

# 계층 논리 기반 전문가 시스템의 전력계통 고장진단에의 적용

論 文  
48A-7-7

## Application of Hierarchical Logic Based Expert System to the Power System Fault Diagnosis

朴永文\*·金光源\*\*·李光浩\*\*\*·鄭在吉§  
(Young Moon Park · Gwang-Won Kim · Kwang-Ho Lee · Jai-Kil Chung)

**Abstract** - While Logic Based Expert System (LBES) has a merit of rapid and complete inference, it also has a defect of huge knowledge base. Hierarchical LBES (HLBES) replaces the assertion time inference of LBES with the multi-level logic minimization procedure, and it guarantees smaller knowledge base comparing with LBES. This paper has two contributions. The one is proposing so-called fact-minimization procedure which reduces not only the number of facts or measured events but also the size of knowledge base dramatically. The other contribution is application of HLBES and the proposed fact-minimization to the fault diagnosis of power system. The application is successfully performed in the example with the transmission system which takes 72 goals and 352 facts.

**Key Words** : Hierarchical Logic Based Expert System, Fact-Minimization, Power System, Fault Diagnosis

### 1. 서 론

1970년대 비약적인 발전을 보인 전문가 시스템은 1980년대에 전력계통에 응용되기 시작하였으며 경보처리(alarm processing), 고장진단 및 복구, 전압/무효전력 제어 등이 그 대표적인 응용분야이다. 그 중에서 본 논문의 대상인 고장진단 전문가 시스템은 대부분 규칙 기반 전문가 시스템(rule based expert system)을 이론적 기반으로 한다[1-3]. 그러나, 규칙 기반 전문가 시스템은 지식 표현의 제약 및 추론의 비완전성 등의 문제를 안고 있으며 이러한 단점은 지식의 표현 및 추론에 논리(logic)를 사용함으로써 극복할 수 있다[4]. 그러나, 논리에 기반을 둔 추론에는 많은 시간이 소요되는 단점에 있다. 이에 최근 발표된 논리 기반 전문가 시스템(logic based expert system: LBES)은 논리를 기반으로 하면서도 선언단계추론(assertion time inference)을 통하여 실시간 추론을 가능하게 하였다[5]. LBES는 발전소의 버너 제어[6], 전력계통 고장진단[7] 등에 적용된 바 있으나, 선언단계추론으로 인한 지식베이스 규모의 거대화는 LBES의 큰 단점으로 부각되었다. 이에 계층 논리 기반 전문가 시스템(Hierarchical LBES: HLBES)이 제안된 바 있으며, HLBES는 지식베이스 구조를 일반화함으로써 LBES에 비하여 지식베이스의 크기를 약 30% 가량 줄일 수 있었다[8].

본 논문의 목적은 두 가지로 요약할 수 있다. 첫째는 원

시 규칙을 분석해서 추론에 영향을 미치지 않는 관측사건, 즉 사실(fact)을 판별하고 이와 관련된 규칙을 지식베이스에서 배제함으로써 불필요한 사실의 관측에 소요되는 노력을 줄이고 전문가 시스템의 지식베이스 규모를 축소하는 것이다. 고장진단 분야에서 불필요한 사건의 검출은 경보처리(alarm processing)의 한 영역이지만 본 논문에서는 보다 일반적인 용어로 사실 최소화(fact-minimization)라고 명명하기로 하고 그 자세한 내용은 3장에 수록하였다. 둘째는, HLBES에 사실 최소화 과정을 추가하여 전력계통 고장진단에 적용함으로써 그 실용 가능성을 보이는 것으로 4장에서 72개의 목적사건과 352개의 사실로 구성된 송전계통을 대상으로 사례연구를 수행하였다. 본 논문의 2장은 계층 논리 기반 전문가 시스템을 간략히 설명하고 있으나 지면의 제약으로 자세한 과정 및 의미는 이전 논문을 참조하기 바란다[7,8].

### 2. 계층 논리 기반 전문가 시스템

LBES의 선언단계추론은 규칙을 논리식으로 변경하고 논리식의 모든 프라임 임플리칸트(Prime Implicant: PI)를 인식하는 과정이다. 다음 논리식은 사실 A, B, C, 목적사건 D가 사용된 규칙의 예이다.

$$A \rightarrow B, B \rightarrow D, C \rightarrow D' \quad (1)$$

(1)에서 규칙  $A \rightarrow B$ 는 사건 A가 '참' 일 때, 사건 B가 반드시 '참' 이어야 함을 의미하므로 곱항  $AB'$ 는 절대로 발생할 수 없다. 따라서,  $AB' = 0$  이다. 이러한 관계는 모든 규칙에 적용할 수 있으므로 (1)의 규칙들은 다음의 논리식 F와 동치이다.

$$F = AB' + BD' + CD = 0 \quad (2)$$

\*正會員 : 서울大 電氣工學部 名譽教授 · 工博  
\*\*正會員 : 蔚山大 電氣電子自動化工學部 助教授 · 工博  
\*\*\*正會員 : 檀國大 電氣工學部 助教授 · 工博  
§正會員 : 中央大 電氣工學部 教授 · 工博  
接受日字 : 1999年 2月 3日  
最終完了 : 1999年 5月 24日

논리식 F의 각 PI의 진리값은 거짓이며, 논리식 (3)은 논리식 F의 모든 PI들의 논리합이다.

$$AB' + BD' + CD + AD' + AC + BC = 0 \quad (3)$$

규칙의 논리식의 PI를 '규칙의 PI' 라고 한다. (3)에는 규칙의 논리식 (2)의 세 곱항 외에도 새로운 곱항  $AD'=0, AC=0, BC=0$  이 있다. 새로운 곱항은 각각 (1)의 규칙에서 연쇄적인 추론으로 얻을 수 있는 규칙인  $A \rightarrow D, A \rightarrow C', B \rightarrow C'$  또는 이들의 대우명제를 의미한다. 이상으로부터, 규칙의 PI는 그 자체가 하나의 규칙이며, 규칙의 PI 집합 내에는 원래의 규칙으로부터 연쇄 추론을 통해야만 얻을 수 있는 규칙이 포함되어 있다. 이상과 같은 과정을 사용하는 LBES는 추론 연쇄 없는 신속한 추론이 가능하지만 추론에 관계하는 PI를 그대로 저장하기 때문에 추론표의 규모가 문제화된다. 사건의 수가  $n$ 일 때 PI의 최대수는  $3^n/n$ 임이 증명되어 있으므로 PI의 수는 일반적으로 사건의 수에 지수적으로 비례한다. 따라서, 사건의 수가 많아질수록 기하급수적으로 불어나는 PI의 저장 문제가 심화된다.

이에 HLBES에서는 PI를 분할하여 저장함으로써 PI의 저장에 사용되는 기억장소를 줄일 수 있었다. 여기서, 기억장소라 함은 논리회로로 구현 시 필요한 논리 게이트 또는 컴퓨터 프로그램으로 구현 시 필요한 컴퓨터 메모리를 일컫으며 다음과 같은 LBES 지식베이스 규모의 정량적 평가기준을 제공한다.

- 평가기준 1) 논리 게이트 수와 평균입력 수
- 평가기준 2) 추론표에 사용되는 사건의 인용 수

PI 분할의 구체적 의미는 PI중에서 공통되는 부분을 추출하여 추론표를 재구성하는 것으로, 추론표의 저장 단위를 기존의 PI보다 작게 함으로써 여러 PI에 공통으로 존재하는 논리식을 독립 모듈화 할 수 있다. 이어서 독립된 모듈의 출력을 새로운 준목적사건(subgoal)으로 정의하고 준목적사건을 사용하여 PI를 재 정의하면 기존의 중복 표현으로 인한 기억장소의 낭비를 막을 수 있다. 간단히 요약하면, LBES는 2단계 논리 간소화 절차를 전문가 시스템의 설계에 적용한 것임에 반해서 HLBES는 전문가 시스템의 구성에 다단계 논리 간소화(multi-level logic minimization)를 이용하였다. 본 논문에서는 다단계 논리 간소화 패키지로써 [8]에서와 마찬가지로 MIS (Multi-level logic Interactive synthesis System)[9]를 사용하였다.

### 3. 사실 최소화 (fact-minimization)

앞서 밝힌 바와 같이 사실 최소화는 관측하여야 하는 사실의 감소라는 효과 외에도 계층 논리 기반 전문가 시스템에서는 그림 1과 같은 순서로 지식베이스를 구성함으로써 그 크기를 감소시킬 수 있다.

논리 기반 전문가 시스템의 규칙 베이스는 PI부터 작성되므로 PI에서 사용된 모든 사실을 획득하여야 완전한 추론이 가능하다. 즉, PI에서 사용되는 모든 사실이 추론에 필요하다. 이에, 본 논문에서는 "추론에 영향을 미치지 않는 한도 내에서 추론에 관계하는 PI의 수를 최소한으로 줄임으로써 획득하여야 하는 사실의 수를 줄인다." 라는 개념에서 사실 최소화에 접근하였다.

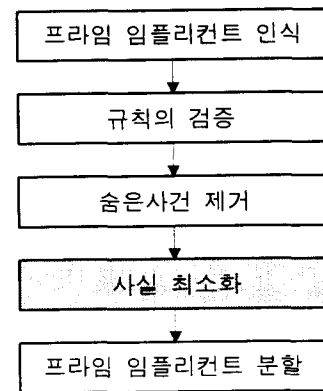


그림 1 계층 논리 기반 전문가 시스템 설계 절차  
Fig. 1 The design procedure of the HLBES

다음은 규칙의 PI가 지니는 의미 중에서 본 논문의 사실 최소화의 이해에 필요한 사항이다.

- 모든 PI는 비발생항(never happen term)이다.
- 사실만으로 구성된 PI의 최소항(min-term)은 무관조건(redundancy)이다.

비발생항이란 발생이 불가능한 상황을 묘사하는 곱항이며 비발생항의 모든 최소항은 비발생 최소항이다. 모든 PI의 진리값은 거짓이므로 각 PI가 묘사하는 상황은 발생이 불가능하며, 모든 PI는 비발생항이다. 한편, 논리회로 설계에서 사용되는 용어인 무관조건이란 발생할 수 없는 최소항이며 무관조건은 절대로 발생할 수 없으므로 그 진리값을 임의로 정할 수 있다. 즉, 논리회로의 설계에서 무관조건은 진리값은 '참' 과 '거짓' 중에서 어느 것을 취하더라도 무방하다. 논리 기반 전문가 시스템에서의 비발생 최소화와 논리회로 설계에서의 무관조건은 다음과 같은 공통점과 차이점이 있다.

- 공통점) 두 용어가 모두 절대로 발생하지 않는 최소항을 의미한다.
- 차이점) 비발생 최소항은 사실과 목적사건을 모두 포함할 수 있으나 무관조건은 사실만으로 구성된다.

두 용어의 위와 같은 차이점으로 인하여 비발생 최소항이 곧 무관조건을 의미하지는 않는다. 예를 들어서,  $A \rightarrow B, B \rightarrow G$ 라는 규칙으로부터 식별되는 PI는  $AB', AG', BG'$  이며 모두가 비발생항이므로  $AB'=0, AG'=0, BG'=0$ 이다. 이 때, A, B가 사실이고 G가 목적사건이라고 하면 비발생항  $AB'$ 는 절대로 관측할 수 없는 사실간의 관계이므로 그 진리값을 임의로 정할 수 있다. 반면에,  $AG'$ 에서 G는 목적사건이므로, 사실 A의 상태에서부터  $AG'=0$ 이 되도록 G를 결정할 수 있다. 즉,  $A=1$ 이면  $G=1$ 이어야만 한다. 이와 같이 목적사건을 포함하는 비발생항은 추론에 사용되므로 그 진리값이 언제나 거짓이어야만 한다. 결론적으로, 사실만으로 구성된 비발생 최소항만이 무관조건이며, 그 진리값을 임의로 정할 수 있다.

본 논문에서는 이와 같은 무관조건은 진리값을 '참' 또는 '거짓'으로 적절히 할당함으로써 추론에 관계하는 PI의 수를 줄이고자 한다.

다음은 사실 최소화 사용되는 용어의 정의이다.

정의1) 최대 추리 PI 집합 (PI1) : 모든 무관조건을 거짓

으로 한 경우의 PI 집합

정의2) 최소 추리 PI 집합 (PI0) : 모든 무관조건을 참으로 한 경우의 PI 집합

정의3) 최적 추리 PI 집합 (PI1') : 사실 최소화 후의 PI 집합

위에서 숨은사건 제거 이후의 PI 집합이 최대 추리 PI 집합이며, LBES에서는 최대 추리 PI 집합 중에서 목적사건을 포함하는 원소를 사용하여 추론표를 작성한다.

한편, 최소 추리 PI 집합의 원소는 다음 식의 PI이다.

(목적사건을 포함하는 PII 원소의 논리합) •  
(사실만으로 구성된 PII 원소의 논리합)' (4)

사실만으로 구성된 PII 원소의 논리합은 모든 무관조건에 대한 논리합이므로 이의 부정은 무관조건이 아닌 최소항의 논리합이며 목적사건을 포함하는 PII 원소의 논리합은 추론표 작성에 사용되는 최소항의 논리합이다. (4)의 두 항의 논리곱의 결과는 두 항에 공통으로 속하는 최소항이므로 무관조건이 아니면서 추론표 작성에 사용되는 최소항이다. 따라서, (4)의 PI는 최소 추리 PI 집합 PI0의 원소이다.

끝으로, 최적 추리 PI 집합 PII'은 사실 최소화의 결과이므로 그 정확한 형태는 알 수 없으나 PII'의 원소는 일부의 무관조건만을 거짓으로 한 경우의 PI이며 목적사건을 포함하고 있어야 한다. 본 논문에서는 이러한 PII'를 다음의 가정 하에서 PII과 PI0로부터 구하고자 하며 가정에 대한 증명은 참고문헌 [10]에 수록되어 있다.

가정1) PI0의 모든 원소에 대하여, 해당 원소를 포함하는 PII의 원소가 하나 이상 존재한다.

가정2) PII'이 될 수 있는 후보는 PI0의 모든 원소를 그 원소를 포함하는 PII의 원소로 교체한 결과이며 그 외의 후보는 없다.

PI0를 구한 후의 정보처리 절차는 크게 다음의 2단계로 구성된다.

단계1: (PII' 후보생성) PI0의 각 원소를 PII의 원소로 교체한 결과를 모두 생성

단계2: (PII' 결정) PII 후보 중에서 사실의 수가 가장 적은 후보를 결정

다음의 세부 사항은 이해의 편의를 위하여 간단한 예와 함께 설명하고자 한다. 예에서 사실은 A, B, C, D, E, F, H이고 목적사건은 G1, G2, G3이고 숨은사건은 I이다. 사용된 규칙은 다음과 같다.

- 규칙 1:  $A + B + C \rightarrow G1$
- 규칙 2:  $B E + D E + H + F \rightarrow G2$
- 규칙 3:  $B' D' + C + F \rightarrow G3$
- 규칙 4:  $A \rightarrow B + C$
- 규칙 5:  $B \rightarrow A + C$
- 규칙 6:  $D \rightarrow I$
- 규칙 7:  $I \rightarrow B$
- 규칙 8:  $H \rightarrow F$
- 규칙 9:  $F \rightarrow C$

위의 규칙의 PI를 구하여 PII을 구성할 수 있으며, PII은 목적사건의 포함여부에 따라 다음과 같이 PIIG, PIIF로 구분하여 기술하였다.

$$PIIG = \{ G1'A, G1'B, G1'C, G1'D, G1'F, G1'H, G2'A C'E, G2'B E, G2'D E, G2'H, G2'F, G3'A', G3'B', G3'C, G3'F, G3'H, G2'G3'E \}$$

$$PIIF = \{ A B'C', A'B C', A'C'D, B'D, C'F, C'H, F'H \}$$

PIIG와 PIIF를 (4)에 적용하여 구성한 PI0는 다음과 같다.

$$PI0 = \{ G1'A B F'H^{(1)}, G1'B C F^{(2)}, G1'B C H^{(3)}, G1'C D'F^{(4)}, G1'C D'H^{(5)}, G2'A B E F'H^{(6)}, G2'B C E H^{(7)}, G2'B C F^{(8)}, G2'CD'F^{(9)}, G3'B C F^{(10)}, G3'B C H^{(11)}, G3'C D'F^{(12)}, G3'C D'H^{(13)}, G3'A'B'D'F'H^{(14)} \}$$

단계 1은 다음 5개의 세부단계로 이루어지며 모든 세부단계는 PI 표를 사용한다.

< 세부단계 1-1: PI 표 작성 >

PI 표의 행은 PIIG의 원소로 구성되며, PI 표의 열은 PI0의 원소로 구성된다. PI 표에서 tag는 tag가 있는 열의 PI0 원소가 해당 행의 PII원소에 포함됨을 의미한다. 표 1은 예의 PI 표이다.

표 1 예에서의 PI 표  
Table 1 PI table in the example

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
G1'A	✓													
G1'B	✓	✓	✓											
G1'C		✓	✓	✓	✓									
G1'D														
G1'F		✓		✓										
G1'H														
G2'AC'E														
G2'BE						✓	✓							
G2'DE														
G2'H														
G2'F									✓	✓				
G3'A'														✓
G3'B'														✓
G3'C										✓	✓	✓	✓	
G3'F										✓		✓		
G3'H														
G2'G3'E														

PI 표에서 각 열의 tag를 하나 이상 반드시 포함하는 PIIG의 부분집합이 PII'의 후보이다.

< 세부단계 1-2: 열 삭제 >

PI 표에서 열 A의 tag가 열 B의 tag에 모두 포함되면 열 B를 PI 표에서 삭제한다. 예를 들어, 표 1에서 4열은 2열에 포함되므로 2열을 삭제한다. 이는 4열의 tag를 포함하는 PIIG의 원소는 2열의 tag도 반드시 포함하므로 2열의 tag를

포함하는 또 다른 PIIG의 원소를 선택할 필요가 없기 때문이다.

< 세부단계 1-3: 행 삭제 >

PI 표에서 tag가 없는 행은 표에서 삭제한다. 표 1에서 G1'D 행을 삭제한다. 이는 G1'D가 PI0의 어떤 원소도 포함하지 않으므로 G1'D를 선택할 필요가 없기 때문이다.

표 2 열삭제, 행삭제 후의 PI 표  
Table 2 PI table after row and column elimination

	1	5	6	8	11	14
G1'A	✓					
G1'B	✓					
G1'C		✓				
G2'BE			✓			
G2'F				✓		
G3'A'						✓
G3'B'						✓
G3'C					✓	

< 세부단계 1-4: 필수 PI의 선택 >

tag가 하나만 있는 열에서 tag된 행은 반드시 선택되어야 한다 (필수 PI). 표 2에서 칠한 행의 PIIG 원소는 필수 PI로 선택됨과 함께 표에서 삭제한다. 이는 필수 PI를 제외하면 해당 열의 PI0 원소를 대체할 PIIG 원소가 없기 때문이다.

< 세부단계 1-5: PII'의 후보 생성 >

삭제되지 않은 열과 삭제되지 않은 행을 대상으로, 각 열의 tag를 하나 이상 포함하는 행의 집합을 결정한다. 본 논문에서는 이의 결정에 Petrick's method[11]를 사용하였다. PII'의 후보는 Petrick's method의 결과인 행 집합에 필수 PI를 추가한 집합이다. Petrick's method를 표 2에서 삭제되지 않은 부분(칠하지 않은 부분)에 적용하여 PII 후보를 생성하는 과정은 다음과 같다.

- 1: 삭제되지 않은 행을 기호화:  
 $P1 = G3'A', P2 = G3'B', P3 = G1'A, P4 = G1'B$
- 2: tag의 논리적 관계를 식으로 표시:  $(P1+P2)(P3+P4)$
- 3: tag의 논리적 관계식의 PI 구합:  $P1P3, P2P4, P2P3, P2P4$
- 4: PII' 후보 생성:  
 후보1: { G1'C, G2'BE, G2'F, G3'C, G3'A', G1'A }  
 후보2: { G1'C, G2'BE, G2'F, G3'C, G3'A', G1'B }  
 후보3: { G1'C, G2'BE, G2'F, G3'C, G3'B', G1'A }  
 후보4: { G1'C, G2'BE, G2'F, G3'C, G3'B', G1'B }

다음으로 단계 2는 다음 2개의 간단한 세부단계로 이루어진다.

< 세부단계 2-1: 각 후보에서 사용하는 사실집합 생성 >  
 단계 1에서 결정한 각 PII' 후보를 대상으로 각 후보 집

합에서 사용된 사실의 종류를 파악하고 이로부터 각 후보에서 사용된 사실의 집합을 구성한다.

- 후보1: { A, B, C, E, F }
- 후보2: { A, B, C, E, F }
- 후보3: { A, B, C, E, F }
- 후보4: { B, C, E, F }

< 세부단계 2-2: PII' 결정 >

세부단계 2-1에서 생성한 집합의 원소 수가 가장 적은 후보가 PII'으로 결정된다. 각 사실의 획득 비용이 동일하다는 가정 하에서 각 집합의 원소의 수를 PI의 결정 기준으로 하였다. 본 예에서는 후보 4가 선택되며 사실 최소화 결과, 추론에 사용되는 지식베이스는 다음과 같다.

$$B + C \rightarrow G1, \quad B E + F \rightarrow G2, \quad B' + C \rightarrow G3$$

사실 최소화 결과로부터 사실 A, D, H는 관측할 필요가 없으며, 사실 B, C, E, F의 관측만으로도 모든 추론이 가능함을 알 수 있다.

4. 사례 연구

4.1 문제의 정의

본 논문에서 제시한 사실 최소화를 전력계통의 고장진단을 위한 HLBES 설계에 적용하였다. 사례연구의 대상 계통은 그림 2와 같은 송전계통으로, 32개의 모선과 40개의 선로로 구성되어 있으며 80개의 차단기가 설치되어 있다. 본 사례 연구에서는 모선 후보호 계전기, 선로 후보호 계전기, 후비보호용 방향 거리 계전기 1단, 2단 (zone1, zone2)만을 고려하였다. 실 계통의 고장진단에 적용 가능한 전문가 시스

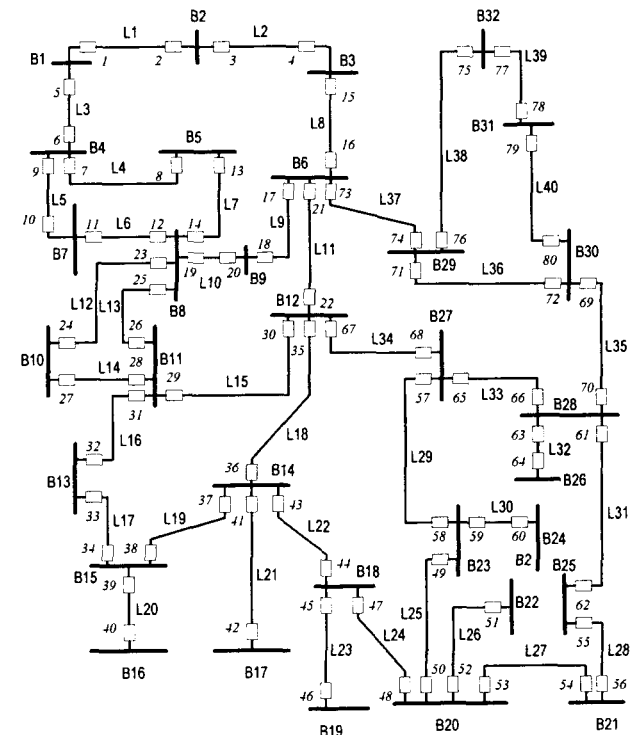


그림 2 사례연구의 송전 계통도  
 Fig. 2 Transmission system in the case study

템이라면 상기한 계전기 외에도 실제로 부착되어 있는 계전기들을 모두 고려하여야 하지만 본 사례연구의 목적은 본 논문에서 제시한 기법의 효용성 검증에 있으므로 위와 같이 문제를 간략화 하였다.

본 사례연구에서 목적사건은 각 모선과 선로의 고장이며 사실은 각 계전기와 차단기의 경보이다. 각 목적사건과 사실은 다음의 기호로 표시한다.

목적사건) 모선(B1~B32), 선로(L1~L40)

사 실) 차단기(CB1~CB80), 모선 주보호계전기(R1B~R32B), 선로 주보호계전기(R1p~R80p), 방향 거리계전기 1단(R1s~R80s), 방향 거리계전기 2단(R1t~R80t)

위에서, 모선, 선로 및 차단기 번호는 그림 2의 번호와 동일하며 모선 주보호 계전기 번호는 보호 대상 모선 번호를, 선로 주보호 계전기와 거리 계전기 번호는 트립(trip)시키는 차단기 번호를 따른다. 이와 같이 사례연구 대상 계통은 72개의 목적사건과 352개의 사실로 구성되는데, 이 모든 사건을 사용하여 규칙을 표현하는 것은 매우 비효율적이다. 따라서, 이전의 논문에서 밝힌 바와 같이[7], 고장 위치에 관계없이 사용할 수 있는 추론모듈을 만들고 멀티플렉싱을 이용하여 전체 고장 진단을 하고자 한다. 본 사례연구에서의 추론모듈은 그림 3과 같다.

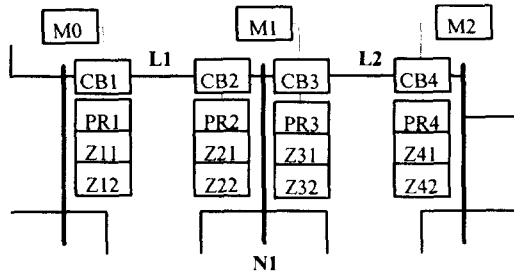


그림 3 사례연구의 추론모듈

Fig. 3 Prototype module in the case study

추론모듈에서 목적사건은 하나의 모선과 그 모선에 연결된 2개의 선로이며, 사실은 선로에 부착된 차단기와 이를 트립할 수 있는 계전기이다. 즉, 목적사건은 3개, 사실은 19개이다. 추론모듈 내에서 사용된 사건의 이름은 다음과 같다.

N1 : 모선,

Li : i번째 선로

Mi : i번째 모선 주보호 계전기,

CBi : i번째 차단기

PRi : i번 차단기를 트립시키는 선로 주보호 계전기

Z1i : i번 차단기를 트립시키는 방향 거리 계전기 1단

Z2i : i번 차단기를 트립시키는 방향 거리 계전기 2단

그림 2에는 그림 3의 추론모듈을 사용하는 85개의 멀티플렉싱 그룹이 있으며 각 멀티플렉싱 그룹의 이름은 추론모듈의 목적사건 L1-N1-L2에 해당하는 그림 2의 목적사건 이름으로 한다. 예를 들면, 그림 2에는 L39-B31-L40이라는 멀티플렉싱 그룹이 있다. 추론모듈의 규칙에는 그림 3에 표시된 사건 명이 사용되며 본 사례연구에서는 다음과 같은 38개의

규칙을 사용하였다.

규칙1:  $L1' L2' N1' \rightarrow M1' P1' P2' P3' P4'$

규칙2:  $L1 L2' N1' \rightarrow M1' P3' P4'$

규칙3:  $L1 L2' N1' \rightarrow P2 Z32' + P2 Z42' + Z22 Z32' + Z22 Z42' + P2' Z22' Z32' Z42' + P2' Z22' Z32 Z42'$

규칙4:  $L1' L2 N1' \rightarrow M1' P1' P2'$

규칙5:  $L1' L2 N1' \rightarrow P3 Z12' + P3 Z22' + Z32 Z12' + Z32 Z22' + P3' Z32' Z12' Z22' + P3' Z32' Z12 Z22'$

규칙6:  $L1' L2' N1 \rightarrow P1' P2' P3' P4'$

규칙7:  $L1' L2' N1 \rightarrow M1 Z12' Z42' + M1' Z12 Z22' Z32' Z42' + M1' Z12 Z22' Z32 Z42' + M1' Z12' Z22 Z32' Z42' + M1' Z12' Z22 Z32 Z42'$

규칙8:  $L1 L2 N1' \rightarrow M1'$

규칙9:  $L1 L2 N1' \rightarrow P2 P3 + P2 Z32 + Z22 P3 + Z22 Z32 + P2 P3' Z32' + Z22 P3' Z32' + P3 P2' Z22' + Z32 P2' Z22'$

규칙10:  $L1 L2' N1 \rightarrow P3' P4'$

규칙11:  $L1 L2' N1 \rightarrow M1 P2' Z22' Z42' + P2 M1 Z42' + P2 M1' Z32' Z42 + P2 M1' Z32 Z42' + Z22 M1 Z42' + Z22 M1' Z32' Z42 + Z22 M1' Z32 Z42'$

규칙12:  $L1' L2 N1 \rightarrow P1' P2'$

규칙13:  $L1' L2 N1 \rightarrow M1 P3' Z12' Z32' + P3 M1 Z12' + P3 M1' Z12' Z22 + P3 M1' Z12 Z22' + Z32 M1 Z12' + Z32 M1' Z12' Z22 + Z32 M1' Z12 Z22'$

규칙14:  $L1 L2 N1 \rightarrow M1 + M1' P2 P3 + M1' P2 Z32 + M1' Z22 P3 + M1' Z22 Z32$

규칙15:  $PR1 + Z11 \rightarrow P1$

규칙16:  $PR2 + Z21 \rightarrow P2$

규칙17:  $PR3 + Z31 \rightarrow P3$

규칙18:  $PR4 + Z41 \rightarrow P4$

규칙19:  $P1 \rightarrow PR1 + Z11$

규칙20:  $P2 \rightarrow PR2 + Z21$

규칙21:  $P3 \rightarrow PR3 + Z31$

규칙22:  $P4 \rightarrow PR4 + Z41$

규칙23:  $PR1 \rightarrow Z11'$

규칙24:  $PR2 \rightarrow Z21'$

규칙25:  $PR3 \rightarrow Z31'$

규칙26:  $PR4 \rightarrow Z41'$

규칙27:  $P1 \rightarrow Z12'$

규칙28:  $P2 \rightarrow Z22'$

규칙29:  $P3 \rightarrow Z32'$

규칙30:  $P4 \rightarrow Z42'$

규칙31:  $M0 + P1 + Z12 \rightarrow CB1$

규칙32:  $M1 + P2 + Z22 \rightarrow CB2$

규칙33:  $M1 + P3 + Z32 \rightarrow CB3$

규칙34:  $M2 + P4 + Z42 \rightarrow CB4$

규칙35:  $CB1 \rightarrow M0 + P1 + Z12$

규칙36:  $CB2 \rightarrow M1 + P2 + Z22$

규칙37:  $CB3 \rightarrow M1 + P3 + Z32$

규칙38:  $CB4 \rightarrow M2 + P4 + Z42$

규칙 내의 P1, P2, P3, P4는 본 사례연구에서 규칙의 기술을 용이하게 하기 위하여 도입된 숨은 사건으로 그림 2에서 정의되지 않은 사건이다. 위의 규칙은 크게 다음의 4부분으로 구분된다.

규칙 1 ~ 규칙 14: 고장과 계전기간의 관계

규칙 15 ~ 규칙 22: 숨은사건의 정의

규칙 23 ~ 규칙 30: 계전기간에 동시에 발생할 수 없는 상황 정의

규칙 31 ~ 규칙 38: 계전기와 차단기와의 관계

본 연구에서는 규칙 1~규칙 14의 기술에서 규칙의 전건부를 발생 가능한 고장의 조합으로 하고, 규칙의 결론부를 해당 전건부의 고장이 발생하였을 때 일어날 수 있는 계전기들의 모든 가능한 상태로 하였다. 실제로 고장 발생이 계전기 작동을 유발하므로 이와 같은 형태의 규칙이 고장과 계전기의 실제 관계를 표현하는데 자연스럽게 지식의 누락을 막을 수 있다. 아울러, 규칙 1~규칙 14는 추론모듈의 3개의 고장이 전혀 발생하지 않은 경우부터 3개의 고장이 모두 발생한 경우까지 모든 가능한 경우를 포함하므로 추론모듈의 고장과 계전기와와의 관계는 위의 규칙에 모두 기술되었다고 할 수 있다.

4.2 사례연구 결과

본 사례연구에서는 다음의 3가지 경우에 대해서 추론표를 작성하여 추론표의 규모와 추론표에서 사용된 사실의 종류를 비교하였다.

- 경우1) 최대 추리 PI 집합으로 추론표를 작성한 경우 (LBES)
- 경우2) 최적 추리 PI 집합으로 추론표를 작성한 경우 (LBES + 사실 최소화)
- 경우3) 최적 추리 PI를 분할하여 추론표를 작성한 경우 (HLBES + 사실 최소화)

본 사례연구에서 사용된 38개 규칙의 PI는 모두 877개이며 이 중에서 숨은사건을 포함하는 PI를 제외하면 모두 271개의 원소로 구성된 최대 추리 PI 집합을 얻는다. 최대 추리 PI 집합에서 목적사건을 포함하는 원소는 173개이며 그 상세한 내용은 지면 관계상 생략하였다. 한편, 이를 논리회로로 구현하려면 6개의 OR게이트와 173개의 AND게이트가 필요하며 게이트 당 평균 입력은 5.55개이다. 또한, 위의 결과를 컴퓨터 메모리에 저장하려면 839개의 심볼(symbol)을 저장하기 위한 메모리가 필요하다.

경우 2의 추론표 작성을 위하여 최대 추리 PI 집합을 대상으로 사실 최소화를 적용하였다. 최대 추리 PI 집합은 목적사건을 포함하는 173개의 원소와, 사실만을 포함하는 98개의 원소가 있다. 이들 원소를 분류하여 (4) 형태의 논리식을 만들고 이의 PI를 인식하여 원소의 수가 1074개인 최소 추리 PI 집합을 얻었다. 최대 추리 PI 집합에서 목적사건을 포함하는 173개의 원소와 최소 추리 PI 집합의 1074개의 원소로 173×1074의 PI 표를 작성하고 열삭제, 행삭제를 행한 후, 반드시 최적 추리 PI의 원소여야 하는 필수 PI를 선별하였다. 다음은 선별된 11개의 필수 PI이다.

$$\begin{aligned}
 L1 &\leftarrow PR1 + Z11 + PR2 + Z21 + M1 Z12 \\
 L2 &\leftarrow PR3 + Z31 + PR4 + Z41 + M1 Z42 \\
 N1 &\leftarrow M1
 \end{aligned}$$

필수 PI에는 11개의 사실 M1, PR1, PR2, PR3, PR4, Z11, Z12, Z21, Z31, Z41, Z42 이 사용되었다. 필수 PI 선별 후에 PI 표에 남은 최대 추리 PI 집합의 원소는 32개이고, 최소 추리 PI 집합의 원소는 12개이다. 이들을 대상으로 PI 표의 tag로부터 생성한 최적 추리 PI 집합의 후보는 모두 36864개이며, 각 후보에서 사용된 사실의 수를 조사하여 최

적 추리 PI 집합을 결정하였다. 최적 추리 PI 집합은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 L1 &\leftarrow PR1 + Z11 + PR2 + Z21 + M1 Z12 + PR3 Z12 Z22 \\
 &\quad + Z12 Z22 Z31 + PR4 Z12 Z22 + Z12 Z22 Z41 \\
 L1' &\leftarrow M1' PR2' PR3' Z21' Z22' Z31' Z32' Z42' \\
 L2 &\leftarrow PR3 + Z31 + PR4 + Z41 + M1 Z42 + PR1 Z32 Z42 \\
 &\quad + Z11 Z32 Z42 + PR2 Z32 Z42 + Z21 Z32 Z42 \\
 L2' &\leftarrow M1' PR2' PR3' Z12' Z21' Z22' Z31' Z32' \\
 N1 &\leftarrow M1 \\
 N1' &\leftarrow M1' PR2' Z12' Z21' Z22' + M1' PR3' Z31' Z32' Z42'
 \end{aligned}$$

최적 추리 PI 집합은 23개의 원소로 구성되어 있으며 이에 사용된 사실은 M1, PR1, PR2, PR3, PR4, Z11, Z12, Z21, Z22, Z31, Z32, Z41, Z42 의 13개이다. 사실 최소화 후의 추론모듈에서 고장 L1, L2, N1을 추론하는데 필요한 사실을 그림 4에 표시하였다.

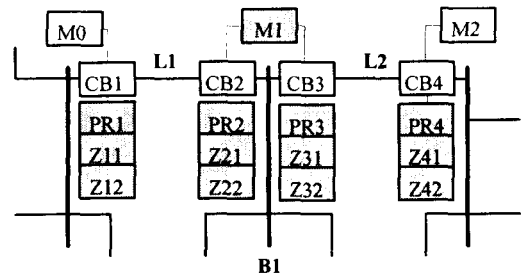


그림 4 사례연구에서 사실 최소화 결과도  
Fig. 4 Result of the fact-minimization in the case study

한편, 그림 4의 사실은 추론모듈 내에서 정의된 것이며 실제 전력계통의 사실과 그림 4의 사실간의 관계는 멀티플렉싱 그룹에 정의된다. 따라서, 특정 멀티플렉싱 그룹에서는 M0나 M2였던 실제 전력계통의 사실이 다른 멀티플렉싱 그룹에서는 M1이 될 수 있으므로 위의 결과가 모선 보호 계전기의 상태를 관측하지 않아도 된다는 것을 의미하지는 않는다. 그러나, 차단기의 경우에는 오동작이나 오부동작이 없을 시에 고장진단에 사용하지 않더라도 추론 결과에 전혀 영향을 미치지 않음을 사실 최소화 결과가 보여 주고 있다. 이는 일반적으로 널리 알려진 바이며 실제로 고장진단은 계전기의 정보만으로 가능하다. 이로써 사실 최소화 결과는 타당하다고 할 수 있다.

한편, 경우 1, 2의 자세한 정량적 비교는 표 3에 수록하였다. 표에서 알 수 있듯이, 사실 최소화를 함으로써 추론모듈에서 추론에 필요한 사실의 수를 19개에서 13개로 줄일 수 있었고, 뿐만 아니라 추론표의 작성에 필요한 기억장소를 현격히 감소시킬 수 있었다. 사실 최소화를 함으로써 논리회로의 게이트는 약 90.5% 절감하였고 게이트 당 평균 입력은 약 21.6% 절감하였다. 또한 추론표 저장에 필요한 컴퓨터 메모리는 88.6% 를 절감하였다.

끝으로 경우 3의 사례로서 MIS를 사용하여 최적 추리 PI를 분할하였고, 그 결과는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 \{L1\} &= M1 Z12 + Z12 Z22 \{6\} + \{7\} \\
 \{L1N\} &= Z42' \{8\} \{9\}
 \end{aligned}$$

- {L2} = M1 Z42 + Z32 Z42 [7] + [6]
- {L2N} = Z12' [8] [9]
- {N1N} = M1' Z42' [9] + Z12' [8]
- {N1} = M1
- [6] = PR3 + PR4 + Z31 + Z41
- [7] = PR1 + PR2 + Z11 + Z21
- [8] = M1' PR2' Z21' Z22'
- [9] = PR3' Z31' Z32'

위에서 중괄호({})로 표시된 항목은 목적사건이며, 대괄호([])로 표시된 항목은 MIS에서 자체적으로 생성한 준목적사건이다. 한편, 우변의 논리식은 좌변의 사건이 '참'임을 증명하는데 필요한 모든 조건이다. 그리고, L1N, L2N, N1N은 각각 L1', L2', N1'를 의미한다.

표 3에서 알 수 있듯이 경우 3은 경우 1에 비하여 논리회로의 게이트는 약 91.6% 절감하였으며 게이트 당 평균 입력은 약 47.2% 절감하였다. 또한 추론표 저장에 필요한 컴퓨터 메모리는 94.5% 절감하였다.

표 3 사례연구에서 경우 1, 2, 3의 비교

Table 3 Comparisons of case 1, 2, and 3 in the case study

	경우 1	경우 2	경우 3
논리회로 형태	1 단계	1 단계	2 단계
OR 게이트 수	6 개	3 개	10 개
AND 게이트 수	173 개	14 개	5 개
논리회로의 전체 게이트 수	179 개	17 개	15 개
게이트당 평균 입력 수	5.55 개	4.35 개	2.93 개
저장에 필요한 메모리	839 심볼	69 심볼	49 심볼
추론에 필요한 사실 수	19 개	13 개	13 개

다음은 경우 3의 지식베이스를 이용하여 고장진단을 수행한 결과이다.

< 사례 1 >

선로 L39에 단락사고가 발생하여 L39의 주보호 계전기 R77p와 R78p가 동작하여 차단기 CB77과 CB78이 트립되었다.

- 동작한 보호기기: R77p, R78p
- 멀티플렉싱 선택자가 선택한 멀티플렉싱 그룹: L38-B32-L39(그룹1), L39-B31-L40(그룹2)
- 각 멀티플렉싱 그룹에 대한 추론 결과: 표 4

표 4 사례 1의 결과표

Table 4 Result table of case 1

	L1	N1	L2	비고
그룹1	L38 모름	B32 비고장	L39 고장	-
그룹2	L39 고장	B31 비고장	L40 모름	-

- 최종 결과: L39 고장 발생

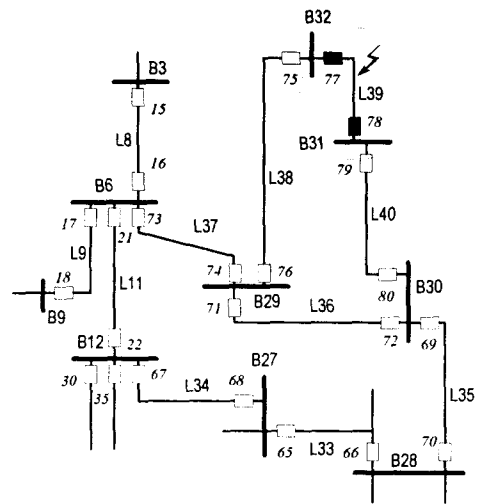


그림 5 고장 사례 1  
Fig. 5 Fault case 1

< 사례 2 >

선로 L38에 단락사고가 발생하여 L38의 주보호 계전기 R75p와 R76p가 동작하여 차단기 CB75과 CB76이 트립되었으나 선로 L37에 부착된 후비보호 계전기 R72t가 오동작하여 차단기 CB72가 트립되었다.

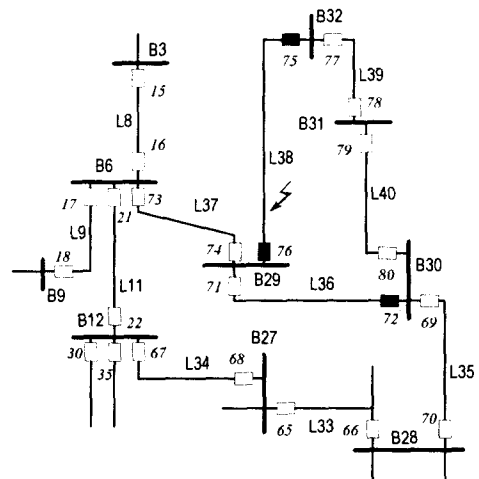


그림 6 고장 사례 2  
Fig. 6 Fault case 2

- 동작한 보호기기: R75p, R76p, R72t
- 멀티플렉싱 선택자가 선택한 멀티플렉싱 그룹: L38-B32-L39(그룹1), L36-B29-L37(그룹2), L36-B29-L38(그룹3), L37-B29-B38(그룹4), L35-B30-B36(그룹5), L36-B30-B40(그룹6)
- 각 멀티플렉싱 그룹에 대한 추론 결과: 표 5
- 최종 결과: L38 고장 발생

비고란의 계전기 오동작은 논리기반 전문가 시스템의 사실검증표로부터 검증할 수 있으나 본 논문에서 그 구체적인 내용은 수록하지 않았다.

표 5 사례2의 결과표

Table 5 Result table of case 2

	L1	N1	L2	비고
그룹1	L38 고장	B32 비고장	L39 모름	-
그룹2	L36 비고장	B29 비고장	L37 비고장	R72t 오동작
그룹3	L36 모름	B29 모름	L38 고장	-
그룹4	L37 모름	B29 비고장	L38 고장	-
그룹5	L35 비고장	B30 비고장	L36 비고장	R72t 오동작
그룹6	L36 비고장	B30 비고장	L40 비고장	R72t 오동작

< 사례 3 >

선로 L38에 단락사고가 발생하였으나 L38의 주보호 계전기 R75p와 R76p가 오 부동작하여 후비보호 계전기 R76s 와 R78t 가 각각 동작하여 차단기 CB76과 CB78이 트립되었고, 이어서 모선 B29 에 추가로 사고가 발생하여 B29의 모선 보호 계전기 R29B 가 동작하여 차단기 CB71, CB74가 추가로 트립되었다.

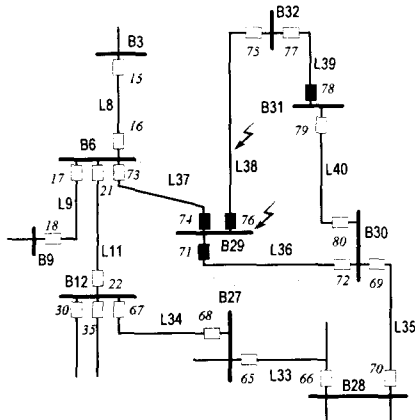


그림 7 고장 사례 3  
Fig. 7 Fault case 3

- 동작한 보호기기: R76s, R78t, R29B
- 멀티플렉싱 선택자가 선택한 멀티플렉싱 그룹:  
L38-B32-L39(그룹1), L36-B29-L37(그룹2),  
L36-B29-L38(그룹3), L37-B29-B38(그룹4),  
L39-B31-B40(그룹5)
- 각 멀티플렉싱 그룹에 대한 추론 결과: 표 6

표 6 사례3의 결과표

Table 6 Result table of case 3

	L1	N1	L2	비고
그룹1	L38 고장	B32 모름	L39 모름	-
그룹2	L36 비고장	B29 고장	L37 비고장	-
그룹3	L36 모름	B29 고장	L38 고장	-
그룹4	L37 모름	B29 고장	L38 고장	-
그룹5	L35 모름	B30 비고장	L36 모름	-

● 최종 결과: L38 고장 발생, B29 고장 발생

이상의 사례에 대해 계전기의 동작 원인인 고장을 경우 3의 추론표로 추론하였다. 한편, 사실 최소화 이전의 사실검증표를 포함하는 경우 1은 차단기의 오, 부동작의 검출이 가능하지만 정보처리 이후의 사실검증표를 포함하는 경우 2, 3에서는 차단기 정보의 검증은 불가능하다. 이는 추론표 작성에서 제외된 사실에는 오류가 없다는 가정 하에서 사실 최소화를 수행하였기 때문이다.

5. 결론

계층 논리 기반 전문가 시스템은 선언단계 추론 과정에서 다단계 논리 간소화를 사용함으로써 2단계 논리 간소화를 이용하는 논리 기반 전문가 시스템에 비하여 지식베이스 규모를 30% 정도 줄일 수 있다. 본 논문에서는 논리 기반 전문가 시스템의 지식베이스 규모를 더욱 줄이고 아울러 추론에 사용되는 사실의 수를 줄임으로써 논리 기반 전문가 시스템의 효율을 증대시키고자 사실 최소화(fact minimization) 기법을 제안하였다.

또한, 본 논문의 사례연구에서는 제안한 사실 최소화 기법을 계층 논리 기반 전문가 시스템과 접목시켜 전력계통의 고장진단 전문가 시스템을 구성함으로써 논리 기반 전문가 시스템의 실현 가능성을 보였다. 적용 결과, 사실 최소화 기법만으로도 추론에 전혀 영향을 미치지 않으면서 지식베이스의 규모를 88.6% 절약하였고, 계층 논리 기반 전문가 시스템과 함께 적용함으로써 지식베이스의 규모를 94.5% 절약함으로써 논리 기반 전문가 시스템의 가장 큰 문제점으로 지적된 지식베이스의 대규모화를 해결하였다. 그러나, 사실의 축소로 인하여 사실 오류를 검증하는 논리 기반 전문가 시스템의 특징을 기대할 수 없게 되었다.

본 연구는 한국전력공사의 지원에 의하여 기초전력공학공동연구소의 주관으로 수행되었음.

참 고 문 헌

[1] C. Fukui and J. Kawakami, "An Expert System for Fault Section Estimation Using Information from Protective Relays and Circuit Breakers", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 1, No. 4, 1986. 10.

[2] A. A. Girgis and M. B. Johns, "A Hybrid Expert System for Faulted Section Identification, Fault Type Classification and Selection of Fault Location Algorithms", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 4, No. 2, 1989. 4.

[3] R. P. Broadwater, J. C. Thompson, S. Rahman, and A. Sagent, "An Expert System for Integrated Protection Design with Configurable Distribution Circuit: Part I", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 9, No. 2, pp. 1115-1121, 1994. 4.

[4] J. Giarratano and G. Riley, Expert Systems Principles and Programming, PWR-KENT Publishing



Company, Boston, pp. 63-184, 1989.

[5] 박영문, 김광원, 이임택, "추론 테이블을 이용한 논리기반 전문가 시스템에 관한 연구", 대한 전기학회 논문지, 제44권 3호, pp. 389-396, 1995. 3.

[6] 이임택, 논리기반 전문가 시스템 및 발전소용 버너 제어시스템의 고장진단 적용, 박사학위논문, 서울대학교 전기공학과, 1995.

[7] Y. M. Park, G. W. Kim, and J. M. Sohn, "A Logic Based Expert System (LBES) for Fault Diagnosis of Power System", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 12, No.1, pp. 363-369, 1997. 2.

[8] 박영문, 김광원, 이광호, 정재길, "계층 논리 기반 전문가 시스템에 관한 연구", 대한 전기학회 논문지, 제47권 11호, pp. 2021-2027, 1998. 11.

[9] R. K. Brayton, R. Rudell, A. L. Sangiovanni-Vincentelli, and A. R. Wang, "MIS: A Multiple-Level Logic Optimization System", IEEE Trans. on CAD, Vol. 6, No. 6, pp. 1062-1081, 1987. 11.

[10] 김광원, 계층 논리 기반 전문가 시스템 개발 및 전력계통 고장진단과 경보처리에의 적용, 박사학위논문, 서울대학교 전기공학과, 1996.

[11] J. P. Hayes, Introduction to Digital Logic Design, Addison-Wesley Publishing Company, New York, 1993.

## 저 자 소 개



박 영 문 (朴 永 文)

1933년 1월 20일생. 1956년 서울대 전기공학과 졸업. 1971년 서울대 공과대학원 전기공학과 졸업(공학). 1983년 미국 휴스턴대 교환교수. 현재 서울대 공과대학원 전기공학부 교수. 1989년-1990년 당 학회 회장 역임.

Tel : 02-880-7244



김 광 원 (金 光 源)

1966년 5월 14일생. 1989년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1991년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 현재 울산대학교 전기전자및자동화공학부 조교수

Tel : 052-259-2186

E-mail : gwkim@uou.ulsan.ac.kr



이 광 호 (李 光 浩)

1965년 12월 22일생. 1988년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1990년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 1995년 한전 전력연구원 위촉연구원. 현재 단국대학교 공대 전기공학과 조교수

Tel : (02) 709-2868

E-mail : mania49d@ns.dankook.ac.kr



정 재 길 (鄭 在 吉)

1936년 9월 24일생. 1961년 서울대 전기공학과 졸업. 1973년 동 대학원 졸업(석사). 1984년 숭실대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학). 현재 중앙대 전기공학과 교수. 발송배전 기술사

Tel : (02) 810-2232

E-mail : chungjk@cau.ac.kr