

계통조건에 의한 거리계전기의 응답특성에 관한 연구

정창호, 김진오
한양대학교 전기공학과

A Study on the Operational Characteristic of Distance Relay According to Power System Condition

Chang-Ho Jung, Jin-O Kim
Hanyang University

Abstract - This paper presents the reach accuracy of a distance relay for protection of transmission line according to power system conditions.

The apparent impedance of distance relay is considerably affected by source impedance, load current, power factor, fault point and resistance etc..

For protective coordination on the variables power system parameters, trip characteristics of distance relay at sending and receiving terminal are discussed.

1. 서 론

송전선 보호에 있어 거리계전기는 주보호 계전기뿐만 아니라 후비보호 기능을 가지고 있어 대표적으로 사용되고 있는 계전기이다. 그러나 이러한 좋은 장점을 가지고 있기는 하지만 계통조건에 영향을 가장 많이 받는 대표적인 계전기이기 때문에 실제로 송전선 보호에 있어 주보호 기능이 뛰어난 전류차동계전기와 병행하여 사용된다. 또한 거리계전기 적용시 이러한 다양한 전력계통의 조건을 미리 감안하여 보완 목적을 위한 여러 알고리즘이 병행 사용되기도 한다.

따라서 본 논문에서는 거리계전기에 영향을 주는 계통조건중에서 거리계전기내의 보완 알고리즘으로 보완이 불가능한 계통조건들을 상정하여 실제 거리계전기가 어느 정도 영향을 받을 수 있는가를 검토하였다.

또한 양단에 설치된 거리계전기 가운데 송전단에 설치된 계전기와 수전단에 설치된 계전기의 동작특성이 상이하여 보호협조에 많은 검토가 필요하므로 본 논문에서는 송전단 및 수전단 계전기의 보호협조를 위한 검토도 실시하였다. 검토대상이 된 계통조건들은 부하전류, 역률, 전원임피던스, 상차각, 선로임피던스 등이며 검토한 이러한 결과들은 계전기 설치시 이를 미리 충분히 감안하여 거리계전기를 정정함으로써 계전기의 오부동작을 방지하는데 사용될 수 있을 것으로 사료된다.

2. 본 론

2.1 거리계전기가 보는 임피던스

거리계전기가 보는 임피던스는 계전기가 설치된 지점에서의 전압과 전류만을 이용하므로 부하전류의 크기가 변화하거나 부하의 종류가 변하면 계전기가 보는 임피던의 특성이 변화하고 지락사고시 사고지점의 지락저항이 있으면 그 크기에 따라라도 계전기가 보는 임피던스는 실제 임피던스와 상당한 차이가 발생하게 된다.

거리계전기의 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)
- $Z_A = A$ 상 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

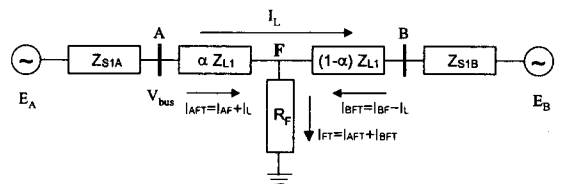


그림 1. 지락사고 모델

그림 1의 F지점에서 사고가 발생한 경우 부하전류와 지락저항값에 따라 계전기가 보는 임피던스는 실제 임피던스와 다르게 나타나며 A모선측에 설치된 계전기와 B모선측에 설치된 계전기가 서로 다른 특성을 갖기 때문에 보호협조시 충분한 검토가 필요하다. 그림 1의 등가회로는 그림 2와 같다.

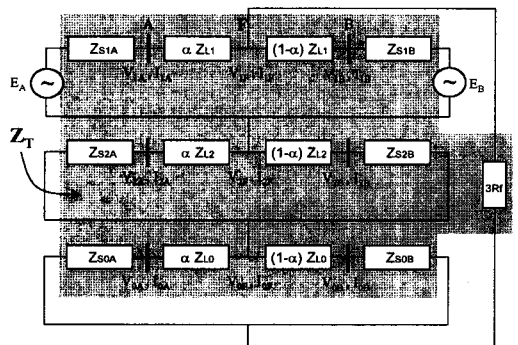


그림 2. 1선지락사고의 등가회로

그림 1에서 사고지점 α 값에 따라 각 모선측에서 본 임피던스는 식 2와 같다.

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

B모선측에 설치된 계전기가 보는 임피던스를 계산하기 위해서는 동일한 방법으로 B모선측에서 본 거리를 α 가 정하여 식 2와 비슷한 다른 식을 구할 수 있다. 등가회로에서 총 임피던스는 식 3과 같다.

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

$E_B/E_A = he^{-j\delta} (= H_\delta)$ 라 하면 $E_B = H_\delta E_A$ 가 되고 선로에 흐르는 부하전류는 식 4와 같다.

$$I_L = \frac{(1 - H_\delta)E_A}{Z_{1A} + Z_{1B}} \quad (4)$$

F지점에서의 사고 전 전압은

$$V_F = E_A - I_L \alpha Z_{L1} \quad (5)$$

F지점에서 사고시 Sequence 전류는 $I_{1F} = I_{2F} = I_{0F}$ 이므로 $I_F (I_{1F} + I_{2F} + I_{0F})$ 는

$$I_F = 3 \frac{V_F}{Z_T} \quad (6)$$

계전기 설치점에서 본 Sequence 전류는

$$I_{1A} = \frac{Z_{1B}}{Z_{1A} + Z_{1B}} \cdot I_{1F}, \quad I_{2A} = I_{1A} \quad (7)$$

$$I_{0A} = \frac{Z_{0B}}{Z_{0A} + Z_{0B}} \cdot I_{0F}$$

그러므로 계전기 설치점에서 본 고장전류는 식 8과 같고 계전기가 측정하는 총 전류는 부하전류를 합한 식 9가 된다.

$$I_{AF} = I_{1A} + I_{2A} + I_{0A} \quad (8)$$

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

그리고 B모선측에서 본 총전류는 식 10과 같다.

$$I_B = I_{BF} - I_L \quad (10)$$

여기서 I_{BF} 는 식 1 - 식 8에서 계산한 방법과 동일하게 B모선측에서 본 값으로 환산하여 계산할 수 있다. 계전기가 측정하는 고장전압은

$$V_A = I_F \cdot R_F + (I_L + I_{1A}) \cdot \alpha Z_{L1} + I_{2A} \cdot \alpha Z_{L1} + I_{0A} \cdot \alpha Z_{L0} \quad (11)$$

B모선측에서 본 전압도 동일한 방법으로 계산하여 식 1에 대입하면 계전기가 보는 임피던스를 계산할 수 있다.

3. 사례연구

사례연구를 위해 표 1과 같은 시스템 파라미터를 설정하였으며 편단전원과 양단전원에서 다양하게 시스템 파라미터를 변경하면서 계전기가 보는 임피던스를 측정하였다. 또한 우리나라에 맞도록 선로를 짧게 구성하였다.

표 1. 사례연구를 위한 시스템 파라미터

$Z_{S1A} = Z_{S1B}$	$0.5334 + j4.1126 [\Omega]$
$Z_{S0A} = Z_{S0B}$	$1.8712 + j10.0961 [\Omega]$
Z_{L1}	$0.0436 + j0.3445 [\Omega/km]$
Z_{L0}	$0.2380 + j1.0443 [\Omega/km]$
R_F	$0 - 50 [\Omega]$
Line length	25 [km]
h	0.95 - 1.0
δ	0 - 20

3.1 편단전원에서 무부하의 경우

그림 1의 양단전원을 편단전원으로 수정하여 계전기가 보는 임피던스를 구하면 식 12와 같다.

$$Z_A = Z_{L1} + \frac{3R_F}{2 + \frac{Z_{L0}}{Z_{L1}}} \quad (12)$$

$Z_{L0} = 3Z_{L1}$ 이라면 계전기가 보는 임피던스는 40%정도 Overreach하게 된다.

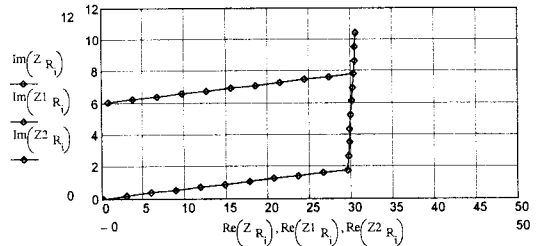


그림 3. 편단전원에서 고저항 지락사고시 계전기가 보는 임피던스

그림 3에서 R축으로 40%정도 Overreach하는 특성을 가지고 있음을 알 수 있다. 또한 $Z_{L1} = Z_{L0}$ 라면 그림 4와 같이 R축의 Overreach는 전혀 없으나 X축의 Angle은 $\arg(Z_{L0}/Z_{L1})$ 에 의해 결정되며 선로의 정상분과 영상분의 크기와 위상이 동일한 경우는 그림 5와 같다.

그림 5에서 R, X축에서 모두 정확하게 Reach하지만 대부분의 선로에서는 $Z_{L0} > Z_{L1}$ 이므로 어느 정도의 R축 Overreach는 나타날 수 있다.

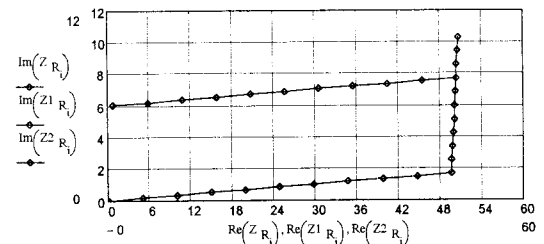


그림 4. 편단전원에서 선로의 정상분과 영상분의 크기가 같은 경우

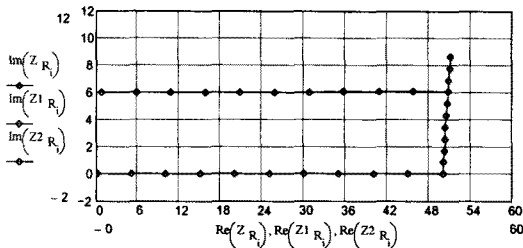


그림 5. 편단전원에서 선로의 정상분과 영상분의 크기와 위상이 같은 경우

3.2 양단전원에서 무부하의 경우

양단전원에서 양단의 전원임피던스가 동일하고 무부하인 경우 A모선측에서 유입하는 전류와 상대단 B모선측에서 유입하는 전류가 같은 지점은 선로의 50%지점이고 50%가 아닌 지점에서는 A,B모선측의 고장전류는 각각 사고지점을 중심으로 동일한 크기로 감소하고 증가하므로 A,B모선측의 계전기 모두 동일한 동작특성을 나타낸다.(그림 6참조)

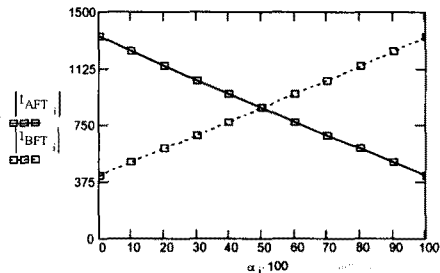


그림 6. A, B모선측에서 유입하는 고장전류(양단의 전원임피던스가 같은 경우)

그림 7은 50%지점과 0%지점에서 사고가 발생한 경우인데 A모선에서 50%지점에서 사고가 발생하면 A모선측 계전기와 B모선측 계전기가 모두 50%지점으로 Reach하고 A모선측에서 0%지점에서 사고가 발생하면 A모선측 계전기는 0%로 Reach하고 B모선측 계전기는 100%로 Reach함을 알 수 있다. 즉, A,B모선측 계전기 모두 동일한 Reach특성을 갖는다는 것을 알 수 있다.

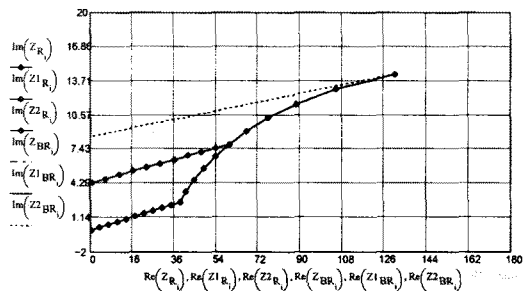


그림 7. A모선에서 0%, 50%지점에서 사고가 발생한 경우 A, B모선측 계전기의 동작특성

그림 8은 A모선측에서 0%, 70%에서 사고가 발생한 경우인데 이 경우에도 마찬가지로 B모선측 계전기는 100% 그리고 30%로 Reach하여 A, B모선측 계전기 모두 동일한 동작특성을 갖는다.

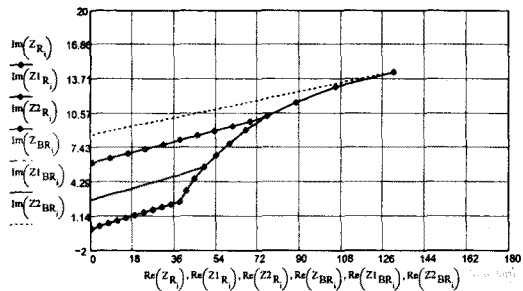


그림 8. A모선에서 0%, 70%지점에서 사고가 발생한 경우 A, B모선측 계전기의 동작특성

3.3 양단전원에서 역조류가 흐르는 경우

역조류가 흐르는 경우는 혼하지는 않지만 시스템에 따라 종종 발생하며 이 경우 보호협조에 상당한 어려움이 있다. 계전기가 보는 임피던스는 사고전 부하전류의 크기와 위상에 영향을 받는데 역조류가 발생하면 부하임피던스는 역조류가 발생하기전과 반대방향에 위치하기 때문에 역조류가 발생하면 보호계전기는 Underreach하게 되며 역조류가 중부하이면 Underreach영역도 증가한다.

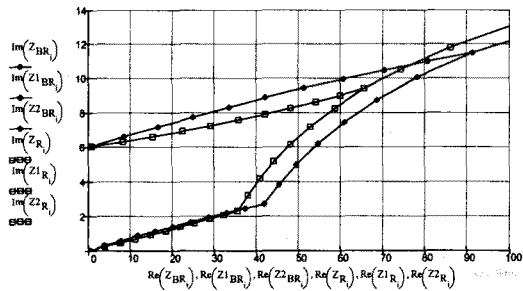


그림 9. 역조류가 발생한 경우 계전기가 보는 임피던스 (부하전류 = $189.30 \angle 170.72^\circ$)

그림 9는 그림 1과 같은 계통에서 역조류가 발생한 경우이다. 역조류인 부하전류가 $189.30 \angle 170.72^\circ$ 인 경우 역조류가 발생하지 않은 경우보다 Underreach가 심하게 나타났으며 역조류가 중부하인 경우는 Underreach는 더욱 심하게 나타남을 알 수 있다.(그림 10참조)

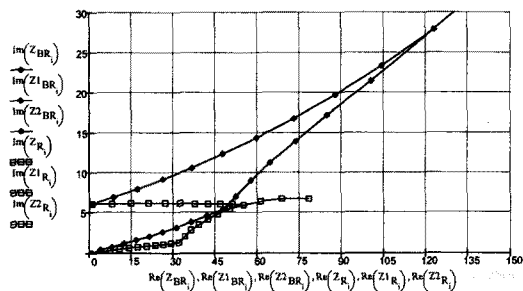


그림 10. 역조류가 발생한 경우 계전기가 보는 임피던스 (부하전류 = $457.65 \angle 179.45^\circ$)

3.4 양단전원에서 부하전류가 흐르는 경우

양단전원에서 부하전류가 흐르면 사고지점의 전압강하와 부하전류에 의해 계전기의 동작특성이 상이하게 나타난다. 무부하인 경우 A, B모선측에서 유입하는 전류와

총 사고전류의 위상이 같기 때문에 A, B모선측의 계전기는 모두 동일한 동작특성을 갖는다. 그러나 사고전 부하전류가 있으면 A, B모선측에서 유입하는 고장전류의 위상이 변하기 때문에 A, B모선측의 계전기는 다른 동작특성을 나타낸다.

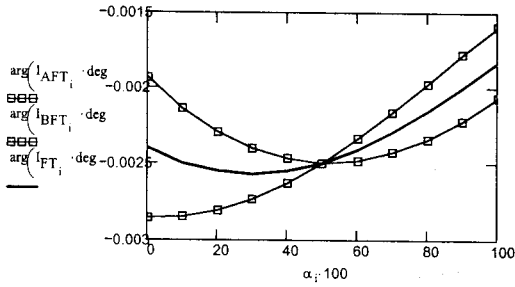


그림 11. 부하전류가 흐르는 경우 양단에서 유입하는 고장전류의 위상($h=0.98, \delta=10, I_L=909.9 \angle 1.9^\circ$)

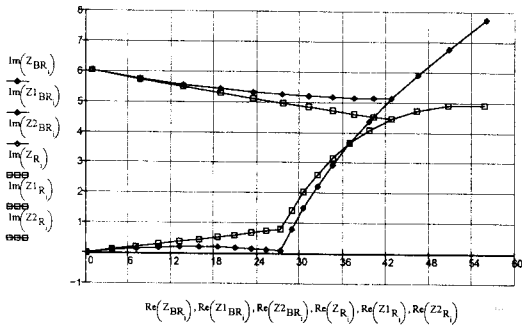


그림 12. 부하전류가 흐르는 경우 양단에서 계전기가 보는 임피던스($h=0.98, \delta=10, I_L=909.9 \angle 1.9^\circ$)

그림 12에서 알 수 있듯이 50%지점의 사고에 대해서만 A,B모선측의 계전기가 동일한 동작특성을 나타내고 그 이외의 사고에 대해서는 서로 다른 특성을 갖는다. 양단의 계전기 모두 Overreach가 발생하며 B모선측의 계전기가 Overreach가 덜하다. 우리나라 계통에서는 선로가 대부분 단거리 선로이고 계통상 h 값이 크지 않으므로 대부분의 계전기는 이와 같이 송전단의 계전기는 Overreach할 가능성이 있고 수전단의 계전기는 Underreach하거나 Overreach 영역이 송전단보다 감소할 수 있다.

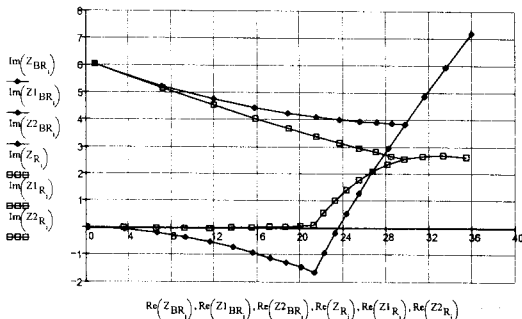


그림 13. 부하전류가 흐르는 경우 양단에서 계전기가 보는 임피던스($h=0.98, \delta=20, I_L=1804 \angle 1.2^\circ$)

3.5 전원임피던스와 선로의 영상분의 영향

그림 14는 그림 12와 같은 부하조건에서 A모선측이 Strong Source 인 경우이다. ($Z_{S1B}=5Z_{S1A}$) Strong source 인 모선측의 계전기는 X축의 Reach 특성은 좋아지는 반면 R축의 Overreach가 약간 증가하였다. 그리고 선로의 영상분이 정상분에 비해 상대적으로 큰 경우 R축 Overreach가 심하게 나타났다.(그림 15참조)

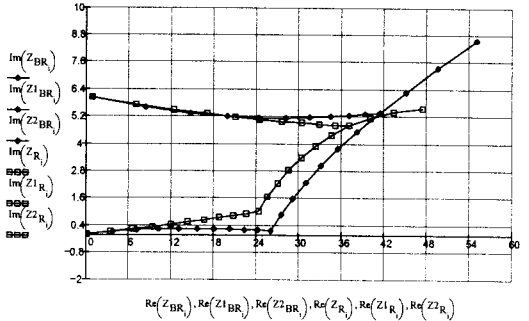


그림 14. Strong Source 인 경우 ($Z_{S1B}=5*Z_{S1A}$)

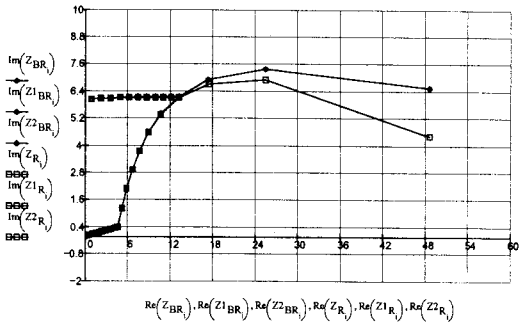


그림 15. 선로의 영상분 임피던스가 10배로 증가한 경우 계전기가 보는 임피던스($h=0.99, \delta=10$)

3. 결 론

본 논문을 통하여 송전선로 보호용 거리계전기가 영향을 받을 수 있는 계통의 조건들을 검토하여 분석하므로써 여러 다양한 조건에서 거리계전기가 어떤 동작특성을 갖는가를 예측하거나 보호협조에 도움이 되도록 하였다. 특히 송전단과 수전단의 계전기의 특성을 분석하여 거리계전기의 정정에 많은 도움이 될 것으로 사료된다. 현재 거리계전기가 전력계통의 여러 조건에 영향을 적게 받는 Adaptive 보호알고리즘에 많은 연구가 진행되고 있으므로 좀더 다양한 오부동작 사례검토가 필요할 것으로 사료된다.

[참고 문헌]

- [1] Y.Q.Xia, "Adaptive Relay Setting for Stand-Along 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.