

## Fuzzy Logic을 이용한 배전계통의 고장검출 알고리즘 개발

김호준\*, 정호성\*, 조필훈\*\*, 신명철\*, 김창종\*\*\*  
 \*성균관대학교, \*\*한국전력, \*\*\*수원대학교

### Development of a Fault Identification Algorithm in Distribution System Using Fuzzy Logic

Ho-Joon Kim\*, Ho-Sung Jung\*, Myung-chul Shin\*, Phil-Hun Cho\*\*, Chang-Jong Kim\*\*\*

\*Dept. of Electrical and Computer Eng. SungKyunKwanUniv. \*\*KEPCO, \*\*\*University of Suwon.

**Abstract** - An Algorithm is devised to discriminate power distribution faults from other activities utilizing the arc activity and changes in the loading. This scheme intends to determine the cause of the transients and identify them. the discrimination algorithm was tested using recorded event data.

#### 1. 서 론

새로운 기술과 문명의 발달에 힘입어 전력 사용량은 증가하고 있고 이에 따라 수용가에 전력을 공급하는 계통은 복잡화되는 한편 전력 계통에 대한 보호와 그 신뢰성은 더욱 요청되고 있는 실정이다. 1960년대 말과 1970년대 초에 걸쳐서 송전선의 보호를 위하여 프로세스 제어형의 디지털 컴퓨터를 채용하고 고속의 전압과 전류파형을 샘플링하여 고속으로 반응하는 디지털 릴레이가 등장하면서 시작된 컴퓨터에 의한 릴레이의 등장은, 지능화된 기능의 추가, 용이한 적용, 선로 데이터 감시, 고장 현상 로깅, 통신 가능, 세팅의 용이성 등의 장점으로 인하여 디지털 릴레이에 대한 연구와 적용이 광범위하게 이루어지고 있다. 이 디지털 릴레이는 마이크로 프로세서와 그 내부의 소프트웨어에 기반을 두고 계통에 대하여 설비와 인명을 보호하는 일을 수행하는 것이다. 이 디지털 릴레이에 있어서 가장 중요한 것은 소프트웨어인 릴레이 알고리즘인데 고장의 민감한 검출과 오동작 방지에 의한 알고리즘의 지능화 및 신뢰성 향상에 의하여 디지털 릴레이의 신뢰성이 향상될 수 있다.[1]

배전 계통에 있어서의 과전류 고장과 저전류 고장에 대한 연구가 진행되면서 고조파(Harmonics) 현상에 대한 연구가 주로 진행되었다. 그러나 고조파 현상에만 국한하여 검출 이론을 추구할 경우 여러 가지 문제에 부딪치게 되는데 그 중의 하나는 과전류고장 및 고저항 검출에 있어서의 릴레이의 신뢰성 문제이다. 즉, 안전성(Security)면에 큰 문제를 일으켜 오동작을 일으키는 가능성이 상존하는 것이다[2].

국내에서도 저전류 고저항 고장등에 대한 부분적인 연구가 진행되어 제품화까지 이르렀지만 배전선로의 제현상과의 구분이 안되어 현재 적용이 어려운 실정에 있으며, 설비에 대한 예측보전적인 연구가 진행되고 있으나 선로의 모든 과전류 고장과 저전류 고장 그리고 현상을 구분하는 연구나 개발은 아직 없는 상태이다. 현재 배전 자동화 시스템이 적용되기에 이르렀으므로 디지털 릴레이에 있어서의 오동작을 줄이는 고장과 유사현상의 구분 기능이 추가되면 더욱 더 신뢰성있는 보호 릴레이의 적용과 운용이 가능할 것이다[3, 4]. 결론적으로 본 연구는 디지털 릴레이의 고장 검출 알고리즘의 지능화, 고장과 유사 현상의 지능적 구분에 의하여 알고리즘의 신뢰성을 제고하는데 그 목적이 있다.

#### 2. 본 론

##### 2.1 배전 계통의 비정상적인 현상

부하전류의 형태를 보면 어떠한 이상 또는 정상 현상이 생기는 지를 알 수가 있다. 즉, 부하 Level에 따라서 다음과 같은 다양한 형태의 배전선로 현상을 구분 할 수 있는 것이다. 부하에서의 변화는 차단기 또는 recloser의 동작으로 나타나며 이러한 초기 동작 이후에는 부하 lever에 변화가 있으며 또한 부하에서의 arc현상이 이상 현상에 따라서 다르게 나타나므로 부하와 arc현상을 체크하면 여러 현상을 식별 할 수 있다. 또한, 본 연구에서는 기존에 시스템에 설치되어 있는 보호기기가 기능을 담당할 수 있도록 충분한 시간을 주고 보호기기가 주어진 시간내에 동작하지 않을 경우 본 연구 시스템이 동작하도록 하여 불필요한 동작과 오동작(false alarm)의 확률을 줄이도록 하였다. 위의 분류를 적용하기위한 기본파의 특성은 그림 1과 같이 세부적으로 나누어 알아보면 다음과 같다.

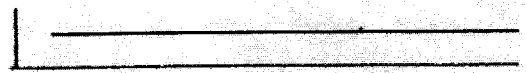


그림 1 정상상태의 부하 레벨 변화

##### 2.1.1 배전 계통의 사고 특성 (Fault)

가. 과전류 고장(OVC) : 과전류가 흐르게 되며 Breaker의 트립이나 recloser의 동작이 따른다. 이는 순간적으로 부하가 급증하고 만일 보호장비가 효과적으로 작동하면 부하 lever의 심한 손실이 뒤따른다.

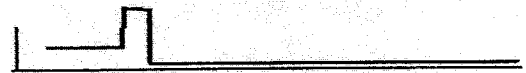


그림 2 과전류 고장(OVC)시 부하 레벨의 변화

나. 고저항 고장(HIF) : 고저항 고장의 발생시 우리는 끊긴 상의 도체가 중성선과 단락하는 순간 과전류 고장(OVC)과 같은 부하 레벨의 급증 곡선을 보인후, 접지하여 심한 부하 lever의 손실을 보이고 이어 arc 현상으로 이어지는 것을 가정한다.



그림 3 고저항 고장(HIF)시 부하 레벨의 변화

다. 선로 단선 : 이 현상은 끊긴 상의 도체가 중성선과의 단락후 공중에 매달려 있는 결과이다. 여기에는 과전류 고장(OVC)과 흡사한 부하 레벨의 모습을 보이나,

그 차이는 부하 레벨 변동량의 차이이다.

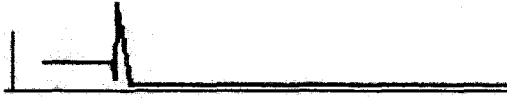


그림 4 선로 단선시의 부하 레벨의 변화

### 2.1.2 제현상 (Event)

가. 수목 현상 : 선로가 수목과 접촉이 일어나면 부하 레벨의 변화가 없으므로 사고는 아니다. 그러나 스파크와 arc에 의한 짧은 시간의 과도현상이 야기된다. 이는 바람등의 날씨나 계절등의 주변 환경에 의한 것이다.



그림 5 수목 현상시의 부하 레벨의 변화

나. Recloser : 재폐로는 보통 과전류 고장(OVC) 또는 그와 유사한 현상이 뒤따른다. 반복되는 feeder측의 개, 폐에 의한 이러한 현상은 부하 레벨의 독특한 변화 곡선을 나타낸다. 만일 과전류 고장(OVC)가 지속되면 부하 레벨의 변동 곡선은 아주 높거나 아주 낮은 부하 레벨을 반복하게 된다. 물론 이러한 패턴은 바로 recloser의 반복되는 개, 폐 시간과 진동에 기인한다.



그림 6 차단기의 작동시 부하 레벨의 변화

### 2.1.3 사고와 제현상의 구분

위에서 논의한 바와 같이 본 연구의 가장 중요한 착상은 바로 사고와 제현상의 특징적인 로드 레벨의 변화에 기인한다. 만일 부하 패턴의 변화를 가장 중요한 변수로 삼으면 사고와 제현상을 보다 효과적으로 구분해 낼 수 있다.

## 2.2 이상 현상 검출을 위한 구성

이상현상의 검출과 구분을 위해서는 앞에서 언급한 바와 같이 부하와 arc를 감시하여 결정을 내리도록 되어 있다. 좀 더 자세히 언급하면, 먼저 이상 현상 검출 시스템은 전류 신호의 고조파 성분 검출에 의해 인지되는 아크 현상(ARC : Arcing Activity), 부하의 감소량 (LOL : Loss of Load), 과전류 고장 전류 변화량 (OVC : Over Current Loading), 그리고 차단기의 개방(BR : Breaker Open)의 네가지 변수를 검사함으로써 과도 현상을 찾아낸다. LOL과 OVC의 변화량 연산은 Simple Exponential Smoothing Method에 의해 계속해서 Update되는 정상상태 평균 부하량(AVG : Nomal Average Loading)의 rms 레벨 변화에 기인하여 연산된다.

배전 계통의 이상 현상 검출의 가장 중요한 원칙은 앞에서 언급한 바와 같이 각 현상의 특징에 기반 한다고 하였다. 이상 현상 검출은 다음의 두 단계로 진행 된다. 먼저 Trigger Check이 과도 현상을 찾아낸다. 일단 Trigger Check이 과도 현상을 찾아내면 다음 단계로 현재의 이상 상태에 대한 Evaluation이 시작된다.

### 2.2.1 과도 현상 감지 (Transient Check)

Trigger Check은 사고로 발전할 수도 있는 과도 현상을 감지하는 것이다. 이러한 Trigger Condition을 찾기 위하여 부하 레벨과 아크 현상을 점검하여야 한다. 아크 현상은 이 arc 현상의 지속 여부 그리고 arc 전류의 크기와 발생 빈도에 따라 arc현상의 증대 또는 지속 또는 무작위성 여부를 어떻게 규정 하는나의 문제가 있어 arc검출기를 사용하여 이를 해결하였다[5].

우선 이상 현상의 시작을 check하여야 하는데 이 이상 현상이 발견되면 검출 시스템을 가동(Trigger)시키게 된다. Trigger가 되지 않은 동안은 정상 상태이므로 검출 시스템은 Idle 상태에 있게 된다.

만일 rms와 AVG의 로드 레벨 차이에 의해 Trigger Check이 결정되었고, 이것이 임계치보다 훨씬 크다면 LOL과 OVC의 Trigger Condition을 계속해서 유지해야 한다. 변수 ARC에 있어서도 arc activity confidence를 이용하여 이와 유사한 과정이 진행될 수 있다. 부하의 변동과 arcing confidence는 Fuzzy값으로 변환하여 이상 현상의 확정할 수 있다. 이 연구에서 쓰이는 Trigger Rule은 다음의 조건을 OR Logic으로 조합하여 결정된다.

- a : 과전류 고장 (Overcurrent fault)
- b : 부하 전류의 현저한 감소 (Significant loss of load)
- c : 차단기의 개방 (Breaker open)
- d : 뚜렷한 arc 현상 (High arc confidence)

### arc의 검출을 위한 알고리즘

배전 계통에서 arc를 찾아내는 것은 어렵지 않지만 사고로부터 발생하는 arc를 구별해 내는 것은 어려움이 있다. 만일 관찰된 arc의 변화가 심하면 ARC인자는 다음에 의하여 그 속성이 제현상에서 발생한 arc로부터 사고에 의하여 발생된 arc로 변환된다. 규정된 임계치보다 낮은 1주기의 고주파 성분과 비교하여 같은 임계치에서 5주기의 크기가 다른 고주파 성분이 관찰되었다면 이를 arc로 가정한다[6]. 이 연구에서 우리는 위의 규정된 임계치를 2KHz로 정하고 이를 초과하는 고주파 성분을 검출하여 count하는 arc 검출기를 사용한다. 우리는 매 60Hz 주기마다 고주파 현상을 검출하기로 한다.

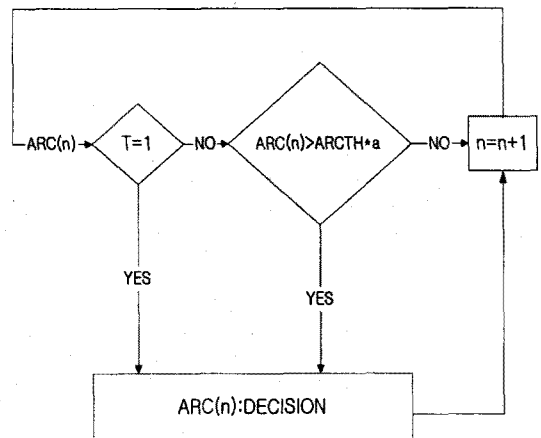


그림 7 과도현상 모니터링에 있어서 arc현상 검출 회로

그러므로 우리는 정상 상태의 급전선에서 검출된 200개의 값 또는 검증된 임계치로 기준 고주파 레벨(임계치 : ARCTH)이 사용된다. 전류의 고주파 성분, ARC는 배전선로에 과도현상이 있는가의 판별을 위하여 ARCTH와 비교한다. 이와 같이 arc 현상의 관찰을 통한 과도현상 판별 방법을 그림 7에 나타내었다.

### Exponential Smoothing of the Sigal (AVG 변수)

LOL인자와 OVC인자는 전류 부하 레벨 기준치와의 비교에 의하여 결정된다. 정상적인 rms 레벨은 하루의 부하변동 곡선(Load Diversity Curve)에 의하여 계속해서 변화하기도 하지만 때때로 급작스럽게 변하는 수도 있으므로 다른 비정상적인 변화와 혼동 되지 않기위해 신중히 선정되어야 할 필요가 있다. 그러므로 이 연구에서는 임의의 평균 부하 레벨을 설정하기 보다는 Exponential Smoothing 기법을 통해 평균값을 구하는 방법을 쓰기로 한다. Exponential Smoothing은 이미 관측된 n개의 값을 단순히 평균하여 모델링하지 않는 대신 관측된 모든 값에 가중치를 주는 x(t)로 모델링 한다[9]. 이 연구에서는 선형이나 계절적인 경향을 보이지 않는 data에 가장 적합한 Simple Exponential Smoothing 기법을 이용하기로 한다. Simple Exponential Smoothing은 x(t)를 가중치가 주어진 평균값으로 모델링하고 이미 n+1의 시간에 취득한 값을 다음의 수식에 의거하여 예측한다.

$$x(n+1) = \sum_{j=1}^n a(1-a)^{j-1}x(n+1-j)$$

여기서 a가 0과 1 사이이면 가중치는

$$\beta_j = a(1-a)^{j-1}$$

의 수식에 의해 지수함수적으로 0에 가까워진다.

위의 수식을 이용하여 AVG인수는 완전한 부하 레벨로 연산된다. 여기서 쓰인 연산은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$x(n+1) = ax(n) + (1-a)x(n)$$

이러한 연산의 과정에서 우리는 이전의 smoothed AVG와 현재의 rms값을 가지고 매번의 주기에서 다음번의 smoothed AVG값을 구할 수 있고, 현재의 rms값과 현재의 smoothed AVG를 비교하여 과도현상이 있는지를 결정할 수 있다. 만일 과도현상이 발견되지 않는다면 우리는 현재의 rms를 다음번 smoothed AVG를 구하기 위해 연산에 대입하고, 이러한 연산은 과도현상이 있을 때까지 계속된다.

### 2.2.2 지연시간(Dead-Time)과 MARC

이상 현상 검출 및 결정을 위하여 다음과 같은 일련의 기능을 수행하게 된다. 즉, 우선 Reset 기능이 있어야 한다. arc 현상의 변수중에서 MARC(Multiple arc 현상)는 arc현상이 반복적으로 일어나고 있는 것을 나타내는데 trigger된 후에 이 count를 reset시키는 기능이다. 그리고 또 하나의 기능은 지연시간 기능이다. 이 기능은 trigger가 발생한 후에 약 5초 동안의 지연시간을 주어 모든 과도현상을 없애지도록 하는 것이다. recloser나 3-phase현상에 의한 오작동(false alarm)을 막기 위하여 이 기능이 필요한 것이다. 이때 결정에 소요된 시간을 계수하는 timer를 재기동 시킨다. 검증 시간 이내에 기존의 보호기기가 작동되는 것을 전제로 하며, 이 시간이 초과된 뒤에도 이상현상이 존재하면 본 검출 시스템에 의하여 현상이 식별되도록 한다.

### 2.3 이상현상 구분 및 결정 로직

Fuzzy Evaluation을 위하여 먼저 event에 기반하는 fuzzy rule을 만든다. 이러한 rule은 다음에 나타내었다. 아래의 rule이 모든 경우를 나타내는 것은 아니지만 좀더 정확한 검출을 위하여 정정되어야 할 rule이다.

1. If LOL is SIGNIFICANT and ARC is ACTIVE, Then HIF
2. If LOL is SIGNIFICANT and ARC is MINOR and MARC is NO, Then BROKEN CONDUCTOR
3. If LOL is VERY SIGNIFICANT and ARC is MINOR, Then BREAK TRIP
4. If LOL is MINOR and ARC is ACTIVE and OVC is STRONGLY POSITIVE and MARC is YES, Then LINES TOUCHING TOGETHER
5. If LOL is MINOR and ARC is (MODERATE of ACTIVE) and OVC is NEGATIVE and MARC is YES, Then TREE OR FOREIGN

### OBJECT CONTACT

6. If (LOL is MINOR and ARC is MINOR) or (LOL is MINOR and ARC is ACTIVE and OVC is NEGATIVE and MARC is NO), Then NORMAL

### 2.4 Sample Data 및 시스템의 적용

Texas A&M에서 실측한 데이터를 적용하여 PC환경에서 프로그램된 fuzzy logic을 테스트 하였다. 여기서는 C상의 데이터만이 사용되었고  $\alpha=0.90$ 로 계산되었다. 프로그램상에서는 입력된 실패치 데이터에 대하여 30개의 샘플데이터를 처리하여 하나의 packet으로 단위화하여 fuzzy 변수를 적용하였다.

검출의 예를 나타내면 다음과 같다.

```
Ex 1)
Trigger
#Packet : 30 (Sample data 871~)
Triggered at count=0, trig=1.00, Phase:C,
LOL is Significant
Waiting
#Packet:31:32:33:34:35:36:37:38:39:40:41:42:43:44:45
DECISION
#Packet : 46 (Sample data 1350~)
MARC count => C:0
Decision:Phase C, Broken Conductor -> 1.0
#Packet : 47
MARC count => C:0
Decision:Phase C, Broken Conductor -> 0.98
Running.....
#Packet : 73
MARC count => C:13
Decision:Phase C, Normal ->1.00
```

```
Ex 2)
Trigger
#Packet : 77 (Sample data 2281~)
Triggered at count=0, trig=1.00, Phase:C,
LOL is Significant
Waiting
#Packet:78:79:80:81:82:83:84:85:86:87:88:89:90:91:92
DECISION
#Packet : 93 (Sample data 2761~)
MARC count => C:1
Decision:Phase C, Broken Conductor -> 1.0
Running.....
#Packet : 122
MARC count => C:14
Decision:Phase C, Tree of Forreign Object Contact ->1.00
```

## 3. 결 론

사고와 제현상의 구분을 위한 시스템의 구현함에 있어서 부하레벨의 변화와 Arc 현상을 이용하기 위해 비수치적인 내용을 잘 표현할 수 있는 Fuzzy Logic을 사용하였다. 또한 실제의 데이터를 적용하여 실제의 예를 보였다. 제시한 방법이 배전계통에 적용된다면, 계전기의 신뢰도 향상 및 안정성 측면에 있어 상당한 개선능을 가져올 수 있으리라 생각된다.

### [참 고 문 헌]

- [1] 김창중, 유명호, "배전선로 고장 예지 및 종합진단 기술", 대한전기학회지 1996년 5월호
- [2] C. J. Kim, B. D. Russell, "A learning method for use in intelligent computer relays for high impedance faults," IEEE Trans. PWRD-6, No. 1, pp. 109-115, 1991.
- [3] 김창중 "퍼지논리 적용에 의한 배전 고장 검출 시스템," 1996년 대한 전기학회 하계 학술발표대회, 1996년 7월.
- [4] C. J. Kim, B. D. Russell, "Classification of Faults and Switching Events by inductive reasoning and expert system methodology," IEEE PWRD 5, 3, 1314-1320, July 1990.
- [5] C. J. Kim, B. D. Russell, "Classification of Gaults and Switching Events by inductive reasoning and expert system methodology," IEEE PWRD 5, 3, 1314-1320, July 1990.
- [6] B. M. Aucoin, B. D. Russell, "Distribution High Impedance Fault Detection Utilizing High Frequency Current Component," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. 101, no., 6, pp. 1596-1606, June 1982.