

Digital Adaptive Distance Relay for Transmission Line Protection

丁 昌 鎬* · 金 鎮 吾**
(Chang-Ho Jung · Jin-O Kim)

Abstract - Distance relay is the most widely used in transmission line protection because it is applicable not only as main protection but also as back-up protection. However, the protection range of the distance relay is always fixed in the unchangeable operating range while the power system varies, and therefore the distance relay is the device that is highly influenced by the power system changes. In this regard, this paper describes an approach to minimize the mal-operation of the distance relay due to the power system changes through changing protection range of the distance relay into optimal condition in response to the load variation and power system condition. Also mal-function of the distance relay in case of high resistance ground faults could be minimized through modeling the protection range into quadratic function.

Key Words : Adaptive Setting, Distance relay, Protection Zones, Quadratic function, quadrilateral type distance relay

1. 서 론

디지털 거리계전기는 송전선로 보호에 있어 주보호뿐만 아니라 후비보호계전기로도 사용이 가능하여 가장 널리 사용되고 있다.

일반적으로 송전선로 보호용 디지털 거리계전기는 계전기가 설치된 지점에서 측정된 전압과 전류로 임피던스를 계산하여 사용자가 미리 정정한 값과 비교하여 측정된 임피던스가 정정한 보호범위안에 존재하면 동작하도록 되어 있다. 그러나 거리계전기의 보호범위는 계통은 변화하는데 비해 동작범위가 항상 일정하게 고정되어 있어 계통의 영향을 가장 많이 받는 계전기이며, 특히 거리계전기의 지락요소는 그 특성상 사고유형과 사고 전 계통조건에 따라 계전기가 보는 임피던스가 실제 사고 임피던스와 다른 경우가 많아 사용자가 정정 당시의 계통상황만을 고려하여 정정할 경우 계전기는 쉽게 오동작을 일으킬 수 있다.

따라서 본 논문에서는 사용자가 정정한 고지향보호범위와 디지털 거리계전기가 계산한 현재계통의 부하 및 역률을 바탕으로 2차함수를 갖는 보호범위로 변경하여 보호함으로써 계통변화에 따른 계전기의 오동작 및 부동작을 최소화 하는데 목적을 두고 있다.

2. 거리계전기가 보는 임피던스

거리계전기가 보는 임피던스는 계전기가 설치된 지점에서의 모선전압과 선로전류만을 이용하므로 부하전류의 크기가 변화하거나 부하의 종류가 변하면 계전기가 보는 임피던의 특성이 변화하고 지락사고시 사고지점의 지락저항이 있으면 지락저항의 크기에 따라서도 계전기가 보는 임피던스는 실제 임피던스와 상당한 차이가 발생하게 된다.

디지털 거리계전기의 지락 임피던스 계산은 영상보상을 실시할 경우 아래와 같다.

$$Z_A = \frac{V_A}{I_A + K_0 \cdot 3I_0} \quad (1)$$

여기서,

- * $K_0 = (Z_{L0} - Z_{L1}) / 3Z_{L1}$ (영상보상 계수)
- * Z_A = A상 임피던스
- * I_A = 계전기 설치점의 A상 전류
- * V_A = 계전기 설치점의 A 전압
- * Z_{L0} = 계전기가 보호하는 선로의 영상분 임피던스
- * Z_{L1} = 계전기가 보호하는 선로의 정상분 임피던스
- * I_0 = 계전기 설치점의 영상전류

그림 1의 F지점에서 사고가 발생하였을 때 A모선에 설치된 계전기에 입력되는 전압, 전류로 계산한 임피던스(식 (1))

* 正 會 員 : 漢陽大 工大 電氣工學科 博士課程

** 正 會 員 : 漢陽大 工大 電氣工學科 副教授 · 工博

接受日字 : 2001年 3月 19日

最終完了 : 2001年 7月 11日

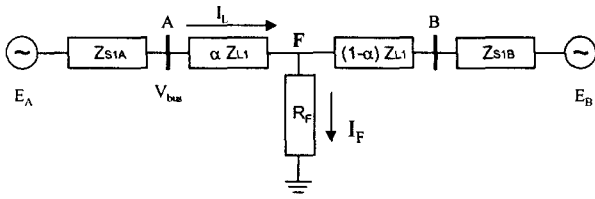


그림 1 1선 지락사고의 모델
Fig. 1 Modeling of Single Phase to Ground Fault

는 $R_F=0$ 이고 무부하의 경우라면 임피던스 궤적에서 보호선로선상에 위치하여 정확한 보호가 가능하나, 사고지점에서 고저항 R_F 가 증가할 경우 사고전의 부하전류(I_L)에 따라 거리계전기가 보는 임피던스는 사고저항값에 따라 그림 2와 같이 Underreach 또는 Overreach 범위에 위치하게 되는데, 그림 2는 서로다른 부하전류 조건에서 보호구간 선로의 75%지점에 0-50Ω까지의 1선 고저항지락사고가 발생한 경우인데 계전기의 오동작이 우려됨을 알 수 있다.

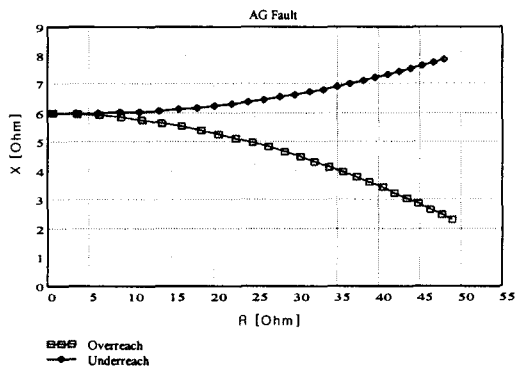


그림 2 고저항지락사고시 고저항값에 따라 거리계전기가 보는 임피던스 특성
Fig. 2 Impedance Characteristics Measured by Relay According to Value of High Resistance Fault

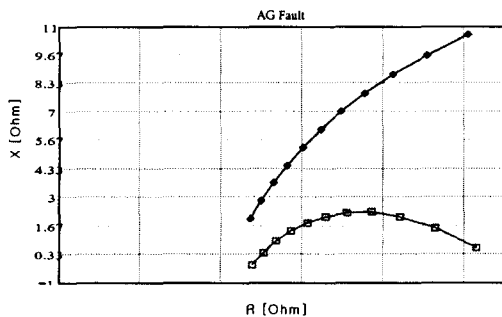


그림 3 고저항지락사고시 사고지점에 따라 거리계전기가 보는 임피던스 특성
Fig. 3 Impedance Characteristics Measured by Relay According to Fault Point at the High Resistance Fault

또한 계전기가 보는 고저항값도 사고지점에 따라 그림 3과 같은 특성을 갖게 되는데, 그림 3은 서로 다른 부하전류 조건에서 50Ω의 1선 고저항지락사고가 보호선로의 0-75% 지점에서 발생한 경우이며, 오동작 범위가 부하전류 및 사고지점에 따라 넓어져 거리계전기가 정확하게 동작할 수 없게 됨을 알 수 있다. 따라서 부하의 변화 및 고저항의 변화에 따라 계전기가 정확한 보호를 가능하게 하려면, 거리계전기의 동작범위를 그림 2 및 그림 3을 합성한 거리계전기가 보는 임피던스로 동작범위로 변경하여 보호한다면 정확한 보호가 가능하게 된다.

3. 거리계전기의 최적 동작범위

3.1 거리계전기가 보는 임피던스 계산

본 논문은 송전선로의 보호에 있어 거리계전기가 계통조건과 고저항에 따라 오동작을 일으키지 않도록 하기 위해 사용자가 정정한 정정치를 기준으로 현재 계통조건에 맞도록 거리계전기가 스스로 지락요소의 정정치를 2차 함수적으로 변경하여 보호하도록 함으로써 거리계전기가 Underreach 및 Overreach 하는 것을 방지하도록 하였다. 그림 1의 F지점에서 1선 지락사고가 발생한 경우의 등가회로는 그림 4와 같다.

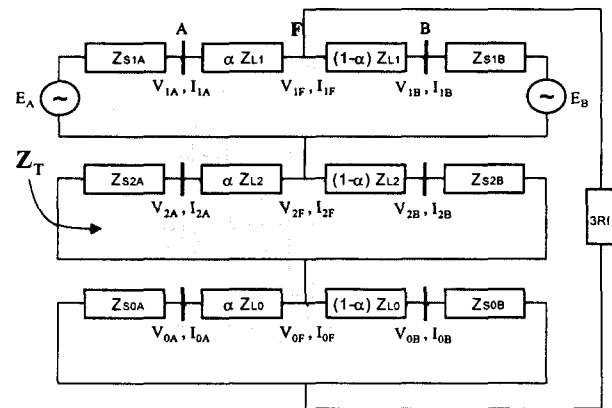


그림 4 A상 지락사고의 등가회로
Fig. 4 Equivalent Circuit for Phase A Ground Fault

그림 4의 등가회로에서 각각의 Sequence임피던스를 표현하면 식 (2) 및 (3)과 같다.

$$\begin{aligned} Z_{1A} &= Z_{S1A} + \alpha Z_{L1} \\ Z_{2A} &= Z_{1A} \\ Z_{0A} &= Z_{S0A} + \alpha Z_{L0} \\ Z_{1B} &= Z_{S1B} + (1 - \alpha) Z_{L1} \\ Z_{2B} &= Z_{1B} \\ Z_{0B} &= Z_{S0B} + (1 - \alpha) Z_{L0} \end{aligned} \tag{2}$$

그림 4에서 Total 임피던스 Z_T 는 식 (4)와 같으며

$$Z_T = \frac{2 \cdot Z_{1A} \cdot Z_{1B}}{Z_{1A} + Z_{1B}} + \frac{Z_{0A} \cdot Z_{0B}}{Z_{0A} + Z_{0B}} + 3R_F \quad (4)$$

사고가 발생한 F지점에서 사고전의 전압과 사고시 Sequence 전류는 각각 식 (5), (6)과 같이 주어진다.

$$V_F = V_{bus} - I_L \cdot \alpha Z_{L1} \quad (5)$$

$$I_{1F} = I_{2F} = I_{0F} \quad (6)$$

그러므로 사고가 발생한 지점에서의 Total Sequence 전류는 식 (7)과 같다.

$$I_F = 3 \frac{V_F}{Z_T} \quad (7)$$

또한 계전기 설치점에서 본 각Sequence 전류는

$$\begin{aligned} I_{1A} &= \frac{Z_{1B}}{Z_{1A} + Z_{1B}} \cdot I_{1F} \\ I_{2A} &= I_{1A} \\ I_{0A} &= \frac{Z_{0B}}{Z_{0A} + Z_{0B}} \cdot I_{0F} \end{aligned} \quad (8)$$

로 주어지므로 계전기 설치점에서의 총 고장전류 I_{AF} ($=I_{1A}+I_{2A}+I_{0A}$)를 구할 수 있다. 따라서 계전기 설치점에서 계전기가 측정하는 A상의 총전류는 계전기 설치점에서의 고장전류에 고장전 부하전류를 합한 전류이며 식 (9)와 같다. 또한 계전기가 측정하는 총 전압은 식 (10)과 같이 표현할 수 있다.

$$I_A = I_{AF} + I_L \quad (9)$$

$$V_A = I_F \cdot R_F + (I_L + I_{1A}) \cdot \alpha Z_{L1} + I_{2A} \cdot \alpha Z_{L1} + I_{0A} \cdot \alpha Z_{L0} \quad (10)$$

따라서 식 (9)와 식 (10)을 계전기가 바라보는 임피던스를 구하기 위해 식 (1)에 대입하면 다음과 같다.

$$Z_A = \alpha Z_{L1} + \frac{3R_F}{\frac{Z_T \cdot (1 - Ph)}{Z_{1B} + Z_{1A} \cdot Ph} + \frac{2 \cdot Z_{1B}}{Z_{1A} + Z_{1B}} + \frac{Z_{0B}}{Z_{0A} + Z_{0B}} \cdot (1 + 3K_0)} \quad (11)$$

식 (11)에서 계전기가 측정하는 현재의 선로전류와 모선 전압을 포함하는 변수 Ph 는 식 (12)와 같이 표현된다.

따라서 식 (11)에서 계전기가 보는 임피던스 Z_A 는 실제 임피던스($\alpha Z_{L1} + R_F$)와 차이가 발생하여 계전기가 오동작하

게 된다.

$$Ph = 1 - \frac{I_L \cdot (Z_{1A} + Z_{1B})}{E_A}, \quad (E_A = V_{bus} + I_L \cdot Z_{S1A}) \quad (12)$$

3.2 최소자승법을 이용한 거리계전기의 Adaptive 동작범위의 계산

일반적으로 데이터가 $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)$ 인 경우 식 (13)를 만족하는 a, b 를 구할 경우 식 (13)은 식 (14)와 같이 표현이 가능하며, 오차가 최소가 되는 a 와 b 를 최소자승법에 의해 구하면 식 (15)에 의해 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} y_1 &= ax_1 + b \\ y_2 &= ax_2 + b \\ &\vdots \\ y_n &= ax_n + b \end{aligned} \quad (13)$$

$$Y = AX, \quad Y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix}, \quad A = \begin{bmatrix} x_1 & 1 \\ x_2 & 1 \\ \vdots & \vdots \\ x_n & 1 \end{bmatrix}, \quad X = \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$X = (A^T A)^{-1} A^T Y \quad (15)$$

이러한 최소자승법을 이용하여 거리계전기의 최적동작범위를 구하기 위해 사용자가 정정한 Zone과 R_F 그리고 사고전 계전기가 측정하는 전압과 부하전류를 기준으로 현재 계통에서 거리계전기가 보는 임피던스를 계산한다. 그리고 계산한 그 결과를 이용하여 거리계전기의 최적동작범위를 구하면 된다.

본 논문에서는 계전기가 보는 임피던스가 그림 2와 그림 3과 같은 2차함수 특성을 나타내므로 2차함수를 갖는 함수로 규정하여 실시하였다.

먼저 식 (11)에서 고장저항값 R_F 를 "0"에서 보호범위까지 변화시킨 경우, 계전기가 보는 임피던스가 $(Z_{Ar1}, Z_{Ax1}), (Z_{Ar2}, Z_{Ax2}), \dots, (Z_{Arn}, Z_{Axn})$ 라고 가정하면, 이때 식 (16)을 만족하는 2차함수의 계수 a_0, a_1, a_2 를 구하면 된다.

마찬가지로 고장위치를 변화시킨 경우 계전기가 보는 임피던스의 데이터를 최소자승법을 이용하여 식 (16)에서 또 다른 계수 b_0, b_1, b_2 를 구한다.

$$Z_{Ax} = a_0 + a_1 Z_{Ar} + a_2 Z_{Ar}^2 \quad (16)$$

$$Z_{Ax} = b_0 + b_1 Z_{Ar} + b_2 Z_{Ar}^2$$

식 (16)은 식 (17)과 같이 표현할 수 있고 Z_{Ar}^T 는 $3 \times n$ 행렬, Z_{Ar} 는 $n \times 3$, $Z_{Ar}^T Z_{Ar}$ 는 3×3 행렬이 된다.

$$a = (Z_{Ar}^T Z_{Ar})^{-1} Z_{Ar}^T Z_{Ax}$$

$$a = \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \end{bmatrix}, Z_{Ax} = \begin{bmatrix} Z_{Ax1} \\ Z_{Ax2} \\ Z_{Axn} \end{bmatrix}, Z_{Ar} = \begin{bmatrix} 1 & Z_{Ar1} & Z_{Ar1}^2 \\ 1 & Z_{Ar2} & Z_{Ar2}^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & Z_{Arn} & Z_{Arn}^2 \end{bmatrix} \quad (17)$$

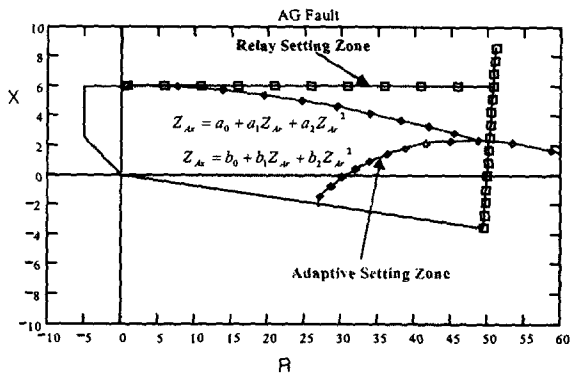


그림 5 거리계전기의 최적동작 범위
Fig. 5 Optimal Operating Range of Distance Relay

결과적으로 2개의 2차함수와 N 개의 1차함수로 구성된 최적동작범위를 기존 정정범위와 비교하면 그림 5와 같다.

그림 5에서 Relay Setting Zone은 기존의 방식대로 정정한 경우의 보호범위이며 Adaptive Setting Zone은 본 논문에서 제안하고자 하는 최적동작범위이다.

대부분의 거리계전기는 R 축으로 Overreach하는 경향이 있는데 이 경우 거리계전기가 중부하시 오동작하는 경우가 있다. 이러한 이유는 그림 5에서 R 축의 오차로 인해 발생하는데 그림 6과 그림 7은 실제 거리계전기를 RTDS를 이용하여 시험하는 모습과 거리계전기의 동작특성을 그린 것이다. 그림에서도 알 수 있듯이 거리계전기가 R 축으로 Overreach 하였음을 알 수 있다.

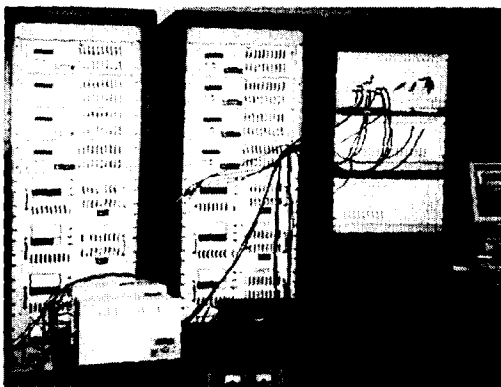


그림 6 거리계전기의 RTDS시험 장면
Fig. 6 RTDS Test of Distance Relay

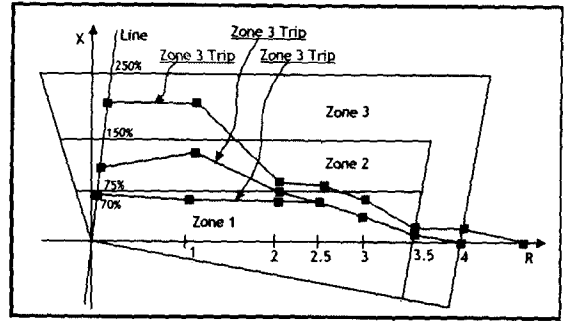


그림 7 거리계전기의 동작특성(RTDS시험결과)
Fig. 7 Operating Characteristics of Distance Relay (Results of RTDS Test)

4. 사례연구

1선 지락사고 모델인 그림 1에 대한 시뮬레이션을 위하여 계통상수들은 표 1과 같이 설정하였으며, 우리나라 계통은 짧은 선로가 대부분이므로 선로길이를 25 km로 설정하였다.

표 1 사례연구를 위한 System Parameters
Table 1 System Parameters for Case Study

Z_{S1A}	$0.5334 + j4.1126 [\Omega]$
Z_{S0A}	$1.8712 + j10.0961 [\Omega]$
Z_{S1B}	$0.5929 + j4.9798 [\Omega]$
Z_{S0B}	$2.3598 + j11.6198 [\Omega]$
Z_{L1}	$0.0436 + j0.3445 [\Omega/km]$
Z_{L0}	$0.2380 + j1.0443 [\Omega/km]$
α	0.7
R_F	50 $[\Omega]$
선로길이	25 [km]

Zone-1의 설정은 선로의 70%이며, Zone-2 지점인 85%지점에서 40Ω 고저항지락사고가 발생한 경우 PSCAD/EMTDC에서 시뮬레이션 결과 계전기 설치점에서의 선로전압과 모선전압은 각각 그림 8 및 그림 9와 같이 나타난다.

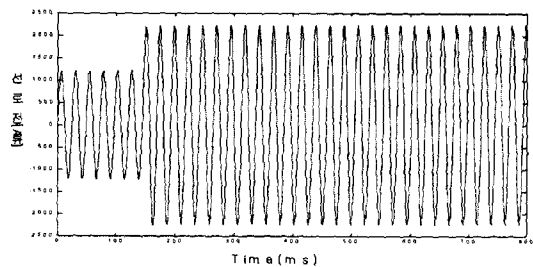


그림 8 Zone-2 지역(85%)에서 고저항지락사고시(40 Ω) 선로전류
Fig. 8 Line Current at High Resistance Ground Fault in the Zone-2 Region(85%)

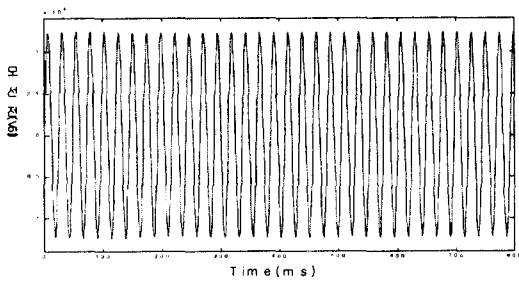


그림 9 Zone-2 지역(85%)에서 고저항지락사고시(40Ω) 모선전압

Fig. 9 Bus Voltage at High Resistance Ground Fault in the Zone-2 Region(85%)

그림 8에서 계전기가 사고전에 측정된 상전압은 $88.328 \angle 59.63^\circ$ [kV], 상전류는 $865.73 \angle 64.42^\circ$ [A]였다. 본 논문에서는 Zone-2, Zone-3의 경우도 마찬가지로 구할 수 있으므로 Zone-1의 경우만 서술하였다.

그림 1의 계통에서 계전기 설치점에서 사고 전 계전기가 측정된 전압과 전류를 바탕으로 식 (11)에 의해 계전기가 보는 임피던스를 구하여 식 (16)에서 2차함수의 계수를 각각 구하면 다음과 같다.

$$a_0 = 6.0563, \quad a_1 = -0.0359, \quad a_2 = -0.0010$$

$$b_0 = -15.2125, \quad b_1 = 0.7999, \quad b_2 = -0.0089$$

그러므로 계전기의 Adaptive Setting은 식 (18), (19)와 같으며, 두식을 만족하면 계전기는 보호구간내에서 사고가 발생한 것으로 판단하면 된다.

$$Z_{Ar} \leq 6.0563 - 0.0359Z_{Ar} - 0.0010 Z_{Ar}^2 \quad (18)$$

$$Z_{Ar} \geq -15.2125 + 0.7999Z_{Ar} - 0.0089 Z_{Ar}^2 \quad (19)$$

최소자승법을 이용한 최적동작범위의 오차를 확인하기 위해 계전기가 보는 임피던스와 최소자승법을 이용한 2차함수를 그림으로 표시하면 그림 10과 같다.

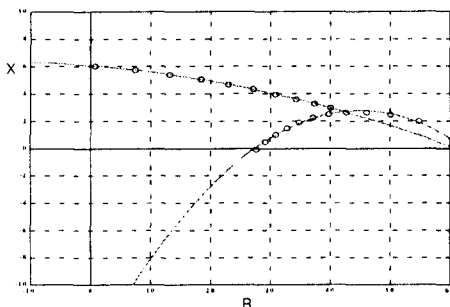


그림 10 계전기가 보는 임피던스와 최소자승오차
Fig. 10 Impedance Measured by Relay and Error of Least Square

그림 10에서 실선은 최소자승법으로 구한 2차함수의 그래프이고 “○”표시는 계전기가 보는 임피던스이다. 그림에서 계전기가 보는 임피던스와 거의 일치함을 알 수 있다. 따라서 계전기의 최적 동작범위는 식 (18), (19)를 만족하고 그림 11에서의 나머지 2,3,4 상한의 Zone을 합성한 보호범위가 된다. 그림에서 빗금친 부분은 오동작이 우려되어 동작범위를 변경한 지역이며 계전기가 계통상황에 맞도록 최초 정정한 동작범위를 바탕으로 빗금친 부분만큼 축소된 최적동작범위가 구성되었음을 알 수 있다

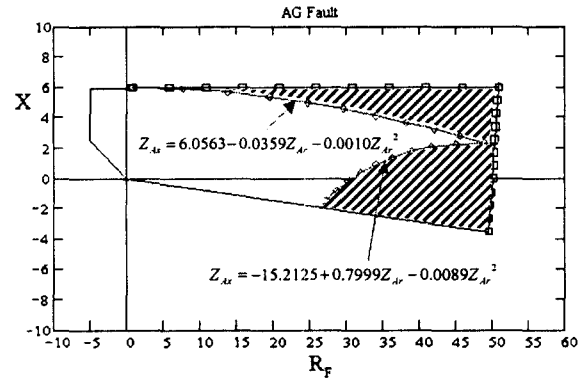


그림 11 최적 동작범위와 기존 보호방식의 범위
Fig. 11 Optimized Operating Range and Original Range

그림 12는 사례연구를 위해 Zone-2 지역인 85%지점에서 40Ω의 고저항지락사고가 발생한 경우 기존방식의 보호범위로 보호하였을 경우와, Adaptive하게 동작범위를 정정한 보호범위로 보호하였을 경우를 비교하였다. 이 경우 Zone-1을 70%로 정정하였기 때문에 계전기는 Zone-2로 동작하여야 정동작이 되지만 원래 정정된 범위로 보호하는 경우는 Zone-1 동작이 되었고 최적동작범위로 보호하는 경우는 Zone-2 동작이 되어 오동작을 방지할 수 있다.

또한 그림 13에서 Zone-1의 경계지점 70%지점에서 40Ω의 고저항지락사고가 발생한 경우는 Adaptive한 보호범위로 정정한 경우도 정확하게 Zone-1의 경계지점에 위치하여 Zone-1동작이 가능하였다.

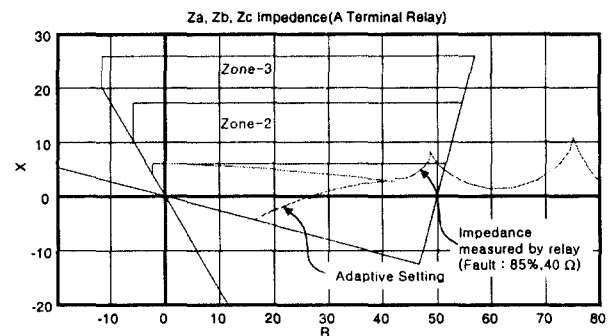


그림 12 Adaptive 보호범위에 의한 거리계전기의 동작 (85%, 40Ω 고저항지락사고)
Fig. 12 Operation of Distance Relay According to Adaptive Setting (85%, 40Ω High Resistance Ground Fault)

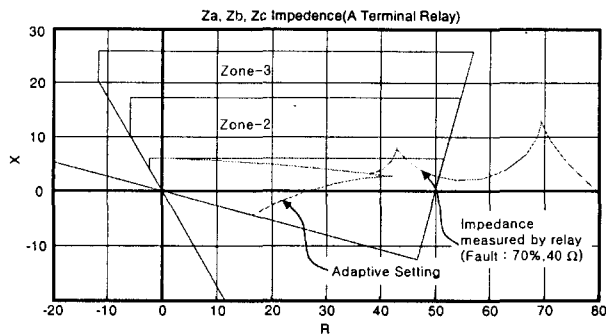


그림 13 Adaptive 보호범위에 의한 거리계전기의 동작 (70%, 40Ω 고저항지락사고)

Fig. 13 Operation of Distance Relay According to Adaptive Setting(70%, 40Ω High Resistance Ground Fault)

5. 결 론

거리계전기는 송전선로 보호에 있어서 후비보호 및 주보호로 많이 사용되고 있는데 이러한 이유는 통신매체를 이용하여 보호하는 계전기는 통신불량의 경우 보호가 불가능하고 자기보호구간만 보호할 수 있어 후비보호용으로 사용할 수 없는 계전기에 비해 많은 장점을 가지고 있는 계전기이기 때문이다. 그러나 그만큼 적은 정보만을 이용하여 사고를 판단하기 때문에 많은 오동작 및 부동작을 일으키기도 한다. 따라서 본 논문에서는 계통의 변화, 특히 선로전류 및

부하역률에 따라 최적동작 범위로 거리계전기가 스스로 최적화하여 보호함으로서 정정치가 고정되어 있어 발생할 수 있는 거리계전기의 오동작 및 부동작을 최소화할 수 있음을 확인하였다. 이러한 Adaptive 보호방식은 중부하시 거리계전기의 Overreach에 의한 오동작을 방지할 수 있을 뿐만 아니라 FACTS기기 등과 같은 보상장치가 설치된 선로의 보호에도 적용이 가능하여 향후 많은 연구성과가 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] Y.Q.Xia, "Adaptive Relay Setting for Stand-Alone Digital Distance Protection", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol.9, No.1, 1994.
- [2] P.J.MOORE, "Performance of Adaptive Distance Protection Under High Resistance Earth Faults", Cigre, 1992.
- [3] C.H.Jung, D.J.Shin, J.O.Kim, "Adaptive Setting of Digital Relay for Transmission Line Protection" PowerCon, 2000. 12.
- [4] 이종범, 정창호 외, "송전계통 고저항지락사고에 대한 보호계전기 시험 및 특성분석에 관한 연구", 대한전기학회 논문지, pp. 412-421, 1998. 4.
- [5] 정창호 외, "Adaptive 보호범위를 가진 송전선로 보호용 디지털 거리계전기", 대한전기학회 하계학술대회, pp. 893-895, 1998. 7.
- [6] 정창호 외, "송전선로 보호용 디지털 거리계전기의 최적 동작범위의 자동설정에 관한 연구", 계통보호제어기술연구회 학술발표회, 1998. 11

저 자 소 개



정 창 호 (丁 昌 鎬)

1966년 6월 15일 생. 1994년 원광대 전기공학과 졸업. 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996~1997년 전력연구원 위촉연구원. 1997~1999년 LG산전 전력연구소 연구원. 현재 한양대 전기공학과 박사과정.

Tel : 02-2290-0347, Fax : 02-2297-1569
E-mail : chjung@ihanyang.ac.kr



김 진 오 (金 鎮 喆)

1956년 1월 17일 생. 1980년 서울대 전기공학과 졸업. 1983년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1991년 Texas A&M Univ. 전기공학과 졸업(공학박). 현재 한양대 공과대학 전기공학과 부교수

Tel : 02-2290-0347, Fax : 02-2297-1569
E-mail : jokim@email.hanyang.ac.kr