

전류 파형을 이용한 배전계통에서의 고장점 진단 전문가 시스템

진보건* 이덕수 이승재 최면승 강상희
 명지대학교

안복신 윤남선
 T&C Tech

An Expert System Using Current Waveform for Dignosis of
 Fault Location on Electric Power Distribution System

B. G. Jin* D. S. Lee S. J. Lee M.S. Choi S. H Kang
 Myongji University

B. S. Ahn N. S. Yoon
 P&C Tech

Abstract - Identifying the fault location has to deal with multiple possible candidates. It presents a new technique to diagnosis a fault region. The proposed diagnosis scheme identifies accurately the location based on the protective device operations and load current change at the substation. An Expert system is presented using these facts.

까지의 전류변화의 추이가 다양하게 나타난다. 또한 고장이 제거된 후의 총 부하전류는 계통에서 절체된 구간 의 부하만큼 감소한다는 것을 알 수 있다.[5]

이 사실들로부터 본 논문에서는 다중의 고장 예상 구간에서 실제 고장위치를 추정할 수 있는 룰베이스를 구성하고, 이 룰베이스로부터 실제 고장위치를 추론하는 전문가 시스템을 제시하였다.

1. 서 론

배전계통은 도심지, 염해지, 산림지 등의 복잡하고 장애물이 많은 지역을 경유하기 때문에 자동차의 추돌이나 수목접촉 등으로 인한 잦은 정전 사고를 일으키기 때문에 계통을 안정적으로 운영하고 전력 공급서비스의 질을 높이기 위해서는 배전계통에 발생한 고장을 신속하게 제거하고, 그 고장으로 인해 정전이된 수용가에 정상적인 전력 공급이 이루어지도록 신속한 후속 조치가 이루어져야 한다. 이러한 일련의 과정이 과거에는 상당히 비효율적으로 전개되었으며, 이것은 또한 전력회사의 신뢰도를 저하시키는 요인이 되기도 하였다.

2. 고장파형 분석

배전계통에서는 고장시 선로와 기기의 충격을 방지하고 공급신뢰도 향상과 유지를 위해서 적절하게 각종 보호기기를 설치한다.

우선 고장전류의 추이를 이용하여 고장위치를 판단하기 위해서 첫째로 고장시점부터 고장제거시점까지의 전류값을 알아야 하고, 다음으로 여러곳의 후보구간 각각의 보호기기 구성과 보호기기의 정정값을 알아야만 하고 배전선로에 설치되는 보호기기에는 OCR, Recloser, Sectionalizer, Line Fuse, 같은 기기들이 있다. 각 보호기기는 고유한 동작 특성을 갖는다. 이 동작 특성과 측정되는 전류의 추이를 분석하면 어떤 보호기기가 동작하였는지를 유추할 수 있다.

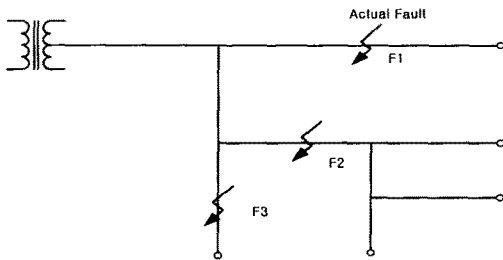


그림 1. 고장점 표정으로 계산된 고장거리에 의한 예상 고장위치

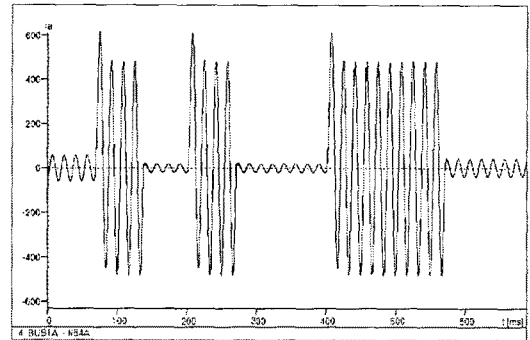


그림 2. Recloser -Sectionalizer 2F2D Setting시 동작파형

배전 계통은 방사상 계통이므로 변전소에서 측정된 전압, 전류 데이터만을 이용한다면, 그림 1에서와 같이 실제 고장점을 포함한 다수의 고장 예상 후보위치가 발생하고, 각각의 후보구간은 약간의 에러를 포함하고 있어 실제 고장위치를 찾아내는 과정을 어렵게 만들며, 이로 인하여 고장 복구시 시간지연을 초래하게 된다.[1, 2]

고장난 시점으로부터 고장이 제거된시점까지 전류파형의 추이를 이용하여 실제 사고지점을 찾아내기 위해서는 우선 각 구간이 어떤 보호기기들의 협조에 의해 보호받는 구간인가에 따라 고장파형이 특색있게 나타나게 된다.

본 논문에서는, 입력 데이터를 이용하여 계통을 구성하고, 예상되는 Path를 찾아 각 Path에 대해 고장점을 추정한다. 또한, 변전소에서 측정된 전압, 전류 데이터를 각 노드에서 업데이트 시킴으로써, 부하의 영향을 배제하는 알고리즘을 제시한다.

이를 위해서 우선 고장 시점과 고장제거 시점을 파악해 그 데이터를 추출해 내고 추출된 파형에서 몇번의 Reclosing동작, Fast동작, Delay동작을 하는지 판단한다.

배전계통에는 선로와 기기의 충격을 최소화하고, 공급신뢰도 향상과 유지를 위하여 과전류 계전기, Recloser, Sectionalizer, Fuse등의 보호기기들이 설치되고[3, 4], 어떤 보호기기에 의해 보호되는 구간에서 고장이 발생하는가에 따라 고장 발생시점으로부터 고장제거 시점

예를 들어 그림 2와 같은 경우 사고가 발생하게 되면 Fast동작은 2번, Delay동작은 1번 그리고 Reclosing 횟수는 2번이 된다. 이러한 기기의 구성과 동작특성을 데이터 베이스화하여 저장하고 실제 사고시 사고 파형의

추이와 데이터 베이스의 정보를 비교하여 판단을 내리게 된다.

일반적으로 OCR만으로 보호되는 구간에서 사고가 발생하게 되면 OCR의 재폐로 동작을 이용하는가 이용하지 않는가에 따라서 파형은 조금 달라지게 되고, Recloser로 보호되는 구간에서는 Setting에 따라서 달라지지만 Setting Sequence에 따른 동일한 전류파형이 보여지게 된다.

2.1.1 기기구성 및 파형특성

계통을 구성하는 기기의 구성에 따라 8가지 type으로 분류하게 되고 각 type의 기기 구성 및 Rule은 다음과 같다.

표 1. 보호기기 구성에 따른 Rule

보호기기	Rule
OCR	① OCR의 Reclosing Setting값과 실제 Reclosing 횟수 비교 ② Fast 동작이 (Reclosing Setting + 1)
OCR - Rec	① Recloser의 Reclosing Setting값과 실제 Reclosing 횟수 비교 ② Recloser의 Fast동작 횟수와 실제 Fast동작 비교, Recloser의 Delay동작 횟수와 실제 Delay동작 비교
Rec - Rec	① Recloser의 Reclosing Setting값과 실제 Reclosing 횟수 비교 ② Recloser의 Fast동작 횟수와 실제 Fast동작 비교, Recloser의 Delay동작 횟수와 실제 Delay동작 비교
OCR - Fuse	① No Reclosing ② 1번의 Fast동작
Rec - Fuse	① Reclosing 동작이 Fast동작 횟수와 동일 ② Fast동작이 (Recloser 순시 Setting + 1)
Fuse - Fuse	① No Reclosing ② 1번의 Fast동작
Rec - Sec	① Reclosing이 (Sectionalizer count 횟수 - 1) ② Fast동작이 Fast동작 횟수와 동일 ③ Delay동작이 (Sectionalizer count횟수 - Recloser Fast동작횟수)
Rec - Sec - Fuse	① Reclosing이 Recloser Fast동작횟수와 동일 ② Fast동작이 (Recloser Fast동작횟수 + 1)

Rec : Recloser, Sec : Sectionalizer

2.2 부하전류 변화에 따른 고장위치 진단

변전소에서 측정되는 전류 파형을 분석하면 어떤 보호 기기가 동작하였는지를 추론할 수 있고, 변전소로부터 고장 예상 후보구간사이에 설치된 보호기기들의 조합으로 고장위치별 타입을 결정할 수 있다. 즉, 후보구간들의 보호기기의 구성에 의해 결정된 고장위치 타입과 측정전류 파형의 분석결과가 일치하면 실제 고장위치로 판단할 수 있는 것이다. 그러나 이 결과가 여전히 다중의 위치로 남겨질 경우 그 후보구간들 중 실제 고장위치를 결정하기 위하여 고장 전과 고장제거 후의 부하전류 변

화를 통하여 실제 고장위치를 진단하게 된다.

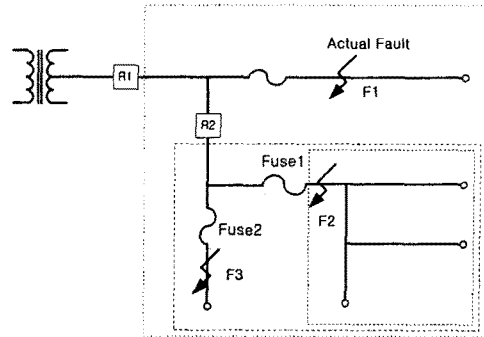


그림 3. Recloser와 Fuse동작시 정전구간

- : Fuse1 동작시 정전구간(Zone1)
- : Fuse2 동작시 정전구간(Zone2)
- : R1 동작시 정전구간(Zone3)
- : R2 동작시 정전구간(Zone4)

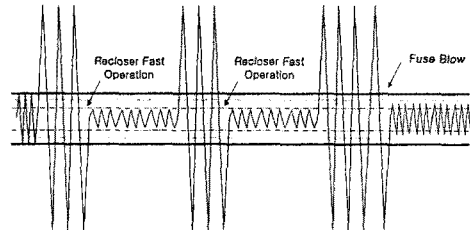


그림 4. 재폐로시 부하전류 변화

- : 정상시 부하전류
- : Recloser 동작시 부하전류
- : Fuse 동작후 부하전류

그림 3이 구성된 계통에서 사고가 발생하게 되면 F1, F2, F3의 사고 예상지점 모두가 같은 파형을 보이게 되지만 보호기기 뒷단의 부하전류값이 차이가 나게 되므로 이를 이용하여 실제 고장위치를 찾아낼 수 있는 것이다.

2.2.1 Reclosing시의 부하전류 변화

배전계통에서 발생하는 사고의 약80%는 일시적인 사고이기 때문에 반드시 재폐로를 행하게 된다. 그로 인하여 배전계통의 사고시 Recloser가 동작하고 이때 전류는 Recloser의 뒷단 부하를 제외한 부분에만 전류가 공급되게 됨으로 인하여 전전시의 부하전류와는 그 차이를 보이게 된다. 그림 3의 모의 계통에서 사고시 a상 전류 파형이 그림4와 같이 측정되었을 경우 Recloser R1이 동작했을 경우는 Zone3구간에 정전이 발생하게 되어 Reclosing시의 부하전류는 고장전 부하전류와 큰 차이를 나타내게 된다. 이를 이용하면 F1지점의 사고와 F2, F3지점의 사고를 구별해낼 수 있다. 이때 이용되는 값은 각 상전류값의 RMS값을 이용하여 고장 전 부하 전류값과의 차를 이용하여 다중의 후보구간들 중 실제 고장위치를 진단하게 된다.

2.2.2 Lockout후의 부하전류 변화

Recloser가 Fuse 설치점 이하의 부하가 정전구간이 되고, 그 만큼의 부하전류가 감소한다는 것을 알 수 있다. 그림 4에서 Fuse1이 동작하게 되면 Zone1에 정전이 발생하게 되고 Fuse2가 동작하여 계통을 보호하게 되면 Zone2에 전원 공급이 중단되게 됨으로 F2점과 F3점의 실제 고장 사실을 유추할 수 있다.

3 전문가 시스템의 구성

전문가 시스템은 인간 전문가의 역할을 대체 수행하는 기능을 지닌 컴퓨터 프로그램을 말한다. 전문가 시스템은 기본적으로 Inference Engine, Rule Base, Working Memory로 구성된다. Rule Base는 문제 해결에 사용될 전문가 영역 지식을 저장하는 곳이며, Working Memory는 시스템의 사용자로부터 입력된 정보와 추론 중간 결과를 저장하는 부분이다. Inference Engine은 Rule Base에 들어 있는 룰을 이용하여 결론을 추론하는 부분이다. 이밖에 사용자와 시스템을 연결하는 사용자 인터페이스를 요구한다.

3.1 Rule Base 설계

고장위치 진단을 위한 전문가 시스템은 Rule Base를 기반으로 하여 설계하였다.

고장 위치 진단 시스템에서 Rule Base의 조건부는 변전소로부터 측정전류 분석의 결과인 재폐로, 순시, 지연 등의 보호기기 동작결과와 보호기기 구성에 의한 고장위치 타입이 된다. 결론부는 해당 고장위치 타입을 결정하는 보호기기들의 정정치와 변전소에서 측정된 전류 파형의 분석결과와의 비교를 통하여, 그 위치가 실제 고장구간인가의 여부를 나타낸다.

예를 들어 고장위치상 Recloser에 의해 보호받는 구간이라면, 고장위치 타입은 OCR-Recloser Type이 되고, 변전소에서 측정되는 전류 파형은 Recloser의 정정치에 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.

표1에서 정의한 룰을 위 예와같은 표현을 이용하여 Rule 베이스에 저장하였다.

3.2 Inference Engine 설계

본 논문에서 제시한 시스템의 추론엔진은 전방향 추론을 선택하고 있다. 그 추론 과정은 배전계통에 고장이 발생하면 고장점 표정에 의하여 고장거리가 계산되어지고 추론엔진은 변전소로부터 고장 후보구간사이의 계통 정보로 리스트를 구성한다. 이 리스트는 보호기기종류, 그것의 정정치, 구간별 부하전류 등으로 구성된다. 진단의 목적으로 사용되는 이 리스트는 분기선로로 인하여 다수가 존재하게 된다. 예상 후보 구간이 결정되면, 변전소로부터 각 고장위치까지의 보호기기들의 구성을 파악하여, 예상 구간별 고장위치 타입을 정하고, 각 리스트별 구간 부하전류와 보호기기들의 정정치를 검색하고, 측정전류 데이터를 분석하여 보호기기의 동작결과를 판

단하여, 이를 각 고장위치 타입별 보호기기의 정정치를 비교하여, 그 위치마다의 실제 고장위치인가의 진위여부를 결정하게 된다.

추론엔진은 또한 변전소에서 측정되어 저장된 전류의 샘플링 데이터를 분석하여 재폐로 동작, 순시동작, 지연 동작등의 보호기기가 동작한 상태를 결정한 후, 이를 저장하여 후보구간 리스트의 보호기기 정정치와 비교 분석하게 된다. 이러한 데이터들이 확보되면 추론엔진은 후보구간의 각 리스트의 고장타입을 결정한다. 각 리스트는 고장타입을 부여받게 되고, 변전소에서 측정된 전류 데이터의 분석결과 즉, 보호기기의 동작 정보가 부여받은 고장타입과 일치하는 지를 판단하게 된다. 다시말하면 각 리스트의 고장위치타입에서 보호기기의 정정치에 의한 재폐로, 순시, 지연 등의 예상 동작과 실제 동작이 일치하는 가를 판단하게 되는 것이다.

그림 5는 추론과정에 대한 흐름도이다.

4 사례연구

추론과정 flow chart

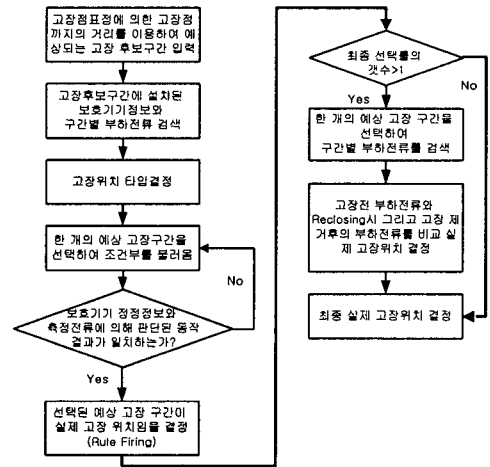


그림 5. Inference Engine flow chart

다음 그림 6은 Recloser와 Fuse의 협조에 의하여 보호되는 구간에 고장이 발생한 경우의 모의 계통도이며 Sectionalizer가 설치되어 있지 않다.

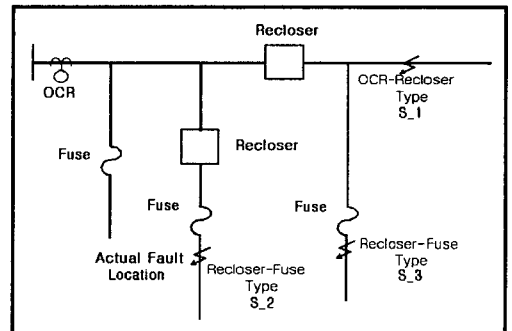


그림 6. 모의 계통도

고장을 모의한 실제 위치는 그림의 Recloser, Fuse의 협조 동작에 의하여 보호되는 구간(Recloser-Fuse Type)이다. 그림 6과 같이 고장점 표정에 의해 계산된 거리로 고장 후보구간이 세 곳으로 결정되었다. 그 후보

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

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

표 2. 각 고장위치 타입의 정정치 및 예상 동작

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

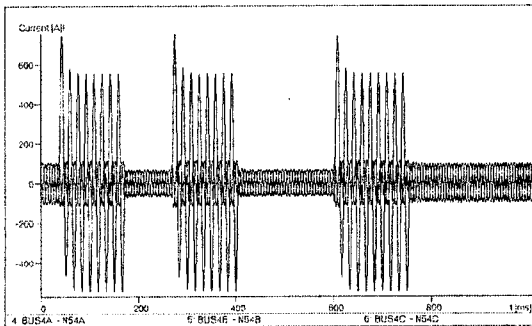


그림 7. 고장전류 파형

그림 7는 a상 1선지락 고장에 대한 전압, 전류 파형이다. 그림 7에서 보여지는 바와 같이, 추론엔진의 전류 파형 분석모듈에 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

고장 전 총 부하 전류	71.03 [A]
고장제거 후 총 부하 전류	60.23 [A]
부하전류 감소량	71.03 - 60.23 = 10.8 [A]
섹션 S_3 이하의 부하	9.1 [A]
섹션 S_2 이하의 부하	9.8 [A]

표 3에서 구간별 부하전류의 분석 결과, 섹션 S_2의 부하전류의 크기가 총 부하전류 감소량과 근사하므로 최종 실제 고장위치를 섹션 S_2로 진단하게 된다.

3. 결 론

본 논문에서 제안한 2가지 방법 즉, 고장전류 추이를 이용하는 방법과 부하전류 변화를 이용하여 고장위치 진단 방안을 이용한 전문가 시스템은 실제 고장위치를 결정하는 과정에서 발생할 수 있는 계통 운영자의 경험적 지식에 의한 부정확성 및 불확실성을 줄이는데, 큰 효과를 거둘 수 있으리라 기대된다. 본 시스템을 실 계통에 적용하게 되면 고장이 발생하는 즉시, 실제 고장위치를 진단하여 복구시 시간적인 효율을 높일 수 가 있으며, 이에 따라 전력 공급서비스의 질을 한 층 증가시킬 수 있을 것이다.

향후에는 같은 type의 후보구간도 구별해내기 위하여 Recloser의 특성곡선을 포함시키게 될 것이다.

[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] 한국전력공사, 배전계통 운영반 교재 II
- [4] "Electrical Distribution System Protection", Third Edition, Cooper Power System, 1990.
- [5] Burke, James J. "Power Distribution Engineering", Marcel Dekker, Inc. 1994.
- [6] John Durkin, "Expert Systems - Design And Development", Macmilian Publishing Company, INC. 1994.
- [7] Grady Booch, "Object-Oriented Analysis And Design", The Benjamin/Cummings Publishing Company. 1994.