

오차를 고려한 송전선 보호 거리계전 정정률에 대한 고찰

조성진*, 최면송, 현승호, 김종욱, 이주왕
 명지대학교 차세대 전력기술 연구 센터

조범섭, 유영식
 한국전력거래소

Examination with Transmission Line Distance Relay Setting Rule Considering Error

Seong-Jin Cho, Myeong-Song Choi, Ho-Seung Hyun
 Jung-wook Kim, Joo-Wang Lee
 Next-Generation Power Technology Center
 in Myong-ji University

Bum-Sub Cho, Young-Sik Yoo
 Korea Power Exchange

Abstract - Korea Power System Protection Setting Rule was used from the rectify 1990's. Thereafter transmission voltage is raised the voltage into 765kV, and introduction to new technology of Power System, and was many of variation but, it is using. The present is using Digital type distance relay for 765kV transmission line protection. If impedance value of transmission line were to value lower than setting, this would be operating and relay setting rule is for 85% into Zone 1 self section, and Zone 2 is a 125%, Zone 3 is a 225%. Which's 15~25% include current transformer error 5%, potential transformer 5%, relay calculation error 5%, and margin factor from the field experience. This paper is discussed transmission protective relay and relay setting rule of high voltage power system and we verify the correctness relay setting rule with distance relay using Matlab simulation.

1. 서 론

보호계전기 정정지침은 1982년도에 최초로 제정된 이후 1990년도에 개정되어 적용하고 있으나 개정 당시의 계통조건과 보호설비가 현재와 상이함에도 불구하고 현재까지 사용되고 있다. 우리나라의 전력계통은 수요 증가에 따라 확대되어 왔으며, 이에 대처하기 위하여 대용량전원인 765kV를 도입하였으며 현재 운용중이다. 765kV 계통은 송전용량이 대폭 증가하기 때문에 사고가 발생하면 계통에 미치는 충격이 매우 크며 따라서 중래의 345kV 계통에 적용된 보호계전시스템에 비하여 보호 계전기의 동작은 더 고속화되고 고장검출감도는 더 높아야 하며, 또한 보호장치의 보다 높은 동작 신뢰도가 요구된다. 보호 계전기 기술의 발달로 인하여 아날로그 보호계전기에서 디지털보호계전기가 도입되어 더욱 정밀하고 민감한 동작을 함에도 기존에 적용한 정정률(Rule)을 사용하고 있다.[1]

거리계전방식은 사고시의 전압 전류에 따라서 사고점까지의 선로 임피던스를 측정하고 그 값이 미리 정한 정정값 이하로 되었을 때 동작하는 것이므로 보호범위는 계통조건 변화의 영향이 적고 과전류 계전기에 비해서 훨씬 적용하기 용이하며 또한 확실하기 때문에 고속도 보호가 가능한 것이다.[2] 이러한 송전선 보호용으로 사용되는 보호 계전기의 정정률을 보면 단락 보호거리계전기의 경우 Zone1은 자기구간 선로 임피던스의 85%를, Zone2는 125%, Zone3는 225%를 보호범위로 하고 있으며, 지락보호거리계전기의 경우 Zone1은 75%, Zone2는 125%, Zone3는 225%를 보호범위로 하고있

다.
 본 논문은 거리계전기의 정정률을 알아보고, 오차를 고려한 거리측정 변동률을 시뮬레이션을 통하여 거리계전기의 정정 범위에 대해 알아보았다.

2. 본 론

2.1 현재 송전선로에 운용중인 거리계전방식

표 1. 송전선에 운용중인 거리계전방식[2]

전압 구분	계열 구분	광통신 사용시		광통신 미사용시	
		주보호	후비보호	주보호	후비보호
765 KV	1	PCM전류차동방식	3단계 거리계전방식	—	—
	2	상동	상동	—	—
345 KV	1	전력선반송방향비교방식(BLK)	3단계 거리계전방식	전력선반송방향비교방식(BLK)	3단계 거리계전방식
	2	PCM전류차동방식	-미적용-	제어언더피치전송차단방식(PUTT)	3단계 거리계전방식
154 KV	1	PCM전류차동방식	3단계 거리계전방식	전력선반송방향비교방식	3단계 거리계전방식
	2	PCM전류차동방식	-미적용-	제어언더피치전송차단방식(PUTT)	3단계 거리계전방식

송전선로보호에 적용하고 있는 거리계전방식은 표 1에 나타낸 것과 같이 3단계 거리계전방식을 적용하고 있으며 후비보호로 사용되고 있다.

2.2 3단계 거리계전방식

거리계전방식은 거리계전기 3개를 1조로하여 가장 보호범위가 좁은 제1단 Zone1은 순시 동작을 하고 보호범위를 넓힌 제2단은 Zone2와 제3단 Zone3는 한시계전기와 조합하여 각각 T_2 , T_3 의 동작시간을 갖도록 되어 있으며 사고점의 위치에 대한 동작시간 특성은 그림 1과 같다. 실제 적용하고 있는 3단계 거리계전방식의 정정률(Rule)은 표 2에 나타내었다. Zone1은 자기구간의 사고에 대해서만 보호를 하며 타구간 사고시 동작 되는 일이 없도록 하는데 그 목적이 있다. 자기구간의 100%로 정정하지 않은 이유는 계전기 자체의 측정오차, CT, PT의 오차 및 선로 임피던스 오차 등을 고려한 것으로써 타구간의 사고시 측정임피던스가 자기구간의 것으로 판단되어 오동작 할 가능성이 있기 때문에 이것을 피하기 위한 것이다. 단락보호의 경우 자기선로구간 임피던스의 85%, 지락의 경우 75%정도를 보호범위로 하도록 되어 있다. 여기서 CT, PT, 계전기의 오차(계산 오차) 5%의 여유를 주는데, 이는 제작사들의

관망사항이며 한국전력의 구매사항으로써 이를 따른 것이다. Zone1은 보호구간의 사고를 고속도 차단을 위해 동작시간은 154, 345KV의 경우 1~3 Cycle, 765KV의 경우는 9cycle 이다.

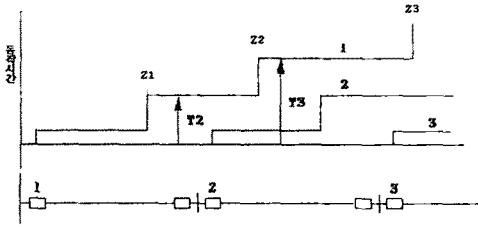


그림 1. 3단계 거리계전방식

표 2. 실제 거리계전방식 정정 물(Rule)[2]

단계	동작시간	정정 물(Rule)	보호원칙
Zone 1	154KV. 345KV (1-3 Cycle) 765KV (9 Cycle)	-단락:자기구간의 85% -지락:자기구간의 75% (CT5%,PT5%,imp3%,계산오차5%,margin)	자기구간만 보호
Zone 2	154KV (20 Cycle) 345KV. 765KV (24 Cycle)	-자기구간에서 125% -자기구간100%+다음구간 최장선로의 50% ⇒상기 중 큰 것 선택	자기구간을 100%보호하겠다는 의지. 자단의 리치보다 짧아선 절대 안됨.
Zone 3	154KV. 345KV 765KV (100 Cycle)	-자기구간100%+다음구간 최장선로의 125% -선로허용 부하임피던스 ⇒상기 중에 큰 것 선택	다음 단과 협조하여 인접구간에 생긴 고장에 대한 보호

Zone2는 Zone1이 자기구간 내부 사고시 완전히 보호하지 못할 가능성이 있기 때문에 자기구간의 사고는 100%를 보호하겠다는 목적과 강한 의지가 있다. 이는 다음 구간의 아주 가까운 고장에 충분히 동작할 수 있도록 자단의 리치(Reach) 100% 보다 반드시 커야만 하며 통상 125~150%를 보고 있다. 또한 Zone1과 협조를 위해 154KV의 경우 20cycle, 345, 765KV 경우는 24cycle 정도 시간지연 동작시킨다. 실제로 고장차단은 Zone1과 Zone2만으로도 보호가능 하지만 이들 계전기에 대한 후비 보호를 위하여 Zone3를 사용한다.

Zone3는 인접구간의 후비보호가 목적이므로 인접구간 중 최장의 것을 완전히 보호선로 임피던스 범위 안에 포함하도록 하여야한다. 따라서 자기구간의 100%와 다음구간 최장선로 임피던스의 125%를 합한 225%를 보고 있으며, 동작 시간의 정정도 Zone2의 경우와 같이 다음구간의 계전기 동작시간과 협조를 취하여 불필요한 차단을 하지 않도록 주의할 필요가 있다. 통상 154, 345, 765KV 모두 100cycle로 정정하고 있다.

2.3 3단계 거리계전기 거리측정방식

실제 직접접지 초고압 송전선로 후비 지락보호에는 일반적으로 거리계전방식이 적용된다.

3단계 거리계전기에서는 그림 2에서 1선지락 사고가 A 상에 발생한 경우 계전기 설치점에 있어서 정상 임피던스는 다음과 같은 방법으로 측정한다.

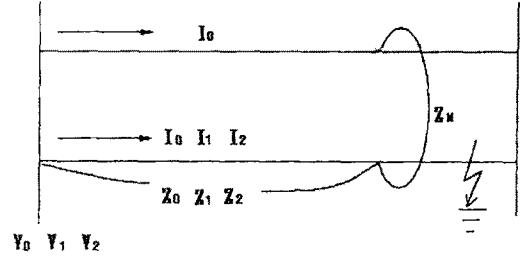


그림 2. 지락거리계전기의 거리측정

사고상 전압 V_A 는

$$V_A = V_0 + V_1 + V_2$$

로 주어지며 여기에서

$$V_0 = I_0 \times Z_0, V_1 = I_1 \times Z_1, V_2 = I_2 \times Z_2$$

이며, 타회선에 의한 상호임피던스를 고려하면

$$V_A = Z_1 \times [(I_0 + I_1 + I_2) + \frac{Z_0 - Z_1}{Z_1} \times I_0 + \frac{Z_m}{Z_1} I_0'] \\ = Z_1 \times [I_A + (\frac{Z_0 - Z_1}{Z_1} \times I_0 + \frac{Z_m}{Z_1} \times I_0')]$$

따라서 계전기가 측정하는 임피던스 Z_1 는 다음 식과 같다.

$$\therefore Z_1 = \frac{V_A}{I_A + [(\frac{Z_0 - Z_1}{Z_1} \times I_0 + \frac{Z_m}{Z_1} \times I_0')]} \quad (1)$$

3.1 거리계전 정정물(Rule)의 시물레이션

송전선 지락고장시 상호 임피던스에 의한 영향으로 증가되는 임피던스 증가분을 고려하지 않는 154kV 1회선 송전계통을 모의하였다.

본 시물레이션에서는 거리계전방식에서 적용하는 CT, PT의 오차를 각각 5%, 선로 임피던스 오차 3% 계전기 계산오차 5%를 고려한 임피던스 값과 오차를 적용하지 않은 값을 비교하여 그 변동폭을 시물레이션 하였으며, 결과 분석을 통하여 정정률에 대해 알아보았다.

3.2 오차율을 고려한 임피던스 계산

거리계전방식에서 가공송전선로 1회선의 고장 계산 방법은 식(2)와 같다.

$$Z_L = \frac{V_A}{I_A + I_0 \times (\frac{Z_0 - Z_1}{Z_1})} \quad (2)$$

식(2)의 각 CT, PT, 임피던스 각각 $\pm 5\%$ 의 오차를 고려하면

$$Z_R = \frac{V_{A\text{measure}}}{I_{A\text{measure}} + I_{0\text{measure}} \times (\frac{Z_{0\text{measure}} - Z_{1\text{measure}}}{Z_{1\text{measure}}})} \quad (3)$$

이며, 식(3)에 계전기 계산오차를 고려하면

$$Z_{RL} = Z_R \times (1 \pm 5\%) \quad (4)$$

이다. 위 식(2), (4)를 비교함으로써 실제 사고점의 임피던스 값과 오차를 고려한 값과의 변동율 Z_{error} 은 다음 식과 같다.

$$Z_{error} = \frac{Z_{RL} - Z_L}{Z_L} \times 100[\%] \quad (5)$$

3.3 차를 고려한 임피던스 변동율의 시뮬레이션

변동률 계산은 식 (5)를 사용하였으며 각 요소 CT, PT의 오차범위를 154kV 1회선 80Km 단거리 송전선로에 적용하여 각 오차 요소들을 Matlab의 함수를 사용하여 랜덤하게 100만번 발생시켜 시뮬레이션 하였다.

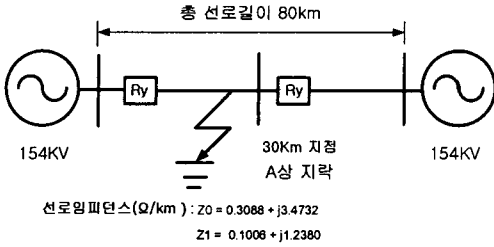


그림 3 154KV 1회선 송전선로 모의

위 그림처럼 30Km지점에서 A상지락 사고를 EMTP로 모의 한 후 DFT하여 변동률을 시뮬레이션하였다. 여기서 임피던스 오차를 3%를 적용하여 오차 변동률을 그래프로 나타내면 다음과 같다.

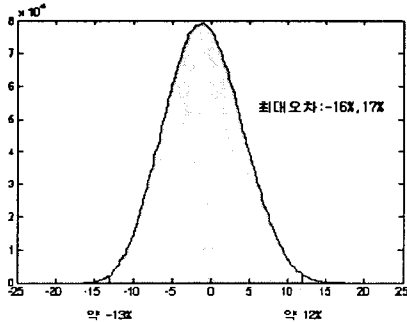
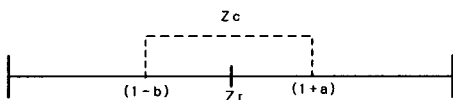


그림 4 임피던스 오차3%시 오차분포곡선
* □ : 오차율의 99%가 차지하는 면적

위 그림(4)에서 알 수 있듯이 임피던스 오차를 3% 적용시 최대 -16%, 17%이다. 하지만 실제 시뮬레이션 한 값들의 대부분(99%)가 □안의 -13%, 12%로 분포됨을 알 수 있는데, 이는 위의 그림에서 볼 수 있듯이 최대 발생 오차 범위 보다 작은 값을 의미한다. 따라서 실제 임피던스에 오차율을 최대 -13%, 12%를 적용한다. 즉 실제 사고점 임피던스 보다 최대 13% 오버리치하거나, 또는 최대 12%까지 언더리치하는 결과가 생긴다. 이러한 사고점과 계산시 오차고려 범위는 그림(5)와 같다.



* Z_R : 실제 임피던스 값

* Z_C : 오차를 고려한 계산 임피던스

그림 5. 실제사고점 계산시 오차고려 범위

이때 실제 사고점의 임피던스 값 Z_R 과 오차율을 적용한 계산 임피던스 값 Z_C 와의 관계식은 다음과 같다.

$$Z_R(1-b) \leq Z_C \leq Z_R(1+a) \quad (6)$$

여기서 실제 고장점 임피던스 Z_r 에 관한 식으로 정리하여 식을 변형하면

$$\frac{Z_C}{(1+a)} \leq Z_R \leq \frac{Z_C}{(1-b)} \quad (7)$$

이다. 여기서 자기구간 임피던스를 Z_L 라하고 고장점 임피던스 Z_R 를 p,u법으로 나타내면 $Z_{Rpu} = \frac{Z_R}{Z_L} = 1$ 이며 이를 (6)식에 넣어 정리하면

$$\frac{Z_{Cpu}}{(1+a)} \leq Z_{Rpu} \leq \frac{Z_{Cpu}}{(1-b)} \quad (8)$$

Zone1은 자기구간만 보호하며 타구간 사고시 오동작하는 일이 없도록 하는 것이 목적이다. Zone1 정정시 자기구간 임피던스를 100%로 볼 때 타구간의 사고시 내부 사고로 판단하여 동작하는 것을 막기 위하여 오버리치를 고려해야 하므로 식(8)의 우변항 즉 $Z_{Cpu} \leq 1$ 이어야 하며 이를 정리하면

$$\frac{Z_{Cpu}}{(1-b)} \leq 1 \quad (9)$$

$$\therefore Z_{Cpu} \leq (1-b) \quad (10)$$

이된다. 여기서 1회선 선로의 경우 오버리치가 13%이므로 이를 적용하여 Zone1의 정정 범위를 구하면 $Z_{Cpu} \leq (1-0.13)$ 즉 $Z_{Cpu} \leq 0.87(87\%)$ 이다. 1회선 송전선로의 지락거리계전기 Zone1의 정정은 자기구간 선로 임피던스 100%에서 13%를 제외한 87%이하이면 타구간에 의한 오동작을 방지 할 수 있다. Zone2의 경우는 Zone1이 보호 할 수 없는 자기 선로의 잔여 부분이 생기므로 자기구간내 사고를 모두 보호 할 수 없다. 따라서 자기구간내 사고를 100% 보호하겠다는 강한 의지가 담겨 있는 것으로써 자기구간 내 사고를 모두 보호할 수 있도록 자기구간 임피던스를 100%로 보았을 때 나타난 언더리치 12%를 고려해야만 한다. 따라서 식 (8)의 좌변항 즉 $1 \leq Z_{Cpu}$ 이어야 하며 이를 정리하면

$$1 \leq \frac{Z_{Cpu}}{(1-a)} \quad (11)$$

$$\therefore Z_{Cpu} \geq (1+a) \quad (12)$$

이 된다. 1회선 송전선로의 경우 12%를 고려해야하므로 $Z_{Cpu} \geq (1+0.12)$, 즉 $Z_{Cpu} \geq 1.12(112\%)$ 이다. 따라서 1회선 송전선로의 Zone2의 정정은 자기구간 임피던스의 112%이상으로 정정한다면 Zone1이 보호하지 못하는 잔여 구간을 모두 포함한 자기구간은 100% 충분히 보호 할 수가 있다. Zone3의 경우 다음 단과의 협조하여 인접구간에 발생한 고장시 인접구간 계전기가 차단할 수 없을 경우 앞단의 계전기가 협조하여 보호하는 즉, 후비보호가 목적이다. 따라서 자기구간 임피던스와 인접구간 임피던스를 고려하여 협조를 맞추어 보호할 수 있도록 정정하면 된다.

3.4 2회선 송전선로의 거리계전기 정정

위의 시뮬레이션은 1회선 송전계통에서 Mutual Coupling에 의한 영향이 없기 때문에 고려하지 않았다. 그러나 2회선 송전선로의 경우는 Mutual Coupling에 의한 영향이 있으며, 이러한 병행회선의 거리측정은 (1)식에서 보는 바와 같이 상호 임피던스를 고려하지 않을 경우, 계전기가 측정하는 임피던스가 증가하게 되고 계전기는 언더리치하게 되므로 타회선 영상전류를 보상해야 한다. 이러한 영향을 분석한 결과는 표 3과 같다.

표 3. 3상 2회선 모의계통의 임피던스 오차율(3)

3상 평형2회선 선로의 1선지락시 고장거리 계산의 최대오차율		
부하임피던스 비율	영상분 상호임피던스 고려한 경우	상호 임피던스 미고려시
1:1	0.0072%	8.48%
2:1	0.0036%	4.73%
3상 불평형2회선 선로의 1선지락시 고장거리 계산의 오차율		
1:1	0.0044%	30.20%
2:1	0.0025%	16.49%

표(3)에 나타난 것과 같이 평형 계통 및 불평형 계통에서의 1선지락 고장시 상호 임피던스에 의한 영향으로 실제 사고점의 거리와 계전기가 측정하는 거리는 오차를 보이게 된다. 1선지락 고장시는 단락고장시와 달리 상호 임피던스에 의한 영향으로 지락보호계전기가 측정하는 임피던스는 증가하게 되므로 계전기가 임피던스 측정시 단락고장보다 오차율은 더 커지게 되는데, 특히 3상 평형 2회선 계통과 3상 불평형 2회선 계통을 비교할 때 3상 불평형 2회선 계통의 경우가 임피던스 측정오차가 더욱 커짐을 알 수가 있다. 이러한 영향으로 인해 고장점을 정확히 판단, 동작하는 것이 더욱더 어려워지는 것이다. 따라서 정확한 사고지점까지의 임피던스 측정을 위해서는 영상전류 I_0, I_0' 의 보상이 필요하다.

765KV 비연가 2회선 송전선로의 경우는 선로정수의 불평형과 상호 임피던스의 영향으로 영상전류보상만으로 계전기가 정확한 임피던스를 측정하는 것이 더욱더 어려워지는데, 이러한 영향을 분석한 결과는 표(4)와 같다.

표 4. 765KV 비연가 송전선로의 Simulation결과(4)

Case No	고장조건	Underreach	Overreach	비고
1	1회선, 지락고장	8%	11%	거리표정 보상계수 비 Setting
2	2회선, 지락고장	22%	—	
3	1회선, 단락고장	10%	7%	
4	2회선, 단락고장	—	9.5%	
5	2회선, 지락고장	22%	—	거리표정 보상계수 Setting하여 시험
6	2회선, 단락고장	—	12%	

- ※ 신서산-신안성S/S간 765KV 송전선로 : 약 138Km
- ※ 1~4 Case: 거리계전기 측정 요소의 오차
- ※ 5,6 Case: 고장점 표정 계산 알고리즘에서의 오차
- ※ 송전선로의 100%지점 고장시 발생 오차값임

765KV 송전선로의 경우는 비연가선로이며 2회선이므로 Mutual Coupling에 의한 영향을 고려해야만 한다. 표 (4)에 나타나 있는 것처럼 765kV 송전선로에서 2회선 지락고장시 Mutual Coupling에 의한 오차율은 1회선 지락고장시 오버리치 11%, 언더리치 8%, 2회선 지락고장시 언더리치 22%이다. 즉 Mutual Coupling에 의해서 발생하는 최대 오버리치가 11%, 최대 언더리치가 22%이며 결과적으로 이를 모두 고려해야 한다. Zone1의 경우는 타구간 선로 사고에 의한 동작이 되면 안되므로 Mutual Coupling에 의한 오버리치 11%를

고려한 765KV 송전선로 2회선 Zone1 정정은 다음과 같다.

$$Z_{Merror} = 1 - [(1.13 \times 1.11)] = 0.2543$$

$$Z_{Cpu} \leq 1 - Z_{Merror} \quad (13)$$

$$\therefore Z_{Cpu} \leq 0.7457(74\%) \quad (14)$$

즉 765KV 송전선로 거리계전기의 Zone1의 정정 또한 자기구간 임피던스 100%에서 25.43% 제외한 74% 이하로 정정하면 타구간의 사고로 인한 오동작을 방지할 수 있어 적당하다. 765KV 송전선로의 경우는 비연가 선로이며 2회선이므로 Zone2 역시 Mutual Coupling에 의한 영향에 의한 언더리치 22%를 고려해야 하는데 그 식은 다음과 같다.

$$Z_{Merror} = 1 - [(1.12 \times 1.22)] = 0.3664$$

$$Z_{Cpu} \geq 1 + Z_{Merror} \quad (15)$$

$$\therefore Z_{Cpu} \geq 1.3664(137\%) \quad (16)$$

따라서 Zone2의 정정의 경우는 자기구간 임피던스의 137%이상이면 자기구간 선로 내의 사고는 100% 보호할 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 국내 송전선로에 적용하고 있는 거리계전기 정정시 각 오차 요소들의 영향으로 인해 실제 고장거리와 계전기가 측정하는 거리와의 차이에 대해 알아보았으며, 그 오차 요인들을 고려한 거리계전기의 정정을 범위에 대해 알아보았다.

그 결과 Zone1의 경우 $Z_{Cpu} \leq 0.87(87\%)$ 를, Zone2의 경우 $Z_{Cpu} \geq 1.12(112\%)$ 를 만족한다면 충분히 보호될 수 있음을 알 수 있었다. 그러나 2회선 비연가 선로의 거리계전기 정정은 Zone1의 경우 $Z_{Cpu} \leq 0.7457(74\%)$ 를 Zone2의 경우 $Z_{Cpu} \geq 1.3664(137\%)$ 를 만족해야 충분히 보호될 수 있음을 알 수 있었다. 결과적으로 1회선 평형계통에 비해 2회선 비연가 선로의 경우는 Mutual Coupling과 선로정수의 불평형의 영향으로 Zone1과 Zone2 정정시 조금더 큰 오차를 고려해야 함을 알 수 있었다.

(감사의 글)

본 연구는 과학기술부 및 한국과학재단의 ERC 프로그램과 한국전력거래소의 지원으로 이루어 졌으며 이에 감사드립니다.

(참 고 문 헌)

- [1] 한국전력공사기술원, "A Study on the Protective Relaying Schemes for 765kV Power System", 초고압 보호계전방식에 관한 연구보고서(최종), P29~32, 1994. 1. 22
- [2] 한국전력공사동해전력소, "Field Guide Book of Substation-Facilities", 변전설비현장가이드북, P108~109, P117~118, 1999. 12
- [3] 이한웅, "A new line to line Fault Location Algorithm in Distribution Power Networks using 3 Phase Direct Analysis", 제36회 대한전기학회춘계학술논문집, P140~143, 2002. 5. 23
- [4] 전력계통보호연구회, "비연가 송전선로에서의 거리계전기 Reach 측정 및 고장점표정에 대한 고찰", 전력계통보호제어연구회 2001학술 및 기술 발표회 논문집, P82~86, 2001. 11