

변전소 소내 고장진단 전문가 시스템에 관한 연구

박영문* 김대환* 이광호* 이홍제** 권태원*** 윤용범***
 * 서울대학교 전기공학과 ** 광운대학교 전기공학과 *** 한전기술연구원

A Study on Expert System for Fault Diagnosis in Substation

Y. M. Park* D. H. Kim* K. H. Lee* H. J. Lee** T. W. Kwon*** Y. B. Yoon***
 * Seoul National Univ. ** Kwangwoon Univ. *** KEPCO Research Center

ABSTRACT

In this paper, we introduce 'Expert System(ES)' for Fault Diagnosis(FD) in unmanned-Substation(S/S). In contrast with the conventional ES, this ES has the following characteristics. First, this ES performs the function that judges the right or false operation of Relays(Ry's) and Circuit Breakers(CB's) in S/S. Then, with this information of the above judgments and the operating times of Ry's and CB's, the candidates of the feasible fault areas are generated. Several examples are presented to show the validity of this system.

1. 서론

현대사회에서 전력 수요는 지속적으로 증가하고 있으며 또한 필요한 전력을 공급하기 위한 전력 시스템의 크기는 점점 대형화되고 있다. 이로 인한 EMS 시스템의 부담 증대를 경감하기 위해 각 전력을 여러 수용가에 공급하기 위한 중간 단계로써 많은 SCADA 시스템이 현재 운용되고 있으며 SCADA내의 여러 154kV급 변전소들은 무인화되어 운용하고 있는 실정이다. 이에 따라 SCADA 시스템의 여러 변전소에 대한 원격 제어에 대한 신뢰성이 중요한 문제로 제기되게 된다. 이러한 상황에서 변전소내의 사고는 수용가에게 필요한 전력을 공급하는데 있어서 심각한 문제를 야기할 수 있으며, 따라서 일반 송전계통의 안정도와 신뢰도를 높이기 위한 연구와 함께 이러한 변전소 계통의 보호 시스템에 대한 연구가 필요하게 되었다. 일반적으로 전력계통에 상존하는 사고의 가능성은 배제할 수 없으며, 복구를 위해서 이러한 사고 지점을 신속히 찾아내는 것이 필요하다. 기존의 고장진단 전문가 시스템[1]은 대부분 송전계통[2]과 배전계통에 국한되어 있으며 이들의 중간 단계인 SCADA 시스템에 대한 고장진단 전문가 시스템은 별한 제시되지 않았다.

고장진단의 문제에 있어서 정보들의 동작시간은 중요한 요소임에도 불구하고 기존의 고장진단 전문가 시스템에서는 이러한 시간 요소를 고려하지 않고 있다. 본 논문에서는 변전소내의 사고시 이러한 동작 시간을 고려한 고장진단 전문가 시스템을 제시한다. 변전소내의 각각의 요소는 'Element'로 정의되며 각 Element는 변전소의 계층 구조적 특성에 의해 여러 단계의 'Level'로 구분한다. 소내 사고시 계전기나 차단기의 동작정보가 입력되면 이들의 동작시간의 비교와, 그들의 보호대상이 되는 Level, Element에 대한 정보 및 그들 사이의 후보호 및 후비보호 관계를 이용해 각 계전기와 차단기에 대한 정동작, 오동작, 부동작등을 판별한다. 이러한 판별은 각 계전기나 차단기의 오, 부, 정 동작등에 대한 가능성으로 제시되고, 이러한 가능성들을 조합하여 고장 지점으로 예상되는 후보들을 생성한다. 이러한 후보들은 여러가지 경험적이고 통계적인 자료의 판정기준에 따라 순위가 매겨지며[3], 이러한 순위에 따라 고장 지점 가능성들이 제시된다.

2. 변전소 소내 계통의 표현과 특성

2.1 Element & Level 의 정의

본 시스템에서는 변전소내 계통의 요소들 Element와 Level로 표현하였다. Element는 변전소내 계통에서 사고를 판정할 수 있는 보호대상이 되는 최소 단위의 기기로 정의하며, 변전소내에서는 상위 모선,

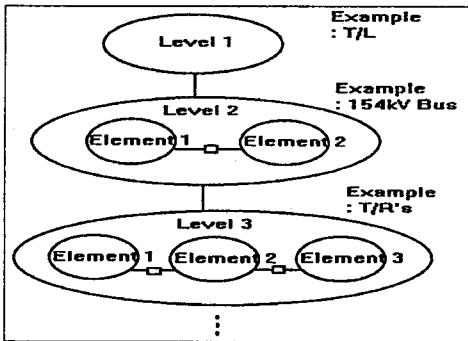


그림 1 Level과 Element의 설정

변압기, 하위 모선, 배전선로, Shunt Capacitor 등이 된다. Level은 변전소의 계층적 특성에 따라 선정된 것으로 전력을 공급하여 주는 축, 즉 변전소내에서는 송전선로에 가까운 축을 상부 Level, 배전선로에 가까운 축을 하부 Level로 구분한다. 위의 그림은 Level과 Element들에 대한 도식화된 표현이다.

이러한 Level과 Element는 특히 계전기들간의 후보호 및 후비보호 관계를 규정할 때 필요하다.

2.2 변전소내의 보호계전기들의 특성

변전소내 보호기기의 특성은 고장진단 전문가 시스템을 구성하는데 있어서 중요한 역할을 한다. 일반적인 변전소내 보호계전기들의 구성 및 특성은 다음과 같다.

- 1) T/L 축 보호계전기: 후보호로서는 순시 계전기인 반송계전기 또는 표시선 방식을 적용하며 한시 특성의 3단계 방향거리 계전방식과 방향 과전류 방식을 후비보호로 적용한다.
- 2) 154kV Bus 축 보호계전기: 순시특성의 전압차동 비을 계전 방식을 적용하고 있다. 일반적으로 후비보호는 사용하지 않는다.
- 3) 변압기축 보호계전기: 후보호로서는 순시 특성의 비을차동 계전기를 사용하며 후비보호로서 한시 특성의 과전류 보호 방식 계전기를 사용하고 있다.
- 4) 66kV 또는 22.9kV Bus 와 D/L 축 보호계전기: 단일 보호 방식으로 방향과전류 방식을 채택하고 있다.

3. 변전소내의 고장진단

3.1 계전기간의 후보호 및 후비보호 관계

계전기와 차단기의 오, 부, 정동작을 판정하기 위해 먼저 변전소내의 각 계전기들간의 후보호 및 후비보호 관계를 규정하는 규칙이 필요한데 이것은 아래와 같은 개념들로 정의하였다. 이것은 일반적으로 정해질 수 있는 규칙이 아니며 변전소의 계층구조적 특성과 변전소에서 통상 사용되는 계전기들의 종류에 의거해 정해진 개념이다.

- 1) 후보호 계전기
 - 어느 Element를 보호구간으로 가지는 계전기가 순시이면 그 계전기는 그 Element에 대해 후보호 계전기이다.
 - 어느 Element를 보호구간으로 가지는 계전기가 한시이더라도 그 Element내에서 그 계전기의 time delay가 가장 짧으면 그 Element에 대해 후보호 계전기이다.
 - 한 Element내에 한 개의 계전기만이 보호하는 방식을 채택하고 있을 때, 그 계전기는 후보호 계전기로 간주할 수 있다.
- 2) 후비보호 계전기
 - 순시 계전기는 후비보호 기능이 없다.
 - 순서가 아닌 경우 상부 Level의 계전기는 하부 Level에 대해 후비보호 기능을 가진다.
 - 같은 Element내에서의 후비보호 관계는 각 계전기들의 time delay에 의해 결정된다. 즉, 긴 time delay를 가진 계전기는 짧은 time delay를 가진 계전기에 대해 후비보호 기능을 가진다.

3.2 계전기와 차단기의 오, 부, 정동작을 판정하는 규칙

(Rule for Deciding the type of Operation: 'RDO')
 각 계전기나 차단기의 오, 부, 정동작의 판정은, 동작한 각각의 계전기나 차단기에 대해 정해진 규칙에 따라 적용하며, 이러한 오, 부, 정동작의 판단은 동작한 계전기나 차단기에 국한된 것이 아니고 앞에서 언급했듯이 그들의 후보호 및 후비보호 관계와 동작시간등을 고려하여 주변의 여타 계전기나 차단기에 대해서도 임의의 판정이 내려질 수 있다. 본 시스템이 설정한 RDO는 모두 19종류이며 이들 중 간단한 몇 개만 예를 들어 다이어그램으로 표시하면,

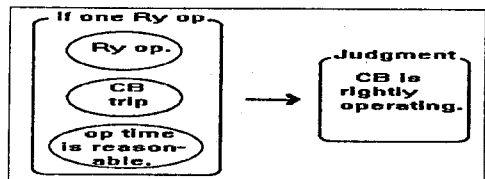


그림 2 한 Element내에서 계전기 동작시 오, 부, 정동작의 판정

위의 그림은 한 Element에서 한 개의 계전기와 차단기가 동작했을 때, RDO에 적용하여 얻은 판정의 결과이다. 동작시간이 적절하다는 것은 계전기의 동작과 차단기의 동작 순서에 모순이 없다는 것을 의미한다. 이와 같은 기본적인 RDO는 계전기와 그에 해당하는 차단기의 관계 및 그들의 동작시간을 고려하여 위와 같은 가장 기본적인 오, 부, 정동작에 대한 판정규칙을 세운다.

한 Element내에 주보호 및 후비보호가 같이 보호기능을 행하는 경우는, 그 주보호 계전기와 후비보호 계전기의 순서 및 한시적 특성과 하부 Level 계전기나 차단기의 동작 유무로써 그들의 오, 부, 정동작등을 판정할 수 있다. 한 예로써 만일 다음 그림과 같은 상, 하부 Level의 계전기가 있고 이들의 동작 관계가 다음 그림과 같다면 이들의 판정은,

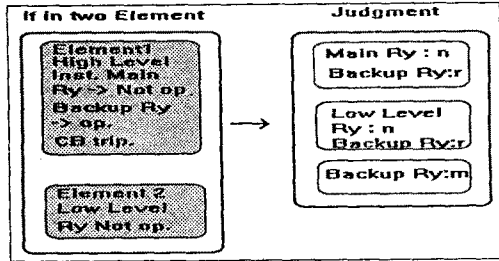


그림 3

계전기 동작시 하부 Level에 대한 오, 부, 정동작 판정 'r'은 정동작, 'm'은 오동작, 'n'은 부동작을 의미한다.

위의 후진부와 같이 내리게 된다. 계전기 및 차단기에 대한 오, 부, 정동작등의 판정은 위에서 제시한 것과 같은 간단한 경우의외에도 그 복잡한 경우에 대해서도 설정되어 있으며 이와 같이 형성된 RDO는 본 시스템에서 모두 19종류로 구성되어 있다.

3.3 변전소내 계통이 Loop인 경우 계전기의 오, 부, 정동작등의 판정

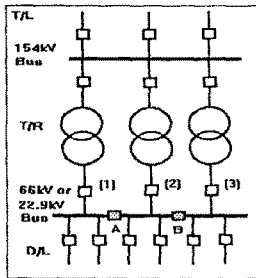


그림 4

변전소내 계통이 Loop인 경우의 차단기 상태 및 Element들의 선정 (계전기 (1), (2), (3)은 거의 유사한 time-delay를 가지고 있으며 66kV 또는 22.9kV Bus들은 사고에 대해 동일한 사고에 대해 동일한 동작을 행하게 된다.)

대상 변전소가 특수한 상황으로서 Loop형태로 운용되고 있을 때(그림 4에서 차단기 A, B가 close되어 있는 경우), 사고가 발생하여 계전기나 차단기가 동작한 경우에 있어서 각 계전기나 차단기에 대한 오, 부, 정동작등의 판정도 기본적인 판정은 Radial의 경우와 유사하다. 즉, 만일 한 계전기와 해당 차단기가 동작했으며 그들의 동작시간에 모순이 없다면, 해당 차단기가 정동작했다는 판정이나, 정전구역내의 계전기 동작은 오동작이라는 기본적인 판정은 다를 것이 없으나, Loop인 경우 Element의 설정이 Radial의 경우와 다르게 변화하므로 이에 대한 고려가 필요하다. Radial인 경우 66kV Bus나 22.9kV Bus들은 같은 Level내의 서로 다른 Element들로 구분되지만, Loop인 경우는 위의 그림에서처럼 동일한 Element로 묶여지며, 계전기 (1), (2), (3)이 거의 동일한 time delay를 가지고 있기 때문에 이들의 동시 동작유무를 판단함으로써 각 계전기들의 오, 부, 정동작등을 판정한다. 그 외에 변압기등의 사고시에도 마찬가지로의 규칙을 생성할 수 있다. 변압기 사고시 정상동작인 경우는 Radial의 경우와 마찬가지로 변압기 양단의 차단기가 trip되지만, 오동작이나 부동작이 있는 경우 차단기의 trip상태는 위의 (1), (2), (3) 계전기의 time delay에 크게 의존하며, 이에 따라 규칙을 설정하였다.

3.4 고장지점의 후보 생성

여기서는 앞에서 행한 계전기나 차단기에 대한 오, 부, 정동작등의 판정 결과를 이용하여 가능한 고장지점을 제시하는 후보들을 생성한다. 한 변전소내에서 n개의 계전기가 동작했을 때 이들을 각각 앞의 RDO에 적용시킨 결과는 아래와 같이 표현될 수 있다.

	Ry1	Ry2	...	Ryn
rule 1.	$f^1(1,1) \vee f^2(1,1)$	Not applied.		$f^1(1,n) \vee f^2(1,n)$
rule 2.	$f^1(2,1)$	$f^2(2,2)$		Not applied.
rule 3.	Not applied.	$f^1(3,2) \vee f^2(3,2)$		Not applied.
rule m.	$f^1(m,1)$	$f^1(m,2)$		$f^1(m,n)$
	sub-group 1	sub-group 2		sub-group n

여기서, $f^j(j,k)$ 는 j번째 RDO에 k번째 동작한 계전기를 적용시켰을 때의 j번째 판정 결과이다.

즉 동작한 각 계전기를 RDO에 적용시켜 그 결과를 각각 sub-group으로 묶으며, 위의 예에서 이들 sub-group을 각각 sub-group1, sub-group2, ..., sub-group n 이라 하면 이들에 대해 고장지점의 후보를 생성하기 위해 다음과 같은 과정을 수행한다.

1) 먼저 각 sub-group내에서 동작한 계전기의 판정결과와 차단기의 판정결과 및 그 외의 계전기들(동작하지는 않았지만 동작한 계전기와 후비보호 관계가 있는 계전기들)에 대한 판정 결과들을 서로 결합하여 가능한 연결을 형성한다.

이러한 연결의 형성은 다음과 같은 원칙에서 이루어진다.

□ [한 계전기의 판단] \wedge [해당 차단기의 판단] \rightarrow ['계전기의 판단 - 차단기의 판단' 형식의 '연결'(Connection: 'C')을 만든다]

□ Radial계통인 경우 한 group내에서 여러 개의 위와 같은 C가 형성 되었을 때 그들 사이의 관계는,

[한 계전기와 차단기의 판단에 관한 C] \wedge [또 다른 C]

\rightarrow ['하부 Level 계전기의 판단 - 상부 Level 계전기의 판단' 으로 C들을 묶는다]

□ Loop계통인 경우는 그들의 time delay에 의거해 C를 생성한다. 즉, [한 계전기와 차단기의 판단에 관한 C] \wedge [또 다른 C] \rightarrow ['time setting이 짧은 계전기에 관한 판단 - time setting이 긴 계전기에 관한 판단' 으로 C들을 묶는다]

이런 C들은 각 sub-group내에서 생성되며 각 sub-group내에서 이들은 'OR'로써 한 sub-group내에 존재한다. 위의 예에 대해 이러한 C들을 형성하면 다음과 같다. 여기서 $C(i,j)$ 는 i번째 sub-group내에서 가능한 연결들 중 j번째 연결을 의미한다.

$$\frac{f^1(1,1)-f^1(2,1)-f^1(m,1)}{C(1,1)} \text{ in sub-group1}$$

$$\frac{f^1(1,1)-f^1(2,1)-f^1(m,1)}{C(1,2)} \text{ in sub-group2}$$

2) 각 sub-group에서 한 개의 C를 택하고 다른 그룹에서 한 개의 C를 택하여 이들을 다시 연결하여 '상위연결'(High Connection : HC)을 형성한다. 위의 C들로부터 이런 HC들을 형성하는 것은 각 C내의 계전기들의 동작시간에 의존한다. 즉, 빠른 동작시간을 가진 C가 HC내에서 앞쪽에 위치한다.

위의 예에 대해서는 sub-group1의 계전기가 sub-group2의 계전기보다 먼저 동작했다면 다음과 같다.

$$C(1,1) - C(2,1) - \dots : HC 1$$

$$C(1,1) - C(2,2) - \dots : HC 2$$

$$C(1,2) - C(2,1) - \dots : HC 3$$

$$C(1,2) - C(2,2) - \dots : HC 4 \dots$$

이러한 HC들은 실제로 오, 부, 정동작 판정에 의거한 고장지점에 대한 후보들을 제시하는데 직접적으로 관계된다.

3) 위의 각 HC에 대해 고장지점을 할당하는 규칙(Rule for Allocating the Fault area : RAF)에 의해 고장지점을 할당한다. 이러한 고장지점의 할당으로써 위에서 구한 HC들은 고장지점들에 대한 후보들로 제시된다. RAF에 관해서는 다음 절에서 설명한다.

3.5 각 HC에게 고장지점을 할당하는 규칙

(Rule for Allocating the Fault area : RAF)

위에서 제시된 각 HC들은 계전기 및 차단기에 대한 오, 부, 정동작등의 판단이며 이러한 판단의 결과들을 가지고 고장지점을 할당하는 것이 필요하다. 이러한 고장지점의 할당은 앞에서 행한 오, 부, 정동작등에 관한 판단으로써 추론한다. 한 예로써, HC내에서 계전기가 정동작이라는 판정을 내렸을 때는 그 계전기의 보호구간이 고장지점이 되며, 만일 HC내에서 계전기가 오동작이라는 판정이 내려졌을 때는 고장지점을 할당해주시 않는다.

한 HC내에 여러 계전기들에 대한 판단이 있고 만일 정동작과 부동작이 같이 있는 경우는 앞에서 구한 '계전기간의 주보호 및 후비보호 관계'에 의거해 다중 사고 또는 부동작 계전기의 보호구간을 고장지점으로 제시한다. 즉, 한 HC내의 계전기간에 주, 후비보호 관계가 있다면 주보호 계전기의 부동작으로 인해 후비보호 계전기가 정동작한 것으로 판정하며, 주, 후비보호 관계가 없다면 각각 다른 보호구간을 가지는 계전기가 각각 다른 사고에 대해 동작한 것으로 간주하고 각각의 보호구간을 고장지점으로 정하여 다중사고로 판단한다.

3.6 제시한 후보들의 순위 선정

위에서 제시한 고장지점들의 후보들에 대해 여러와 같은 판정기준에 의거하여 고장 가능성의 순위를 설정한다. 여러 후보들중 우선 순위도(Priority)가 높은 수록 고장의 가능성은 더욱 높은 후보로 간주한다.

■ 순위 선정의 판정 기준

1) 각 후보내에서 제시된 예상 고장지점들의 갯수

2) 각 후보내에서 부동작 차단기의 갯수

3) 각 후보내에서 예상 고장지점으로 설정된 기기의 고장 빈도

4) 각 후보내에서 부동작 계전기의 갯수

5) 각 후보내에서 오동작 계전기의 갯수

이러한 순위 선정의 판정 기준은 전문가의 지식과 통계적인 자료에 의거해 설정하였으며 이러한 기준에 의해 각 후보들은 그들의 선형결합으로써 우선 순위를 정의하였다. 우선 순위를 계산하는 방식은

다음 그림과 같다.

	Criterion 1	Criterion 2	...	Criterion m
Candidate 1	J(1,1)	J(1,2)		J(1,m)
Candidate 2	J(2,1)	J(2,2)		J(2,m)
...
Candidate n	J(n,1)	J(n,2)		J(n,m)

$$\begin{bmatrix} J(1,1) & J(1,2) & \dots & J(1,m) \\ J(2,1) & J(2,2) & \dots & J(2,m) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ J(n,1) & J(n,2) & \dots & J(n,m) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ \vdots \\ P_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} TP_1 \\ TP_2 \\ \vdots \\ TP_m \end{bmatrix}$$

그림 5

후보들의 우선 순위를 정하기 위한 선형 계산표
 $J(i,j)$ 는 i 번째 후보에 j 번째 판정 기준을 적용했을 때의 계산값
 P_i 는 i 번째 판정 기준의 가중치
 TP_i 는 i 번째의 후보의 최종적인 우선 순위값

4. 사례연구

사례연구의 대상 시스템은 의정부 전력소관할 154kV급 도봉 변전소이다. 도봉 변전소의 구조는 다음 그림과 같으며 제퍼로 계전기를 제외하고 모두 70여개의 계전기와 32개의 차단기로 구성되어 있다. 보호대상이 되는 지역은 모두 33개이다.

4.1 사례 연구 1

변압기 후보로 계전기인 차동 계전기와 다른 변압기에 연결된 D/L의 계전기가 동작하여 차단기 3개(1008, 1011, 1020)가 trip된 경우이다(그림 6). 이 경우 동작한 계전기는 비유차동 계전기(34)와 지락 과전류 계전기(51)로써 모두 2개가 동작했으며 동작순서는 차동 계전기가 먼저 동작하며 그 간격은 1초로 두었다. 가능한 진단의 경우는 그림 아래에 표시된 후보들로써 제시되어진다. 동작 결과 이 경우는 모두 4가지의 가능성이 각각의 우선 순위를 가지고 제시되었으며, 가장 가능한 고장 지역으로는 '변압기 #1'이 제시되었다. 아래의 'r'은 정동작, 'm'은 오동작, 'n'은 부동작을 의미하며, 숫자들은 계전기와 차단기의 번호이다.

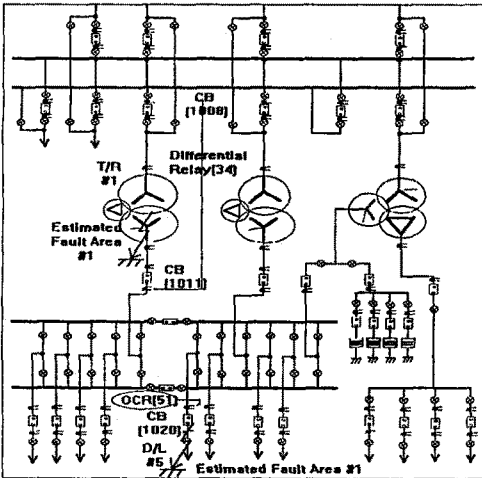


그림 6 사례 연구 1

(변압기 후보로 계전기와 D/L보호 계전기가 동작했을 때)

***** Grouping Fault Area *****
DIFF_RY(34) and OCR6(51) has no backup relation.
Candidate 1 :
34 r 1008 r 1011 r
51 r 1020 r
Fault Area : TR #1(9), D/L #5(22)
-----> Multiple Fault!
Candidate 2 :
34 r 1008 r 1011 r
51 m 1020 r
Fault Area : TR #1(9)
-----> Single Fault!
Candidate 3 :
34 m 1008 r 1011 r
51 r 1020 r
Fault Area : D/L #5(22)
-----> Single Fault!
Candidate 4 :
34 m 1008 r 1011 r
51 m 1020 r
Fault Area : Not Exist!
***** Priority of Candidates (Second Arranged) *****
Candidate 1 : 1.32

Candidate 2 : 1.53
Candidate 3 : 1.37
Candidate 4 : 0.93
-----> Fault Area is " TR #1 " .

4.2 사례 연구 2

D/L측의 지락 과전류 계전기(49)와 22.9kV Bus 보호 계전기(39)가 동작했고, 해당 차단기는 22.9kV Bus측만이 동작(1011)했을 경우이다. 동작순서는 과전류 계전기가 먼저 동작했으며, 제시된 고장지점은 D/L #4이다.

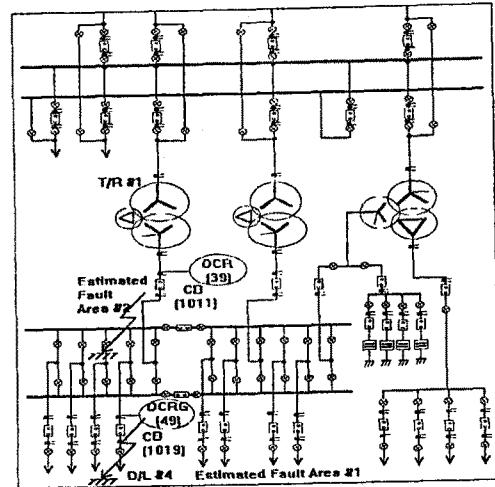


그림 7 사례 연구 2

(D/L 보호 계전기와 22.9kV Bus 보호 계전기가 동작했을 때)

***** Grouping Fault Area *****
OCR(39) has the BACKUP function for OCR6(49).
Candidate 1 :
49 r 1019 n
39 r 1011 r
Fault Area : D/L #4(21)
-----> Single Fault!
Candidate 2 :
49 r 1019 n
39 m 1011 r
Fault Area : D/L #4(21)
-----> Single Fault!
Candidate 3 :
49 m 1019 n
39 r 1011 r
Fault Area : LBUS #1(12)
-----> Single Fault!
Candidate 4 :
49 m 1019 n
39 m 1011 r
Fault Area : Not Exist!
***** Priority of Candidates (Second Arranged) *****
Candidate 1 : 1.35
Candidate 2 : 1.30
Candidate 3 : 1.10
Candidate 4 : 0.68

5. 결론

본 연구에서는 154kV급 변전소 계통내에서 계전기와 차단기의 동작 정보가 들어왔을 때, 이들에 대한 동작시간의 고려와 오, 부, 정동작 등의 판정을 기준으로 고장지점을 예상하는 전문가 시스템을 제시하였다. 실제 사고가 생겼을 때 전문가 시스템은 신속한 동작을 수행하여 정확한 고장지점을 제시하여 주는 것이 필요하며, 이러한 속도의 향상을 위해 계전기와 차단기에 대해 그들의 후보 및 후비보호관계와 동작시간들을 통해 오, 부, 정동작들을 미리 먼저 판정하는 것은 실제적인 수행속도에 상당한 도움을 준다.

본 논문에서는 도봉 변전소내의 66kV Line에서 전류의 방향을 일정하다고 가정하였고, 변전소내의 제퍼로 계전기의 영향은 고려되지 않았으며, 현재 이에 대한 연구가 진행중에 있다.

6. 참고 문헌

[1] C. Fukui, J. Kawasaki, " An Expert System for Fault Estimation using Information from Protective Relays and Circuit Breakers ", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. PWRD-1, No. 4, October 1986
[2] " 전력계통 사고판정 및 복구지원 전문가 시스템에 관한 연구 ", 과학기술처 최종연구보고서 1990. 8
[3] S. Kumano, H. Ito, " Development of Expert System for Operation at Substation ", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 8, No. 1, January 1993
[4] K. P. Wong, C. C. Fung, " Development of a Knowledge-Based System for Circuit Allocation in Substation Switching Substations ", Third Symposium on Expert Systems Application to Power Systems, April 1991