

2회선 송전선로에서 상호임피던스와 고장저항을 고려한 거리계전기의 동작 특성 연구

論 文
53A-4-4

A Study on Adaptive Distance Protection of Double-circuit Line with Mutual Impedance and Fault Resistance

李 源 奭* · 丁 昌 鎬** · 金 鎮 吾***
(Won-Seok Lee · Chang-Ho Jung · Jin-O Kim)

Abstract - Power system has recently used Double-circuit Line and Multi-circuit Line in the industrial development. This has an advantage of system stability and reliability, but the complexity of the system has a disadvantage that makes it difficult to protect the power line. Double-circuit Line has two operation conditions in the Single-circuit operation and Double-circuit operation, so it has mutual impedance. To make it possible for the remaining single-line to operate independently while there is a fault with first line or when maintenance is needed, a trip region for the single-circuit operation should be set in order to set the relay trip region. An optimal trip region for each operation, a different operational conditions for the relay setting should be calculated.

In this paper, trip regions of each operation condition have been compared by considering mutual impedance and fault resistance that led to the calculation of fault impedance.

Also, as we know that one of the advantages in the distance relay is the back-up protection, we calculated the trip region(Zone-2) in consideration of the mutual impedance.

Key Words : trip region, back-up protection, distance relay, mutual impedance

1. 서 론

송전계통에서 2회선 송전선로는 신뢰성 있고 안정된 전력 공급이 가능할 뿐만 아니라 사고나 보수의 경우에도 정상적인 전력공급이 가능하여 대부분의 송전선로에서 채택되어 운전되고 있다.

거리계전기는 계통조건에 많은 영향을 받는 계전기 이므로 계전기 정정시 많은 조건들을 상세히 검토하여 이를 반영하여야 하는데 2회선의 송전선로의 경우는 송전선로의 운전상태에 따라 더 많은 계통의 조건이 추가되어 계전기의 정동작을 방해하는 원인이 되기도 한다.

거리계전기는 계전기의 설치 점에서 계측용 PT, CT로 측정된 전압과 전류를 입력 신호로 하여 계전기가 바라보는 임피던스를 계산하여 사고를 판단하는데 이러한 거리계전기의 한정된 입력정보는 계통의 변화나 선로의 운영조건 변화에 능동적으로 대응하지 못하므로 오동작이나 부동작을 초래한다. 또한 2회선 송전선로는 1회선 송전선로에는 없는 상호임피던스를 고려해야 하며 사고 위치와 고장저항에 따라 계전기가 보는 임피던스가 변화하기 때문에 상세한 검토와 분석이 필요하다.

거리계전기는 후보호의 Zone 1과 후비보호 기능으로 Zone 2, Zone 3의 보호구간이 있다. 거리계전기의 자기보호

구간이 100%인 경우 보통 Zone 1은 75%내외, Zone 2의 경우는 150%내외를 설정하므로 Zone 2의 일부에도 자기보호 구간 영역을 가지고 있어 Zone 2의 영역도 신중한 분석이 필요하다.

본 논문에서는 기존의 2회선 송전선로에서의 거리계전기의 응답특성에 대한 해석뿐만 아니라 지락사고시 고장저항을 포함하고 거리계전기의 Zone 2의 영역까지 확대하여 거리계전기가 보는 임피던스 영역을 상세히 분석하여 표시하였다.

2. 2회선송전선로의 운전

2회선 송전선로에서 1선 지락사고시의 모델은 그림 1과 같으며 거리 계전기 설치점은 A모선의 Line G인 경우이다.

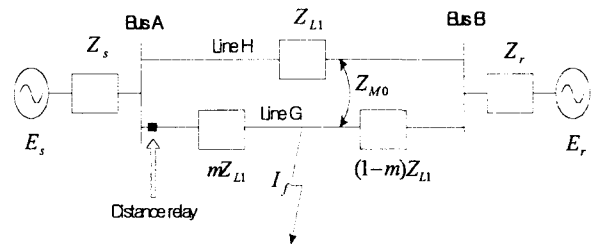


그림 1 2회선 송전선로에서 1선지락 사고
Fig. 1 Single Line Ground Fault in the Double-circuit line

Line G에서 1선지락 사고시 모선에서 보는 임피던스는 사고 위치의 변화에 상관없이 Δ 회로가 되므로 정상분, 역

* 準 會 員 : 漢陽大 工大 電氣工學科 碩士課程
** 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 : 2003年 12月 8日
最終完了 : 2004年 1月 20日

상분, 영상분 임피던스를 계산하기 위해서는 Y회로로 변환하여 계산해야 한다.

그림 2에서 2회선 송전선로는 사고나 보수로 1회선만 운전하는 경우(Single circuit operation)와 2회선 모두를 운전하는 경우(Double circuit operation)가 있다.

1회선 운전시에는 유도 기전력이 Line H에 발생하므로 양단을 접지를 시켜야 한다. 1선지락 사고시 영상분전류가 이 접지선을 따라 Line H에도 흐르므로 상호임피던스를 고려하여야 한다.

운전상태에 따라 정상분, 역상분, 영상분 등가임피던스 회로가 변하므로 각각에 맞는 등가 임피던스를 구하여 계전기가 바라보는 임피던스를 계산하여야 한다.

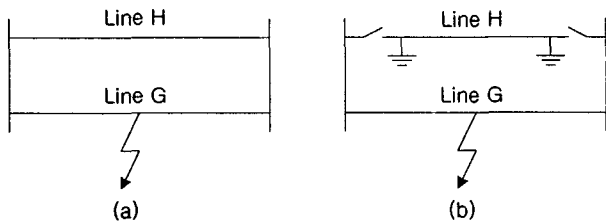


그림 2 (a) 2회선운전 (b) 1회선운전
Fig. 2 (a) Single circuit operation (b) Double circuit operation

3. 임피던스 계산

그림 3은 각 운전상태에 따라 영상분 임피던스 등가 회로를 나타낸 것이다.

그림 3(b)에서와 같이 1회선만 운전하는 경우에도 상호 임피던스의 영향을 받음을 알 수 있다. 이것은 Line G에서 1선지락 사고시 영상분 전류가 Line H로도 흐르기 때문이다. 그림 3(a)에서 계전기 설치점에서 본 영상분 임피던스를 구하기 위해 모선사이의 Δ회로를 Y회로로 변환하여 2회선 송전선로의 운전상태에 따라 상호임피던스와 고장저항을 고려한 등가회로를 가지고 거리계전기가 바라보는 임피던스를 계산한다.

그림 3에서 각 선로의 임피던스는 다음과 같다.

- Z_{L0} : 모선 A와 모선 B 사이의 영상분 선로임피던스
- Z_{M0} : 선로 사이의 영상분 상호임피던스
- m : 계전기 설치점에서 사고점(a)까지의 거리비
- Z_{a0} : 계전기 설치점(버스A)에서 사고점(a)까지의 영상분 선로임피던스
- Z_{b0} : 선로의 영상분 선로임피던스
- Z_{c0} : 사고점(a)에서 모선 B까지의 영상분 선로임피던스

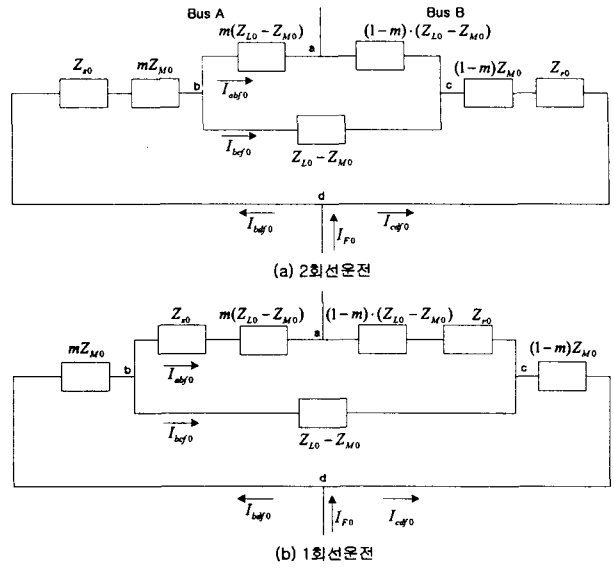


그림 3 2회선 송전선로에서의 영상분 임피던스 등가회로
Fig. 3 Zero sequence component system in the double circuit line

3.1 2회선 운전시 임피던스 계산

그림 3(a)에서 계전기 설치점에서 본 영상분 임피던스를 구하기 위해 Δ회로를 Y회로로 변환하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} Z_{a0} &= m(Z_{L0} - Z_{M0}) \\ Z_{b0} &= Z_{L0} - Z_{M0} \\ Z_{c0} &= (1-m) \cdot (Z_{L0} - Z_{M0}) \end{aligned} \tag{1}$$

식 (1)을 영상분 임피던스 합을 구하기 위하여 Y변환하면

$$\begin{aligned} Z_{A0} &= Z_{a0} + Z_{b0} + Z_{c0} \\ Z_{a0} &= \frac{Z_{a0} \cdot Z_{c0}}{Z_{A0}} \\ Z_{b0} &= \frac{Z_{a0} \cdot Z_{b0}}{Z_{A0}} \\ Z_{c0} &= \frac{Z_{b0} \cdot Z_{c0}}{Z_{A0}} \end{aligned} \tag{2}$$

$$\begin{aligned} Z_{A0} &= Z_{b0} + Z_{c0} + mZ_{M0} \\ Z_{B0} &= Z_{c0} + Z_{a0} + (1-m)Z_{M0} \end{aligned}$$

이 된다. 이 때 영상분 임피던스 합은 식 (3)과 같이 구해 지고

$$Z_{A0} = Z_{a0} + \frac{Z_{A0} \cdot Z_{B0}}{Z_{A0} + Z_{B0}} \tag{3}$$

같은 방법으로 정상분 (Z_{A1}) 과 역상분 (Z_{A2}) 을 구하면

$$Z_{A1} = Z_{A2} = Z_{a1} + \frac{Z_{Ab1} \cdot Z_{Bc1}}{Z_{Ab1} + Z_{Bc1}} \quad (4)$$

이 된다. Total sequence 임피던스 (Z_T) 는 식 (5)과 같이 된다.

$$Z_T = 2 Z_{A1} + Z_{A0} \quad (5)$$

부하전류 (I_{LD-2})는 식 (6)으로 나타내며 한 회선의 부하전류 (I_{LD-1})는 식 (7)과 같이 된다.

$$I_{LD-2} = \frac{(1-h e^{-j\delta}) E_s}{\frac{Z_{L1}}{2} + Z_{s1} + Z_{r1}} \quad (6)$$

$$I_{LD-1} = \frac{I_{2LD-2}}{2} \quad (7)$$

여기서 h 는 송전단과 수신단의 전압차이다. 사고전 사고점의 전압 (U_{ADF}) 은 식 (8)과 같다.

$$U_{ADF} = E_s - I_{LD-2} \left(Z_{s1} + \frac{m Z_{L1}}{2} \right) \quad (8)$$

1선지락 사고시 영상분, 정상분, 역상분의 고장전류는 동일하며 식 (9)로 나타낼 수 있다.

$$I_{F1} = I_{F2} = I_{F0} = \frac{U_{ADF}}{Z_T + 3 R_F} \quad (9)$$

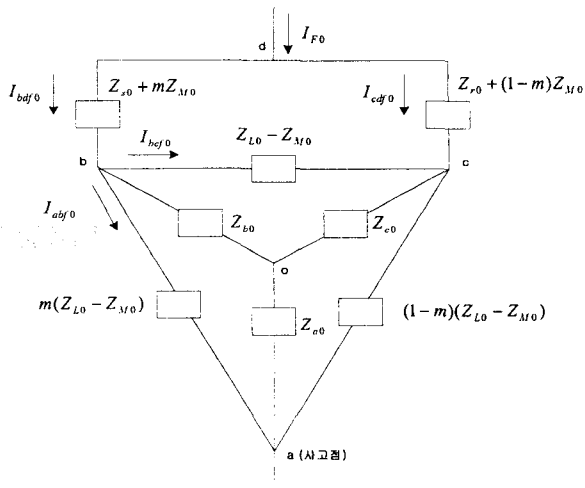


그림 4 2회선 운전에서의 영상분 전류
Fig. 4 Zero-sequence current in the Double circuit operation

사고점까지 흐르는 영상분 전류 I_{ab0} 는 그림 4에서 보는 것과 같이 I_{F0} 가 임피던스비로 I_{bd0} 와 I_{cd0} 로 분배되고, I_{bd0}

는 I_{ab0} 와 I_{bc0} 로 분배됨을 알 수 있다.

$$I_{bd0} = C_0 \cdot I_{F0} \quad (10)$$

$$I_{ab0} = D_0 \cdot I_{F0} \quad (11)$$

$$C_0 = \frac{Z_{Bc0}}{Z_{Ab0} + Z_{Bc0}} \quad (12)$$

$$D_0 = \frac{(C_0 \cdot Z_{M0}) + Z_{a0}}{m(Z_{L0} - Z_{M0})} \quad (13)$$

같은 방법으로 정상분 전류 I_{ab1} 을 구할 수 있다.

$$I_{bd1} = C_1 \cdot I_{F1} \quad (14)$$

$$I_{ab1} = D_1 \cdot I_{F1} \quad (15)$$

$$C_1 = \frac{Z_{Bc1}}{Z_{Ab1} + Z_{Bc1}} \quad (16)$$

$$D_1 = \frac{(C_1 \cdot Z_{L1}) + Z_{a1}}{m Z_{L1}} \quad (17)$$

고장전류 (I_A) 는 식 (18)이 되고 고장전압 (V_A) 은 식 (19)와 같이 나타낼 수 있다.

$$I_A = I_{LD-1} + 2 I_{ab1} + I_{ab0} \quad (18)$$

$$V_A = 3 I_{F1} R_F + m Z_{L1} (I_{LD-1} + I_{ab1}) + m Z_{L1} I_{ab1} + m Z_{L0} I_{ab0} \quad (19)$$

계전기 설치점에서 계전기가 바라보는 임피던스 (Z_A) 는 식 (20)으로 나타낼 수 있다.

$$Z_A = \frac{V_A}{I_A + \left(\frac{Z_{L0} - Z_{L1}}{Z_{L1}} \right) I_{ab0} + \left(\frac{Z_{M0}}{Z_{L1}} \right) I_{bc0}} \quad (20)$$

I_{bc0} 는 식 (11)을 구한 같은 방법으로 구할 수 있다.

식 (20)에 식 (18)과 식 (19)을 대입하면 Z_A 는 다음과 같이 표현된다.

$$Z_A = \frac{3 R_F + m Z_{L1} \left(X_1 + 2 D_1 + \frac{Z_{L0}}{Z_{L1}} D_0 \right)}{X_1 + 2 D_1 + (1 + K_1) D_0} \quad (21)$$

여기서 X_1 와 K_1 은 다음과 같다.

$$X_1 = \frac{(1-h e^{-j\delta})(Z_T + 3 R_F)}{2 \left(\left(Z_{r1} + \frac{(1-m) Z_{L1}}{2} \right) + h e^{-j\delta} \left(Z_{s1} + \frac{m Z_{L1}}{2} \right) \right)}$$

$$K_1 = \frac{Z_{L0} - Z_{L1}}{Z_{L1}} + \left(\frac{Z_{M0}}{Z_{L1}} \times \frac{m Z_{r0} - (1-m) Z_{s0}}{(2-m) Z_{r0} + (1-m)(Z_{s0} + Z_{L0} + Z_{M0})} \right) \quad (22)$$

3.2 1회선 운전시 임피던스 계산

2회선 송전선로에서 1회선 운전시 계전기가 바라보는 임피던스 계산은 2회선 운전과 동일한 방법으로 계산하며, 그림 3(b)의 영상분 등가회로와 식 (20), (23)을 이용하여 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} Z_{ab0} &= m(Z_{L0} - Z_{M0}) + Z_{s0} \\ Z_{bc0} &= Z_{L0} - Z_{M0} \\ Z_{ca0} &= ((1-m) \cdot (Z_{L0} - Z_{M0})) + (1-m) Z_{M0} \end{aligned} \quad (23)$$

1회선 운전시 계전기 설치점에서의 계전기가 바라보는 임피던스는 식 (24)과 같다.

$$Z'_A = \frac{3 R_F + m Z_{L1} \left(X_2 + 2 D'_1 + \frac{Z_{L0} D'_0}{Z_{L1}} \right)}{X_2 + 2 D'_1 + (1 + K_2) D'_0} \quad (24)$$

식 (24)에서

$$\begin{aligned} X_2 &= \frac{(1-h e^{-j\delta})(Z'_T + 3 R_F)}{(Z_{r1} + (1-m) Z_{L1}) + h e^{-j\delta}(Z_{s1} + m Z_{L1})} \\ K_2 &= \frac{Z_{L0} - Z_{L1}}{Z_{L1}} + \left(\frac{Z_{M0}}{Z_{L1}} \times \frac{Z_{M0}((1-m) Z_{s0} - m Z_{r0})}{Z_{L0}((1-m) Z_{L0} + Z_{r0}) - (1-m) Z_{M0}^2} \right) \end{aligned} \quad (25)$$

이며 Z'_T 와 전류비 D'_1 , D'_0 도 2회선 송전과 같은 방법으로 구할 수 있다.

4. 사례 연구

사례연구를 위해 2회선 송전선로는 154kV, 양모선의 전압비 $h=0.97$, 위상차 $\delta=20^\circ$, 각 회선의 선로 임피던스는 동일하게 설정하였다. 고장저항 (R_F)는 0에서 200 Ω까지 고려하였고 모선간 선로 길이는 100km이다.

Zone-1에서의 운전상태별 거리계전기가 보는 임피던스 영역을 구하기 위해서는 그림 1의 모델을 사용하였고 Zone-2의 임피던스 영역을 구하기 위해서는 그림 5의 모델을 사용하였다.

그림 5에서 Zone-2의 영역은 계전기 설치점(모선 A)에서 Zone-1 이후구간부터 모선 B, C의 50%까지를 Zone-2 (150%)로 설정하였다.

$$\frac{E_r}{E_s} = h \cdot e^{-j \cdot \delta} \quad (26)$$

사례연구에서 사용된 시스템 임피던스는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} Z_{s0} &= 1.8712 + j10.0961(\text{ohm}) \\ Z_{s1} &= 0.5334 + j4.1126(\text{ohm}) \\ Z_{r0} &= 2.3598 + j11.6198(\text{ohm}) \\ Z_{r1} &= 0.5929 + j4.9798(\text{ohm}) \end{aligned}$$

선로임피던스는 다음과 같이 설정하였다.

$$\begin{aligned} Z_{L0} = Z_{2L0} &= 0.2380 + j1.0443(\text{ohm/km}) \\ Z_{L1} = Z_{2L1} &= 0.0436 + j0.3445(\text{ohm/km}) \\ Z_{M0} &= 0.1948 + j0.5633(\text{ohm/km}) \end{aligned}$$

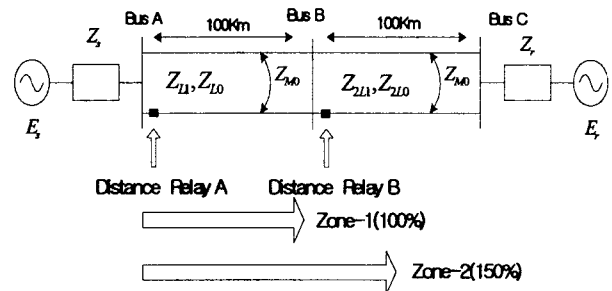


그림 5 Zone-2 모델계통

Fig. 5 Zone-2 Model System

4.1 상호임피던스를 고려한 운전상태별 임피던스 영역

2회선 송전선로에서 2회선 운전을 하다가 한 회선을 보수하거나 사고로 인하여 한 회선이 차단되었을 때에도 1회선 만으로도 송전이 가능하다. 그림 6은 상호임피던스를 고려하는 경우 1회선 운전과 2회선 운전시 계전기가 보는 임피던스 영역을 비교한 것이다. 고장저항이 zero 인 경우에는 1회선을 운전하는 경우가 2회선을 운전하는 경우보다 거리계전기가 보는 임피던스가 값이 비교적 정확하며 고장저항이 클수록 부하전류의 영향을 많이 받고 있음을 알 수 있다. 이처럼 사고지점과 고장저항값에 따라 거리계전기가 보는 임피던스는 차이가 많이 발생하기 때문에 계전기 정정시 이를 고려하여야 한다.

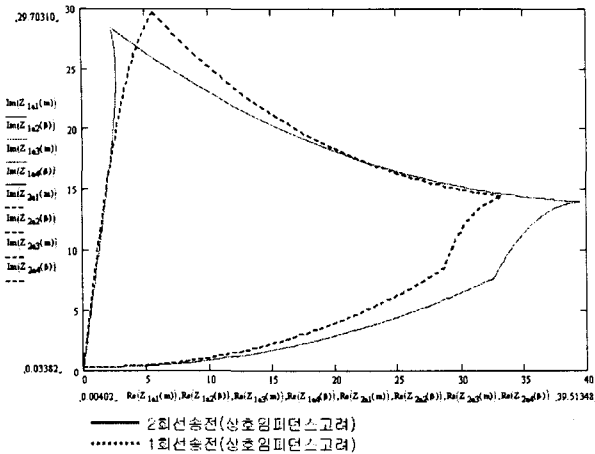


그림 6 2회선 운전과 1회선 운전의 임피던스 비교
 Fig. 6 Comparison of Double circuit operation and Single circuit operation

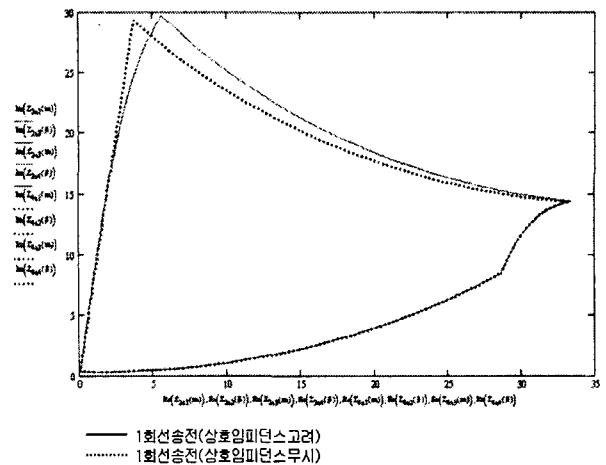


그림 8 2회선 송전선로에서 1회선 운전시 임피던스영역
 Fig. 8 Trip region of Single circuit operation

4.2 상호임피던스를 고려한 트립영역과 상호임피던스를 고려하지 않은 트립영역 비교

2회선 송전선로에서 대부분은 상호임피던스를 무시하고 계전기를 정정하고 있는데 상호임피던스를 고려한 경우와 고려하지 않은 경우의 각 운전상태에 따라 거리계전기가 보는 임피던스를 나타내었으며 그림 7, 8과 같다.

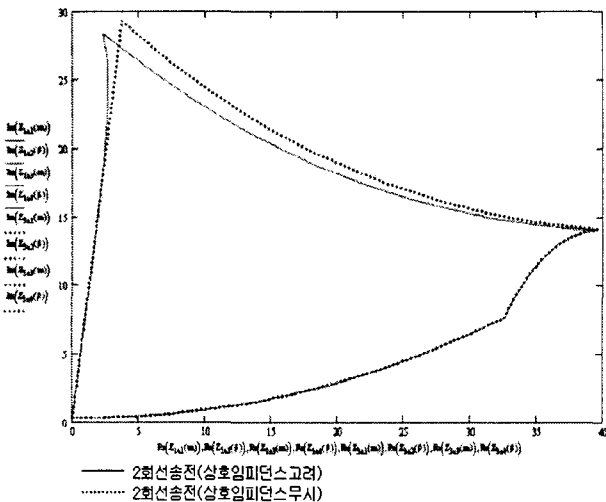


그림 7 2회선 송전선로에서 2회선 운전시의 임피던스영역
 Fig. 7 Impedance region in the Double circuit operation

그림 7과 같이 송전선로를 2회선을 운전하다가 1선 지락 사고가 발생하는 경우 상호임피던스의 무시하는 경우 고장 저항이 충분히 큰 경우에는 상호임피던스를 고려한 경우와 많은 차이가 없으나 고장저항이 적을수록 차이가 발생함을 알 수 있다.

그림 8은 2회선 송전선로에서 1회선만 운전하다가 선로에서 1선 지락사고가 발생하는 경우 상호임피던스를 고려한 경우와 고려하지 않은 경우를 비교한 것이다. 그림 8도 마찬가지로 그림 7과 비슷한 결과를 얻을 수 있다.

4.3 상호임피던스를 고려한 2회선 송전의 Zone-2 영역

송전계통의 사고시 주보호 계전기의 부동작으로 사고의 파급을 방지하기 위하여 송전계통 상호간의 후비보호는 필수적이라 할 수 있다. 그림 5에서 보는 것과 같이 모선 B, C 사이에 1선지락 사고시 모선 B에 설치된 주보호 거리계전기가 동작하여 계통에서 버스 B, C를 분리하여야 한다. 그러나 거리계전기 B에서 부동작이 발생하였을 경우에는 사고의 파급을 방지하기 위하여 거리계전기 A에서 후비보호가 가능하도록 Zone-2 영역에 대해서도 A모선에 설치된 거리계전기가 보는 임피던스 영역을 파악하여 충분히 이를 반영하여 거리 계전기를 정정하여야 한다.

B모선에 설치된 거리계전기가 부동작하는 경우 A모선에 설치된 거리계전기의 동작으로 버스 A, C간의 선로를 계통에서 분리하여 사고의 파급을 막을 수 있다. A모선에 설치된 거리계전기가 보는 Zone-2의 임피던스 영역을 구하기 위해서 식 (21), (22)을 이용하였다.

그림 9에서 보는 것과 같이 Zone 1과 Zone 2 구간사이에 계전기가 보호하지 못하는 영역이 있음을 알 수 있다. 이는 각 임피던스 영역을 계산할 때 모선 B를 경계로 Zone-1을 구할 때는 모선 B와 C 사이를 등가하고 Zone-2를 계산할 때는 모선 A와 B사이를 등가 하여 계산하기 때문에 발생한 임피던스 영역이다.

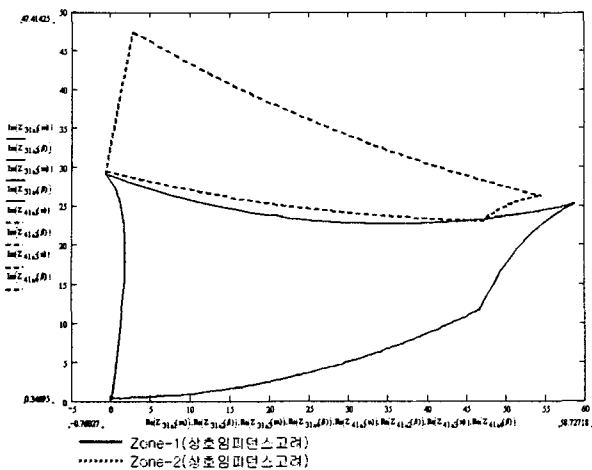


그림 9 2회선 송전의 Zone-2 임피던스 영역
Fig. 9 Zone-2 Impedance region in the Double circuit line

5. 결 론

거리계전기는 송전선로 보호에 많이 쓰이고 있으며 별도의 통신라인 없이도 단독으로 설치하여 송전선로 보호가 가능한 장점을 가지고 있다. 그러나 선로상태와 계통상황을 고려하여 초기에 거리계전기가 보는 임피던스와 동작영역을 정확히 계산하여 계전기를 정정하여야 하므로 보호선로가 2회선 송전선로인 경우에는 상호 임피던스와 고장저항을 고려하여 정확하게 동작영역을 계산할 필요가 있다.

본 논문은 2회선 송전선로에서 선로의 운전상태에 따른 거리계전기가 보는 임피던스 영역과 후비보호 기능인 Zone-2까지 거리계전기가 보는 임피던스를 구하였다. 또한 2회선 송전선로에서 상호임피던스를 고려한 경우와 고려하지 않은 경우의 거리계전기의 동작영역을 각 운전상태 별로 비교하였다.

2회선 송전선로에서 상호임피던스를 무시할 경우와 상호 임피던스를 고려하는 경우 운전조건별로 계전기가 보는 임피던스를 참고하여 Zone 1과 Zone 2의 계전기 정정에 좋은 자료와 정정값의 근거가 되어 거리계전기의 오부동작을 어느정도 방지할 수 있을것으로 사료된다.

참 고 문 헌

[1] A. G. Jongepier and L. van der Sluis, "Adaptive distance protection of a Double-circuit line", IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 9, pp. 1289-1295, July 1994.
[2] Yi Hu, Damir Novosel, Murari M. Saha, "An Adaptive Scheme for Parallel-Line Distance Protection", IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 17, NO. 1, pp. 105-110, Jan 2002.

[3] Y. Q. Xia, K. K. Li, A. K. David, "Adaptive Relay Setting for Stand-alone Digital Distance Protection", IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 9, NO. 1, pp. 480-486, Jan 1994.
[4] Y. Q. Xia, A. K. David, K. K. Li, "HIGH RESISTANCE FAULTS ON A MULTI-TERMINAL LINE: ANALYSIS, SIMULATED STUDIES AND AN ADAPTIVE DISTANCE RELAYING SCHEME", IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 9, No. 1, pp. 492-496, Jan 1994.
[5] P. G. M Laren, I. Fernando, H. Liu, E. Dirks, G. W. Swift, "Enhanced Double Circuit Line Protection", IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 12, No. 3, pp. 1100-1108, July 1997.

저 자 소 개



이 원 석 (李源奭)

1973년 08월 29일생. 1998년 한려대 전자계산학과 졸업. 현 한양대학교 대학원 전기공학과 석사과정.
Tel : 02-2290-0347 Fax : 02-2297-1569
E-mail : evan1255@hotmail.com



정 창 호 (丁昌鎬)

1966년 6월 15일생. 1994년 2월 원광대학교 전기공학과 졸업(학사). 1996년 2월 동 대학원 졸업(석사). 현 한양대학교 대학원 전기공학과 박사과정.
E-mail : chjung@ihanyang.ac.kr



김 진 오 (金鎭喆)

1956년 1월 17일생. 1980년 2월 서울대학교 전기공학과 졸업(학사). 1983년 2월 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1991년 12월 Texas A&M 대학교 전기공학과 졸업(공학박사). 현재 한양대학교 전자전기공학부 부교수.
E-mail : jokim@hanyang.ac.kr