

# 경험적 물에 의한 송전계통의 거리계전 방식 협조

이 승 재    이 병 칠                      윤 상 현                      윤 만 칠    이 상 욱  
 명지 대학교 전기 공학과              프로컴 시스템              한전 기술 연구원

## Heuristic rule-based coordination of Distance Relaying in Transmission System

Seung Jae Lee    Byeong Chil Lee    Sang Hyun Yoon    Man Chul Yoon    Sangok Lee  
 Dept. of Electrical Engineering    PROCOM System    Research Center, KEPCO  
 Myong Ji University

### ABSTRACT

Distance relaying is one of the most commonly used protection schemes in the high voltage transmission systems. In this scheme, coordination between the primary and backup relays is very critical for the power system security. This paper reports a rule-based methodology for checking and correction of miscoordination problems in the distance relaying. Diagnosis rules achieving an accurate but simple checking have been developed through the geometric analysis of the impedance characteristics of the distance relays. Heuristic rules having the practical power for miscoordination correction are suggested. The proposed method has proved very effective through the several case studies on the actual systems.

각 전력회사에는 오랜 실계통 적용경험을 바탕으로 확립된 정정규칙들이 있으며 정정 작업은 이에 근거하여 계전기기술자에 의해 수작업으로 행하여지고 있으며 이들의 경험적 지식과 창의성이 매우 중요한 역할을 한다 [1]. 이와같은 방법은 거리계전 방식에서 요구되는 후보호-후비 보호간의 협조를 완전히 보장할 수는 없으며 결과적으로 후비보호가 후보호보다 더 빠르게 동작하는 비협조 문제가 발생할수 있다. 이러한 비협조 문제는 계통의 안정도에 미치는 그 영향이 매우 크므로 이에대한 교정이 요구된다. 이러한 교정 작업은 현재 선로 임피던스나 계전기의 최대 토오크각등의 요소들이 고려되지않은 부정확한 수작업으로 행하여지고 때로는 시간 제약으로 인하여 생략되기도 한다.

이러한 거리계전방식의 협조를 이루기위한 알고리즘에관한 연구들이 다수 나와 있으나 [1,3,4,5] 대부분 송전계통의 특성상 완전한 협조를 이룬다는 것은 거의 불가능하므로 사용자와의 도움으로 적절한 타협점을 모색하거나 또는 마이크로프로세서 기반의 다른 보호 방식을 일부분에 적용하는 방법을 제안하고 있다. 또 다른 접근 방법은 전문가 시스템을 이용하는 것으로 [6] 이 방식에서는 전문가들의 보호 협조에 관한 경험적인 정정 지식들을 사용하여 계전기의 1차 정정치를 구하고 이들의 비협조 문제도 경험적인 교정 규칙들을 사용하여 상호 협조가 될 수 있도록한다. 이 방법의 장점은 비록 계통의 완벽한 협조를 이룰 수는 없을지라도 대상 전력계통에 실용적으로 적합한 해를 항상 제시할 수 있다는 것이다.

본 논문에서는 거리계전 방식의 협조여부를 진단하는 정확하나 간단한 평가 물을 거리 계전기의 임피던스 특성을 기하학적 분석에 의하여 개발하였고, 비협조 문제들을 경험적 방법에 의해 교정하는 교정법을 개발하였다. 이들은 룰베이스 구축에 편리한 PROLOG 언어를 사용하여 독립적으로 수행 가능한 2 개의 모듈로 구성되었으며 각 모듈 수행 결과는 칼라 그래픽 화면을 통하여 사용자가 그 결과들을 쉽게 알아 볼 수 있도록 하였다.

### 1. 서 론

송전 계통의 변전소에는 선로, 변압기등과 같은 장치들의 보호를 위하여 다양한 보호 계전기가 설치 운용되고 있다. 보호 계전기들의 동작 파라미터들은 고장을 신속히 선택 차단하고, 후보호 장치가 실패하였을 경우 일정 지연 시간후 동작하도록 적절한 값으로 정정되어야 한다.

3 단계 한시 거리계전방식은 고압 송전 계통에서 사용되고 있는 가장 일반적인 보호 방식이며 이 방식에 사용되는 거리 계전기는 그림 1 에 보이는 바와 같이 각각의 보호 범위를 달리하는 zone-1, zone-2, zone-3 요소로 구성되어 있다. 일반적으로 zone-1 요소는 순시 동작으로서 자기구간의 80 - 90 %로 정정하고 있으며 zone-2 요소는 zone-1 요소의 나머지 구간 보호와 인접 선로의 후비 보호를 겸하여 0.2 - 0.5 초의 지연시간을 갖고 동작하도록 한다. zone-3 요소는 인접 선로의 후비 보호를 완료하도록 하며 0.4 - 1 초의 지연시간을 갖는다 [2].

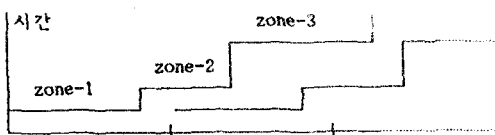


그림 1 3 단계 한시 거리 계전 방식  
 Fig. 1 3-Step Distance Relaying

### 2. 거리 계전 방식의 협조

계전기 기술자들은 각 전력 회사에서 다년간의 적용 경험을 바탕으로 확립된 정정 지침서에 근거하여 계전기 정정을 하게 되는데, 현재 한국 전력 공사에서 적용하고 있는 거리계전기의 정정규칙들을 살펴보면 다음과 같다.

R1 : 단락 거리 계전기의 zone-1 이면 보호 범위를 선로 임피던스의 85 %로 정정한다.

- R2 : 단락 거리 계전기의 zone-2 이면 보호 범위는 다음 중 큰 값으로 한다.
- i) 선로 임피던스의 125 %
  - ii) 선로 임피던스 100 % + (다음 구간 최단 선로 임피던스의 50% + 겹보기 계수 / 2)
- 여기서, 지연 시간은 20 cycle로 한다.
- R3 : 단락 거리 계전기의 zone-3 이고 CR trip 감응이 면 보호 범위를 다음 중 작은 값으로 한다.
- i) 선로 임피던스 100 % + (다음 구간 최단 선로 임피던스의 125% x 겹보기 계수)
  - ii) 최대 토오르크를 고려한 허용 부하
- 여기서, 지연 시간은 100 cycle로 한다.

상기 정정 규칙들에 의한 계전기 정정치들은 항상 보호 계전기 동작 선택성을 만족시키지는 않으며 그림 2에서 보듯이 장거리 선로와 단거리 선로가 이웃한 경우, 후비보호 계전기 Ry-1 의 zone-2 및 zone-3의 동작 범위가 주보호 계전기 Ry-2의 보호 범위와 중복이 될 수 있다. 이 경우 zone-2 지연 시간이 동일하기 때문에 고장 F에 대하여 Ry-1 및 Ry-2의 두 계전기가 동시 동작하게 되어 보호 계통의 중요 조건인 선택성을 만족시키지 못하게 된다. 이 경우 후비 보호 계전기 zone 2의 보호 범위를 줄이든지 또는 지연시간을 증가시켜 Ry-1이 Ry-2 보다 늦게 동작하도록 하여야 한다.

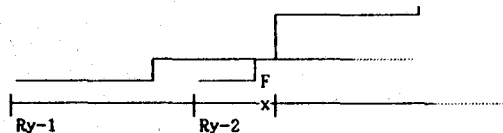


그림 2 zone-2 비협조  
Fig. 2 zone-2 miscoordination

zone-3에 대하여서도 비슷한 문제가 발생할 수 있으며 이러한 zone-2와 zone-3의 협조 조건들을 요약하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

- CR1 (zone-2 협조 조건)  
후비보호 zone-2 보호범위 < 주보호 zone-1 보호범위
- CR2 (zone-3 협조 조건)  
후비보호 zone-3 보호범위 < 주보호 zone-2 보호범위

### 3. 협조 진단

거리 계전기중에서 일반적으로 많이 사용되고 있는 것으로는 모(mho)형과 리액턴스(reactance)형을 들 수 있다. 그림 3 은 모형과 리액턴스형 거리계전기의 동작 특성을 R-X도(R-X diagram) 또는 임피던스도(impedance diagram)상에 표시한 것이며 이들은 각각 원과 직선 형태로 나타난다.

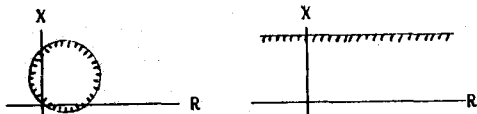


그림 3 모형과 리액턴스형 거리계전기 동작구역  
Fig. 3 Operating region of distance relays (mho type and reactance type)

그러므로 주 보호와 후비 보호간의 zone-2 또는 zone-3 협조는 임피던스도 상에서 직선 또는 원으로 표현되는 두 개의 방정식의 교차 여부로 파악할 수 있다. 예를

들어, 주보호 zone-1 요소가 리액턴스형이고 후비보호 zone-2 요소가 모형인 경우, 협조조건 CR1에 의하여 이들의 동작 범위는 중복되지 않아야 한다. 즉 그림 4 와 같이 모형 거리계전기의 원과 리액턴스형 거리계전기의 직선이 서로 교차해서는 안된다.

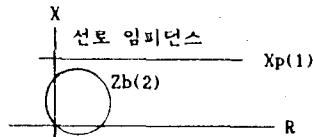


그림 4 zone-2 협조  
Fig. 4 zone-2 coordination

본 연구에서는 협조 규칙 CR1과 CR2, 그리고 다음에 보이는 원과 원, 원과 직선의 교차조건에 관한 정리들을 근거로 협조 진단규칙들을 개발하였다. 이들에 대한 수학적 증명은 기하학적 분석에 의하여 쉽게 파악할 수 있으므로 생략한다.

#### 정리 1 (원과 직선의 교차)

$$y = c$$

$$(x-a)^2 + (y-b)^2 = r^2$$

교차 조건  $r > |b-c|$

#### 정리 2 (원과 원의 교차)

$$(x-a_1)^2 + (y-b_1)^2 = r_1^2$$

$$(x-a_2)^2 + (y-b_2)^2 = r_2^2$$

교차 조건  $|r_1 - r_2| < d < |r_1 + r_2|$

여기서 a, b, c, r은 상수를 나타내며, d는 원의 중심 간 거리를 뜻하며 개발된 진단 규칙들은 다음과 같다.

#### 진단 규칙 1

후비 보호의 zone-2 요소가 reactance 형이고, 주 보호의 zone-1 요소가 reactance 형 일때 협조 조건은  $(X_b(2) - X_{line}) < K_{app} \times X_p(1)$

#### 진단 규칙 2

후비 보호의 zone-2 요소가 mho 형이고, 주 보호의 zone-1 요소가 reactance 형 일때 협조 조건은  $Z_b(2) < |Z_b(2)\sin - 2X_{line} - 2X_p(1)|$

#### 진단 규칙 3

후비 보호의 zone-2 요소가 reactance 형이고, 주 보호의 zone-1 요소가 mho 형 일때 협조 조건은  $Z_p(2) > |Z_p(2)\sin - 2X_{line} - 2X_b(1)|$

#### 진단 규칙 4

후비 보호의 zone-2 요소가 mho 형이고, 주 보호의 zone-1 요소가 mho 형 일때 협조 조건은  $|Z_p(1) - Z_b(2)| < 2d < |Z_p(1) + Z_b(2)|$

#### 진단 규칙 5

후비 보호의 zone-3 요소가 reactance 형이고, 주 보호의 zone-2 요소가 reactance 형 일때 협조 조건은  $(X_b(3) - X_{line}) < X_b(2)$

#### 진단 규칙 6

후비 보호의 zone-3 요소가 reactance 형이고, 주 보호의 zone-2 요소가 mho 형 일때 협조 조건은  $Z_p(2) > |Z_p(2)\sin + 2X_{line} - 2X_b(3)|$

#### 진단 규칙 7

후비 보호의 zone-3 요소가 mho 형이고, 주 보호의 zone-2 요소가 reactance 형 일때 협조 조건은  $Z_b(2) < |Z_b(3)\sin - 2X_{line} - 2X_p(2)|$

#### 진단 규칙 8

후비 보호의 zone-3 요소가 mho 형이고, 주 보호의 zone-2 요소가 mho 형 일때 협조 조건은  $|Z_p(2) - Z_b(3)| < 2d < |Z_p(2) + Z_b(3)|$

다음은 진단 규칙에서 사용되는 부호를 표시한 것이다.

부 호	비 고
$X_p(i)$	reactance형 주 보호 계전기의 zone-i 동작 범위
$X_b(i)$	reactance형 후비보호 계전기의 zone-i 동작 범위
$Z_p(i)$	who 형 주 보호 계전기의 zone-i 동작 범위
$Z_b(i)$	who 형 후비 보호 계전기의 zone-i 동작 범위
$K_{app}$	걸보기 계수
$X_{line}$	후비 선로의 리액턴스
$R_{line}$	후비 선로의 저항
$d$	임피던스상의 두 원 중심간의 거리
$\theta_i$	who 계전기의 최대 모오크각

여기서,  $i = 1, 2, 3$

본 논문에서는 리액턴스형과 who형 계전기에 관해서만 언급되었지만 lens형이나 off-set who형과 같은 다른 유형의 거리계전기에 관한 진단 규칙도 유사한 방법으로 쉽게 파악될 수 있다.

#### 4. 비협조 조정 규칙

전장에서 설명한 진단 규칙으로 협조 판정의 실행 결과 만일 비협조 문제가 발생하면 후비 보호 계전기의 보호 범위나 지연 시간을 조정하여 협조를 이루도록 한다. 일반적으로 초고압 송전계통에서는 반송계전방식이 주보호를 담당하고 이와 아울러 거리계전방식이 후비보호로 채택되고 있다. 이 경우 반송계전 방식의 Carrier trip 용(또는 내부방향 고장검출용)으로 zone-3 요소가 이용되며 따라서 zone-3의 보호 범위는 가급적 줄이지 않고 지연 시간의 조정만을 허용한다. 본 논문에서 제시된 수정 방법은 다음 두개의 규칙에 근거한다.

##### GR1 (범위 축소 규칙)

후비 zone-2 보호범위의 축소는 새로운 보호범위가 자기 구간의 120% 이상이고, 모든 후단과 zone-3 비협조 문제를 발생시키지 않을 경우 적용한다

##### GR2 (지연 시간 조정 규칙)

후비보호의 zone-2(zone-3) 지연시간 조정은 모든 후단과의 zone-2(zone-3) 비협조 문제가 없을 경우 적용한다

상기 규칙에 있어서의 조건은 다음 그림으로 설명되는 이유에서 검토되어야 한다.

##### 1) zone-2 보호 범위 감소시의 문제점

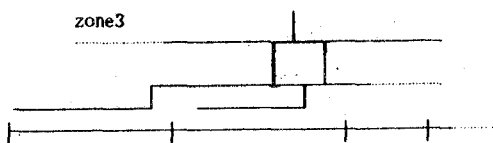


그림 5 zone-2 보호 범위 감소시 새로운 zone-3 문제  
Fig. 5 New zone-3 problem by zone-2 reach reduction

##### 2) zone-3 지연 시간 증가시 문제점

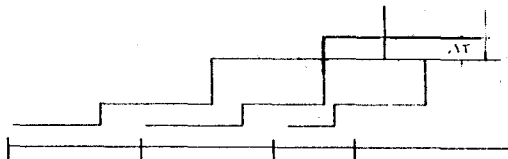


그림 6 지연 시간 증가시 더욱 나빠진 zone-3 문제  
Fig. 6 Aggravated zone-3 problem by time delay increase

비협조 조정의 기본 원칙은 범위 축소가 바람직하므로 우선적으로 적용하고 실패할 경우에 한하여 지연시간 조정 규칙을 적용하도록 한다. 현행 zone-3 비협조 조정에는 보호 범위를 줄이는 것을 고려하지 않으며 단지 지연시간만을 조정하는데 그 이유는 앞에서 설명한 바와 같다. 일반적으로 특정 후비 보호 계전기에 대하여 비협조 문제를 갖는 주보호 계전기는 그림 7에 보이는 바와 같이 한개 이상 있을 수가 있다.

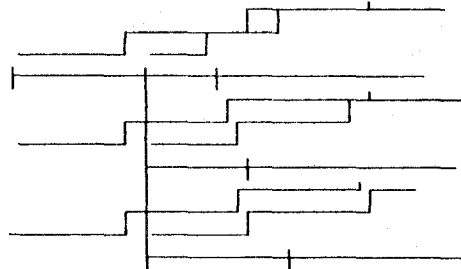


그림 7 한개의 후비 보호에 대한 다수의 비협조 경우  
Fig. 7 More than one miscoordinations for one backup

이와같은 다수의 비협조 조정은 심각도가 큰 주보호-후비보호 관계의 계전기 쌍에 대하여 우선적으로 실행하는데 여기서 심각도란 (선로 리액턴스 x 걸보기 계수)의 역수를 나타낸다. 이는 비협조가 가장 심각한 쌍에 대해 교정이 되면 이보다 심각도가 작은 계전기쌍에 대한 협조가 보장되기 때문이다. 이러한 교정 과정은 다음 규칙들에 의해 요약될 수 있다.

- AR1 : 한개의 zone-2 비협조만 있을 경우  
범위감소 규칙을 적용한다
- AR2 : 다수의 zone-2 비협조가 발생한 경우  
심각도 순서로 범위감소 규칙을 적용한다
- AR3 : zone-2 비협조시 범위감소 규칙이 실패하면  
지연 시간 조정 규칙을 적용한다
- AR4 : zone-3 비협조가 발생한 경우  
지연시간 조정규칙을 적용한다

#### 5. 사례 연구

제시된 방법은 물베이스 구조의 실현에 편리한 PROLOG 언어를 사용하여 두개의 모듈 - 평가모듈, 교정모듈 - 로 구성된 시스템으로 개발되었으며, 한국전력공사의 154KV 송전계통의 일부(그림 8)에 대하여 그 효용성을 시험하였다.

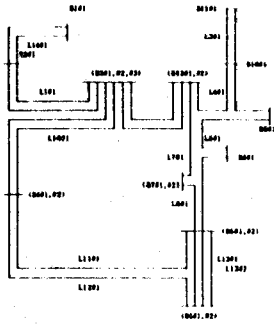


그림 8 한국 전력공사의 154 KV 송전 계통 일부  
Fig. 8 Part of KEPCO 154 KV Transmission System

시험 계통은 방향비교 전송계전방식을 주보호로, 3 단계 거리계전 방식을 후비 보호로 채택하고 있다. 표 1 은 시험 계통의 각 선로 영상, 정상 임피던스 데이터들, 표 2는 현행 정정 규칙을 적용하여 얻은 12 개의 거리 계전기의 초기 정정치들 보여준다.

표 1 선로 임피던스 데이터

선로 (L1001)	정상 임피던스 (Zs)	영상 임피던스 (Z2s)	정정치 (ohm)				
			zone-1	zone-2	zone-3		
L1001	0.4423-j3.536	2.2854-j11.2347	8422	84	9.34	13.57	36.19
L201	0.0944-j0.7609	0.5098-j3.2806	B501	34	9.34	14.19	36.03
L301	1.4877-j7.2863	6.4423-j11.4517	B601	34	9.34	12.62	36.19
L401	0.0573-j7.1855	3.2903-j13.2591	B70	32	2.64	4.01	36.19
L501	0.3710-j1.3846	0.9198-j3.7158	B101	32	10.44	15.50	34.91
L601	0.8284-j1.3134	0.4874-j3.5443	B201	33	7.13	10.44	35.97
L801	0.3023-j1.4025	0.4606-j2.3252	B301	32	7.13	14.54	25.96
L901	0.8370-j3.4643	2.4022-j9.4984	B302	34	10.18	17.41	36.19
L1001	0.6293-j5.0648	3.2878-j15.1946	B401	33	10.18	14.97	36.19
L1101	0.7900-j2.7998	2.0244-j7.7131	B501	36	7.02	11.57	36.19
L1201	1.2348-j4.6463	2.7500-j14.4874	B601	312	1.33	3.52	36.19
L1301	0.3230-j1.8860	1.3840-j6.5020	B1201	33	1.53	6.00	36.19
L1302	0.4540-j1.8280	1.3840-j6.4408					
L1401	0.6730-j4.1864	2.6850-j16.3844					

표 2 초기 정정치

계전기	영상 임피던스	정정치 (ohm)		
		zone-1	zone-2	zone-3
B422	84	9.34	13.57	36.19
B501	34	9.34	14.19	36.03
B601	34	9.34	12.62	36.19
B70	32	2.64	4.01	36.19
B101	32	10.44	15.50	34.91
B201	33	7.13	10.44	35.97
B301	32	7.13	14.54	25.96
B302	34	10.18	17.41	36.19
B401	33	10.18	14.97	36.19
B501	36	7.02	11.57	36.19
B601	312	1.33	3.52	36.19
B1201	33	1.53	6.00	36.19

표 3 수정 정정치

후비 보호/주 보호	비 협조	조정 방법	조정 전	조정 후
B601 / B422	zone 2	Reach T B	5.237	4.237
B701 / B1201	zone 3	Reach T B	1.691	1.668
B601 / B422	zone 3	T B	1.66	1.66
B101 / B201	zone 3	T B	1.66	1.66
B302 / B422	zone 3	T B	1.66	1.66
B501 / B422	zone 3	T B	1.66	1.66
B201 / B302	zone 3	T B	1.66	-
B401 / B302	zone 3	T B	1.66	-
B1201 / B301	zone 3	T B	1.66	-

6. 결론

본 논문에서는 거리 계전 방식의 물에 의한 협조 진단 및 비협조 조정방법을 제시하고 있다. 제시된 진단 규칙들은 표현 방식이 간단하나 정확하며, 고정 규칙들은 경험적인 방법을 근거로 개발되어 실 적용성이 높은 특성을 갖는다. 제시된 방법은 독립 실행 능력이 있는 두 개의 모듈로 구성된 물베이스 시스템으로 구현되었으며 여러 사례연구를 통하여 그 효용성을 보였다.

현재의 규칙베이스는 모(mho)형과 리액턴스(reactance)형 거리계전기에 관한 규칙들만 있으나, 다른 형의 계전기들에 관한 물에 비슷한 방법으로 쉽게 개발 확장 할 수가 있다. 개발된 시스템은 현재 zone-3 비협조 문제 고정에 있어서 보호범위 조정을 고려하지 않으나, 이의 적용 가능성이 크므로 이에 관한 연구가 요구되며, 또한 다른 형의 계전기를 다룰수 있도록 물베이스의 확장이 필요하다. 그리고 다양한 그래픽스등을 이용한 입출력의 개선을 통한 실용성의 향상이 요구된다. 이와같은 여러 개선점을 보완하였을 경우, 본 시스템은 보호 협조에 있어서 계전기 기술자들에게 큰 도움이 될 것이다.

참고로 본연구의 일부는 한국과학기술원의 지원에 의하여 일부는 한국전력공사의 지원에 이루어졌음을 밝힌다.

REFERENCES

- [1] M.J. Damborg and S.S. Venkata, "Specification of Computer Aided Design of Transmission Protection Systems", Final Report EL-3337, EPRI, Jan. 1984.
- [2] C.R. Mason, The Art and Science of Protective Relaying, John Wiley and Sons, Inc., New York, 1956.
- [3] R.E. Albrecht, et al, "Digital Computer Protective Device Coordination Program I - General Program Description", IEEE Tr. on PAS, Vol. PAS-83, NO.4, April 1964, pp. 402-410.
- [4] R.B. Gastineau, et al, "Using the Computer to Set Transmission Line Phase Distance and Ground Backup Relays," IEEE Tr. on PAS, VOL. 96, NO.2, March/April 1977, pp. 478-484.
- [5] M.H. Dwarakanath and L. Nowitz, "An Application of Linear Graph Theory for Coordination of Directional Overcurrent Relays" Electric Power Problems The Mathematical Challenge, SIAM, 1980, pp. 104-114.
- [6] Seung Jae Lee, Sang Hyun Yoon, Man Chul Yoon, Jong Keun Jang, "An Expert System for Protective Relay Setting of Transmission Systems", IEEE Tr. Power Delivery, Vol.5, No.2, April, 1990, pp. 1202-1208.
- [7] System Protection Div., Korea Power Electric Cor., Guideline for Relay Setting, 1989.
- [8] Protective Relaying for Power Systems, edited by S. H. Horowitz, IEEE Press, 1980.

Fig. 9 Sample Screen of Evaluation Module

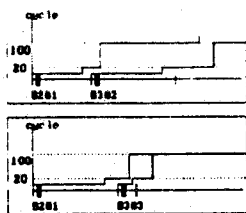


그림 9 평가모듈 실행 샘플 화면  
Fig. 9 Sample Screen of Evaluation Module