

# 과도성분과 상태를 이용한 거리 계전기의 향상된 Zone 3 알고리즘

論文  
53A-3-5

## An Enhanced Zone 3 Algorithm of a Distance Relay using Transient Components and State Diagram

許 禎 容\* · 金 喆 煥\*\*  
(Jeong-Yong Heo · Chul-Hwan Kim)

**Abstract** - Zone 3 of the distance relay is used to provide the remote back-up protection in case of the failure of the primary protection. However, the risk for mal-operations under stressed conditions such as heavy loading, voltage and transient instability is usually high. Zone 3 is used in combination with the derivatives of the voltage, and current, etc to prevent mal-operations. Sometimes, the impedance characteristics that restrict the tripping area of relay are used to avoid the mal-operations due to load encroachment.

This paper presents a novel zone 3 scheme based on combining the steady-state components (i.e. 60Hz) and the transient components (TCs) using a state diagram that visualizes the sequence of studies that emanate from the sequence of events. The simulation results show that the novel zone 3 distance relay elements using the proposed method operates correctly for the various events.

**Key Words** : Zone 3. Distance Relav. Transients. State Diagram. Voltage Instability. Power Svstem

### 1. 서 론

3단계 거리 계전기에 사용되는 zone 3는 이웃한 선로의 주보호 계전기가 동작하지 않을 때 후비보호(backup protection)의 목적으로 사용된다. 이와 같은 후비보호를 위해서는 이웃한 선로의 고장을 검출해야 하고, 이웃한 선로의 주보호 계전기와 정확한 보호협조가 필요하다. 거리 계전기에서는 이웃한 선로의 고장검출을 위해 계전기에서 보는 피상임피던스를 이웃한 선로까지 확장하고, 보호협조를 위해 2초 정도의 지연시간을 두고 있다. 하지만, zone 3는 이웃한 선로까지 보호범위를 넓히기 때문에, 보호범위 상 모선에서의 부하 또는 전원에 의한 전류 유출 또는 유입은 거리 계전기에 언더리치 또는 오버리치를 발생시킨다. 그리고, 부하가 매우 크거나 전압 불안정에 의해 전압이 감소하고 전류가 증가하면 정상상태에서의 zone 3 진입 가능성은 더욱 커지게 된다[1-2].

이러한 zone 3의 문제점을 해결하기 위해 고장시의 전압 감소, 전류 위상각의 변화율을 이용하여 고장을 검출하는 방법을 사용하거나[1], RX 평면상의 blinder영역을 설정하여 피상임피던스의 변화율을 이용하거나, 피상임피던스의 위상각을 이용하여 고장을 검출하기도 한다[3]. 그리고, 임피던스 특성의 모양에 따라 동작 특성은 달라지며, forward offset

mho 특성은 부하에 의한 잘못된 zone 3 진입 문제가 없는 후비보호에 적당하다[3].

본 논문에서는 기존의 zone 3를 이용한 고장검출법과 조파성분을 이용한 고장검출법을 결합하여, 전압불안정, 중부하 상태에서 보다 신뢰성 있는 동작을 할 수 있는 고장검출 방법을 제시하고자 한다. 그리고, EMTP MODELS를 이용하여 제안된 거리 계전기 알고리즘을 모델링하고[4-5], 몇 가지 조건 하에서의 zone 3 동작 특성을 시뮬레이션하였다.

### 2. Zone 3와 부하전력 [1]

다음 그림 1의 bus 1에 위치한 거리 계전기가 보는 피상임피던스는 bus 2에 연결된 부하전력에 따라 변화하게 되고, 매우 큰 부하전력일 때는 거리 계전기의 zone 3에 진입할 수도 있다.

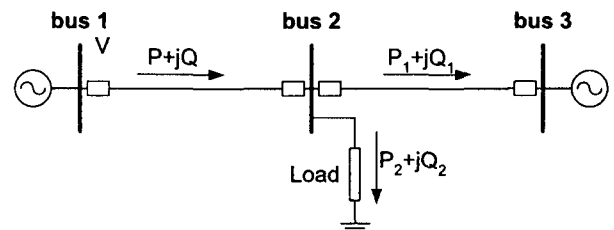


그림 1 부하 조류의 영향을 받는 전력 계통

Fig. 1 Power system under the influence of load power

영상 전류가 흐르지 않는 평형상태일 때 계전기에서 보는 피상임피던스는 다음 식 (1)과 같다.

\* 準 會 員 : 成均館大 工大 情報通信工學部 博士課程  
\*\* 正 會 員 : 成均館大 工大 情報通信工學部 教授 · 工博  
接受日字 : 2003年 9月 22日  
最終於了 : 2003年 12月 27日

$$\bar{Z}_a = \frac{|\bar{V}|^2(P+jQ)}{P^2+Q^2} = \frac{|\bar{V}|^2 \bar{S}}{|\bar{S}|^2} \quad (1)$$

여기서,  $\bar{Z}_a$  : 피상임피던스  
 $V$  : 선로전압  
 $\bar{S}$  : 피상전력 ( $\bar{S}=P+jQ$ )  
 $P$  : 유효전력  
 $Q$  : 무효전력

피상전력의 크기를 일정하게 유지하고 역률을 변화시킬 때 피상임피던스는 다음 식 (2)과 같다.

$$|Z_a| = \frac{|V|^2}{|S|} \quad (2)$$

식 (1)을 R-X 평면상에 나타내면 다음 그림 2의  $a_1, a_2$ 와 같다.  $a_1, a_2$ 의 반지름은 식 (2)에서와 같이 피상전력의 크기가 커질수록 작아지고, 역률이 작아질수록 그림 2의  $m1$  방향으로 이동한다.

역률을 일정하게 유지한 상태로 피상전력의 크기를 변화시킬 때의 피상임피던스의 궤적은 그림 2의  $b$ 와 같다. 피상임피던스는 피상전력의 크기가 커질수록 역률  $\theta$ 의 기울기를 가진 직선을 따라 그림 2의  $m2$  방향으로 이동한다.

따라서, 피상전력의 크기가 커지거나, 역률의 크기가 작아질수록 고장전류가 아닌 부하전류에 의한 zone 3 진입 가능성은 점점 커지게 된다.

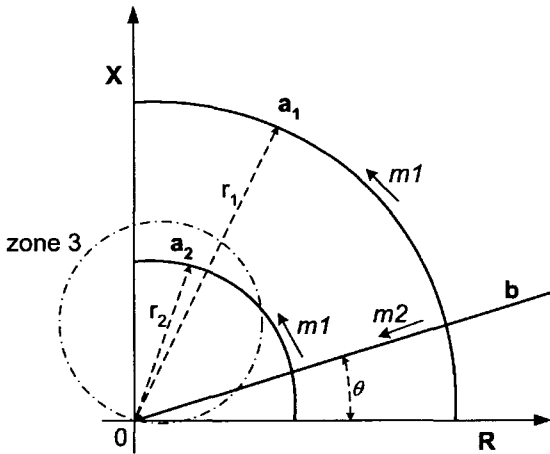


그림 2 복소전력, 역률의 변화에 따른 임피던스 궤적  
 Fig. 2 Impedance locus as complex power or power factor changes

유효전력(무효전력)을 일정한 값으로 고정하고, 무효전력(유효전력)을 변화시킬 때의 피상임피던스를 구하기 위해, 식 (1)의 우변을 실수부와 허수부로 나누면 다음 식 (3)~(4)과 같다.

$$R = \frac{|V|^2 P}{P^2 + Q^2} \quad (3)$$

$$X = \frac{|V|^2 Q}{P^2 + Q^2} \quad (4)$$

여기서,  $R$  : 피상임피던스의 저항성분  
 $X$  : 피상임피던스의 리액턴스성분

식 (3)~(4)의 R, X 성분을 각각 제곱하여 더하면 다음 식 (5)와 같다.

$$R^2 + X^2 = \frac{|V|^4}{P^2 + Q^2} \quad (5)$$

식 (5)에 식 (3)을 대입하여 정리하면 다음 식 (6)과 같다.

$$\left(R - \frac{|V|^2}{2P}\right)^2 + X^2 = \frac{|V|^4}{4P^2} \quad (6)$$

유효전력 P를 일정하게 고정시키고, 무효전력 Q를 변화시킬 때의 피상임피던스는 식 (6)과 같이 중심이  $(\frac{|V|^2}{2P}, 0)$

이고, 반지름이  $\frac{|V|^2}{2P}$  인, 다음 그림 3의  $b$ 와 같은 원이 된다. 무효전력이 증가함에 따라  $m2$ 의 방향으로 이동하게 된다.

유사하게 식 (5)에 식 (4)를 대입하여 정리하면 다음 식 (7)과 같다.

$$R^2 + \left(X - \frac{|V|^2}{2Q}\right)^2 = \frac{|V|^4}{4Q^2} \quad (7)$$

무효전력 Q를 일정하게 고정시키고, 유효전력 P를 변화시킬 때의 피상임피던스는 식 (7)과 같이 중심이  $(0, \frac{|V|^2}{2Q})$

이고, 반지름이  $\frac{|V|^2}{2Q}$  인, 다음 그림 3의  $a$ 와 같은 원이 된다. 유효전력이 증가함에 따라  $m1$ 의 방향으로 이동하게 된다.

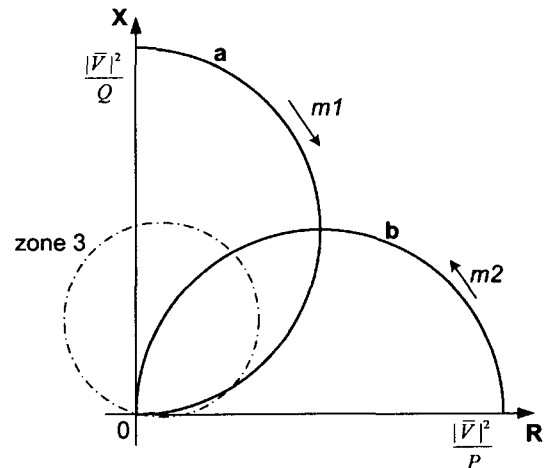


그림 3 유효전력, 무효전력의 변화에 따른 임피던스 궤적  
 Fig. 3 Impedance locus as active power or reactive power changes

따라서, 유효전력 또는 무효전력의 증가는 zone 3의 진입 가능성을 증가시킨다. 특히, 다음 그림 3의  $b$ 에서와 같이 무효전력의 증가는 더욱 문제가 될 수 있다.

### 3. 결합형 고장 검출 방법

#### 3.1 고장 검출 방법

고장 검출을 위해 사용되는 방법은 크게 두 가지로 구분할 수 있다. 첫 번째는 정상상태에서의 동작 특성을 이용하는 방법으로, 거리 계전기, 과전류 계전기, 차동 계전기 등에서 가장 일반적으로 사용되고 있다. 고장 발생 후의 정상상태에서의 특성을 이용하여 고장 여부를 판단하고, 고장 발생전의 상태와 고장 중의 과도상태를 이용하지 않는 방법이다. 두 번째는 과도상태의 동작 특성을 이용하는 방법으로, 고장 중의 과도현상을 이용하여 고장을 검출하는 방법으로 거리 계전기의 OSD(out of step detection)에 사용되는 피상임피던스의 변화율, 전압의 변화율, 주파수 성분의 변화율 등을 이용하여 고장 여부를 판단하는 방법이 이에 해당한다.

보다 정확한 고장 검출을 위해서 위의 2가지 방법을 결합하여 사용할 수도 있다. 현재 사용되는 거리 계전기에서는 zone과 PSB(power swing blocking), OSD를 결합하여 고장 검출의 신뢰성을 높이고 있다[6].

#### 3.2 고조파 성분을 이용한 고장 검출

고장 중의 과도상태 특성을 이용하여 고장을 검출하기 위해서 주파수 성분을 이용할 수 있다. 고장 발생 전의 정상상태에서는 전압 또는 전류의 기본 주파수 성분이 매우 크고 다른 주파수 성분은 매우 작다. 하지만, 고장이 발생하는 동안의 과도 상태에서는 기본 주파수 이외의 주파수 성분이 매우 커지게 된다. 주파수 스펙트럼 전체 대역의 성분을 이용하기 위해서는 마이크로 프로세서 외의 부가적인 하드웨어가 필요하다. 하지만, 주파수 성분 중 기본 주파수의 정수배인 고조파성분은 현재의 디지털 계전기에 사용되는 마이크로 프로세서에서 쉽게 추출할 수 있다.

다음 식 (8)의 DFT변환 공식을 이용하여 고조파성분을 구할 수 있다. 다음 식 (8)에서  $n$ 이 1일 때는 기본파 성분,  $n$ 이 2일 때는 2 고조파성분으로,  $n$ 은 고조파성분의 차수를 나타낸다. 하지만, 샘플링 주파수의 1/2인 Nyquist 주파수는  $N/2$  고조파일 때이고, 최대 고조파 차수도  $N/2$ 로 제한된다 [7-8].

$$X(n) = \sum_{k=0}^{N-1} x_k W_N^{nk} \quad (n = 0, 1, 2, \dots, N-1) \quad (8)$$

$$= \sum_{k=0}^{N-1} x_k \cos\left(\frac{2\pi nk}{N}\right) - j \sum_{k=0}^{N-1} x_k \sin\left(\frac{2\pi nk}{N}\right)$$

여기서,  $W_N = e^{-j(2\pi/N)}$

$$x_k = x[t - (N-1) + k] \text{ 이다.}$$

고조파성분 크기의 합은 다음 식 (9)와 같다.

$$H_{sum} = \sum_{k=2}^{N/2} |X(k)| \quad (9)$$

본 논문에서는 과도상태 동작 특성에 의한 고장 검출부를 위해  $H_{sum}$ 을 사용하였으며, 식 (8)을 이용하여 전류의 고조파성분을 구하고, 식 (9)을 이용하여 고조파성분의 합을 계산하였다.

### 3.3 정상상태 및 과도상태 동작 특성을 이용한 고장 검출기

정상상태 동작 특성과 과도상태 동작 특성을 이용하여 고장을 검출하는 고장 검출기의 블록도는 다음 그림 4와 같다. 정상상태 동작특성을 이용한 고장검출 신호  $S$ 와 과도상태 동작특성을 이용한 고장검출 신호  $T$ 를 이용하여 최종적인 정확한 고장검출 신호를 출력한다. 부하의 증가, 감소는 정상상태 동작특성이며, 부하차단, 고장발생, 고장제거 등은 과도상태 동작특성에 해당된다. 본 논문에서는 순시 전류를 전력 계통의 변수로 입력받고, zone 3 진입 여부로 신호  $S$ 를 출력하였으며, 전류의 고조파 성분 크기의 합으로 신호  $T$ 를 생성하였다.

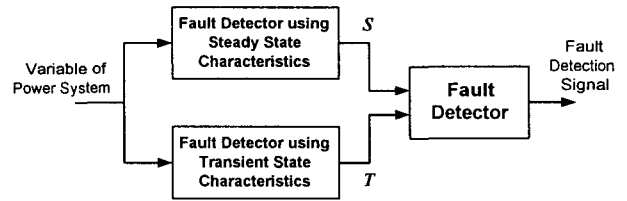


그림 4 고장검출기의 블록도

Fig. 4 Block diagram of fault detector

다음 그림 5는 전력 계통의 상태에 따른 피상임피던스의 궤적을 나타내고, 계통의 상태에 따른 궤적과 그림 4의  $S$ ,  $T$ 의 신호의 관계는 다음 표1과 같다.

표 1 계통 상태에 따른  $S$ ,  $T$  신호

Table 1 Signals  $S$  and  $T$  for various events

Case	1st event	2nd event	Ref. Fig. 6
1	고장 발생(①)	고장 제거(②)	(a)
2	부하 증가(③)	부하 감소(④)	(b)
3	부하 증가(③)	부하 차단(⑤)	(c)
4	부하 증가(③)	고장 발생(⑥)	(d)

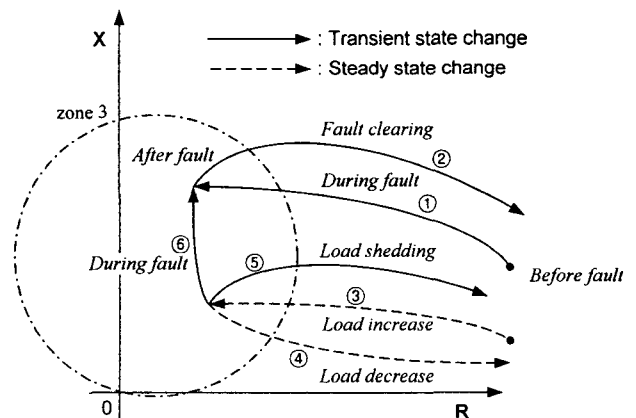


그림 5 전력 계통의 상태에 따른 피상임피던스의 궤적

Fig. 5 Apparent impedance at each state of power system

그림 6에서와 같이 zone만을 사용하여 생성되는 신호 S 만으로는 고장을 정확하게 판단하지 못하지만, 신호 S와 T를 이용하면 고장을 보다 정확하게 고장을 검출 할 수 있다.

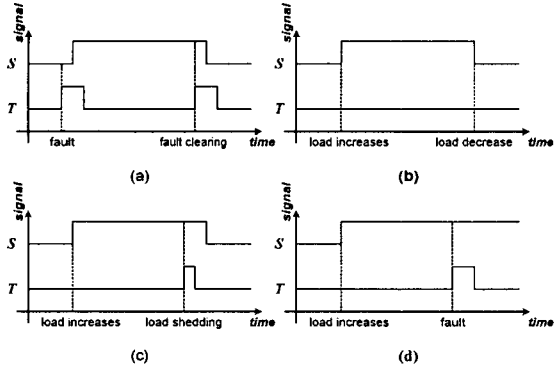


그림 6 계통 상태에 따른 S, T 신호  
Fig. 6 S and T signal at each state of power system

4. 상태도를 이용한 고장 검출기 설계

상태도(state diagram)는 디지털 논리회로의 순차 머신(sequence machine)에서 사용되는 방법으로, 입력되는 논리 신호에 따른 내부상태의 변화와 출력을 나타낸다[9]. 전력 계통의 여러 변수를 입력으로 받는 보호 계전기에서 각 변수들과 전력 계통 상태와의 관계를 설정할 수 있다. 신호 S와 T를 이용하여 정확한 고장 검출을 수행하기 위해서는 두 신호의 변화에 따른 상태 천이를 정의할 필요가 있다.

고장검출을 위해 본 논문에서 사용된 상태도는 다음 그림 7과 같다. 초기상태는 ①이고, 그림 4에서의 신호 T와 그림 4에서의 신호 S에 따라 상태가 변하게 되고, 고장검출상태 ③에서 2초 이상이 머물러 있게 되면 상태 ⑨로 이동하여 트립신호를 발생시킨다.

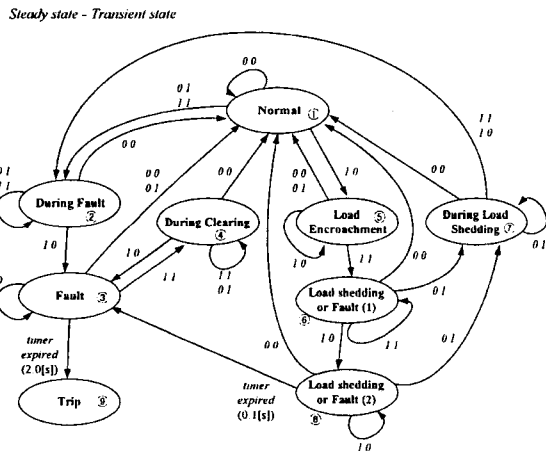


그림 7 고장검출기의 상태도  
Fig. 7 State diagram for fault detection

계통 상태의 변화에 따른 상태천이는 다음 표 2와 같다.

표 2 계통 상태에 따른 상태 천이  
Table 2 State transition for various events

Case	Event	State transitions
1	고장 발생 → 2초동안 고장이 제거되지 않음	①-②-③-⑨
2	고장 발생 → 주보호에 의해 고장이 제거됨	①-②-③-④-① ①-②-③-①
3	부하 증가 → 부하 감소	①-⑤-①
4	부하 증가 → 부하 차단	①-⑤-⑥-⑧-①
5	부하 증가 → 고장 발생	①-⑤-⑥-⑧-③-⑨
6	부하 차단	①-②-①
7	.....	.....

5. 시뮬레이션 및 결과 검토

5.1 시뮬레이션 방법

EMTP로 시뮬레이션한 모델 계통은 다음 그림 8과 같다. 154[kV]의 양단전원에 전체선로 길이 500[km]의 2회선선로가 연결되어 있다. EMTP MODELS로 구현된 거리 계전기 relay a는 bus 1에 연결되어 있다. 모델 계통의 bus 2, bus 3 사이에서의 고장 발생, bus 2에서의 부하 증가와 부하 차단 등의 조건하에서 거리 계전기의 동작을 시뮬레이션하였다. 거리 계전기 relay a의 한 주기당 샘플수는 12로 하고 임피던스 특성은 mho형을 사용하였으며, 고장 검출 알고리즘은 고조파성분과 zone 진입 신호를 사용한 그림 4와 그림 7의 상태도를 기초로 하여 구현하였다.

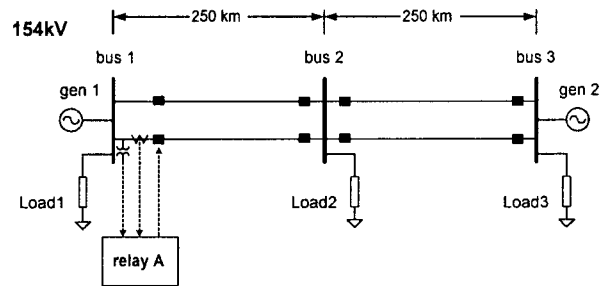


그림 8 모델 계통  
Fig. 8 Model of power system

5.2 3상고장

bus 2에서 bus 3 방향으로 125[km] 지점에서 3상고장이 발생하고 주보호 계전기가 동작하지 않을 때 relay a에서 보는 피상임피던스의 R-X평면상의 궤적은 다음 그림 9와 같고, 전류의 고조파성분 크기의 합  $H_{sum}$ 은 다음 그림 10과 같다. 다양한 조건에서의 고장 시뮬레이션 결과, 고장검출을 위한 고조파성분 합의 최소 임계값은 0.2[p.u]로 결정되었다.

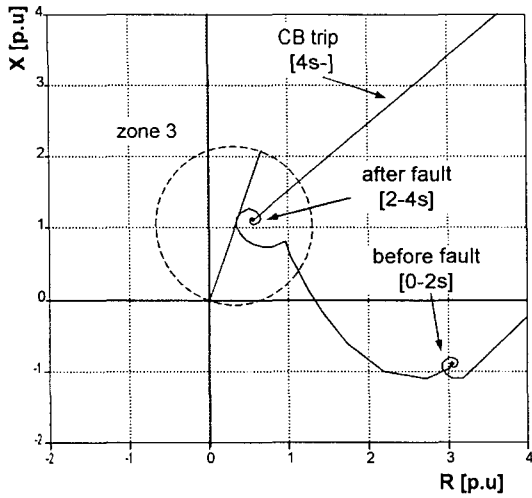


그림 9 3상고장 발생시의 피상임피던스 궤적  
Fig. 9 Apparent impedance in 3-phase fault

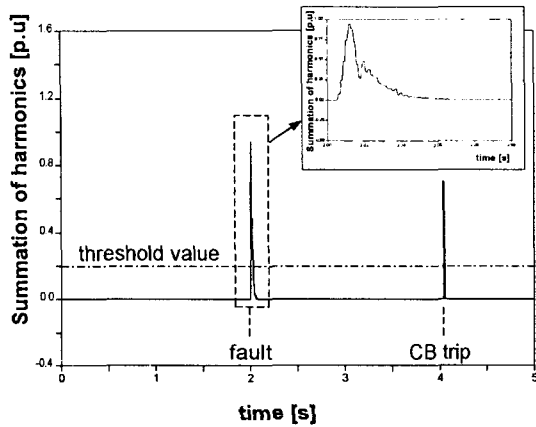


그림 10 3상고장 발생시 고조파성분의 합  
Fig. 10 Summation of harmonics in 3-phase fault

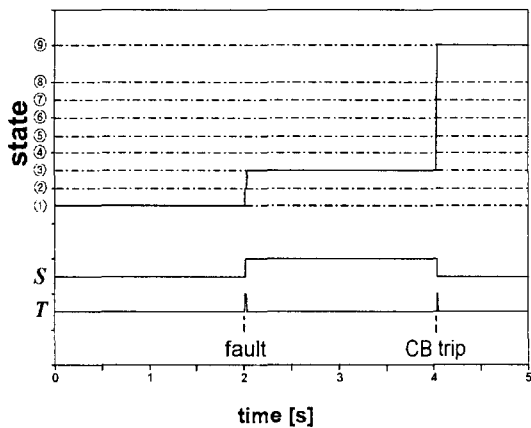


그림 11 3상고장 발생시 상태값과 S, T 신호  
Fig. 11 State and signal S, T in 3-phase fault

그림 9와 그림 10에 의해서 생성되는 신호 S, T와, 이 신호를 그림 7의 상태도의 입력으로 사용하여 변화되는 상태 값은 그림 11과 같다. 3상고장 발생시 상태 ①-②-③으로 이동한 후, zone 3 지연시간 2[s] 후 상태 9로 변화하여 트립신호가 출력된다.

### 5.3 전압불안정에 의한 zone 3 진입

bus 2에 부하모델을 연결하고 전압이 0.6[p.u.]에서 부하를 차단했을 때의 시뮬레이션 결과는 다음 그림 11~14과 같다. 부하가 증가함에 따라 relay a에서 보는 피상임피던스는 zone 3에 진입하고, 부하차단에 의해 zone 3를 빠져나오게 된다. 이 때 부하 차단에 의한 고조파성분이 존재하지만 zone 3를 빠져나옴에 따라 상태 ⑥-⑧-⑦을 거쳐 정상상태로 복귀한다.

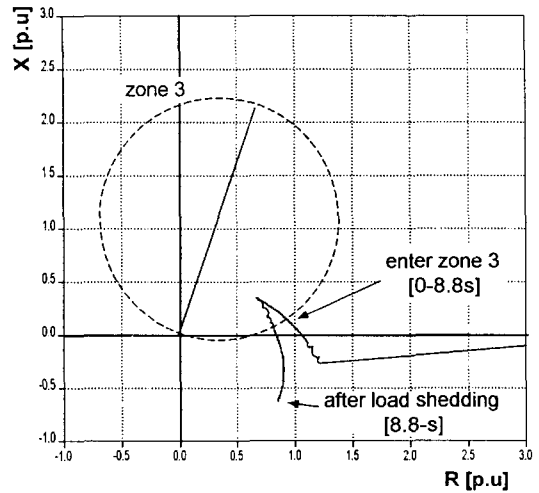


그림 12 전압 불안정에 의한 zone 3 진입과 부하 차단시의 피상임피던스 궤적  
Fig. 12 Apparent impedance when it enter zone 3 and load is shedded under voltage instability

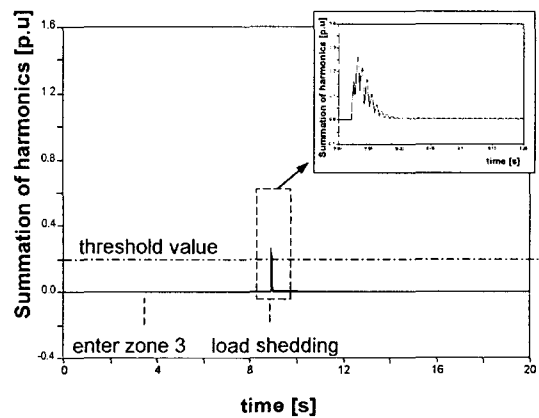


그림 13 전압 불안정에 의한 zone 3 진입과 부하 차단시의 고조파성분의 합  
Fig. 13 Summation of harmonics when it enter zone 3 and load is shedded under voltage instability

다음 그림 14에서, 전압불안정에 의해 zone 3에 진입하면서 상태 ①-⑤로 이동하고, 부하차단에 의해 상태 ⑤-⑥-⑧-⑦-①로 이동한다.

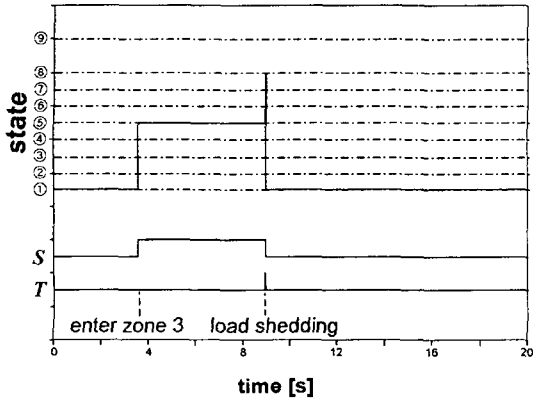


그림 14 전압 불안정에 의한 zone 3 진입과 부하 차단시의 상태값과 S, T 신호  
Fig. 14 State and signal S, T when it enter zone 3 and load is shedded under voltage instability

5.4 중부하시의 3상고장

bus 2의 부하가 증가하여 relay a의 피상임피던스가 zone 3로 진입하는 중부하 상태에서 3상고장이 발생할 때의 시뮬레이션 결과는 다음 그림 15~17과 같다. 고장에 의한 고조파성분의 증가를 검출하여 상태 ⑥-⑧-③을 거쳐 상태 ⑨에서 트립신호를 출력한다.

다음 그림 17에서 부하가 증가하여 zone 3에 진입하면서 상태 ①-⑤로 이동한다. 이 상태에서 3상고장이 발생하면 상태 ⑤-⑥-⑧-③으로 이동하여 고장을 검출하고, 2초 후 상태 ⑨에서 트립신호를 출력한다.

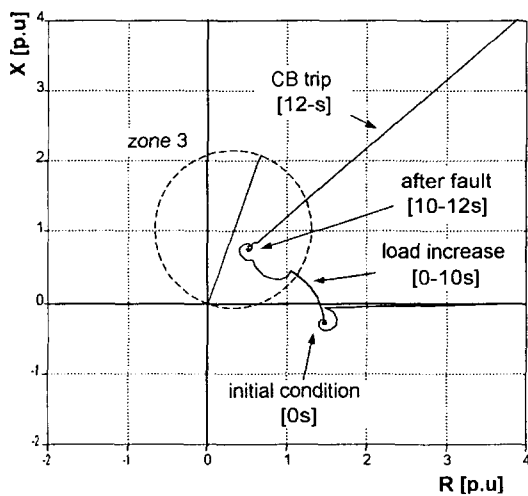


그림 15 중부하 상태 하에서 3상고장 발생시의 피상임피던스 궤적  
Fig. 15 Apparent impedance when 3-phase fault occurs under heavy loading

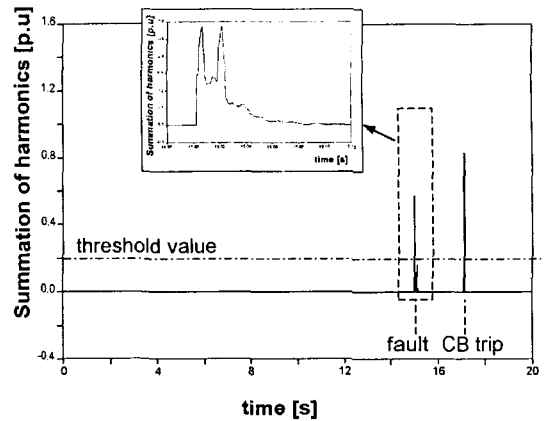


그림 16 중부하 상태에서 3상고장 발생시의 고조파성분의 합  
Fig. 16 Summation of harmonics when 3-phase fault occurs under heavy loading

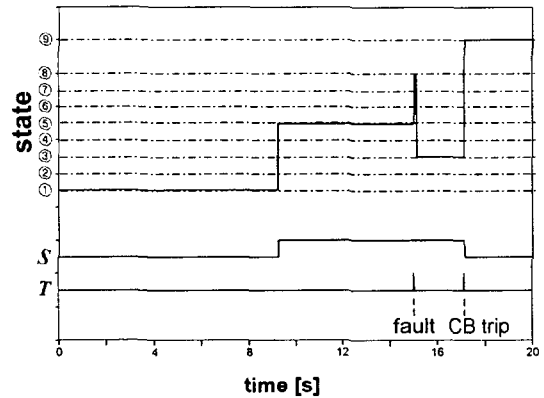


그림 17 중부하 상태에서 3상고장 발생시의 상태값과 S, T 신호  
Fig. 17 State and signal S, T when 3-phase fault occurs under heavy loading

6. 결 론

전력 계통의 구성이 복잡해지고 다양한 현상이 발생함에 따라 보호 계전기가 오동작 또는 부동작할 수 있는 가능성이 증가하고 있고, 기존의 계전기보다 향상된 알고리즘의 필요성이 증가하고 있다. 디지털 계전기의 사용이 많아지고 마이크로 프로세서의 성능이 증가하면서 알고리즘의 구현은 비교적 쉬워지고 있으며, 전력 계통의 많은 변수들과 상태들을 복합적으로 사용한 새로운 보호 알고리즘의 개발이 이루어지고 있다.

본 논문에서는 정상상태 동작 특성인 zone과 과도상태 동작 특성인 전류의 고조파성분을 이용한 결합형 고장검출 방법을 제시하고, EMTP를 이용하여 몇 가지 조건에서 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 결과, 고장발생, 부하차단, 고장제거 시에 고조파성분이 증가하였으며, 전류의 고조파성분을 이용한 고장검출 방법을 zone에 의한 고장검출 방법과 함께 사용하여 계통의 상태 변화를 추정할 수 있었고, 각 상

태에서 보다 정확하게 고장을 검출할 수 있었다.

**감사의 글**

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

**참고 문헌**

- [1] Mattias Jonsson, "Line Protection and Power System Collapse", Chalmers University, pp. 143-152, 2001.
- [2] Gerhard Zigler, "Numerical Distance Protection Principles and Application", Siemens-Erlangen Pulicis, pp. 286, 1999.
- [3] Tony Seegers, Ed Krizauskas, "Transmission Line Protective Systems Loadability", Power System Relay Committee of PES, pp. 16-28, Mar, 2001.
- [4] C.H. Kim, M.H. Lee, R.K. Aggarwal, A.T. Johns, "Educational Use of EMTP MODELS for the Study of a Distance Relaying Algorithm for Protecting Transmission Lines", IEEE Trans. on Power System, Vol. 15, No. 1, pp. 9-15, Feb. 2000.
- [5] Laurent Dube, "User guide to MODLES in ATP", 1996.
- [6] P.M Anderson, "Power System Protection", Power Math Associate, Inc., pp. 3-12, 1999.
- [7] Helmut Ungrad, "Protection Techniques in Electrical Energy Systems", Marcel Dekker, inc., pp. 252-302, 1995.
- [8] Antonio Gomez Exposito, Jose A. Rosendo Macias, "Fast Harmonics Computation for Digital Relaying", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 14, No. 4, pp. 1263-1268, Oct. 1999.
- [9] Thomas Richard McCalla, "Digital Logic and Computer Design", Merrill, pp. 261-275, 1992.

**저 자 소 개**

**허 정 용 (許 禎 容)**



1974년 12월 28일생. 2000년 성균관대 전자공학과 졸업. 현재 동 대학원 정보통신 공학부 박사과정, 차세대전력기술 연구센터

Tel: 031-290-7166

Fax: 031-290-7955

E-mail : rc1901@hanmail.net

**김 철 환 (金 喆 換)**



1961년 1월 10일생. 1982년 성균관대 전기공학과 졸업. 1990년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 현재 성균관대 정보통신공학부 교수, 차세대전력기술 연구센터

Tel: 031-290-7124

Fax: 031-290-7179

E-mail : chkim@skku.edu