 작업구간을 분리한다.
4	주요행사	비정상	주요행사구간을 경부하의 비교적 신뢰도가 높은 선로로 절체한다.
5	부하분담 균등화	정상	시스템의 부하분담비가 최적화 되도록 절분점을 이동시킨다.
6	선로손실 최소화	정상	시스템의 선로손실이 최소화가되도록 절분점을 이동시킨다.
7	주변압기 사고	비상	변전소 모선재구성으로 부하절체 후 부하절체가 불가능한 선로들을 CB 개방 후 타 선로들로 절체한다.
9	주변압기 과부하	비상	주변압기 과부하 분을 경부하의 주변압기 선로들로 절체
10	주변압기 작업정전	비정상	변전소 모선재구성으로 부하절체 후 부하절체가 불가능한 선로들을 타 선로들로 절체한 후 CB를 개방한다.

3. 데이터베이스 설계

선로자동화 데이터베이스는 주변압기 데이터베이스, 배전선로 데이터베이스, 선로구간 데이터베이스, 개폐기 데이터베이스, PAD 데이터베이스, FI 데이터베이스, 리얼 데이터베이스 등으로 구성된다.

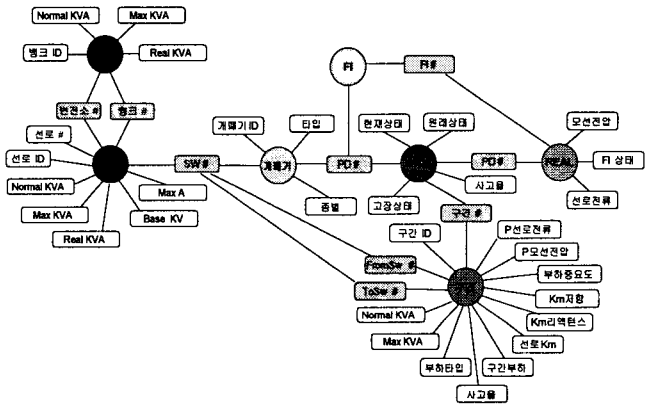

그림 2 선로자동화를 이한 배전 데이터베이
Fig. 2 Distribution database for feeder automation

주변압기 데이터베이스는 정격용량, 최대용량, 허용용량, 실제부하 데이터 필드를 가지며 변전소 번호와 주변압기 번호를 인덱스 필드로 한다. 선로 데이터베이스는 정격용량, 최대용량, 허용용량, 실제부하, 기준전압, 실제전류 데이터 필드를 가지며 변전소 번호와 주변압기 번호 그리고 선로 번호를 인덱스 필드로 한다. 선로구간 데이터베이스는 선로구간에 대한 모든 정보를 포함하는데, 최대용량, 허용용량, 선로길이, 선로 임피던스, 부하타입, 구간부하, 부하중요도, 사고율, 모선전압, 모선전류 필드 등을 포함한다. 그리고 From 개폐기 번호, To 개폐기 번호를 인덱스 필드로 하여 연결성을 추적한다. 개폐기 데이터베이스는 PAD 데이터베이스와 스위치 데이터베이스로 구분된다. 개폐기 데이터베이스는 개폐기 종별, 개폐기 타입등의 데이터 필드를 가지며 개폐기 번호를 색인 필드로 한다. 그림 2는 선로자동화를 위한 배전계통 데이터베이스를 보인다.

4. 전문가 시스템 설계

4.1 전문가 시스템 구조 설계

전문가 시스템은 다양한 시스템 이벤트들에 대해 시스템 운영자가 최적한 제어전략을 결정할 수 있도록 다중 탐색전략, 다중 목적함수 구조로 설계된다. 그리고 자동화된 환경에서는 물론 수동 개폐기 조작환경하에서도 최적한 제어전략을 수립할 수 있도록 디바이스 선택기능이 설계된다. 그림 3은 시스템의 추론구조를 보인다. 먼저 지적경보처리기나 외부이벤트 처리기에 의해 이벤트 타입이 분류되어 해당 이벤트 모듈이 작동한다. 다음 전문가 시스템이 추론을 시작하게 되는데, 사용자가 선택한 탐색법 즉, 최선우선 탐색법, 준최적 탐색법, 탐색범위제한 소모적 탐색법중의 하나를 탐색모드로 하여 추론된다. 이때, 운용환경에 따라 정전구간 최소화, 손실 최소화, 개폐기 조작회수 최소화, 부하분담 균등화 중의 한 운용목적을 추론엔진의 운용목적으로 선택할 수 있다.

4.2 종합추론전략 설계

전문가 시스템은 기본적으로 다중 이벤트 처리능력을 가지도록 설계, 구현된다. 추론전략은 비상 또는 비정상상태하의 다중 이벤트 처리부와 정상상태하의 시스템 재구성부로 구성되며 다음과 같은 단계적 처리수순에 의해서 이벤트를 처리한다. 그림 4는 각각 시스템의 다양한 이벤트들에 대한 종합 문제해결전략을 보인다.

[단계 1] 전문가 시스템은 기동시에 데이타베이스로부터 시스템 연결성 데이타를 검색하여 실시간 데이타베이스를 구축한다. 다음, 사용자는 전문가 시스템의 초기 운영환경과 추론모드를 설정한다.

[단계 2] 지적 경보처리 프로그램으로부터 이벤트 발생여부를 확인한다. 만약 이벤트가 발생하지 않은 경우, 감시시간 ΔT가 감시주기 허용시간, ST_{ime}의 조건을 만족하는지가 점검되며, 만족하는 경우, 단계 12]로 가서 시스템 재구성을 실시한다. 반면에 만족하지 않는 경우, 프로그램 종료여부를 확인한다. 만약 종료입력이 없는 경우 이벤트 발생여부를 확인하며 이과정은 반복적으로 실행된다. 그리고, 이 반복과정에서 이벤트가 발생하는 경우 단계 3]으로 간다.

[단계 3] 다중 이벤트 정보 ME = $\{e_1, e_2,..., e_n\}$를 수집한다. 다음 HR 1-2]에 의해 ME를 재정렬하여 $ME^* = \{e_1^*, e_2^*,..., e_n^*\}$를 결정한다. 여기서, e_i는 i번째 우선순위의 이벤트를 나타낸다.

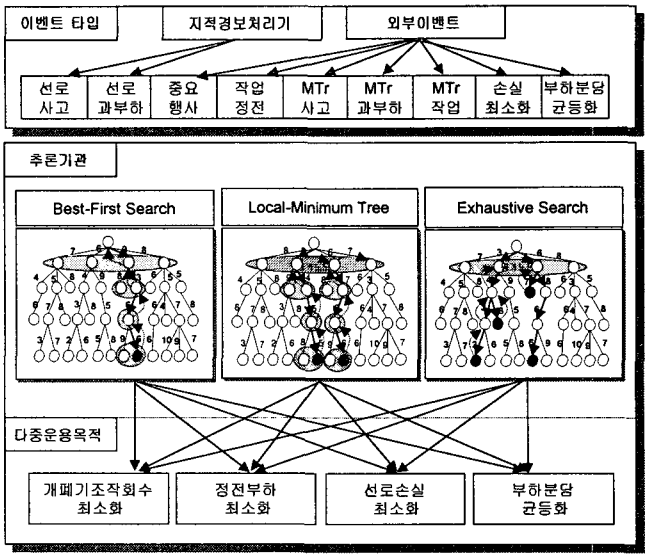

그림 3 전문가 시스템의 추론기관 구조

Fig. 3 Structure of inference engine of expert system

[단계 4] HR 3-4]에 의해 이벤트 e_i에 대한 탐색깊이 j의 부하절체 후보집합 ST_{ij}를 작성한다. 다음, [HR 5-14]에 의해 선택된 시스템 운영목적에 따라 부하절체 후보집합 ST_{ij}를 재정렬하여 ST_{ij}^*를 결정한다. 이때, 부하절체 후보집합 $ST_{ij}^* = \{SW_{ij1}, SW_{ij2},...SW_{ijk},...,SW_{ijm}\}$으로 구성되며, SW_{ijk}는 e_i의 깊이 j에서의 부하절체 후보들중 k번째 우선순위의 부하절체 후보를 나타낸다.

[단계 5] 부하절체 후보집합 STij* = {Φ}인지를 점검한다. 만약, 이벤트 처리가 완료되지 않는 상황하에서 부하절체 후보가 존재하지 않는 경우, 단계 6]으로 가서 강제부하절체를 실시한다. 반면에 부하절체 후보가 존재하는 경우 단계 8]로 가서 부하융통 또는 부하절체를 실시한다.

[단계 6] 강제부하절체 조건의 만족여부가 점검된다. 만약, 강제부하분담이 불가능한 경우 HR 18-19]을 근거로하여 과부하분에 대한 부하격리를 실행한 다음, 단계 4]로 가서 다음 이벤트를 처리한다. 반면에 강제부하절체조건을 만족하는 경우, HR 3-4]에 의해 새로운 부하절체 후보집합 FST를 작성한다. 그리고 HR 16-17]에 의해 FST를 재정렬하여 FST^*를 결정한다. 그리고 최선의 분담선로들에 강제적으로 부하절체를 실시한 다음, 새로운 주변압기 이벤트 e_i^* 를 생성한다. 그리고 단계 4]로가서 새로운 이벤트 e_i^*를 처리한다.

[단계 8] 선택된 후보구간 SW_{ijk}에 대한 부하절체를 실시한 후 절체선로와 분담선로 F_s, F_r에 대한 조류계산을 실시한다.

[단계 9] 분담선로나 주변압기의 용량제약조건이나 전압제약조건 즉 HR 15]의 만족여부가 점검된다. 만약 시스템 운영제약조건을 위반하는 경우 SW_{ijk}를 버리고 단계 5]로 가서 다음 우선순위 SW_{ijk+1}에 대한 부하절체를 실시한다. 반면에

만족하는 경우, 단계 10]으로 가서 이벤트 e_i에 대한 처리가 완료되었는지가 점검된다.

[단계 10] 부하융통 이벤트에 대해서는 통전되야 할 부하 OTS_i가 존재하는지가 점검되며, 과부하 이벤트에 대해서는 시스템 운영제약조건이 만족되는지가 점검된다. 만약 만족하지 않는 경우, 단계 4]로 가서 다음 탐색깊이 j+1에 대한 부하절체후보를 작성한다. 반면에 만족하는 경우 다중 이벤트 처리가 완료되었는지를 점검하기 위해 단계 11]로 간다.

[단계 11] $ME^* = \{\Phi\}$인지를 점검한다. 만약 완료된 경우, 단계 12]로 가며 그렇지 않은 경우 다음 이벤트 e_{i+1}을 처리하기 위해 단계 4]로 간다.

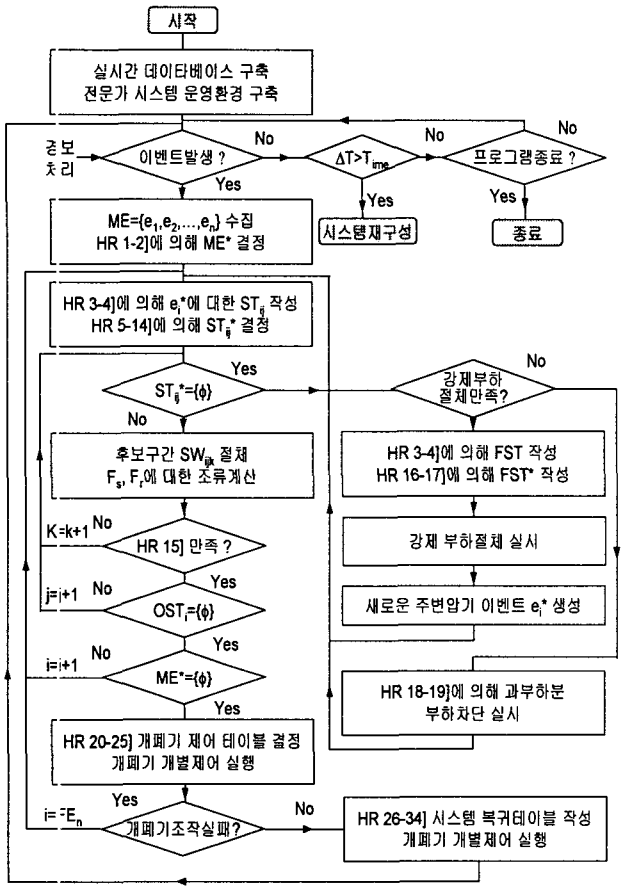

그림 4 다양한 시스템 이벤트들에 대한 문제해결전략
Fig. 4 Problem-solving strategy for system events

[단계 12] HR 20-25]를 근거로 하여 개폐기 제어테이블을 작성한다. 또한 정해진 순서에 따라 개폐기를 개별적으로 제어한다. 만약 실패하는 경우 개폐기 조작에 실패한 이벤트 FE_n에 대해서 새로운 개폐기 제어 테이블을 작성하기 위해 단계 4]로 간다. 그러나 성공한 경우 HR 26-34]를 근거로 고장수리후 시스템 복귀를 위한 시스템 복귀 테이블을 작성한다. 다음, 작업완료후 개폐기를 복귀테이블에 정해진 수순에 따라 순차적으로 개별제어를 실시한다. 그리고 단계 2]로 가서 감시제어업무를 계속 수행한다.

[단계 13] HR 9,11]을 근거로 부하절체 후보집합, NST를 작성한다. 다음 [HR 10,13]을 근거로 재정렬된 부하절체 후보집합 NST^* 를 얻는다.

[단계 14] $NST^* = \{\Phi\}$를 점검한다. 만약 부하절체 후보가 존재하지 않는 경우 단계 17]로 가서 개폐기 조작 테이블을 작성한다. 반면에 존재하는 경우 부하절체 후보집합 SW_k에 대해 시스템 운영목적에 따라 부하분담 균등화 지표 ΔS 또는 손실 지표 ΔP를 계산하고 단계 14]로 간다.

[단계 15] HR 9,11]의 만족여부를 점검한다. 만약 만족하는 경우 단계 15]로 가서 부하절체를 실시한다. 반면에 그렇지 않은 경우 단계 13]으로 가서 다음 우선순위의 부하절체 후보 SW_{k+1}에 대해서 계속한다.

[단계 16] 부하절체 후보 SW_k에 대한 부하절체를 실시한다. 이때 절체 또는 분담 주변압기들 T_s, T_r의 실제부하가 변경된다. 그리고 절체, 분담 배전선로들 F_s, F_r 에 대한 조류계산을 실행한 다음 단계 11]로 간다.

[단계 17] 조류계산 실행후 분담 선로나 주변압기의 운용제약조건 HR 15]의 만족여부를 점검한다. 만약 위반되는 경우 부하절체 후보 SW_k를 원래상태로 복귀한 후단계 13]으로 가서 다음 우선순위의 부하절체 후보 SW_{k+1}에 대한 부하절체를 시도한다. 반면에 계통운용제약조건을 만족하는 경우 부하절체 후보 SW_k를 새로운 부하절체 후보 SW_k^*로 갱신한다. 그리고 단계 13]로 가서 동일 우선순위의 SW_k에 대해 부하절체를 시도한다.

[단계 18] HR 20-25]를 근거로 하여 개폐기 조작 테이블을 작성하고 그 순서에 따라 개폐기의 상태를 제어한다. 조작에 실패하는 경우 HR 26-34]에 의해 새로운 시스템 재구성 전략을 수립한 다음, 단계 17]로 간다.

4.3 휴리스틱 규칙(HR : Heuristic Rule)

시스템 운영자가 선택하는 탐색전략하에서 시스템 운영자가 선택하는 운영목적에 따라 적합한 휴리스틱들이 구동되도록 건전 정전구간 최소화, 개폐기 조작회수 최소화, 선로손실 최소화 그리고 부하분담 균등화를 위한 복합 휴리스틱 규칙들을 제안, 채택한다. 이들 휴리스틱 규칙들은 탐색공간의 안내자의 역할을 한다. 여기서는 HR 1-14]가 소개된다.

1) 다중 이벤트 처리

[HR 1] 부하 중요도가 높은 주변압기나 정전선로가 우선선택된다.

[HR 2] 부하크기가 큰 주변압기나 선로가 우선선택된다.

2) 부하절체 후보집합 결정

[HR 3] 분담 주변압기나 배전선로가 절체 주변압기나 배전선로가 되어서는 안된다.

[HR 4] 분담 배전선로상의 개폐기가 모두 투입상태이어야 한다.

3) 개폐기조작회수 최소화 제어전략

[HR 5] 선로 사고정전시 동일 배전선로가 최우선 순위를 갖는다.

[HR 6] 여유용량이 가장 큰 주변압기가 우선선택된다.

[HR 7] 동일 주변압기의 경우 인출단에서 말단까지의 전압강하가 작은선로가 우선선택된다.

[HR 8] 이미 선택된 경로상의 부하절체 후보가 우선선택된다.

4) 손실최소화 개폐기 제어전략

[HR 9] $LTL_R > LT_{COST}$인 부하절체 후보만을 선택한다.

여기서 LTL_R 는 손실절감 이득을, LT_{COST}는 부하절체 비용을 나타낸다.

[HR 10] min(ΔP)인 부하절체 후보를 우선 선택한다. 여기서 ΔP는 부하절체 후의 전체 손실절감 지표이다[8].

5) 부하균등화 개폐기 제어전략

[HR 11] $LTB_B > LT_{COST}$인 부하절체 후보만을 선택한다. 여기서 LTB_B 는 부하분담 균등화 개선효과를, LT_{COST}는 부하절체 비용을 나타낸다.

[HR 12] 부하분담 균등화 운용목적하에서, min(ΔS)를 가지는 부하절체 후보를 우선 선택한다. 여기서 ΔS는 부하절체 후의 부하분담균등화 지표이다[8].

[HR 13] 부하분담 균등화 목표하에서, 동일 분담선로의 부하측 부하절체 후보가 절체후 타 분담선로의 부하절체 후보를 포함하는 경우 가장 낮은 우선순위를 가진다.

[HR 14] 리클로우저를 연계 개폐기로 하는 부하절체 후보는 가장 낮은 우선순위를 가진다. 부하절체후의 보호협조 메카니즘을 고려한 규칙이다.

5. 컴퓨터 모의 결과

5.1 시험 배전 시스템

시험 배전계통은 그림 5와 같이 4대의 주변압기로부터 각각 전력을 공급받는 6, 6, 6, 8개의 실 선로들 중에서 상이한 부하패턴을 보이는 6개의 배전선로들로 구성하였다. 시스템 내의 주변압기들 {T_1, T_2, T_3, T_4}에 대한 용량과 특정시점에서의 실제부하는 표 2와 같다. 정격용량은 OA용량, 최대용량은 FA용량을 나타낸다.

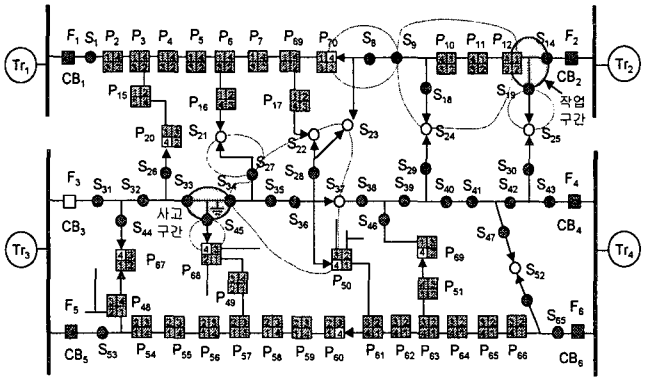

그림 5 성능평가를 위한 시험 배전 시스템

Fig. 5 Test distribution system for performance evaulation

표 2 주변압기 정격용량

Table 2 Main transformer capacities

KVA \ ID	T_1	T_2	T_3	T_4
정격용량	30,000	45,000	30,000	45,000
최대용량	40,000	60,000	40,000	60,000
실제부하	21,040	28,240	22,020	26,700

표 2는 주 변압기 용량, 표 3은 각 선로들에 대한 부하 데이터를 보인다.

표 3 배전선로 데이터

Table 3 Feeder data

KVA \ ID	F_1	F_2	F_3	F_4	F_5	F_6
정격용량	7,000	7,000	7,000	7,000	7,000	7,000
최대용량	14,000	14,000	14,000	14,000	14,000	14,000
전류부하	400	250	220	150	180	150

전문가 시스템의 성능 검증을 위해서 선로사고, 선로과부하, 선로작업정전, 선로중요부하, 주변압기 사고, 주변압기 과부하 문제등 을 시뮬레이션 하였다. 소모적 탐색법은 운용목적별로 휴리스틱에 근거하여 순차적으로 해를 제시하는 데, 첫 번째 해가 최선우선 탐색법(best-first search)의 해가 되며, 탐색깊이 0에서 얻어지는 부하절체 후보들 각각에 대한 첫 번째 해들의 그룹에서 최적의 해가 준최적 탐색법(local minimum tree search)의 해가 된다. 반면에 탐색제한 소모적 탐색법은 첫번째 해로부터 그 제한된 수만큼의 해들 중에서 최적한 해를 얻는 것이다. 그러므로 추론과정은 소모적 탐색법(exhaustive search)을 추론모드로 하여 시뮬레이션함으로써 확인할 수 있다.

5.2 선로사고 이벤트 모의

선로사고{S_{30}, S_{32}, S_{45}}에 대해 시뮬레이션 하였다. 시스템 부하분담 균등화 운용목적하에서 얻어진 개폐기 제어전략은 표 4와 같다. 표 4에서 G는 개스 개폐기, P는 다회로 개폐기, C는 선로보호용 차단기(CB)이며, 1002는 F_2의 CB번호이다.

표 4 선로사고 이벤트에 대한 개폐기 제어 전략

Table 4 Switch control strategy for a feeder fault event

NO.	개폐기 ID		제어모드	개폐기 타입
1	30	1	OPEN	G
2	32	1	OPEN	G
3	45	1	OPEN	G
4	39	1	OPEN	G
5	49	4	CLOSE	P
6	48	4	CLOSE	P
7	1002	1	CLOSE	C

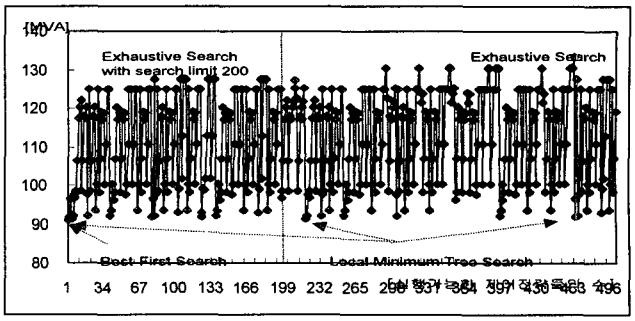

그림 6 선로사고 이벤트에 대한 제어전략들의 부하분담 균등화 지표

Fig. 6 Balancing index of control strategies for feeder fault event

그림 6은 최선우선 탐색법이나 준 최적 탐색법, 탐색제한 소모적 탐색법에 대한 추론과정을 설명한다. 준 최적 탐색법은 시간측면에서 가장 유리하나 나머지 두 방법은 최적해에 대한 가능성을 제고할 수 있음을 보인다. 그림에서 ◆는 가능한 모든 제어전략들에 대한 부하분담 균등화 지표를 나타내는데, 특히 최선우선 탐색법하에서 수립된 실시간 제어전략(첫번째 해)이 약 500개의 가능한 해들 중에서 준 최적에 속하는 해임을 보인다.

5.3 선로작업정전 이벤트 모의

선로작업정전{S_{16}, P_{18}, S_{25}}에 대해 시뮬레이션 하였다. 시스템 부하분담 균등화 지표하에서 얻어진 개폐기 제어전략은 표 5와 같다.

표 5 선로작업정전 이벤트에 대한 개폐기 제어 전략
Table 5 Control strategy for a feeder scheduled outage event

NO	개폐기 ID		제어모드	개폐기 타입
1	23	1	CLOSE	G
2	29	1	OPEN	G
3	18	1	CLOSE	P
4	28	1	OPEN	G
5	25	1	CLOSE	G
6	26	1	OPEN	G
7	18	1	OPEN	G

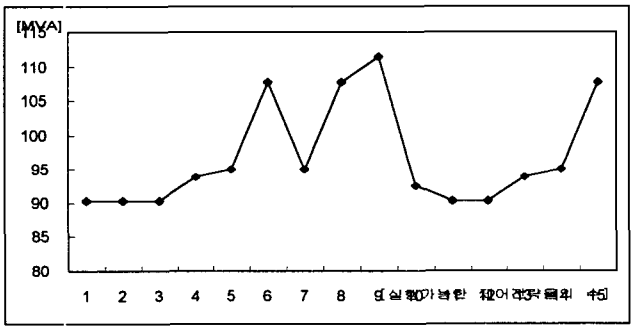

그림 7 선로 작업정전 이벤트에 대한 제어전략들의 부하분담 균등화 지표
Fig. 7 Balancing index of control strategies for feeder scheduled outage

그림 7은 실시간제어전략의 최적해에 대한 정도를 설명한다. 그림에서 ◆는 가능한 모든 제어전략들에 대한 부하분담 균등화 지표를 나타내는데, 실시간 시스템 제어전략이 약 15개의 가능한 해들 중에서 준 최적에 속하는 해임을 보인다.

5.4 선로중요행사 이벤트 모의

중요행사가 부하지역{S_{78}, S_{86}, $P_{80,1}$}에서 발생하는 경우를 시뮬레이션 하였다. 개폐기 조작회수 최소화 운용목적하에서 얻어진 개폐기 제어전략은 표 6과 같다.

그림 8은 실시간 해의 정확성과 유효성을 보인다. 첫 번째 해가 아주 최적한 수의 개폐기 조작회수를 요구함을 확인할 수 있다.

표 6 선로 중요행사 이벤트에 대한 개폐기 제어 전략
Table 6 Switch control strategy for a feeder important work event

NO.	개폐기 ID		제어모드	개폐기 타입
1	65	4	CLOSE	P
2	80	1	OPEN	G

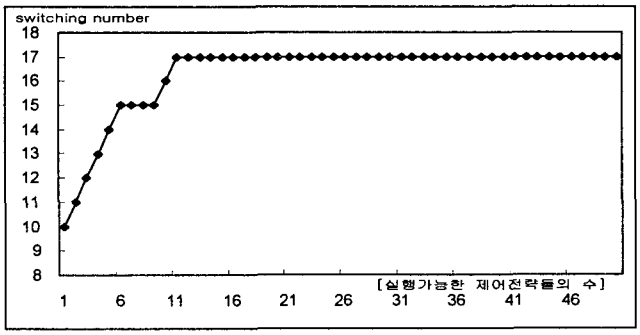

그림 8 선로 중요행사 이벤트에 대한 제어전략들의 개폐기 조작회수 지표
Fig. 8 Switching number of control strategies for feeder important work

5.5 선로과부하 이벤트 모의

선로 과부하 이벤트에 대한 전문가 시스템의 처리능력을 검증하기 위해서 비교적 복잡한 연계구조를 가지는 배전선로 F_2에 대한 과부하 이벤트가 모의된다. 먼저 전문가 시스템은 best-first 탐색전략을 추론모드로 하고 시스템 부하분담 균등화를 시스템 운영목적으로 하여 표 7과 같은 실시간 제어전략을 수립하였다.

그림 9는 많은 해들 중에서 약 500개의 실행 가능한 제어전략들을 나타내는데, 실시간 제어전략이 과부하 해소를 위한 최적해 부근에 있음을 알 수 있다. 그림에서, ◆는 제어전략들의 시스템 부하분담 균등화 지표를 나타낸다.

표 7 선로과부하 이벤트에 대한 개폐기 제어 전략
Table 7 Switch control strategy for feeder overload event

NO.	개폐기 ID		제어모드	개폐기 타입
1	49	4	CLOSE	P
2	39	1	OPEN	G
3	46	4	CLOSE	P
4	45	1	OPEN	G
5	48	4	CLOSE	P
6	47	1	OPEN	G

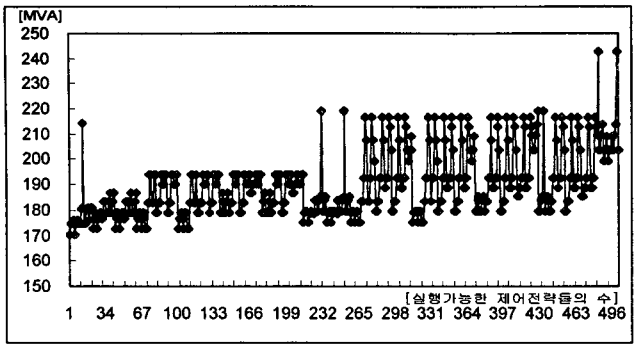

그림 9 선로 과부하 이벤트에 대한 제어전략들의 부하분담 균등화 지표

Fig. 9 Balancing index of control strategies for feeder overload event

따라서 최선우선 탐색전략이 대규모 배전계통에서 아주 빠른 시간에 아주 만족할 만한 수준의 실시간 해를 구하는 데 아주 유효할 수 있음을 확인할 수 있다.

5.6 주변압기과부하 이벤트 모의

표 8은 시스템 부하분담 균등화하에서 주변압기 T_2의 용량을 48,240[KVA]로 가정한 상태하에서 얻어진 과부하 해소 전략을 보인다.

표 8 주변압기 T2 과부하 이벤트에 대한 개폐기 제어 전략

Table 8 Switch control strategy for a MTr. overload event

NO.	개폐기 ID		제어모드	개폐기 타입
1	49	4	CLOSE	P
2	36	1	OPEN	G
3	75	4	CLOSE	P
4	73	4	OPEN	P

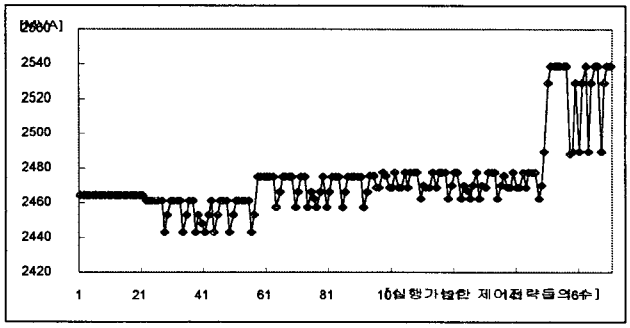

그림 10 MTr 2 과부하 이벤트에 대한 제어전략들의 성능

Fig. 10 Performances of control strategies for a Mtr 2 overload event

그림 10은 컴퓨터 모의결과에서 161개의 실행 가능한 해들이 크게 수개의 부하분담 균등화 지표레벨로 분류됨을 보인다. 또한 실시간 제어전략이 비교적 만족할만한 준 최적의 부하분담 균등화 수준에 속함을 보인다. 그림에서, ◆는 실행가능한 해들의 시스템 부하분담 균등화 지표들을 의미한다.

5.7 주변압기사고 이벤트 모의

시스템 이벤트 중 비교적 처리가 복잡하고 다중 정전처리가 요구되는 주변압기 사고 이벤트에 대한 문제해결능력을 검증하기 위해서 먼저 주변압기 T_2의 사고 이벤트가 처리된다. 이때 복구되야 할 정전선로는 사고 주변압기에 속하는 배전선로들의 집합 $\{F_2, F_3\}$로 표시되는데 이들에 대한 전문가 시스템의 추론결과는 표 9에 보인다. 이 시뮬레이션 결과들은 전문가 시스템이 배전계통의 다양한 이벤트들에 대해서 정확한 해를 신속하게 제시할 수 있음을 보인다. 추론결과는 최선우선 탐색법, 준최적 탐색법, 탐색제한 소모적 탐색법 모두가 추론모드로 선택될 수 있음을 보이는데 특히, 최선우선 탐색법은 탐색시간을 최소화하는 반면 최적해에 대한 가능성이 다소 낮아지는 반면 준 최적 탐색법이나 탐색제한 소모적 탐색법은 점차적으로 최적해에 대한 가능성을 보다 높임을 알 수 있다.

표 9 주변압기 T2 사고 이벤트에 대한 개폐기 제어 전략

Table 9 Switch control strategy for a MTr. 2 fault event

NO.	개폐기 ID		제어모드	개폐기 타입
1	41	1	OPEN	G
2	11	4	CLOSE	P
3	42	1	OPEN	G
4	13	1	CLOSE	G
5	43	1	OPEN	G
6	29	1	CLOSE	G
7	1002	1	OPEN	C
8	50	1	CLOSE	G
9	46	1	OPEN	P
10	46	4	CLOSE	P
11	1003	1	OPEN	C
12	75	4	CLOSE	P

6. 결 론

본 연구에서는 배전계통상에서 발생할 수 있는 다양한 이벤트들에 대해 종합적으로 대처할 수 있는 전문가 시스템을 제안하였다. 이벤트들은 선로사고, 주요행사, 선로 작업정전, 선로과부하, 부하분담 균등화, 선로손실 최소화, 주변압기 사고, 선로 모선사고, 주변압기 작업계획, 주변압기 과부하, 주변압기 예방제어 등 사고 및 작업계획, 최적운용과 관련하여 선로상에서 발생할 수 있는 다양한 이벤트들을 포함한다. 전문가 시스템은 다양한 이벤트들에 대해서 통합적인 개념으로 설계됨으로써 소프트웨어 설계의 신뢰도를 제고할 수 있도록 하였다. 전문가 시스템은 C언어로 구현되었으며 대표적인 배전계통 모델에 대한 다양한 평가결과에서 그 유용성과 정확성을 보였다. 따라서 제안된 전문가 시스템은 차후 대규모 배전계통에 대한 선로자동화 소프트웨어로 활용되어 공급신뢰도를 제고함으로써 공급전력의 고품질에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력공학 공동연구소 주관으로 수행된 과제임(과제번호 : 01-015)

참 고 문 헌

[1] Castro, C. H., J. B. Bunch, and T. M. Topka, "Generalized Algorithms for Distribution Feeder Deployment and Sectionalizing," IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-99, No. pp. 549-557, March/April 1980.

[2] 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.

[3] Kim, H., Y. S. 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.

[4] Kim, H, 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.

[5] Jung, K. H., H. Kim, Y. S. Ko, "Network Reconfiguration Algorithm for Automated Distribution Systems based on Artificial Intelligence Approach," IEEE PWRD WM-93 Feb. 1993.

[6] 고윤석, 이기서, "자동화된 변전소의 주변압기 사고시 제어전략 수립지원을 위한 전문가 시스템", 전기학회논문지, Vol. 44 ,No. 10 ,pp. 1258-1264, 1995년 10월.

[7] 고윤석, 김호용외 2인, "인공신경회로망의 LDC 변수 동적이동능력을 이용한 실시간 ULTC 제어전략" ,전기통신학회논문지, Vol. 21 No. 2 ,pp. 541-550 1996년 2월.

[8] 고윤석, 이기서, "배전 SCADA 시스템의 부하분담 균등화 및 선로손실 저감화 타스크를 위한 실시간 전문가 시스템의 구현" ,전기학회논문지, Vol. 44 , No. 11 ,pp. 1423-1429, 1995년 11월.

[9] 고윤석, 이호정, "불확실성을 가지는 배전 SCADA정보로부터 확률론과 휴리스틱 탐색법에 근거한 고장위치 확인 알고리즘 개발",전기학회논문지, Vol. 47, No. 12, pp 2087-2093, 1998년 12월.

[10] 고윤석, 이기서외, "배전 SCADA기능을 이용한 고장타입·고장위치 진단 전문가 시스템", 전기학회논문지, Vol. 48, No. 11, pp 1417-1428, 1999년 11월.

저 자 소 개

고 윤 석 (高 銑 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.