

보호기기 동작시 전류파형과 탈락부하량을 고려한 방사상 배전계통 고장점 추정방법

論 文
52A-2-4

A New Diagnosis of Actual Fault Location in Distribution Power Systems by Comparing the Current Waveform and the Amount of Interrupted Load

崔 勉 松* · 李 承 宰* · 陳 保 建** · 李 德 洙*** · 玄 升 鎬*
(M.S. Choi · S.J. Lee · B.G. Jin · D.S. Lee · S. H. Hyun)

Abstract - In this paper, an intelligent fault location and diagnosis system is proposed. The proposed system identifies the fault location in two-step procedure. The first step identifies candidates of fault location using an fault distance calculation using an iterative method. The second step is diagnosis the actual fault location in the candidates by comparing the current waveform patterns with the expected operation of the protective devices and considering the interrupted load after the operation protective device. The simulations results in the case study demonstrates a good performance of the proposed fault location and diagnosis system.

Key Words : iterative fault location, distribution power system, diagnosis of actual fault location

1. 서 론

전력 계통에서 송배전 선로는 전원단과 수용가를 연결하는 중요한 역할을 하며 대기 중에 노출되어 있음으로 해서 뇌우, 동물의 접촉, 보호기기의 오·부 동작, 그리고 그 외 다양한 사고 등의 원인으로 사고가 빈번하게 발생한다. 선로에서 사고가 발생할 경우 사고 발생지점을 빠르고 정확하게 찾아내고 신속한 고장복구를 하는 것이 정전 비용을 최소화하며 더 나아가 서비스 신뢰도와 전력의 질을 높이는 측면에서 매우 중요하다. 그리고 현재 우리나라에서 진행되는 전력 산업의 구조 개편으로 인하여 양질의 전력을 공급하는 것이 전력상품의 중요한 경쟁력이 될 것이다.

사고 발생 시 계통 관리자가 육안으로 고장점을 찾아낸다던 광범위한 송배전 선로 구간을 확인하여야 하며 이러한 작업은 많은 비용과 인력, 정전비용이 요구되며 실제 고장 위치를 찾아내는 과정을 어렵게 만들며, 이로 인하여 고장 복구시 시간지연을 초래하게 된다.[1, 2]

송배전 선로상에서 고장발생시 고장점까지의 거리를 계산하는 고장점 검출 알고리즘은 최근 10여년 동안 활발히 연구되어 왔다. [3-5]

송전계통은 3상 평형회로이므로 여기서 고장점 검출 방법으로는 진행파를 이용하는 방법, 전압과 전류의 고조파 성분만 이용하는 방법, 그리고 전압과 전류의 기본과 성분을 사용한 겔보기 임피던스 법 등으로 구분할 수 있으며, 세부적

으로 기본과 성분을 이용하는 방법의 적용에 있어서 한단 정보를 이용하는 것과 양단 정보를 이용하는 방법으로 구분된다. 그리고 양단 정보를 사용하는 경우 정확한 고장점 검출이 가능하지만 통신장비 등 다양한 장비들이 부가적으로 필요하게 됨으로 한단 정보를 사용하면서 평형회로의 대칭좌표법[6]을 사용한 전류분배계수, 보상등의 방법을 적용하여 보다 정확한 고장점 검출 방법들이 제안되어왔으며 현재 송전계통은 고장점 검출 장치가 널리 사용되고 있다.

그러나 배전계통은 크게 송전계통보다 여러 가지 측면에서 해석을 어렵게 하는 요인들이 있다. 먼저 배전 선로의 비 동질성, 부하 전류, 다중의 부하 탭 등의 이유로 불평형 요인을 들 수 있다. 고장해석의 가장 기본이 되는 대칭좌표법은 3상 평형 계통에만 사용할 수 있으므로 배전계통 불평형이 해석을 가장 어렵게 만드는 요인이다. 둘째로 송전계통과 달리 배전계통은 많은 분기선을 포함하는 방사상계통이다. 송전계통은 선로 구간마다 보호기기가 설치되어 그 구간의 고장에 관련된 정보를 얻기가 쉽지만 배전계통은 변압기 인출단의 계전기 설치점에 관한 정보만으로 많은 분기선을 포함하는 방사상계통을 해석하여야 하므로 해석에 어려움을 더한다.

배전계통에서의 고장점 검출 방법으로는 이와 같은 어려움 때문에 그다지 많은 연구가 수행되지는 않았으며 실제 배전계통의 고장점 검출은 현재 사용되지 않는 실정이며 고장점 검출은 육안에 의존하고 있는 실정이다. 그러나 최근에 반복추정기법을 이용하여 배전계통의 불평형을 고려한 방법이 제안[7]되었고 분기선을 고려하기 위하여 분기점에서 전압, 전류를 수정[8]하는 방법이 소개되는 등 연구가 시작되고 있다.

그리고 배전계통은 방사상 계통이므로 변전소에서 측정된 전압, 전류 데이터만을 이용하여 고장지점까지의 정확한 고장거리를 계산하더라도 배전계통의 방사상 특징으로 인하여

* 正 會 員 : 明知大學 電氣工學科 教授 · 工博
** 正 會 員 : 明知大學 電氣工學科 博士課程
*** 正 會 員 : P&C Tech. 研究員
接受日字 : 2002년 4월 19일
最終完了 : 2002년 12월 02일

실제 고장점을 포함한 같은 거리의 다수의 고장 예상 후보 위치가 발생하여 실제 고장점이 어디인지 그 진단과정을 필요로 한다.

본 논문에서는 최신의 반복추정기법과 전압전류 수정기법을 이용하여 정상상태에서 고장점까지의 거리를 계산하고 변전소에서 취득한 전류의 변화를 파악하여 여러 고장 예상지점 중 실제 고장지점을 찾아낼 수 있는 고장점 진단 알고리즘을 제시한다. 이 알고리즘은 배전계통에 설치된 보호기기의 종류에 따라 어떤 구간에서 고장이 발생하는가에 대한 전류변화의 추이가 다양하게 나타나고 고장이 제거된 후의 총 부하전류는 계통에서 절체된 구간의 부하만큼 감소한다는 것을 이용하였다.

사례연구의 대상시스템은 실제와 유사한 배전계통을 택하였으며 EMTP로 사용하여 고장 모의를 수행하였다. 이 데이터를 이용하여 고장거리를 계산하였으며 고장전류의 파형과 각 고장예상지점의 보호기기를 파악하여 실제 고장위치를 찾는 과정을 보였다.

2. 반복계산에 의한 고장거리 계산 알고리즘

배전선로 고장점 추정을 위하여 먼저 고장거리를 계산하여야 한다. 배전계통은 단상부하의 존재로 인하여 일반적으로 불평형 계통이므로 고장거리 계산을 위하여 전통적인 대칭좌표법을 사용하지 못한다. 다음과 같다.

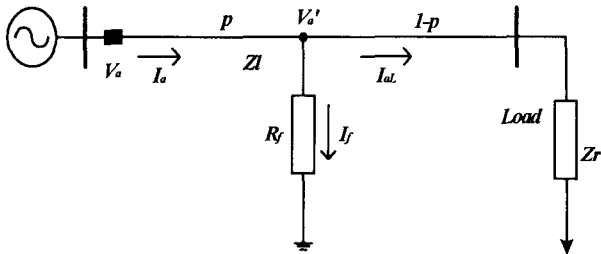


그림 1 1선 지락 고장
Fig. 1 Single-Phase to Ground Fault

최근에 발표된 반복계산에 의한 고장거리 계산알고리즘은 그림 1과 같은 불평형 배전계통의 1선지락 고장 시 단상도의 해석으로부터 나온다.

변전소 인출단에서 측정되는 전압은 3상일 경우 식 (1)과 같이 표현된다.

$$V_a = p \times (Zl_{aa}I_a + Zl_{ab}I_b + Zl_{ac}I_c) + I_f R_f \quad (1)$$

이와 같은 배전계통에서의 1선지락 고장시 일반적으로 고장저항이 개입된다. 고장 저항에 걸리는 전압이 부하단에 병렬로 걸리게 됨으로, 고장시 고장점 뒷단으로 부하전류가 흐른다. 그림에서 I_{aL} 은 고장시 부하전류로서 고장 발생동안의 이 부하전류는 고장 시 부하 전압이 낮아짐으로 인하여

고장 전 부하 전류와는 다른 값을 갖는다. 이 부하 전류를 구하기 위하여 먼저 고장점 전압을 추정하고 다시 이 값으로부터 부하정보를 이용하여 부하전류를 추정하는 과정을 반복한다. 반복 기법에 의한 고장거리계산 알고리즘은 다음과 같다.

- 1) 고장 발생 후 부하전류 I_{aL} 는 고장 발생 전 인입전류 I_a 와 같다고 추정한다.
- 2) 고장발생 후 인입 전류 I_a 에서 부하전류를 뺀으로써 고장 전류 I_f 를 구한다.

$$I_f = I_a - I_{aL} \quad (2)$$

- 3) 계산된 고장전류 값을 식 (1)에 대입하고, 실수부와 허수부로 분리한 후 R_f 를 소거하여 고장거리 p 를 구한다.

$$p = \frac{V_{ar}I_{fi} - V_{af}I_{fr}}{A \cdot I_{fi} - B \cdot I_{fr}} \quad (3)$$

$$A = Zl_{aar}I_{ar} - Zl_{aai}I_{ai} + Zl_{abr}I_{br} - Zl_{abi}I_{bi} + Zl_{acr}I_{cr} - Zl_{aci}I_{ci}$$

$$B = Zl_{aar}I_{ai} + Zl_{aai}I_{ar} + Zl_{abr}I_{bi} + Zl_{abi}I_{br} + Zl_{acr}I_{ci} + Zl_{aci}I_{cr}$$

- 4) 위에서 구해진 고장거리 p 와 식 (4)을 이용하여 고장점에서의 전압(V_f)을 구한다.

$$\begin{bmatrix} V'_a \\ V'_b \\ V'_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} - p \begin{bmatrix} Zl_{aa} & Zl_{ab} & Zl_{ac} \\ Zl_{ba} & Zl_{bb} & Zl_{bc} \\ Zl_{ca} & Zl_{cb} & Zl_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (4)$$

- 5) 고장점의 고장전압으로부터 고장 시 부하전류를 구한다.
- 6) 반복과정마다 계산된 고장거리의 변화가 허용오차 이내로 될 때까지 단계 2)로 돌아가 이 계산 과정을 반복한다.

여기서 고장점 뒷단으로 흐르는 부하전류를 구하는 방법은 부하에 대한 정보에 따라 여러 가지가 있다. 먼저 부하단에 대한 정보를 가장 많이 알고 있는 경우로 정 임피던스 부하이며 부하 등가 임피던스를 알고 있을 때 부하전류는 고장점의 전압을 알고 있다면 쉽게 구할 수 있다. 그리고 부하단에 대한 정보로서 부하가 정 임피던스 부하라는 사실만 알고 있을 때 부하전류는 다음과 같이 근사적으로 추정한다.

$$I_{aL} = (I_{anL} / V_{na}) \times V_{fa} \quad (3)$$

여기서 I_{anL} , V_{na} , V_{fa} 고장전의 부하전류와 고장전의 고장점 전압, 그리고 고장 후 고장점 전압이다.

그리고 부하에 대한 정보부족으로 임피던스 부하라는 가정조차도 사용할 수 없는 경우 식 (4)에 나타난 일반적인 부하 모델[9]을 사용하여 부하전류를 추정한다.

$$I_{aL} = I_{nr} \left| \frac{V_{fa}}{V_{na}} \right|^{n_p} + jI_{\cong} \left| \frac{V_{fa}}{V_{na}} \right|^{n_q} \quad (4)$$

여기서, n_p, n_q 는 부하 상수이며 부하의 동특성에 따라서 결정된다. 예를 들면 정 전류 부하는 $n_p = n_q = 0$ 의 값을 갖고, 정 전력 부하는 $n_p = n_q = -1$, 정 임피던스 부하는 $n_p = n_q = 1$ 의 값을 갖는다. 일반적인 배전계통에서는 이러한 부하들이 혼합되어 있으므로 $n_p = 0.5 \sim 1.8$, $n_q = 0.5 \sim 6$ 의 값을 갖는다[10].

그리고 이렇게 하여 구한 고장거리 p 가 1을 넘는다면 고장은 그 다음 구간이상에서 발생하였다는 것이 된다. 이때는 다음 구간의 전압과 전류를 구하여 위의 고장거리를 구하는 반복계산 알고리즘을 다시 사용해서 고장거리를 구해낸다. 그러나 배전계통은 방사상 계통이므로 부하에 전력을 공급하기 위하여 많은 단상, 3상 분기선 및 간선 그리고 부하 탭을 포함하고 있기 때문에 변전소 인출단의 전압과 전류를 측정할 수 있다하더라도, 그 다음 구간의 인입단에서의 전압과 전류를 추정하는 것이 필요하다. 다음구간의 인입단 전압은 이것은 고장시 변전소 인출단의 전압에서 선로 전압강하를 뺀 부분이 된다. 그리고 다음구간의 전류는 변전소 인출단전류에서 분기점으로 빠져 나가는 전류를 빼면 얻을 수 있다. 분기점으로 빠져나가는 전류는 분기점의 전압에서 분기점의 부하정보로부터 계산할 수 있다. 고장 구간과 그 구간에서 고장거리는 이와 같은 과정을 반복하여 고장거리 고장거리 p 가 1 이하가 나올 때까지 반복한다.

3. 고장점 진단 알고리즘

변전소에서 측정한 전압, 전류 데이터만을 이용하여 반복 계산에 의한 고장거리 계산 알고리즘으로 고장구간과 그 구간에서 고장점을 찾아 낸다고 하더라도 배전계통의 방사상 특징으로 인하여 실제 고장점을 포함한 다수의 고장 예상 후보위치가 발생하므로 실제 고장점이 어디인지 찾아내는 진단과정이 필요하다.

본 논문에서는 배전계통에서는 고장시 선로와 기기의 충격을 방지하고 공급신뢰도 향상과 유지를 위해서 적절하게 각종 보호기기가 설치된다. 배전선로에 설치되는 보호기기는 OCR, Recloser, Sectionalizer, Line Fuse, 같은 기기들이 있다[11, 12]. 각 보호기기는 고유한 동작 특성을 갖고며, 분기선에 대한 부하의 정보를 알 수 있다면 고장전후의 전류 파형으로 실제 고장점이 어디인지 유추하였다.

3.1 고장전류 파형 분석

우선 고장전류의 추이를 이용하여 고장위치를 판단하기 위해서 첫째로 고장시점부터 고장제거 시점까지의 전류값을

취득하고, 다음으로 여러 곳의 후보구간 각각의 보호기기 구성과 보호기기의 정정값을 이용하여 이 보호기기의 동작 특성과 측정되는 전류의 추이를 분석하면 어떤 보호기기가 동작하였는지를 유추할 수 있다. 그 예로 그림 2는 Recloser와 Sectionalizer가 직렬로 설치되어 2F2D로 설정되었을 경우 이 분기선에서 사고시 동작파형을 나타낸다.

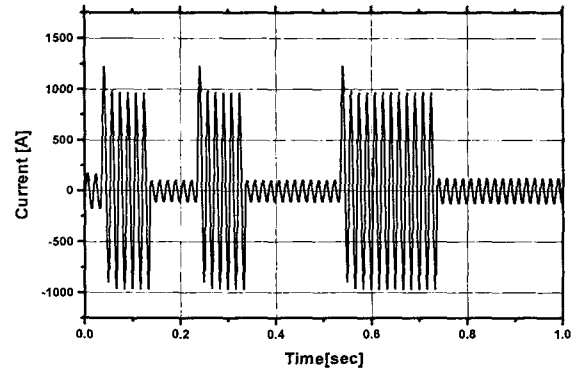


그림 2. Recloser - Sectionalizer 2F2D Setting시 동작파형
Fig. 2 Current waveform of Recloser - Sectionalizer 2F2D Setting

이 그림에서는 2번의 Reclosing 동작이 있으며, 2번의 Fast 동작과, 하나의 Delay 동작이 있다. 이와 같이 고장난 시점으로부터 고장이 제거된 시점까지 전류파형의 특징에서 설치된 보호기기들의 협조관계를 유추할 수 있다.

이를 위하여 먼저 배전계통에 설치된 기기의 구성과 동작 특성을 데이터베이스로 저장하고 실제 사고시 전류파형의 추이와 데이터 베이스의 정보를 비교하여 고장루트를 판단한다.

3.1.1 기기구성 및 파형특성

계통을 구성하는 보호기기의 구성특징은 보호기기의 조합에 구성에 따라 8가지 type으로 분류되고 각 type의 보호기기 조합 및 그 동작 특징은 표1과 같다.

3.2 부하전류 변화 분석

이와 같이 고장시 변전소에서 측정되는 전류파형 분석을 통하여 어떤 보호기기가 동작하였는지를 추론할 수 있다. 즉, 변전소로부터 고장 예상 후보 구간사이에 설치된 보호기기들의 조합에 의한 type 별 보호기기 동작특성과 측정된 전류파형 분석결과가 일치하면 실제 고장위치로 판단할 수 있다. 그러나 같은 보호기기의 조합으로 된 루트가 여러 곳일 경우, 고장 전류 파형 분석에 의해서도 고장 후보 구간이 여러 개가 될 가능성이 있다. 이 경우 남은 후보구간들 중 실제 고장위치를 결정하기 위하여 고장 전과 고장제거 후의 부하전류 변화와 보호기기가 동작하였을 경우 각 상 전류의 RMS값으로 탈락되는 부하량을 비교하여 실제 고장위치를 진단할 수 있다[13].

표 1 보호기기 구성에 따른 동작 특징

Table 1 Pattern Identification Rule

보호기기	Rule
OCR	① OCR의 Reclosing Setting값과 실제 Reclosing 횟수는 동일. ② Fast 동작 횟수는 (Reclosing Setting + 1) 이다.
Rec	① Recloser의 Reclosing Setting값과 실제 Reclosing 횟수는 같다. ② Recloser의 Fast동작 횟수와 실제 Fast 동작 횟수는 동일, Recloser의 Delay동작 횟수와 실제 Delay동작 횟수는 동일.
Rec - Rec	① Recloser의 Reclosing Setting값과 실제 Reclosing 횟수와 동일하다. ② Recloser의 Fast동작 횟수와 실제 Fast 동작 비교, Recloser의 Delay동작 횟수와 실제 Delay동작 횟수는 같다.
OCR - Fuse	① Reclosing이 없다. ② 1번의 Fast동작만 있다.
Rec - Fuse	① Reclosing 동작이 Fast동작 횟수와 동일하다. ② Fast동작횟수는 (Recloser 순시 Setting + 1)과 같다.
Fuse - Fuse	① Reclosing 이 없다. ② 1번의 Fast동작만 있다.
Rec - Sec	① Reclosing횟수는 (Sectionalizer count 횟수 - 1) 이다. ② Fast동작이 Fast동작 횟수와 동일하다. ③ Delay동작횟수는 (Sectionalizer count횟수-Recloser Fast동작횟수)이다.
Rec - Sec - Fuse	① Reclosing이 Recloser Fast동작횟수와 동일하다. ② Fast동작횟수는 (Recloser Fast동작횟수 + 1)이다.

Rec : Recloser, Sec : Sectionalizer

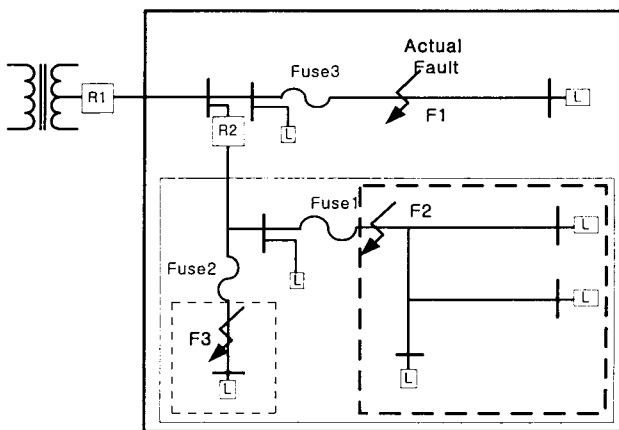


그림 3 Recloser와 Fuse동작시 정전구간
Fig. 3 Outage Zone of operating Recloser and Fuse

- — — — — : Fuse1 동작시 정전구간(구간1)
- : Fuse2 동작시 정전구간(구간2)
- : R1 동작시 정전구간(구간3)
- : R2 동작시 정전구간(구간4)

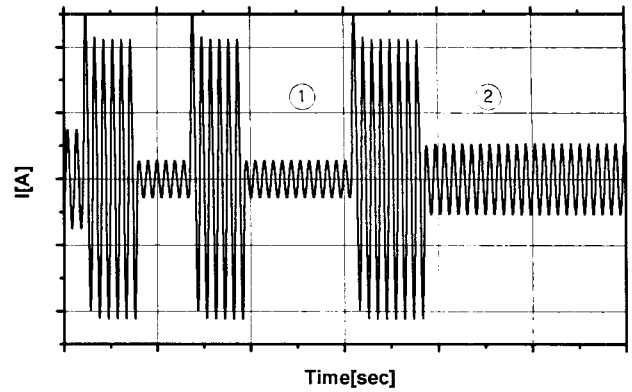


그림 4 F1 지점 사고시
Fig. 4 Current waveform of F1 Fault

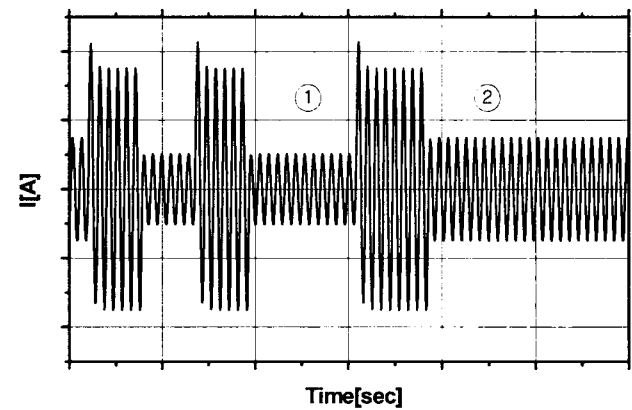


그림 5 F2 지점 사고시
Fig. 5 Current waveform of F2 Fault

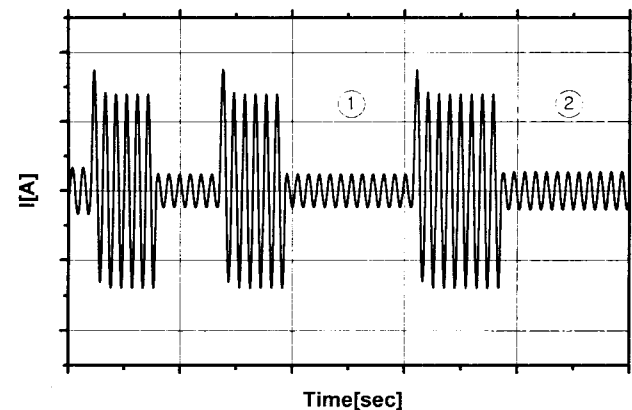


그림 6 F3 지점 사고시
Fig. 6 Current waveform of F3 Fault

그림 3과 같이 구성된 계통에서 F1에서 사고가 발생하게 되면 고장거리 계산 알고리즘에 의하여 사고예상지점이 F1, F2, F3의 세가지 후보가 계산된다. 그리고 보호기기의

조합에 의한 파형은 그림 4,5,6과 같으며 모두 두 번의 Fast 동작과 한번의 Delay 동작을 보인다. 그러나 배전계통에서 발생하는 사고의 약80%는 일시적인 사고이기 때문에 반드시 재폐로를 행하게 된다. 이로 인하여 배전계통의 사고 시 Recloser가 동작하고 이때 전류는 Recloser의 뒷단 부하를 제외한 부분에만 전류가 공급되게 됨으로 인하여 건전 시의 부하전류와는 그 차이가 있다. 즉 각 그림의 ①과 ②와 같은 동작한 보호기기 뒷단의 부하의 크기에 따라 전류값의 차이를 보인다. 그림 4,5,6의 ①이 Recloser가 동작하여 뒷단의 부하만큼 전류가 감소하고 나머지에 공급하는 전류만 정상되게 되어 고장전보다 전류값이 줄어든다. 그리고 ②는 fuse가 동작하여 고장을 제거하였을 때의 파형이므로 이는 fuse가 뒷단의 부하만큼 전류가 감소한 양이다. 본 논문에서는 이를 이용하여 실제 고장위치를 찾아내었다.

3.2.1 Reclosing시의 부하전류 변화

그림 3의 모의 계통에서 사고시 a상 전류 파형이 그림 4,5와 같이 측정되었을 경우 Recloser R1이 동작했을 경우는 구간3에 정전이 발생하게 되고 R2가 동작했을 경우 구간4에 정전이 발생하게 되어 Reclosing시의 부하전류는 고장전 부하전류와 큰 차이를 나타내게 된다. 이를 이용하여 F1지점의 사고와 F2, F3지점의 사고를 구별해낼 수 있다. 그 방법은 고장전과 고장이 발생하여 보호기기가 동작한 이후 상전류의 RMS값을 이용하여 다중의 후보구간들 중 실제 고장 위치를 진단하게 된다.

3.2.2 Lockout후의 부하전류 변화

Fuse가 동작하여 계통에서 최종적으로 고장이 제거되는 지점을 Lockout이라고 하여 이때는 Fuse 설치점 이하의 부하가 정전구간이 되고, 그 만큼의 부하전류가 감소한다. 그림 4에서 Fuse1이 동작하게 되면 구간1에 정전이 발생하게 되고 Fuse2가 동작하여 계통을 보호하게 되면 구간2에 전원 공급이 중단되게 됨으로 F1지점의 사고와 F2, F3지점의 사고를 판별할 수 있다.

3.3 고장진단 전문가 시스템의 구성

본 논문에서는 배전계통의 고장점 추정을 하기 위하여 전문가 시스템을 구성하였다[14]. 전문가 시스템은 인간 전문가의 역할을 대체 수행하는 기능을 지닌 컴퓨터 프로그램을 말하며 중요 요소로는 Inference Engine, Rule Base로 구성된다. Rule Base는 문제 해결에 사용될 전문가 영역 지식을 저장하는 곳이며, 여기서는 보호기기의 조합에 따른 동작 특성을 Rule 로 만들어 저장하였다. Inference Engine은 Rule Base에 들어 있는 Rule 을 이용하여 결론을 추론하는 부분이며 C++로 구현하였다.

3.3.1 Rule Base

고장 위치 진단 전문가 시스템에서 Rule Base의 조건부칙: 변전소로부터의 측정전류 분석의 결과인 재폐로, 순시,

지연 등의 보호기기 동작결과와 보호기기 조합의 type 과 구성된 보호기기들의 정정값, 변전소에서 측정된 전류 파형의 분석결과와 비교이며 결론부는 그 위치가 실제 고장구간인가의 여부를 나타낸다.

예를 들어 배전계통에서 고장위치가 Recloser에 의해 보호받는 구간이라면, 고장위치 타입은 OCR-Recloser Type이 되고, 변전소에서 측정되는 전류 파형은 Recloser의 정정값에 따라, Reclosing동작, Fast동작, Delay동작의 형태를 보일 것이다.

이 경우의 룰의 형태가 다음의 예1)에서 보여진다.

예1) Rule 2

IF The Fault Region Type is OCR-Recloser Type.

AND The number of Reclosing is same as the number of Recloser Reclosing Setting.

AND The number of Fast Operation is same as the number of Recloser Fast Sequence Setting.

AND The number of Delay Operation is same as the number of Recloser Delay Sequence Setting.

THEN It is a Fault Zone.

표1의 보호기기 구성에 따른 동작특성을 위 예와 같이 룰로 표현하여 모두 Rule 베이스에 저장하였다.

3.3.2 고장점 추정 과정

본 논문에서 사용한 고장진단 전문가 시스템의 추론엔진은 밝혀진 사실을 이용하여 결론을 도출해 내기에 적합한 전방향 추론을 선택하였다. 먼저 배전계통에 고장이 발생하면 고장점 표징에 의하여 고장거리를 계산하고 변전소로부터 고장 후보 구간사이의 계통 정보로 리스트를 구성한다. 이 리스트는 보호기기 종류, 그것의 정정값, 구간별 부하전류 등으로 구성된다. 진단의 목적으로 사용되는 이 리스트는 분기선로로 인하여 다수가 존재하게 된다. 예상 후보 구간이 결정되면, 변전소로부터 각 예상후보구간의 고장위치까지 보호기기들의 구성을 파악하여, 예상 구간별 고장위치 타입을 정하고, 각 리스트별 구간 부하전류와 보호기기들의 정정값을 비교하고, 변전소에서 측정되어 저장된 전류의 샘플링 데이터를 분석하여 재폐로 동작, 순시동작, 지연동작등의 보호기기가 동작한 상태를 결정한 후, 이를 저장하여 후보구간의 보호기기 구성과 정정치를 비교·분석하여 각 후보구간이 실제 고장구간인가의 진위여부를 결정한다.

4. 사례 연구

본 논문에서는 배전계통의 1선 지락사고 시 반복 계산에 의한 방법으로 고장거리를 구하여 다수의 후보구간이 나오는 배전계통에 제한한 진단 알고리즘을 적용하여 그 타당성을 검증하였다. 사례연구는 22.9[kV] 배전계통을 대상으로 하였으며 사고모의는 EMTP (Electromagnetic Transients Program)를 이용하였다.

데이터 취득을 위한 샘플링 주파수로는 1920Hz, aliasing 에러를 방지하기 위해 960Hz 차단 주파수 특성을 갖는 2차

Butter-worth 저역 통과 필터를 사용하였다. 그리고 전압, 전류 순시 데이터로부터 페이지를 추출하기 위하여 한 주기 데이터 윈도우를 사용하는 DFT를 사용하였다.

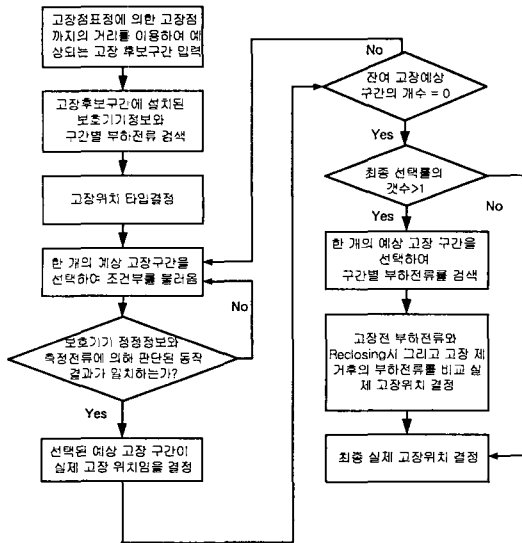


그림 7 추론과정 flow chart
Fig. 7 Inference Engine flow chart

다음 그림 8은 Recloser와 Fuse의 협조에 의하여 보호되는 구간에 고장이 발생한 경우의 모의 계통도이며 Sectionalizer가 설치되어 있지 않다.

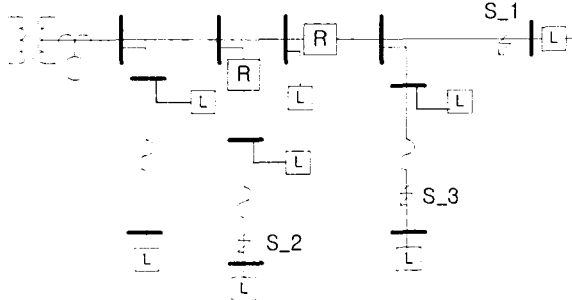


그림 8 모의 계통도
Fig. 8 Example distribution system



고장을 모의한 실제 위치는 그림의 Recloser, Fuse의 협조 동작에 의하여 보호되는 구간(Recloser-Fuse Type)이다. 그림 8과 같이 반복계산에 의한 고장점 표정에 의해 고장지점을 추정한 결과 고장 후보구간이 세 곳으로 결정되었다.

그 후보 리스트의 고장위치 타입은 S_1 : Recloer, S_2 : Recloser-Fuse, S_3 : Recloser-Fuse Type이었다.

각 리스트에서 보호기기의 정정치와 예상되는 동작은 다음의 표 2와 같다.

표 2 각 고장위치 타입의 정정치 및 예상 동작
Table 2 Expected operation for each fault candidat

예상고장 구간	S_1	S_2	S_3
설치된 보호기기	Recloser	Recloser Fuse	Recloser Fuse
정정치	Recloser : 2F2D	Recloser : 2F2D	Recloser : 2F2D
예상동작	재폐로 3회 fast동작 2회 delay동작 2회	재폐로 2회 fast동작 3회	재폐로 2회 fast동작 3회

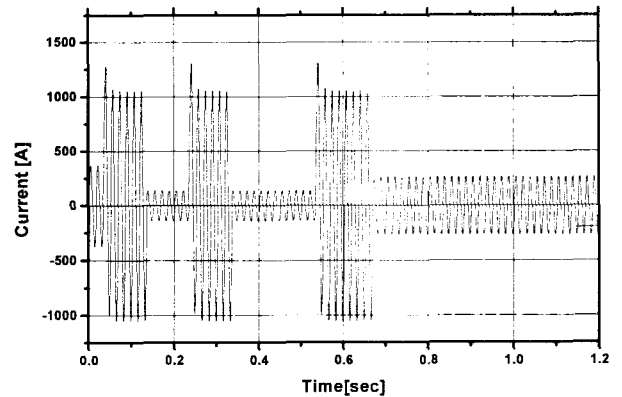


그림 9 고장전류 파형
Fig. 9 Fault current waveform

그림 9는 a상 1선지락 고장에 대한 전압, 전류 파형이다. 그림 9에서 보여지는 바와 같이, 추론엔진의 전류파형 분석 모듈에 의한 분석 결과는 다음과 같이 된다.

- 재폐로동작 : 2회
- Fast동작 : 3회

여기서 측정전류 데이터 분석결과가 섹션 S_2와 섹션 S_3로 두 개의 구간이 고장 구간으로 결정되므로 고장 전과 고장제거 후의 부하전류의 변화를 이용한 진단에 들어간다.

표 3 부하전류 분석결과
Table 3 Expected load current

고장 전 총 부하 전류	168.17 [A]
고장제거 후 부하 전류	120.02 [A]
섹션 S_3 이하의 예상부하전류	153.8[A]
섹션 S_2 이하의 예상부하전류	121.40A]

표 3에서 구간별 부하전류의 분석 결과, 섹션 S_2의 부하 전류의 크기가 고장제거 후 부하전류와 근사하므로 최종 실제 고장위치를 섹션 S_2로 진단하게 된다.

6. 결 론

단상부하 존재등으로 인하여 일반적인 배전계통은 불평형 계통이므로 고장해석에 있어 전통적인 대칭좌표법은 사용할 수가 없다. 본 논문에서는 방사상의 불평형 배전계통에서 1 선지락사고가 일어났을 때 반복추정 기법을 사용하여 고장 거리를 계산하였으며 방사상 계통으로 인하여 다수의 고장 후보구간이 존재하였을 때 실제 고장위치가 어디인지를 진단하는 배전계통 고장점 추정 시스템을 개발하였다. 본 논문에서는 실제 고장지점 진단을 위해 새로운 2가지 방법 즉, 고장전류 파형을 이용하는 방법과 보호기기 동작시 부하전류 변화를 이용하여 고장위치 진단 방안을 이용한 전문가 시스템을 개발하였다. 개발된 시스템의 성능을 검증하기 위하여 실제 배전 계통을 기반으로 한 모의 계통에 대한 사례 연구를 EMTP를 사용하여 수행하였으며 만족할 만한 고장점 추정결과를 보였다. 현재는 배전계통의 고장위치 찾는 데 계통 운영자의 경험적 지식에 의존하므로 본 논문에서 개발된 시스템을 사용하면 신속, 정확성 측면에서 큰 효과를 거둘 수 있으리라 기대된다. 추후의 연구과제는 실시간으로 변화하는 배전계통 부하 특성으로 인하여 정확한 부하에 대한 정보가 부족하므로 배전계통 고장점 추정에서 이로 인한 문제점을 해결하는 것이라 사료된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부 및 한국과학재단의 ERC 프로그램을 통한 지원으로 이루어졌으며 이에 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

- [1] Jun Zhu, David L. Lubkeman, Adly A. Girgis, "Automated Fault Location And Fault Diagnosis On Electric Power Distribution Feeders", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 12, April 1997
- [2] P. Jarventausta, P. Verho, J. Partanen, "Using Fuzzy Sets To Model The Uncertainty In The Fault Location Process Of Distribution Networks" IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 9, No. 2, April 1994
- [3] G. B. Ancell, N. C. Pahalawaththa, "Maximum Likelihood Estimation of Fault Location on Transmission Lines Using Travelling Waves", IEEE Transactions on PWRD, Vol. 9, No. 9, 1994, pp. 680-689
- [4] T. Takagi, Y. Yamakoshi, J. Baba, K. Uemura, T. Sakaguchi, " A New Algorithm of an Accurate Fault Location for EHV/UHV Transmission Lines : Part I -Fourier Transform Method", IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-100, No. 3, 1988, pp. 1316-1323
- [5] Yong-Jin Ahn, Myeon-Song Choi, Sang-Hee Kang, Seung-Jae Lee, "An Accurate Fault Location Algorithm For Double-Circuit Transmission Systems", Power Engineering Society Summer Meeting, 2000. IEEE, Volume: 3 , 2000 pp 1344-1349
- [6] J. Lewis Blackburn, "Symmetrical Components for Power Systems Engineering", New York, Marcel Dekker, 1993.
- [7] Jun Zhu, Lubkeman, D.L., Girgis, A.A., "Automated fault location and diagnosis on electric power distribution feeders", Power Delivery, IEEE Transactions on Volume: 12 2 , April 1997, Page(s): 801-809
- [8] R. Das, M.S. Sachdev, T.S, Sidhu, "A Fault Locator for Radial Sub-transmission and Distribution Lines", Power Engineering Society Summer Meeting, 2000. IEEE Volume: 1 , 2000 , Page(s): 443-448
- [9] Srinivasan, K.; St.-Jacques, A. "A new fault location algorithm for radial transmission lines with loads", Power Delivery, IEEE Transactions on Volume: 4 3 , July 1989 , Page(s): 1676-1682
- [10] P. Kundur, "Power System Stability and Control", McGraw-Hill, 1994, Page(s): 271-275
- [11] 한국전력공사, 배전계통 운영반 교재Ⅱ
- [12] "Electrical Distribution System Protection", Third Edition, Cooper Power System, 1990.
- [13] Burke, James J. "Power Distribution Engineering", Marcel Dekker, Inc. 1994.
- [14] John Durkin, "Expert Systems-Design And Development", Macmillan Publishing Company, INC. 1994.

저 자 소 개



최 면 승 (崔 勉 松)

1967년 4월생. 1989년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1991년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동 전기공학과 졸업(공학박사). 1995년 Pennsylvania State Univ. 방문 연구원. 1992년 기초 전력공학 공동연구소 전임연구원. 현재

명지대 학교 공대 전기정보제어공학부 부교수.

Tel : 031-336-6367, Fax : 031-321-0271

E-mail : mschoi@mju.ac.kr



진 보 건 (陳 保 建)

1976년 9월 28일 생. 2000년 명지대 공대 전기전자공학부 졸업. 2002년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.

Tel : 031-335-2068

Fax : 031-330-6816

E-Mail : sinato@mju.ac.kr



이 승 재 (李 承 宰)

1955년 11월 30일생. 1979년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1981년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1988년 Univ. of Washington 전기공학과 졸업(공학박사). 1994년 Univ. of Washington 교환교수. 현재 명지대 공대 전기정보제어공학부 교수.

Tel : 031-336-6362, Fax : 031-330-6816

E-mail : sjlee@mju.ac.kr



현 승 호 (玄 升 鎬)

1962년 10월생. 1991년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동 전기공학과 졸업(공학박사). 1996년 Pennsylvania State Univ. 방문 연구원. 1996년 2002년 한국철도기술연구원 책임연구원, 시스템개발팀장. 현재 명지대학교 공대 전기정보제어공학부 연구교수. Tel :

031-330-6814, Fax : 031-321-0271,

E-mail : takcitez@mju.ac.kr



이 덕 수 (李 德 洙)

1977년 11월 19일생. 2000년 명지대 공대 전기공학과 졸업, 2002년 명지대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 P&C Tech. 연구원.

Tel : 031-455-5791,

Fax : 031-456-7923,

E-mail : suness@hanmail.net