

전력계통의 실시간 고장진단을 위한 전문가 시스템에 관한 연구

박영문 서울대학교 전기공학부 정세길 중앙대학교 전기공학과 김광원 울산대학교 전기공학과

A Study on the Real Time Expert System for Power System Fault Diagnosis

Young Moon Park Jae-Gil Chung Gwang-Won Kim
Seoul National Univ. ChungAng Univ. Univ. of Ulsan

[Abstract]

In this paper, a new expert system scheme, called Logic Based Expert System (LBES), is proposed for real time fault diagnosis of power system. In LBES, Expertise is represented by logical connectives and converted into a Boolean function. The set of Prime Implicants (PIs) of the Boolean function contains all the sound inference results which can be obtained from the expertise. Therefore, off-line inference is possible by off-line PI identification, which reduces the on-line inference time considerably and makes it possible to utilize the LBES in real-time environment.

1. 서 론

전력계통의 고장진단에 많이 이용되는 규칙 기반 전문가 시스템(rule based expert system)은 생성시스템(production system)에 그 이론적 기반을 두고 있다[1]. 생성 시스템에서 사용되는 지식 표현법은 if...then 구조의 생성 규칙(production rule)이며, 추론 방법은 recognize-act cycle로 불리는 연속된 추론 과정에 의거하는데, 이는 논리적 추론법 중에서 모더스 포넨즈(modus ponens)와 다를 바 없다. 모더스 포넨즈란 규칙 if A then B 와 사건 A가 참임을 알 때, 사건 B가 참임을 증명하는 방법이다. 이 방법은 논리적으로 건전(sound)하지만 규칙의 대우명제를 이용하지 못한다는 점에서 완전(complete)하지는 않다. 이로 말미암아 생성 시스템은 규칙의 생성에 있어서 추론 목적이 되는 목적사건은 반드시 규칙의 결론부에 위치해야 하고 논리합 형태의 결론부를 사용 못하는 등의 제약이 따른다. 또한, 생성 시스템에 있어서 추론 연쇄(inference chaining)로 말미암아 추론의 깊이가 깊어지는 경우에는, 추론 시간이 깊이의 증가에 따라 기하급수적으로 증가하므로 실시간 고장진단과 같은 문제에 적용하기에는 어려움이 따른다.

규칙 기반 전문가 시스템의 이와 같은 한계의 극복을 위한 방법의 일환으로 전력 계통의 고장 진단 분야에서는 인공 신경회로망을 이용한 고장진단[2], 모델 기반(model based)의 전문가 시스템[3] 등이 제안되고 있다. 두 방법은 모두 규칙 생성이 용이하다는 장점과 함께, 특히 전자는 추론 시간이 짧다는 장점이 있어서 앞서 제시한 규칙 기반 전문가 시스템의 단점의 극복이 가능하다. 본 논문에서는 규칙기반 전문가 시스템의 한계를 극복하는 또 다른 방안으로써 논리 기반(logic-based) 전문가 시스템을 제안한다.

제안하는 논리기반 전문가 시스템은 지식의 표현 기법으로 명제논리를 사용하며, 추론 기법으로는 전문가의 지식을 통합한 논리식의 프라임 임플리칸트[4]를 이용하는 방법을 취한다. 프라임 임플리칸트는 논리회로의 설계시에 부울함수의 간소화에 사용되는 개념이며, 본문에서 밝힌 바와 같이 이를 이용한 추론은 추론의 질적인 면에서 로빈슨의 비교흡수정리(resolution)와 동등하다. 비교흡수정리는 그 추론의 논리적 건전함과 완전함이 이미 증명되어 있으나[5] 추론에 소요되는

시간이 규칙 기반 전문가 시스템과 비교해서 매우 길다.

본 논문에서 제안하는 논리 기반 전문가 시스템에서는 전문가 전문가의 지식을 표현한 논리식의 프라임 임플리칸트를 식별(identification) 한 후, 이를 추론에 적합한 표의 형태(추론표)로 전문가 시스템의 지식베이스에 저장한다. 프라임 임플리칸트의 인식은 사건의 진, 위와 무관하게 전문가의 지식으로부터 비교흡수정리로부터 얻을 수 있는 모든 논리적 결과와 동등하며, 이러한 과정이 오프라인으로 이루어지므로, 제안하는 방법은 실시간 추론의 양을 대폭 줄일 수 있다. 아울러, 논리적으로 완전한 추론 결과를 제공하므로 지식의 표현에 있어서도 논리연산자를 이용한 임의 형태의 논리식을 이용할 수 있으므로 앞서 지정한 규칙 기반 전문가 시스템의 두 가지 단점의 극복이 가능하다.

본 논문에서는 간단한 모의 송전선로의 고장진단에 제안한 전문가 시스템의 지식 표현법과 추론법을 적용함으로써 그 효용성을 검증하였다.

2. 본 론

전문가의 지식을 표현한 논리식을 하나의 부울함수로 변형하고, 프라임 임플리칸트를 선별하면, 이는 전문가의 지식으로부터 비교흡수정리를 통하여 얻을 수 있는 모든 추론 결과와 동일하다. 본 절에서는 이의 증명과 함께 실시간 추론을 위한 프라임 임플리칸트의 저장방법에 대해 설명한다.

2.1 프라임 임플리칸트와 비교흡수정리

논리연산자를 이용해 기술된 지식은 적절한 논리연산을 통해 논리곱의 논리합 형태인 하나의 등가 논리식으로 표현 가능하다. 예를 들어, 다음 논리식 (1)이 사건 A, B, C, D, E 에 관계되는 전문가의 지식이라고 하자.

A → B, B → C, CD → E (1)

(1)의 각 논리식은 전문가의 지식이므로 항상 옳다고 볼 수 있으며, 따라서 (1)의 각 식은 대응되는 (2)의 식과 논리적으로 동가이다.

A' + B = 1, B' + C = 1, (CD)' + E = 1 (2)

(2)의 각 식의 논리부정을 취하면, (3)의 식을 얻을 수 있다.

AB' = 0, BC' = 0, CDE' = 0 (3)

(3)의 각 식의 논리합 역시 진리값이 0이므로,

AB' + BC' + CDE' = 0 (4)

식 (4)의 각 곱항은 발생이 금지된 상황을 묘사한다. 예를 들어, 사건 A가 참이면서, 동시에 사건 B가 거짓일 수는 없다. 이는 관계 A → B와 논리적으로 동가이다. 즉, 식 (4)는 전문가의 지식을 하나의 논리식으로 변형한 결과이며, 이의 각 곱항은 하나의 관계로 풀이 될 수 있다.

또한, 식 (4)의 프라임 임플리칸트는 AB', AC', BC', ADE', BDE', CDE'이며, 프라임 임플리칸트는 원 논리식의 진리값과 같으므로 식 (5)를 얻을 수 있다.

AB' + AC' + BC' + ADE' + BDE' + CDE' = 0 (5)

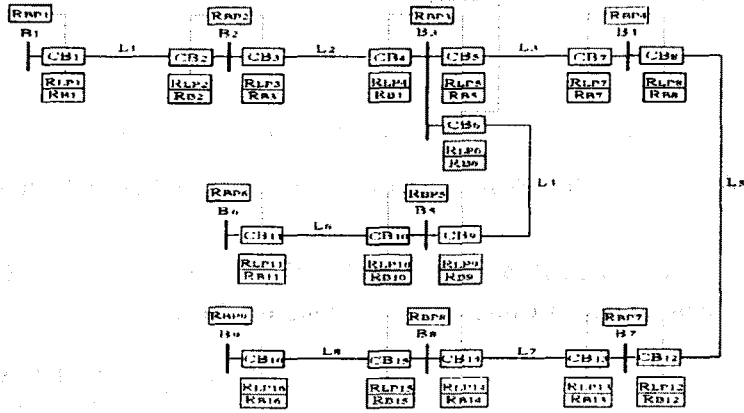


그림 1. 모의 송전 계통도

식 (5)를 식 (4)의 완전합(complete sum)이라고 한다. 식 (5)에는 (1)의 3가지 관계 외에도, 추론으로부터 얻은 $AC'=0$, $ADE'=0$, $BDE'=0$ 의 관계를 발견할 수 있다. 각각은 $A \rightarrow C$, $AD \rightarrow E$, $BD \rightarrow E$ 로 바꾸어 쓸 수 있으며, 관계의 조건부에 위치시키는 사건에 따라서 다른 형태로도 표시 가능하다.

이상과 같은 완전합이 지니는 의미는 로빈슨의 비교흡수정리(resolution)의 맥락에서 이해할 수 있다. 다음의 정의 1에서 비교흡수정리에서 사용되는 비교흡수절(resolvent)이 정의된다.

정의1) 사건 A가 절(clause) $P=A+P'$ 에 포함되어 있고, A' 가 절 $Q=A'+Q'$ 에 포함되어 있을 때, P와 Q의 비교흡수절은 $P'+Q'$ 이며, 중복된 사건은 한 번만 표시한다.

한편, 논리회로 설계에서 사용되는 용어인 컨센서스(consensus)는 다음 정의 2와 같이 정의된다.

정의2) 사건 A가 곱합 $P=AP'$ 에 포함되어 있고, A' 가 곱합 $Q=A'Q'$ 에 포함되어 있을 때, P와 Q의 컨센서스는 $P'Q'$ 이며, 중복된 사건은 한 번만 표시한다.

정리1과 정리2는 드 모르간의 법칙으로 상호 변환될 수 있으므로, 결국은 같은 의미를 지닌다고 할 수 있으며, 다음의 컨센서스 정리[6]는 주어진 논리식의 완전합이 그 논리식이 표현하는 사건간의 관계로부터 비교흡수정리로써 얻을 수 있는 모든 비교흡수절을 포함하고 있음을 의미한다.

컨센서스 정리) 다음의 두 조건은 논리곱의 합인 $E = \sum P_i$ 가 주어진 부울함수의 완전합이기 위한 필요충분 조건이다. i) 임의의 곱합 P_i 는 다른 곱합 P_j 를 포함하지 않으며 포함되지도 않는다. ii) E의 임의의 두 곱합의 컨센서스는 존재하지 않거나 E의 어떤 곱합 P_i 에 포함된다.

한편, 비교흡수정리는 논리적으로 건전하고 완전합이 증명되어 있으므로, 완전합은 주어진 논리식이 포함한 사건간의 관계로부터 논리적으로 건전하게 추론할 수 있는 모든 결과를 포함한다고 할 수 있다. 즉, (1)로 표현된 사건간의 관계로부터 논리적으로 유추할 수 있는 모든 결과가 식 (5)에 나타나 있다.

2.2. 추론표

이상과 같이 식별한 프라임 임플리컨트는 논리 기반 전문가 시스템의 규칙베이스에 표의 형태로 저장되며, 이를 추론표라고 한다. 전문가 시스템의 추론 전략에는 전방향 추론과 후방향 추론이 있다. 전방향 추론은 관측한 사실로부터 증명 가능한 모든 목적사건을 찾는 데에 적합하고, 후방향 추론은 특정 목적사건만을 증명하는 문제에 적합하다. 전력계통의 고장진단 문제는 전자에 해당한다고 할 수 있다. 한편, 논리 기반 전문가 시스템에서는 그 추론 방법에 따라서 전방향 추론표와 후방향 추론표를 달리 구성할 수 있으나, 전체적인 개념 설명에 후방향 추론표가 용이하므로 본 논문에서는 후방향 추론표만을 고려하기로 한다.

(5)에서 사건 A, B, D를 관측사건(사실, fact), 사건 C, E를 목적사건(goal)이라고 가정할 경우에, 사실을 관계의 조건부에 목적사건을 결론부에 위치시켜서 각 곱합을 의미함축으로 표현하면 다음과 같다.

$$A \rightarrow C, B \rightarrow C, AD \rightarrow E, D \rightarrow C+D \quad (6)$$

(5)의 첫 곱합은 사실간의 관계이기 때문에 (6)에서 제외되었다. 한편, (6)에서 결론부가 같은 조건부를 모아서 표 1과 같은 추론표를 구성할 수 있다.

표 1. 추론표의 예

결론부	조건부
C	A, B
E	AD, BD
$C' + E$	D

표1의 조건부에서 심표는 논리합을 의미한다. 논리기반 전문가 시스템의 지식베이스는 표 1과 같은 형태로 구성되며, 조건부의 만족여부에 따라서 결론부가 추론 연쇄 없이 즉각적으로 증명된다. 예를 들어, 사실 B가 관측되면 목적사건 C가 증명되며, 사실 B, D가 관측되면 목적사건 C와 E가 모두 증명된다. 또한 사실 D만이 관측되면 목적사건 C가 거짓이거나 E가 참임을 알 수 있다.

한편, 표 1은 조합논리회로의 입, 출력 쌍으로 볼 수도 있으며, 이는 논리 기반 전문가 시스템의 조합논리회로로서의 구현 가능성을 보여준다. 그러나, 이에 대해서는 추후 보다 많은 연구를 필요로 한다.

2.3. 사례연구

이상의 논리 기반 전문가 시스템을 그림 1의 모의 송전계통의 고장구간 판단에 적용하여 보았다. 그림 1에서 사용한 기호의 의미는 다음과 같으며, 각 주보호 계전기는 해당 보호설비의 고장 시에만 작동하고, 후비보호 계전기는 방향성을 가지며 설치된 지점의 전단 모선과 선로의 사고에 대한 후비보호의 역할만을 수행하는 것으로 한다.

- B_i : 모선번호
- L_i : 선로이름
- RBP_i : 모선 주보호 계전기 이름
- RL_i : 선로 주보호 계전기 이름
- RH_i : 후비보호 계전기 이름
- CB_i : 차단기 이름

그림 1의 계통도에는 판별 가능한 고장(목적사건)이 17가지이며, 계통 보호설비(관측사건)가 41가지이다. 전문가 시스템의 구축 시에, 앞의 58개의 사건간의 관계를 기술하는 것이 불가능하지는 않으나, 대 규모의 전력 시스템의 고장진단 문제의 적용 가능성을 고려할 때, 이러한 방법은 현실성이 없

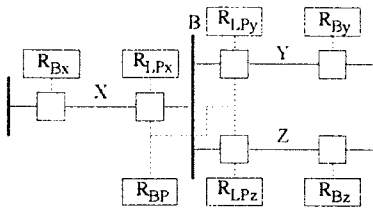


그림 2. 사례연구의 정형

다고 할 수 있다. 실제로, 규칙 기반 전문가 시스템의 생성 규칙은 사건의 변수(variable)를 사용하며, 사건간 관계의 정형(prototype)만을 정의하여 규칙베이스를 구성한다. 제안하는 논리 기반 전문가 시스템에서도 이와 같은 개념을 도입하여 그림 1의 전력계통에 대해 하나의 정형을 구성하고 정형내의 사건간의 관계만을 지식베이스에 저장한다. 본 예에서는 모선 B₃과 선로 L₂, L₃, L₄로 구성되는 정형을 그림 2와 같이 모듈 B-X-Y-Z로 정의하였다. 그림 1에는 B₃-L₂-L₃-L₄ 모듈, B₄-L₃-L₅ 모듈 등 그림 2의 정형에 대응되는 모듈이 9개 있다. 논리 기반 전문가 시스템에서는 동작할 보호기기가 소속된 모듈만을 대상으로 차례로 정형 모듈의 추론표를 이용하여 추론함으로써 전체의 고장진단이 완료된다. 한편, 정형 모듈보다 작은 보호요소로 이루어진 모듈의 경우에는 여분의 보호요소의 상태를 적절히 가정함으로써 정형 모듈을 이용한 추론이 가능해진다.

본 예에서는 문제를 간단히 하기 위하여 차단기의 오, 부동작은 없다고 하고, 단일 고장만을 전제로 하여, 정형 모듈의 고장진단에 사용되는 사건간의 관계를 다음과 같이 구성하였다.

- 관계1) R_{1PX}가 동작하면 선로 X의 고장이다.
- 관계2) R_{1PY}가 동작하면 선로 Y의 고장이다.
- 관계3) R_{1PZ}가 동작하면 선로 Z의 고장이다.
- 관계4) R_{BP}가 동작하면 모선 B의 고장이다.
- 관계5) R_{BX}가 동작하면 B, Y, Z 중 하나의 고장이다.
- 관계6) R_{BY}가 동작하면 B, X, Z 중 하나의 고장이다.
- 관계7) R_{BZ}가 동작하면 B, X, Y 중 하나의 고장이다.
- 관계8) B의 고장이면 R_{BP}가 동작하거나, R_{BP}의 부동작 시에 R_{BX}, R_{BY}, R_{BZ}가 동작한다.
- 관계9) X의 고장이면 R_{1PX}가 동작하거나, R_{1PX}의 부동작 시에 R_{BY}, R_{BZ}가 동작한다.
- 관계10) Y의 고장이면 R_{1PY}가 동작하거나, R_{1PY}의 부동작 시에 R_{BX}, R_{BZ}가 동작한다.
- 관계11) Z의 고장이면 R_{1PZ}가 동작하거나, R_{1PZ}의 부동작 시에 R_{BX}, R_{BY}가 동작한다.

위의 관계는 후보호 계전기의 부동작의 경우까지 포함하여 기술하고 있으므로, 위의 관계와 논리적으로 모순인 경우는 보호기기의 오동작으로 간주할 수 있다. 이상의 11개의 관계를 논리식으로 표현하고, 2장에서 제시한 순서에 따르면 89개의 프라임 임플리컨트를 구할 수 있다. 이 중에서 관측사건간의 관계를 나타내는 프라임 임플리컨트들 추론에 필수적이지 않은 것을 제외하면 46개의 프라임 임플리컨트들을 추출 수 있으며, 이로써 표 2와 같은 추론표를 구성할 수 있다.

다음은 계전기의 동작 정보와 표 2를 이용한 추론 예이다.

- 예 1) R_{BX}, R_{BZ}, R_{BP}의 동작 → B₃의 고장
- 예 2) R_{1PX}, R_{BZ}의 동작 → L₅의 고장
- 예 3) R_{1PY}의 동작 → 모순

예 1은 B₃-L₂-L₃-L₄ 모듈에서 증명되며, 예 2는 B₄-L₃-L₅ 모듈, B₇-L₅-L₇ 모듈에서 중복되어 증명된다. 한편, 예 3의 경우에도 B₄-L₃-L₅ 모듈에서 L₃의 고장을 증명하고, B₃-L₂-L₃-L₄ 모듈에서 L₃를 증명하므로 최종 추론 결과는 모순이다. 이는 계전기 R_{1PY}가 오동작 했음을 의미한다.

3. 결 론

기존의 규칙기반 전문가 시스템은 구성의 용이성 및 보수, 유지의 간편성 등 많은 장점이 있으나, 전문가 지식 표현의 제약, 추론 결과의 비완전성 및 추론에 많은 시간이 소요되는 등의 한계를 지니고 있다. 한편, 논리적 증명에 많이 사용되

표 2. 사례연구의 추론표

결론부	조건부
B	R _{BP} , R _{BX} R _{BY} R _{BZ}
B'	R _{BP} 'R _{BX} ', R _{BP} 'R _{BY} ', R _{BP} 'R _{BZ} ', R _{BX} 'R _{BY} ', R _{BX} 'R _{BZ} ', R _{BY} 'R _{BX} ', R _{BY} 'R _{BZ} ', R _{BZ} 'R _{BX} ', R _{BZ} 'R _{BY} ', R _{BP} 'R _{1PX} ', R _{BP} 'R _{1PY} ', R _{BP} 'R _{1PZ} '
X	R _{1PX} , R _{BX} 'R _{BY} ', R _{BX} 'R _{BZ} '
X'	R _{BX} , R _{1PX} 'R _{BY} ', R _{1PX} 'R _{BZ} ', R _{1PX} 'R _{1PY} ', R _{1PX} 'R _{1PZ} ', R _{1PX} 'R _{BP} ', R _{BY} 'R _{BZ} ', R _{BZ} 'R _{BY} '
Y	R _{1PY} , R _{BY} 'R _{BX} ', R _{BY} 'R _{BZ} '
Y'	R _{BY} , R _{1PY} 'R _{BX} ', R _{1PY} 'R _{BZ} ', R _{1PY} 'R _{1PX} ', R _{1PY} 'R _{1PZ} ', R _{1PY} 'R _{BP} ', R _{BX} 'R _{BZ} ', R _{BZ} 'R _{BX} '
Z	R _{1PZ} , R _{BZ} 'R _{BX} ', R _{BZ} 'R _{BY} '
Z'	R _{BZ} , R _{1PZ} 'R _{BX} ', R _{1PZ} 'R _{BY} ', R _{1PZ} 'R _{1PX} ', R _{1PZ} 'R _{1PY} ', R _{1PZ} 'R _{BP} ', R _{BX} 'R _{BY} ', R _{BZ} 'R _{BY} '

는 비교추수정리는 논리적으로 건전하면서도 완전한 추론을 보장하지만, 일반적으로 규칙기반 전문가 시스템보다 많은 추론 시간을 필요로 한다. 제안하는 논리 기반 전문가 시스템은 비교추수정리와 같은 수준의 추론을 규칙기반 전문가 시스템보다 짧은 시간 내에 행할 수 있을 뿐만 아니라, 전문가의 지식 표현에 논리를 사용함으로써 지식의 표현 능력이 우수하다.

논리기반 전문가 시스템은 전문가 지식을 함축한 논리식의 프라임 임플리컨트를 적절한 표의 형태로 전문가 시스템의 지식 베이스에 저장하여, 사건의 관측과 동시에 적절한 추론이 즉각적으로 이루어지게 함으로써 실시간 추론을 가능하게 하였다. 아울러, 보호기기의 오동작 판별에 관련된 여분의 지식 없이도 보호기기의 오동작 검출이 용이한 장점이 있다. 본 논문에서는 제안하는 전문가 시스템을 간단한 송전선로의 고장구역 판단에 적용해 봄으로써 그 적용 가능성을 확인하였으며, 후속 연구에 의해 전문가 시스템이 이용되는 많은 분야에 적용 가능하리라고 생각된다.

본 연구는 한국전력공사의 지원에 의하여 기초전력공학 공동연구소 주관으로 수행되었음

[참 고 문 헌]

- [1] J. Giarratano and G. Riley, *Expert Systems Principle and Programming*, PWR-KENT Publishing Company, Boston, 1989.
- [2] H. T. Yang, W. Y. Chang, and C. L. Huang, "On-line Fault Diagnosis of Power Substation Using Connectionist Expert System," *IEEE Trans. on PWRs*, vol.10, no.1, February 1995
- [3] T. Kimura, S. Nishimatsu, Y. Ueki, and Y. Fukuyama, "Development of an Expert system for Estimation Fault section in Control Center based on Protective System Simulation," *IEEE Trans. on PWRD*, vol.7, no.1, January 1992.
- [4] R. M. Katz, *Contemporary Logic Design*, The Benjamin/Cummings Publishing Company, Redwood City, 1994
- [5] C. L. Chang and R. C. Lee, *Symbolic Logic and mathematical Theorem Proving*, Academic Press, New York, 1973.
- [6] J. P. Hays, *Introduction to Digital Logic Design*, Addison-Wesley Publishing Company, New York, 1993.