

자동화된 변전소의 이벤트 발생시 준최적 탐색법에 기반한 모선 재구성 전략의 개발

論 文
53A-10-6

Bus Reconfiguration Strategy Based on Local Minimum Tree Search for the Event Processing of Automated Distribution Substation

高 銳 錫[†]
(Yun-Seok Ko)

Abstract - This paper proposes an expert system which can enhance the accuracy of real-time bus reconfiguration strategy by adopting local minimum tree search method and minimize the spreading effect of the fault by considering totally the operating condition when a main transformer fault occurs in the automated substation. The local minimum tree search method to expand the best-first search method. This method has an advantage which can improve the performance of solution within the limits of the real-time condition. The inference strategy proposed expert system consists of two stages. The first stage determines the switching candidate set by searching possible switching candidates starting from the main transformer or busbar related to the event. And, second stage determines the rational real-time bus reconfiguration strategy based on heuristic rules for the obtained switching candidate set. Also, this paper studies the generalized distribution substation modelling using graph theory and a substation database is designed based on the study result. The inference engine of the expert system and the substation database 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 local minimum tree search solution based on diversity event simulations for typical distribution substation.

Key Words : Substation Automation, Bus Reconfiguration, Local Minimum Tree Search, Expert System

1. 서 론

배전 변전소는 수용가 지역에 폭넓게 분산 배치되는 배전 선로들을 통해 일반 수용가들에게 전력을 공급하는데, 154 KV 수전단 모선은 이중으로 전력을 공급받기 때문에 계통사고의 경우에도 전력공급이 중단되는 사태를 피할 수 있으나 154 KV 모선 부하단은 수지상 구조로 운전되기 때문에 주변압기나 22.9KV 모선사고시 엄청난 사고파급효과를 발생시킨다. 따라서 이벤트 발생시 사고파급효과를 최소화하기 위해서 변전소 자동화가 추진되고 있는데, 이것을 기반으로 전력계통 운영의 효율성과 경제성을 제고하기 위한 일환으로 변전소 무인화가 동시에 모색되고 있다. 전력사업자들은 변전소 자동화에 기반한 변전소 무인화를 추진하기 위해 22.9KV 모선의 1, 2모선간에 모선간 CB를 설치, 운영하고 있으며, 전력 SCADA의 원격 제어기능을 이용하여, 이 CB들을 원격에서 제어할 수 있도록 하고 있다. 그러나 정상시 모선의 구성상태는 다양할 수 있으며, 이벤트도 다양한 부하조건에서 발생할 수 있기 때문에 변전소 운전의 안정성과 효율성을 제고하기 위해서는 모선간 색션 스위치는 물론 라인 스위치들을 원

격에서 종합적으로 제어할 수 있는 원격제어기능의 실현이 요구된다. 특히, 이러한 자동화 기반 무인화 환경하에서 시스템 운영자의 잘못된 판단은 엄청난 사고파급효과를 가져올 수 있기 때문에 이벤트 발생시의 모선구성, 부하조건 등을 고려하여 최적한 모선재구성 전략을 실시간으로 수립, 운영자에 제공할 수 있는 부하절체 전략 수립기능이 탑재되어야 한다. 그러나 모선상의 CB나 색션 스위치 그리고 라인 스위치들의 조작을 통해서 다양한 모선구성이 가능함은 물론 하나의 주변압기에 최대 8개의 배전선로들이 할당되기 때문에 운용목적에 만족하는 최적한 해를 얻기 위해서는 이들 CB나 스위치들에 기반한 대규모 조합문제를 풀어야 한다[1-3]. 따라서 [4-8]에서는 휴리스틱 탐색전략에 기반하여 탐색공간을 최소화함으로써 탐색시간을 최소화할 수 있는 실시간 모선 재구성 전략들을 제안한다. 특히, [8]에서는 최선우선 탐색법(Best-First Search)에 기반한 실시간 모선 재구성 전략을 제안하는데, 이 방법은 휴리스틱에 기반하여 얻어지는 첫 번째 해를 실시간 해로 제안하기 때문에 최적한 실시간 조건을 만족시킬 수 있으나 해의 성능을 보장할 수 없다는 단점을 가진다.

따라서 본 연구에서는 자동화된 변전소의 주변압기 사고 이벤트 발생시 준최적 탐색법(Local Minimum Tree Search Method)을 탐색전략으로 함으로써 해의 성능을 제고하고 동시에 변전소 운전조건등을 종합적으로 고려함으로써 이벤트 파급효과를 최소화할 수 있는 전문가 시스템을 제안한다. 준최적 탐색법은 최선우선 탐색법을 확장한 것으로 탐색공간을

[†] 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

다소 확장함으로써 실시간 운전조건을 만족하면서 해의 정도를 제고할 수 있다는 장점을 가진다. 전문가 시스템의 추론 전략은 2단계로 구성되는데, 첫번째 단계에서는 이벤트 주변압기나 모선으로부터 스위칭 후보를 탐색하는 스위칭 후보를 결정하는 단계이며, 두번째 단계는 이들로부터 휴리스틱 규칙에 기반하여 합리적인 부하절체 전략을 수립하는 실시간 모선 재구성 전략 수립 단계이다. 또한 본 연구에서는 그래프 이론을 이용하여 일반화된 배전변전소의 모델링을 얻으며, 이것을 기반으로 변전소 데이터베이스와 실시간 데이터베이스가 설계된다. 그리고 Visual C++의 MFC 기능을 이용해 다이나믹 프로그래밍에 기반한 추론엔진과 MMI를 구현하며, 동시에 데이터베이스를 구현한다. 끝으로, 대표적인 배전 변전소에 대해 데이터베이스를 구축하고 시뮬레이션 검증 작업을 통해 제안된 전문가 시스템의 이벤트 처리기능에 대한 정확성과 유효성을 검증한다.

2. 기본개념

그림 1은 대표적인 배전 변전소 결선도를 보인다. 모선은 상위에 위치한 1모선 B_{1j}와 하위에 위치한 2모선 B_{2j}로 구성되며, 1, 2모선 즉 B_{1j}와 B_{2j}사이에는 배전선로들 F_{jk}를 상대모선으로 절체하기 위한 라인 스위치들 LS_{ij,k}가 설치된다. 그리고 B_{1j}사이 또는 B_{2j}사이에는 모선간 연결을 위해 섹션 스위치들 BS_{ij,k}가 설치된다.

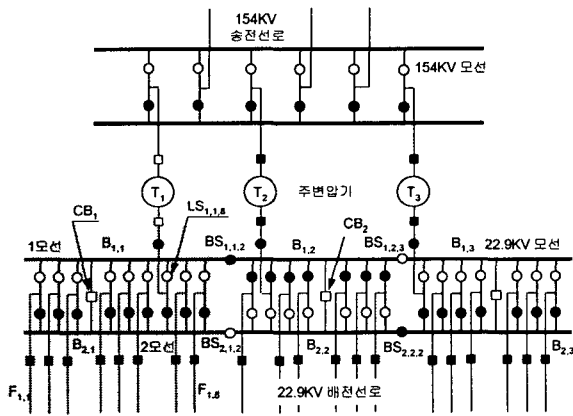


그림 1 배전 변전소 결선도
Fig. 1 Distribution substation diagram

또한 필요시 신속한 모선간 부하절체를 위해 모선 타이 CB가 설치된다. 여기서 B_{ij}는 i모선 j모선구간을, LS_{ij,k}는 i모선 j모선구간 k번 선로용 라인 스위치들을 표시한다. BS_{ij,k}는 i모선 j와 k 모선구간간 섹션 스위치를, CB_j는 j모선구간 모선간 차단기를 표시한다. 그리고 F_{j,k}는 j번째 주변압기에 속한 k번째 배전선로를 의미한다. ■, □는 차단기의 투입, 개방된 상태를, 반면에 ●, ○는 섹션 스위치, 라인 스위치 또는 단로기의 투입, 개방 상태를 나타낸다. 그림 2는 그림 1의 변전소를 감시하는 전력 SCADA 시스템의 구성과 본 연구에서 제안하는 전문가 시스템의 구성을 보인다. 전력 SCADA

시스템은 사고발생시 변전소내의 CB에 대한 조작기능만을 가진다.

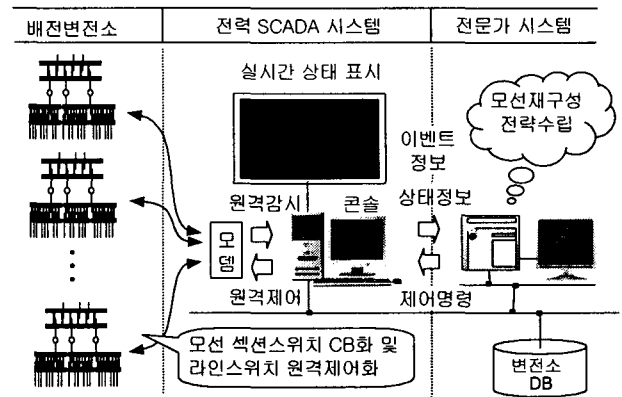


그림 2 전력 SCADA 시스템과 전문가 시스템의 구성
Fig. 2 Configuration of power SCADA system and expert system

따라서 무인화된 환경하에서 변전소 운전의 안전성을 확보하기 위해서는 모션 섹션 스위치 BS_{ij,k}와 라인 스위치 LS_{ij,k}에 대한 원격제어기능을 구현함과 동시에 사고과급효과를 최소화할 수 있는 정확한 모션 재구성 전략을 제공할 수 있어야 한다. 주변압기 T₁에 사고가 발생한 경우를 가정해보자. 먼저 주변압기 T₁에 대한 무부하 가압시험을 통해 영구고장 여부를 확인한다. 영구고장의 경우, 사고과급효과를 최소화시키기 위해 사고 주변압기의 부하를 변전소내의 타 탱크로 신속하게 절체하게 된다. 이때 모션간 타이 CB를 투입해서 신속하게 문제를 해결하는 것을 원칙으로 하나 모션운전상태다 다양하기 때문에 모션 타이 CB만을 가지고는 많은 경우에서 문제해결이 어려울 수 있다. 따라서 LS_{ij,k}나 BS_{ij,k}를 이용하게 되는데 이때의 운용목적은 모션조작의 신뢰성을 높이기 위해 개폐기 조작회수를 최소화할 수 있도록 해야 한다. 식 (1)은 이때의 운용목적을 보인다.

$$\min(N_{CB} + N_{SS} + N_{LS}) \tag{1}$$

여기서, N_{CB}는 모션 재구성을 위해 조작되어야 할 CB의 수, N_{SS}는 모션 재구성을 위해 조작되어야 할 섹션 스위치들의 수 그리고 N_{LS}는 모션 재구성을 위해 조작되어야 할 라인 스위치들의 수를 의미한다.

먼저 CB₁을 투입하여 정전선로들을 T₂로 절체하여 문제 해결을 시도한다. 그러나 T₁의 부하가 T₂의 최대허용용량을 초과하는 경우, T₂가 T₃와 함께 부하를 분담하도록 CB₂를 투입하여 병렬운전을 실행한다. 그러나 부하추정에서 사고부하가 2대의 병렬분담용량을 초과하는 경우, 식 (2)를 만족하도록 부하분리를 시도한다.

$$\min \sum_{i \in F_R} FAL_i \tag{2}$$

여기서, FAL_i는 i번째 배전선로의 부하, F_R은 후보주변압기에 절체될 수 없는 정전선로들의 집합을 의미한다.

다음 섹션 스위치 BS_{2,1,2}를 투입한 후, 라인 스위치들을 조작, 정전부하를 최대허용용량 범위내에서 2대의 주변압기에 분담시키기 위한 라인 스위치 제어전략을 수립해야 한다. 이때 식 (3)의 부하 균등화가 정의된다.

$$\min(\sum_{i \in T} (TIL_i - TAL_i)^2) \quad (3)$$

여기서 T는 변전소내의 주변압기들의 집합, TIL_i, TAL_i은 i번째 주변압기의 이상부하와 실제부하, TNC_i, TMC_i은 i번째 주변압기의 정격용량과 최대허용용량, TAC_i은 i번째 주변압기의 가용용량 그리고 TIL_i는 LF * TNC_i 또는 LF * TMC_i이다. LF는 $\sum TAL_i / \sum TAC_i$ 이다.

$$i \in T \quad i \in T$$

중 부하시에 이벤트가 발생한 경우 한대의 주 변압기로는 사고부하를 모두 분담할 수 없기 때문에 2대이상의 타 변압기에 부하를 분담시켜야 한다. 이 문제는 모선상의 CB_i, LS_{i,j,k} 그리고 BS_{i,j,k}에 대한 조합문제를 풀어 운용목적 (1) 또는 (3)을 만족하는 해를 구하는 문제인데, 상당한 탐색비용을 요구한다. 따라서 휴리스틱 탐색전략인 최선우선 탐색법이 활용될 수 있는데 이 방법은 매 깊이에서 우선적인 경로를 탐색하기 때문에 실시간 측면에서 유리하나 전체적으로는 해의 성능을 보장할 수 없다. 이 문제는 최선우선 탐색법을 깊이 1의 모든 노드들에 대해서만 확장, 적용하는 준최적 탐색법을 적용함으로써 해소될 수 있다. 준최적 탐색법은 최선우선 탐색법에 비해 탐색공간을 다소 확장함으로써 실시간 운전조건을 만족하면서 동시에 해의 성능을 제고할 수 있는 탐색법이다[9-10].

3. 전문가 시스템 설계

본 연구에서 제안하는 전문가 시스템은 데이터베이스, 변전소 모델, 추론엔진 그리고 MMI로 구성된다. 전문가 시스템은 이벤트가 발생하면 이벤트 정보로부터 이벤트 타입과 이벤트 위치정보를 확인한다.

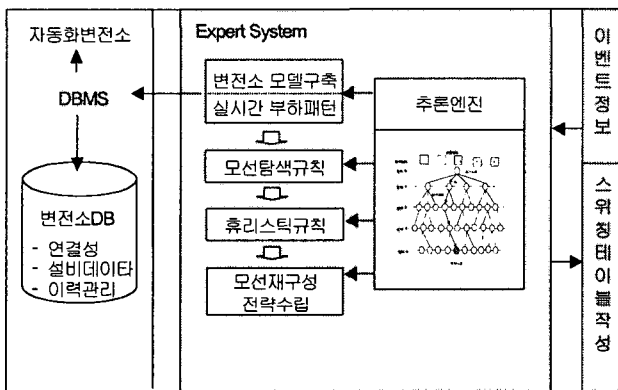


그림 3 전문가 시스템의 구조
Fig. 3 The structure of expert system

추론엔진은 DB 연계모듈을 이용하여 변전소 DB로부터 메모리내에 변전소 연결성을 표시하는 변전소 모델을 구축하고 이벤트 시점의 부하패턴을 검색하도록 한다. 그리고 변전소 모델로부터 연결성을 추적하면서 이벤트 정보에 근거하여 모선탐색규칙을 만족하는 스위칭 후보를 결정하고 준최적 탐색전략에 기반한 실시간 모선 재구성 전략을 수립, 최종적으로 스위칭 테이블을 작성하여 MMI를 통해 표시될 수 있도록 한다. 그림 3은 전문가 시스템의 구조를 보인다.

3.1 배전 변전소 모델링

배전 변전소의 전기적 연결성 추적기능을 지원하기 위해 메모리내에 실시간 배전 변전소 모델이 설계, 구축된다. 그림 4는 그래프 이론을 이용하여 변전소 연결성을 표시하는데, 주변압기, 모선바, 모선, 스위치 그리고 배전선, 송전선 등 6개의 노드들을 정의되며 이들간의 연결성은 브래치로 표시된다. ○는 노드를 브랜치는 노드간 연결성을 표시한다.

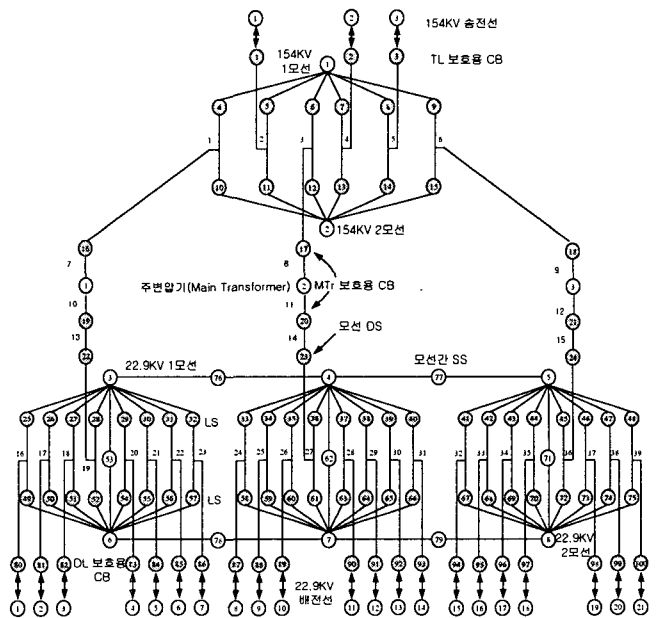


그림 4 배전변전소 모델 구축
Fig. 4 Distribution substation modelling

3.2 추론엔진

전문가 시스템의 추론메카니즘은 탐색트리로 표시할 수 있다. 탐색트리에서 초기노드는 이벤트 발생시점의 모선구성을, 반면에 브랜치는 스위칭 후보를 표시하며 일반노드는 스위칭 후보에 의한 스위칭 후에 재구성된 모선구성을 표시한다. 그림 5는 모선 재구성을 위한 탐색트리를 보이는데, ○는 탐색노드, ●는 목표노드(부하절체를 완료하는 모선구성)를 나타낸다. 주변압기 사고 이벤트가 발생한 경우를 가정해보자. 전문가 시스템은 먼저 초기노드로부터 출발한다. 즉, 현재의 모선구성에서 이벤트 정보에 기반하여 변전소 연결성을 추적, 사고 주 변압기의 부하들을 절체하기 위한 스위칭 후보를 탐색한다. 다음, 휴리스틱 규칙들에 기반하여 각 스위칭 후보들에 대한 휴리스틱 비용 @를 평가한다. 여기서 @는 개폐기 조작회수나 부하분담 균등화 지표가 될 수 있다. 그림 5는 가능한 확장노드가 4개(N_{1,1}, N_{1,2}, N_{1,3}, N_{1,4})이며 이들에

대한 휴리스틱 비용 @각 각각 {3,1,2,4}임을 표시한다. 따라서 최소비용의 노드 $N_{1,2}$ 가 우선 탐색된다. 만약 그림1의 변전소에서 T_1 에 사고가 발생한 경우라면 총 10개의 노드로 확장될 수 있다. 다음, 부하절체가 가능한지를 검증하고 부하절체가 가능하면 부하를 절제한 후 부하절체가 완료되었는지를 검증하여 목표노드를 확인한다. 만약 부하절체가 완료되지 않은 경우 깊이 2의 노드들로 확장된다. 깊이 2에서는 @가 2를 가지는 $N_{2,4}$ 가 선택된다. 그리고 깊이 3에서는 @가 1을 가지는 $N_{3,5}$ 가 우선 선택된다. 그리고 이와같은 깊이 확장 과정은 목표노드를 만날때까지 계속되는데 그림에서 부하절체가 완료되는 첫 번째 목표노드는 $N_{4,5}$ 이다. 그리고 이 목표노드를 얻기까지 탐색경로 $\{N_{1,2}, N_{2,4}, N_{3,5}, N_{4,5}\}$ 에서 선택된 스위칭 후보들의 집합 즉, 부하절체 전략이 최선우선 탐색법의 해가 된다.

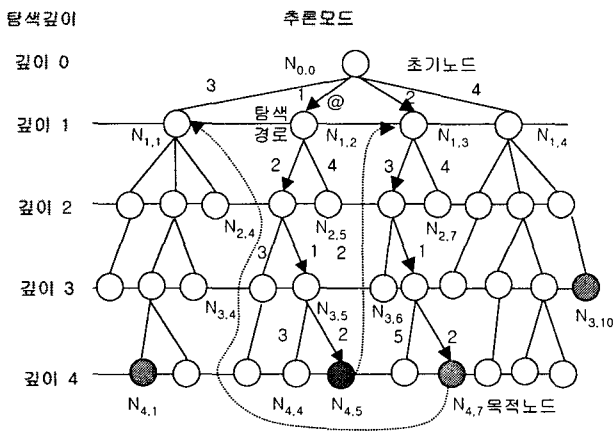


그림 5 전문가 시스템의 추론구조
Fig. 5 The structure of inference engine of expert system

준최적 탐색법은 이 과정을 깊이 0의 모든 노드들에 대해서만 확장 적용한다. 즉, 목표노드 $N_{4,5}$ 에서 깊이 0으로 역추적하여 두 번째 우선순위의 스위칭 후보를 선택, 노드 $N_{4,7}$ 을 얻는다. 그리고 두 번째 목표노드 $N_{4,7}$ 을 얻기까지의 경로 $\{N_{1,3}, N_{2,6}, N_{3,7}, N_{4,7}\}$ 에서 선택된 스위칭 후보들의 집합이 두 번째 부하절체 전략이 된다, 그리고 첫 번째 얻어진 부하절체 전략과 비교하여 최적한 성능의 것을 새로운 부하절체 전략으로 한다. 그리고 깊이 0의 $N_{1,1}$ 로 역추적하여 3번째 목표노드 $N_{4,1}$ 을 탐색, 부하절체 전략을 작성하고 이전의 것과 성능을 비교 우수한 성능의 부하절체 전략을 다시 새로운 부하절체 전략으로 한다. 이 과정이 끝나면 다시 $N_{1,4}$ 로 역추적하여 4번째 목표노드 $N_{3,10}$ 을 탐색하고, 같은 과정을 적용하여 최적한 부하절체 전략을 얻게된다. 그림 1에서 주변압기 T_1 에서 주변압기 사고가 발생한 경우에는 언급된바와 같이 10개의 부하절체 전략중에서 가장 우수한 것을 해로 결정하게 된다. 이와같이, 준최적 탐색법은 최선우선 탐색법에 비해 탐색공간을 다소 확장함으로써 상당히 개선된 부하절체 전략을 얻을 수 있다. 여기서 다소 확장되는 탐색공간은 전체 탐색공간에 비해 무시할 수 있는 수준이다.

3.3 휴리스틱 규칙(HR : Heuristic Rule)

논문 [8]에서는 모선구조에 기반한 문제해결전략을 채택함으로써 모선구조나 구성상태에 따라 경우별로 휴리스틱들이

개발됨으로써 휴리스틱들이 복잡하여 프로그램의 설계 및 보수유지 그리고 확장에 상당히 어려운 측면이 있었다. 따라서 본 연구에서는 가급적 전기적 연결성만을 추적하는 일반화된 스위칭 알고리즘을 적용, 부하절체 후보를 결정함으로써 모선의 구조에 기반한 복잡한 휴리스틱 규칙들을 배제하고 HR 1-5와 같이 일반적인 휴리스틱 규칙들이 채택되도록 하여 프로그램의 보수유지 및 확장성이 확보될 수 있도록 하였다. 운용목적 (1)하에서는 HR 1-3이, 운용목적 (2)하에서는 HR 4가 적용된다. 그리고 공통적으로 스위칭 관련 휴리스틱 규칙 HR 5가 적용된다.

HR 1] $\max\{TL_k : k \in CST_{ij}\}$ 가 우선선택된다. 이 규칙은 깊이 i, j 번째 노드에서 부하절체가 가능한 스위칭 후보들의 집합 CST_{ij} 에서 절체될 부하 TL 이 큰 스위칭 후보를 우선 선택함으로써 가급적 $\min(N_{CB} + N_{SS} + N_{LS})$ 을 얻기 위한 규칙이다.

HR 2] $\min\{LP_k : k \in CST_{ij}\}$ 가 우선선택된다. 이 규칙은 스위칭 후보들의 집합 CST_{ij} 에서 부하 중요도 LP 가 높은 스위칭 후보를 우선 선택함으로써 부하중요도가 높은 부하를 가급적 신속하게 복구하기 위한 규칙이다.

HR 3] $\min\{SN_k : k \in CST_{ij}\}$ 가 우선 선택된다. 이 규칙은 스위칭 후보들의 집합 CST_{ij} 에서 스위칭 횟수 SN 이 작은 스위칭 후보를 우선 선택함으로써 차단기나 개폐기 조작으로 인한 복구시간 지연이나 안전사고를 방지하기 위한 규칙이다.

HR 4] $\min\{\Delta E_k : k \in CST_{ij}\}$ 가 우선 선택된다. 이 규칙은 스위칭 후보들의 집합 CST_{ij} 에서 스위칭으로 인한 부하분담 평준화 지표 ΔE 가 작은 스위칭 후보를 우선 선택함으로써 사고부하를 동일변전소내의 건전 타뱅크에 적절하게 분담함으로써 변전소 운전의 안정성을 제고하기 위한 규칙이다. 만약, 절체될 부하 TL 이 $\sigma[KVA]$ 인 경우 시스템의 부하 균등화 지표 변화 ΔE 는 절체전과 절체후의 부하 균등화 지표의 차 즉, 식 (4)로 표시된다. 식 (4)에서, $TE_i = TIL_i - TAL_i$ 이다.[8]

$$\Delta E_i = TE_i^2 - (TE_i - \sigma)^2 = 2TE_i\sigma - \sigma^2 \quad (4)$$

HR 5] $\text{equ}\{LS_k : k \in CST_{ij}\}$ 가 우선 선택된다. 여기서 이 규칙은 스위칭 후보들의 집합 CST_{ij} 에서 라인 스위치 LS 를 우선 선택함으로써 병렬운전을 배제하고 사고복구의 안정성을 제고하기 위한 규칙이다.

3.4 데이터베이스 설계

변전소 데이터베이스는 논리적으로 쉽게 표시할 수 있는 관계형 모델로 설계되며, 크게 주변압기(MTr), 모선바(BUS-BAR), 모선(BUSLINE), 배전선(DL), 스위치(SW) 그리고 송전선(TL) 테이블로 구성된다. 각 테이블은 공통필드인 변전소 번호(변전소 #)를 이용하여 관할 변전소를 확인하며 스위치 번호(SW#)를 이용하여 연결성을 추적한다. 주변압기는 공통필드인 개폐기 번호(SW#)를 통해 모선과 배전선 그리고 송전선과 연결된다. 주변압기 데이터베이스 테이블에서 가용용량은 주변압기 내용년수와 상태를 고려해 분담이 가능한 용량이다. 모선과 모선봉 그리고 스위치(SW)는 모선#를 공통 필드로 하여 상호간의 연결성을 표시한다. 모선위치는 모선의 위치 즉, 1모선 또는 2모선을 표시하며 모선종별은 전압레벨 즉, 154KV 또는 22.9KV를 표시한다. SW 데이터베이스 테이블의 종별은 CB, 섹션 스위치 SS 그리고 라인 스위치 LS를 표시하며 타입은 수동 또는 자동을 표시한다. 그리고

DL의 부하 중요도는 전체의 우선순위를 결정하는 데 도움을 줄 수 있도록 설계된다.

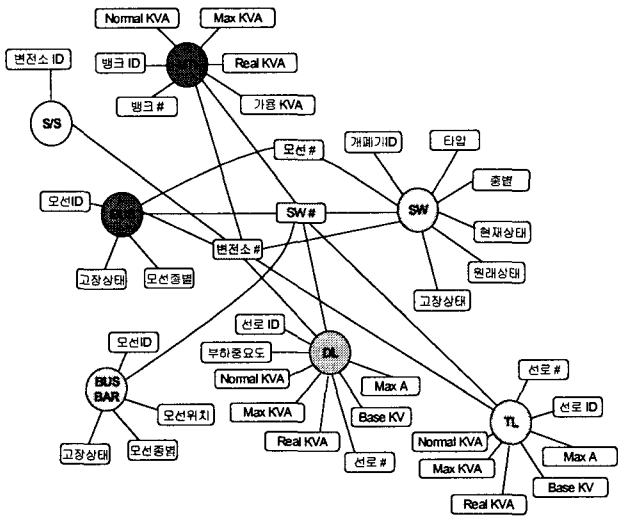


그림 6 변전소 데이터베이스 설계
Fig. 6 Substation database design

4. 문제해결전략

본 연구에서 제안하는 준최적 탐색법에 기반한 전문가 시스템의 사고 이벤트들에 대한 문제해결전략은 그림 7에 보인다

단계 1] 먼저 전문가 시스템은 추론모드를 설정하고 사고 변전소 번호를 인덱스로하여 변전소 DB로부터 해당 변전소에 대한 데이터를 검색, 전문가 시스템내에 변전소 모델을 구축한다.

단계 2] 이벤트를 감시하다 이벤트가 발생하면 정보처리 프로그램으로부터 사고 변압기를 확인한다. 그리고 추론깊이 i와 추론경로 j를 0으로 설정하고 단계 3]으로 간다.

단계 3] 사고 주변압기의 부하절체를 위한 스위칭 후보 세트 CST_{i,j}를 결정한다. 그리고 휴리스틱 규칙 HR 1-4]를 기반으로 재 정렬된 스위칭 후보 세트 CST_{i,j}*를 얻는다. 다음 k를 0으로 하고 단계 4]로 간다.

단계 4] 스위칭 후보 SW_{i,j,k}를 선택한다. 그리고 선택된 SW_{i,j,k}를 통해 절체되는 부하 TL_{i,j,k}와 분담하는 주변압기의 여유용량 TMC_{i,j,k}에 대한 정보를 확인하고 부하절체가 가능한지 즉 TL_{i,j,k}<TMC_{i,j,k}인지를 검사한다. 만약 만족하지 못하면 k를 증분하여 단계 4]로 가서 SW_{i,j,k+1}을 스위칭 후보로 선택한다. 반면에 부하절체 조건을 만족하면 단계 5]로 간다.

단계 5] 스위칭 후보 SW_{i,j,k}에 근거하여 부하절체를 시도하고 모선 재구성 전략 BRT_{i,j}에 SW_{i,j,k}를 멤버로 추가한다. 그리고 부하절체가 완료되었는지 즉 TL_{i,j,k}=0인지를 검사한다. 조건을 만족하지 못하면 i를 증분하고 단계 3]으로 가서 새로운 스위칭 후보 세트 CST_{i+1,j}를 결정한다. 반면에 조건을 만족하면 단계 6]으로 간다.

단계 6] 시스템 인덱스 즉, 식(1) 또는 식(2)의 비용 IDX_{i,j,k}를 계산한 다음 이전까지의 최소 비용 IDX와 비교한다. 만약 IDX<IDX_{i,j,k}이면 새로운 모선 재구성 전략이 보다 나은 성능을 가지는 것이므로 IDX_{i,j,k}를 IDX로 변경하고 모선 재구성 전략 BRT를 새로 얻어진 모선재구성 전략 BRT_{i,j}로 설정한다. 그리고 단계 7]로 간다. 반면에 IDX>IDX_{i,j,k}로

이전 부하절체 전략이 현재의 부하절체 전략보다 우수하면 단계 7]로 직접 점프한다.

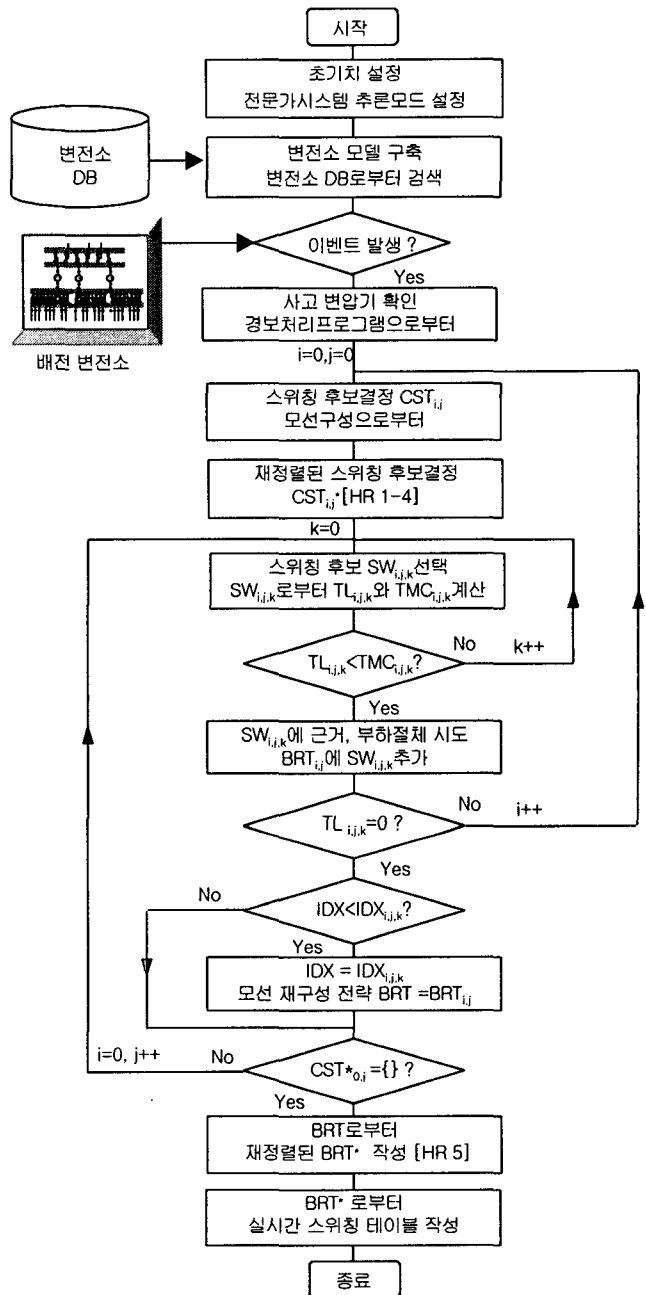


그림 7 전문가 시스템의 문제해결 전략
Fig. 7 Problem-solving strategy of expert system

단계 7] 지금까지 탐색경로에서 부하절체를 통해 재구성된 모선구성을 복원시키면서 상위 깊이로 역추적하여 깊이 0으로 복귀한다. 그리고 CST_{0,j}*가 {}인지를 검사한다. 만약 조건을 만족하면 단계 8]로 간다. 반면에 CST_{0,j}* ≠ {}이면 i=0으로 하고 j를 증분한 다음 단계 4]로 가서 다음 우선 스위칭 후보 SW_{0,j+1,k}에 대해서 추론과정을 반복한다. 단 초기노드에서는 탐색경로와 우선 순위 k가 같다.

단계 8] 추론과정에서 얻어진 BRT를 HR 5]를 기반으로

제 정렬한 다음 스위칭 테이블을 작성하여 MMI에 표시한다.

5. 시뮬레이션 결과

본 연구에서는 준최적 탐색법에 기반한 자동화된 변전소의 사고복구 전문가 시스템을 제안하였다. 제안된 전문가 시스템의 유효성을 검증하기 위해서는 대표적인 배전 변전소 모델하에서 동일한 부하조건하에서 기존 탐색법과 준최적 탐색법의 성능을 비교하는 것이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 그림 8과 같은 대표적인 변전소 모델에 대해 에 대해 주변압기 1에서 사고가 발생한 것으로 가정하고 다양한 부하조건하에서 최선우선 탐색법 그리고 제안되는 준최적 탐색법을 적용하여 문제해결을 시도한다.

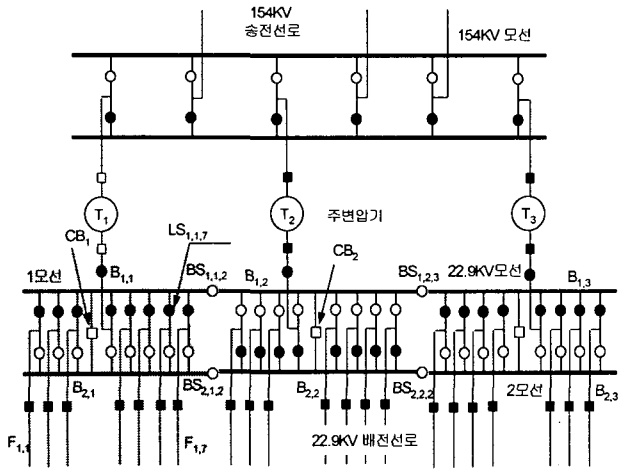


그림 8 시험 변전소
Fig. 8 Distribution substation for test

배전 변전소는 3대의 주변압기로 구성되며 각 주변압기들 T1, T2, T3은 수용가 지역을 경유하는 각각 7개의 배전선로들로 구성된다. 표 1은 각 주변압기들에 대한 정격용량, 최대용량 그리고 기록된 기간동안의 이력 데이터로부터 얻어지는 최대 및 최소부하를 보인다.

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

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

본 연구에서는 제안된 전략의 유효성을 확인하기 위해 다양한 부하조건에 대한 사고경우를 모의한다. 따라서 부하레벨을 피크부하, 중부하, 경부하 그리고 최소부하로 구분한다. 표 2는 주변압기 T₁에 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. 제안된 전문 시스템에 대한 성능평가는 크게 3단계로 실시되었다. 첫번째, 전문가 시스템의 부하패턴 발생가능을 이용하여 다양한 부하조건들을 모의하기 위해 총 L^(n,m)개의 부하패턴들을 발생시킨다. 여기에서 L은 부하레벨 수를 의미하는데 피크부하, 중부하, 경부하, 최소부하레벨 등 4개의 레벨로 설정되었다. 그리고 n과 m은 각각 주변압기와 배전선로들의 독립된 부하패턴 수인데, 3과 4로 설정되었다. 따라서 총 16,414개의 부하패턴들이 발생되었다. 둘째, 전문가 시스템의 운용목적들을 개폐기 조작회수 최소화 운용목적 식 (1)로 설정하고 추론모드를 최선우선 탐색법으로 하여 생성된 부하패턴들에 대한 모션 재구성 전략을 얻는다. 다음 본 연구에서 제안하는 준최적 탐색법을 적용하여 생성된 부하패턴들에 대한 모션 재구성 전략들을 결정한다. 셋째, 부하분담 균등화 운용목적(3)하에서 최선우선 탐색법과 준 최적 탐색법을 각각 적용하여 생성된 부하패턴들에 대한 실시간 모션 재구성을 전략을 얻는다. 그림 9는 식 (1)하에서 2개의 접근법에 의해서 얻어진 모션 재구성 전략의 성능을 보인다. 여기서 보인 경우는 주변압기 T₁에서 사고가 발생한 경우에 대한 모션 재구성 전략들이다.

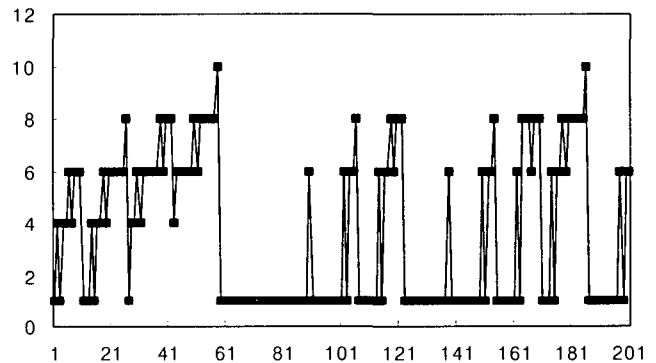


그림 9 모션 재구성 전략들의 개폐기 조작회수
Fig. 9 Switching number of bus reconfiguration strategy

그림 9에서 ◆, ■는 운용목적, 식 (1)하에서 각각 최선우선 탐색법, 준최적 탐색법에 의해서 얻어진 모션 재구성 전략들의 개폐기 조작회수를 보인다. 전문가 시스템은 차단기 CB₁을 투입해서 사고부하를 주변압기 T₂에 전담시키는 전략을 첫 번째 스위칭 전략으로 제시하였다. 따라서 개폐기 조작회수는 1이다. 그리고 계속되는 부하패턴들에 대한 모션 재구성 전략들 중 약 200개의 전략들에 대한 개폐기 조작회수들은 그림 9에서 보인다. 그림에서 최선우선 탐색법과 준 최적 탐색법의 모션 재구성 전략들에 대한 개폐기 조작회수가 차이를 보이지 않는데, 이것은 부하를 가급적 하나의 주변압기에 전담시키려고 시도하기 때문이다. 그러나 사고 주변압기의 정전선로들이 하나의 주변압기에 전담될 수 없는 경우 2대의 주변압기에 부하분담을 시도해야 한다. 이 문제가 본 연구에서 해결하고자 하는 주요논지인데, 이 경우 변전소 운전의 안정성을 제고하기 위해서 부하분담 균등화를 추구하는 것이 바람직하다. 그림 10은 패턴 생성기에 의해서 생성된 패턴들에 대한 두 접근법의 부하분담 균등화 지표들을 보이는데 ■, ◆는 부하분담 균등화 운용목적 식(2)하에서

각각 최선우선 탐색법과 준최적 탐색법에 의해서 얻어진 목적함수의 값들이다.

표 3 모선 재구성 전략

Table 3 Bus reconfiguration strategy

#	개폐기ID	타입	종류	자동/수동	제어상태
1	LS _{1,1.5}	DS	DS	M	개방
2	LS _{2,1.5}	LS	DS	M	투입
3	LS _{1,1.1}	LS	DS	M	개방
4	LS _{2,1.1}	LS	DS	M	투입
5	LS _{1,1.6}	LS	DS	M	개방
6	LS _{2,1.6}	LS	DS	M	투입
7	LS _{1,1.2}	LS	DS	M	개방
8	LS _{2,1.2}	LS	DS	M	투입
9	BS _{1,1.1}	SS	DS	M	투입
10	BS _{1,2.3}	SS	DS	M	투입
11	BS _{2,1.2}	SS	DS	M	투입

표 3은 준최적 탐색법에 의해서 얻어진 모선 재구성 전략들 중 한 경우를 보인다. 그림에서 DS는 단로기를 표시한다. 제안된 전략에서는 먼저 라인 스위치들을 순차적으로 조작하여 사고 주변압기 T₁의 부하중 선로 {F_{1,4}, F_{1,1}, F_{1,7}, F_{1,2}}는 모선 B_{2,1}에, 반면에 나머지 선로 {F_{1,3}, F_{1,5}, F_{1,6}}는 B_{1,1}에 연결한다. 섹션 스위치 BS_{2,1.2}와 {BS_{1,1.2}, BS_{1,2.3}}를 투입해서 주변압기 T₂와 T₃가 각각 전력을 공급하도록 한다.

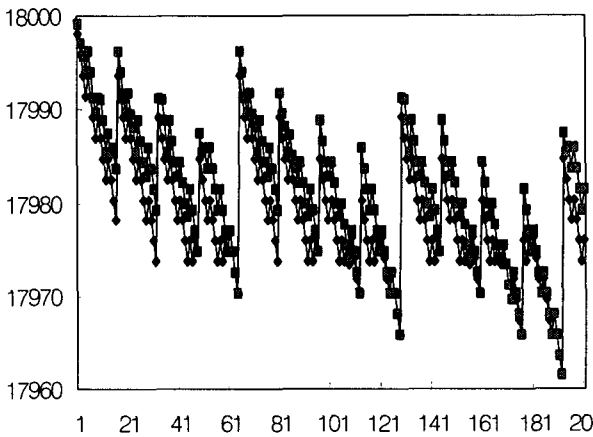


그림 10 모선 재구성 전략들의 부하분담 균등화 지표
Fig. 10 Load balancing index of reconfiguration strategy

그림에서 제안된 준최적 탐색법이 최선우선 탐색법에 비해 일부 동일한 경우를 제외하고는 대부분의 경우에서 보다 개선된 성능을 보임을 알 수 있다. 따라서 부하분담 균등화 운용목적하에서 2대의 변압기에 부하를 분담하는 경우 제안된 준최적 탐색법을 활용하는 것이 부하분담 균등화를 개선할 수 있음은 물론 변전소 운전의 안정화를 기할 수 있음을 확인할 수 있다.

6. 결 론

본 연구에서는 자동화기반 무인화되는 변전소의 주변압기

사고 이벤트 발생시 준최적 탐색법을 탐색전략으로 함으로써 모선 재구성 전략의 성능을 제고할 수 있는 전문가 시스템을 제안하였다. 준최적 탐색법은 일반적으로 활용되는 최선우선 탐색법을 확장한 것으로 탐색공간을 다소 확장함으로써 실시간 운전조건을 만족하면서 해의 정도를 제고할 수 있다는 장점을 가진다. 전문가 시스템의 추론전략은 2단계로 설계되었는데, 첫번째 단계에서는 이벤트 주변압기나 모선으로부터 스위칭 후보를 탐색하는 스위칭 후보를 결정하는 단계이며, 두번째 단계는 이들로부터 휴리스틱 규칙에 기반하여 합리적인 부하절체 전략을 수립하는 실시간 모선 재구성 전략 수립 단계이다. 특히 모선기반의 휴리스틱을 배제하고 일반화된 스위칭 알고리즘을 적용함으로써 프로그램의 확장성과 보수유지의 효율성을 개선하였다. 또한 그래프 이론을 이용하여 일반화된 배전 변전소의 모델링을 얻었으며, 이것을 기반으로 변전소 데이터베이스와 실시간 데이터베이스를 설계하였다. 전문가 시스템은 대표적인 배전 변전소의 다양한 부하조건에 대한 주변압기 사고모의에서 2대의 변압기에 부하를 분담하는 경우, 기존의 최선 우선 탐색법에 비해 개선된 성능을 가지는 정확한 모선 재구성 전략을 실시간으로 제시함으로써 제안된 부하절체 전략의 정확성과 유효성을 확인할 수 있었다. 따라서 제안된 전략은 자동화 기반 무인화된 변전소 운영환경하에서 실시간 이벤트 처리를 위한 효과적인 부하절체 전략으로 적용될 수 있을 것으로 기대된다.

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. Kaneshashi, "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., IHata, 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.

감사의 글

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

저 자 소 개



고 윤 석 (高 銳 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 한국 전기연구소 선임연구원. 1996년 4월~1997년 2월 포스코 경영연구소 연구위원. 1997년 3월~현재 남서울대학교 전자정보통신공학부 부교수.