

고장저항의 영향을 최소화한 순환형 거리계전 알고리즘

안 용 진\* 강 상 희\*\* 이 승 재\*\*  
 \*유호전기(주) 연구소 \*\*명지대학교 전기공학과

A Recursive Distance Relaying Algorithm Immune to Fault Resistance

YONG-JIN AHN\* SANG-HEE KANG\*\* SEUNG-JAE LEE\*\*  
 \*Youho Elec. Ind. Co., LTD \*\*Myongji University

**Abstract** - An accurate digital distance relaying algorithm which is immune to the combined reactance effect of the fault resistance and the load current is proposed. The algorithm can estimate adaptively the impedance to a fault point independent of the fault resistance. To compensate the apparent impedance, this algorithm uses iteratively the angle of an impedance deviation vector improved step by step. The impedance correction algorithm for ground faults uses a current distribution factor to compensate mutual coupling effect.

1. 서 론

전력계통이 복잡화·대형화·초고압화 되어감에 따라 이에 대한 보호시스템도 복잡해졌다. 결과적으로 고장이 발생하였을 경우에 보호시스템이 적절한 보호능력을 상실한다면 사고파급범위와 강도는 매우 커진다. 또한 보호계전기가 고장을 정확하게 검출하지 못한다면 보호협조의 원칙에 따라 정전구간이 커지게 된다. 송전선의 후비보호 계전기 모두와 대부분의 주보호 계전기는 방향성 거리계전기로 저항 지락고장시 검출능력이 떨어진다. 더구나 송전계통이 복잡해지면서 중조류가 흐르는 송전구간의 평균 길이가 짧아짐에 따라 고장저항과 부하전류의 결합작용인 리액턴스 효과에 의한 계전기 성능저하는 더욱 큰 문제점으로 대두되고 있다[1].

병행 2회선 송전선로에 저항이 개입한 고장이 발생하면 고장점까지의 영상분 상호작용 및 고장저항의 크기 및 부하조류 상태에 따라 고장의 양상 및 고장 특성이 상이하며, 보호기기 동작에 부정적인 영향을 미친다.

본 논문에서는 병행 2회선 송전선로에서 고장이 발생하면, 추정임피던스로부터 추정고장점을 산출하여 대상계통의 전류분배계수에 적용함으로써 얻어지는 위상각과 추정임피던스를 이용한 반복적인 임피던스 보정으로 고장저항과 영상분 상호작용의 영향을 최소화하고, 고장시 조류에 영향받지 않는 거리계전 알고리즘을 제시한다.

2. 본 론

2.1 1선지락고장

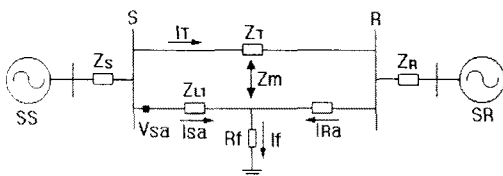


그림 1. 1선지락고장 고장시의 단선도

표 1. 기호 정의

기호	정 의	단위
$Z_{S012}$	전원 SS의 영상, 정상, 역상분 임피던스	[ $\Omega$ ]
$Z_{R012}$	전원 SR의 영상, 정상, 역상분 임피던스	[ $\Omega$ ]
$Z_{L012}$	고상회선의 영상, 정상, 역상분 임피던스	[ $\Omega$ ]
$Z_{T012}$	건전회선의 영상, 정상, 역상분 임피던스	[ $\Omega$ ]
$Z_m$	회선간 선로의 영상분 상호 임피던스	[ $\Omega$ ]
$R_f$	고장점 저항	[ $\Omega$ ]
$I_{S012}$	자기단의 영상, 정상, 역상분 전류	[A]
$I_{R012}$	상대단의 영상, 정상, 역상분 전류	[A]
$I_{T012}$	건전회선의 영상, 정상, 역상분 전류	[A]
$I_{f012}$	고장점 영상, 정상, 역상분 전류	[A]

그림 1은 1선지락고장 시에 고장저항이 개입한 전형적인 경우이며, 계전기 설치점에서 고장점까지의 전압방정식은 다음과 같다.

$$V_{Sa} = Z_{L1}(I_{Sa} + \frac{Z_{L0} - Z_{L1}}{Z_{L1}} I_{S0} + \frac{Z_m}{Z_{L1}} I_{T0}) + R_f I_f \quad (1)$$

한편, 계전기가 추정하는 임피던스  $Z_{app}$ 는 식 (2)와 같다.

$$Z_{app} = R_{app} + jX_{app} = \frac{V_{app}}{I_{app}} \quad (2)$$

여기서,

$$V_{app} = V_{Sa}$$

$$I_{app} = I_{Sa} + \frac{Z_{L0} - Z_{L1}}{Z_{L1}} I_{S0} + \frac{Z_m}{Z_{L1}} I_{T0}$$

식 (1)과 식 (2)에서 다음을 유도할 수 있다.

$$Z_{app} = Z_{L1} + R_f \frac{I_f}{I_{Sa} + \frac{Z_{L0} - Z_{L1}}{Z_{L1}} I_{S0} + \frac{Z_m}{Z_{L1}} I_{T0}}$$

$$= Z_{L1} + R_f \left| \frac{I_f}{I_{Sa} + \frac{Z_{L0} - Z_{L1}}{Z_{L1}} I_{S0} + \frac{Z_m}{Z_{L1}} I_{T0}} \right| e^{j\alpha} \quad (3)$$

계전기가 추정하는 임피던스  $Z_{app}$ 에는 고장점까지의 실제 선로임피던스  $Z_{L1}$  이외에 고장저항  $R_f$ 가 포함된 항 만큼의 오차를 포함하므로 계전기의 오·부동작이 예상된다.

식 (3)에서 고장점 전류  $I_f$ 는 알 수 없으므로, 자기단의 대칭분 전류  $I_{S0,1,2}$ 로 고장점 전류  $I_f$ 를 추정하여 위상각  $\alpha$ 를 구하면 다음과 같다.

$$\alpha = \text{Arg} \left( \frac{I_{S0,1,2}}{I_{S0} + \frac{Z_{L0} - Z_{L1}}{Z_{L1}} I_{S0} + \frac{Z_m}{Z_{L1}} I_{T0}} \right) + \text{Arg} \left( \frac{1}{\text{CDF}_{S0,1,2}} \right) \quad (4)$$

식 (5)에 고장회선에서 자기단과 고장점 대칭분 전류 분배계수  $\text{CDF}_{S0,1,2}$ 를 나타내었다[2].

$$\text{CDF}_{S0,1,2} = \frac{I_{S0,1,2}}{I_{0,1}} = \frac{pB_{S0,1,2} + C_{S0,1,2}}{A_{S0,1,2}} \quad (5)$$

여기서,

$$A_{S0} = (Z_{L0} - Z_m)(Z_{S0} + Z_{R0} + Z_m) + (Z_{T0} - Z_m)(Z_{S0} + Z_{R0} + Z_{L0})$$

$$B_{S0} = (Z_m - Z_{L0})(Z_{S0} + Z_{R0} + Z_m) - (Z_{T0} - Z_m)Z_{L0}$$

$$C_{S0} = (Z_{L0} - Z_m)(Z_{S0} + Z_{R0} + Z_m) + (Z_{T0} - Z_m)(Z_{R0} + Z_{L0})$$

$$A_{S0,1,2} = Z_{L1,2}(Z_{S1,2} + Z_{R1,2}) + Z_{T1,2}(Z_{S1,2} + Z_{R1,2} + Z_{L1,2})$$

$$B_{S0,1,2} = -Z_{L1,2}(Z_{S1,2} + Z_{R1,2} + Z_{T1,2})$$

$$C_{S0,1,2} = Z_{L1,2}(Z_{S1,2} + Z_{R1,2} + Z_{T1,2}) + (Z_{T1,2})(Z_{R1,2})$$

## 2.2 추정임피던스 보정

고장 시에 계전기가 추정하는 임피던스  $Z_{app}$ 와 위상각  $\alpha$ 를 계산하였으므로 추정임피던스를 보정하여 실제 선로임피던스에 근사하는 알고리즘은 다음과 같다.

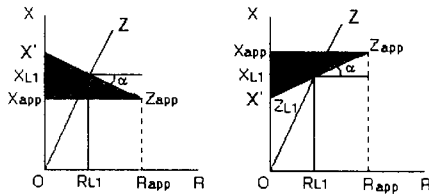


그림 2. 추정임피던스 보정

그림 2에서 추정 임피던스  $Z_{app}$ 와 위상각  $\alpha$ 를 이용한 면 식 (6)에 의하여 리액턴스  $X'$ 을 계산할 수 있다.

$$X' = X_{app} \pm R_{app} \cdot \tan \alpha \quad (6)$$

직선  $Z_{app}-X'$ 와 직선  $O-Z$ (선로)를 이용하여 다음과 같이 두 직선의 교점을 찾을 수 있으며, 교점 ( $R_{L1}$ ,  $X_{L1}$ )이 고장 시에 실제 선로임피던스임을 그림 2에서 확인할 수 있다.

$$R_{L1} = \frac{X'}{X/R - (X_{app} - X')/R_{app}} \quad (7)$$

$$X_{L1} = \frac{X}{R} \cdot \frac{X'}{X/R - (X_{app} - X')/R_{app}}$$

여기서,

$R_{app}$ : 추정된 저항 [ $\Omega$ ]

$X_{app}$ : 추정된 리액턴스 [ $\Omega$ ]

$R$ : 단위 송전선로의 저항 [ $\Omega/km$ ]

$X$ : 단위 송전선로의 리액턴스 [ $\Omega/km$ ]

$R_{L1}$ : 고장점까지의 저항 [ $\Omega$ ]

$X_{L1}$ : 고장점까지의 리액턴스 [ $\Omega$ ]

## 2.3 계전 알고리즘 흐름도

본 논문에서 제시한 거리계전 알고리즘의 흐름도는 그림 3과 같다. 자기단 대칭분 전류로 고장점 전류를 추정하기 위한 전류분배계수(식 (5))에 사용되는 추정고장점을 추정임피던스를 이용하여 구했으며, 임피던스 보정 후에 다시 추정고장점을 산출하는 단계를 반복함으로써 보다 정확한 추정고장점을 유추할 수 있다. 반복을 위한 임계값은 보정임피던스의 변화율을 이용하거나 반복의 횟수를 정해줌으로써 세팅이 가능하게 하였다.

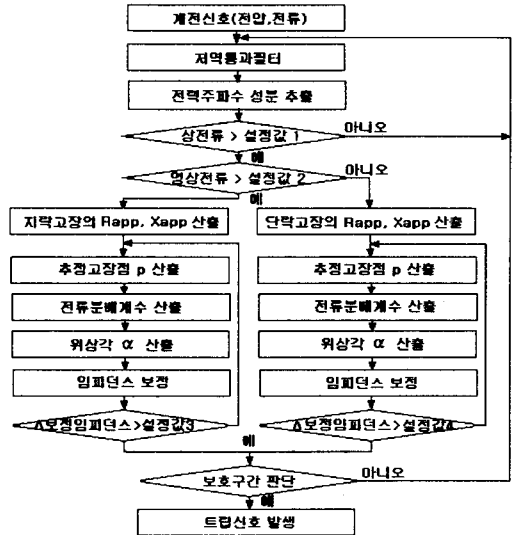


그림 3. 계전 알고리즘 흐름도

## 3. 사례 연구

### 3.1 시험 계통

본 논문에서 제시한 계전 알고리즘의 타당성을 검증하기 위하여 EMTPElectromagnetic Transients Program)를 이용하여 그림 4에 도시한 154[kV] 병행 2회선 송전선로를 모의하였다.

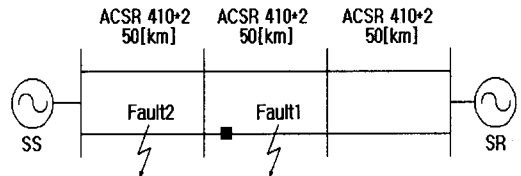


그림 4. 시험 계통

표 2. 시험 계통 데이터

구분	정상분(역상분) 임피던스	영상분 임피던스		
		Self	Mutual	
전원 [ $\Omega$ ]	SS	0.5331+j4.1106	1.8699+j10.089	-
	SR	0.5926+j4.9773	2.3581+j11.611	-
선로 [ $\Omega/km$ ]		0.0436+j0.3445	0.2380+j1.0443	0.1948+j0.563

제안된 알고리즘 검증을 위한 고장은 Zone1을 전체 선로(50[km])의 0~80[%]지점인 0~40[km]로 설정한 후에, 계전기의 오·부동작이 가장 크게 예상되는 보호구간의 경계지점  $\pm 0.5[km]$ 에서 모의하였다. EMTPE에서 얻은 계전신호는 주기당 384회 샘플링한 것이며, 계전 알고리즘에 사용된 지역통과 필터는 300[Hz]에서 이득 0.1로 설계하였다. 전압과 전류의 페이저 값은 주기당 32개의 샘플을 읽어 최소자승법으로 계산하였다.

### 3.2 추정임피던스 미보정

Zone1 0.5[km]와 39.5[km] 지점에 고장저항 50 [ $\Omega$ ]이 개입한 고장의 경우를 살펴보면, 실제값(선로임피던스)과 계산값(추정임피던스)에는 상당한 차이가 있으므로 자기 보호구간임에도 불구하고 트립신호를 보내지 않았다.

표 3. 트립 판단 결과

고장지점 [km]	고장저항 [ $\Omega$ ]	트립기준	판단	비고
Zone4 0.5	0	No Trip	N.T.	식 (2)
	50		N.T.	
Zone1 0.5	0	Trip	Trip	
	50		N.T.	
Zone1 39.5	0	Trip	Trip	
	50		N.T.	
Zone2 40.5	0	No Trip	N.T.	
	50		N.T.	

표 4. 임피던스 계산 결과

고장지점 [km]	고장저항 [ $\Omega$ ]	저항		리액턴스		비고
		실제값	계산값	실제값	계산값	
Zone4 0.5	0	-0.0218	-0.0537	-0.1723	-0.4243	식 (2)
	50		-164.3993		-58.4395	
Zone1 0.5	0	0.0218	0.0218	0.1723	0.1723	
	50		35.5417		0.2866	
Zone1 39.5	0	1.7222	1.7225	13.6078	13.6100	
	50		70.5174		11.1999	
Zone2 40.5	0	1.7658	1.7661	13.9523	13.9547	
	50		72.2550		11.4074	

### 3.3 추정임피던스 보정

고장저항이 개입한 고장에 있어서 추정임피던스 미보정의 경우에는 계산값과 실제값은 상당한 차이를 나타냈지만 추정임피던스 보정으로 인하여 계산값이 실제값에 상당히 근접하며 정상적으로 트립신호를 발생함을 표 5, 6과 7에서 알 수 있다. 추정임피던스 보정에는 영상분, 정상분, 역상분을 택일하여 사용한다(식(4)).

표 5. 트립 판단 결과

고장지점 [km]	고장저항 [ $\Omega$ ]	트립기준	판단		
			영상분	정상분	역상분
Zone4 0.5	0	No Trip	N.T.	N.T.	N.T.
	50		N.T.	N.T.	N.T.
Zone1 0.5	0	Trip	Trip	Trip	Trip
	50		Trip	Trip	Trip
Zone1 39.5	0	Trip	Trip	Trip	Trip
	50		Trip	Trip	Trip
Zone2 40.5	0	No Trip	N.T.	N.T.	N.T.
	50		N.T.	N.T.	N.T.

표 6. 저항 계산 결과

고장지점 [km]	고장저항 [ $\Omega$ ]	실제값	계산값		
			영상분	정상분	역상분
Zone4 0.5	0	-0.0218	-0.0537	-0.0536	-0.0536
	50		-0.1112	-0.0337	-0.1121
Zone1 0.5	0	0.0218	0.0218	0.0218	0.0218
	50		0.0227	0.0281	0.0221
Zone1 39.5	0	1.7222	1.7225	1.7225	1.7225
	50		1.7286	1.7524	1.7240
Zone2 40.5	0	1.7658	1.7661	1.7661	1.7661
	50		1.7726	1.7979	1.7677

표 7. 리액턴스 계산 결과

고장지점 [km]	고장저항 [ $\Omega$ ]	실제값	계산값		
			영상분	정상분	역상분
Zone4 0.5	0	-0.1723	-0.4243	-0.4238	-0.4238
	50		-0.8790	-0.2665	-0.8856
Zone1 0.5	0	0.1723	0.1723	0.1723	0.1723
	50		0.1797	0.2217	0.1746
Zone1 39.5	0	13.6078	13.6100	13.6101	13.6101
	50		13.6583	13.8263	13.6222
Zone2 40.5	0	13.9523	13.9547	13.9547	13.9547
	50		14.0061	14.2064	13.9674

추정임피던스의 보정에 역상분을 이용하는 것이 영상분이나 정상분을 이용하는 경우보다 좋은 결과를 나타내었다.

### 3.4 추정고장점 순환

식 (2)에서 건전회선의 영상분 전류  $I_{70}$ 는 건전회선에서 직접 검출하여 사용할 수 있으나, 통신선의 문제나 데이터의 손실로 인하여  $I_{70}$ 를 검출하지 못할 경우에는 자기단의 영상분 전류  $I_{50}$ 를 이용하여  $I_{70}$ 를 추정하여 사용할 수 있다[3,4].

표 8과 9는 본 논문에서 제시한 계산알고리즘 수행시에 전류분배계수에 사용되는 고장점을 추정하기 위한 반복에 따른 임피던스 계산의 결과를 도시한 것으로,  $I_{70}$  (직접 사용),  $I_{50}$ (추정), 반복의 경우가 좋은 결과를 나타내었으며,  $I_{70}$ 를 추정하여 사용하는 경우에 반복하여 추정하는 경우가 오차가 작다.

표 8. Zone1 0.5[km]지점 고장저항 50 [ $\Omega$ ]

고장거리	고장저항 [ $\Omega$ ]	$I_{70}$	$I_{50}$	반복 횟수	저항		리액턴스	
					계산값	실제값	계산값	실제값
0.5 [km]	50 [ $\Omega$ ]	추정 (0.8)	0.8	1번	0.0271	0.0218	0.2138	0.1722
				5번	0.0193		0.1524	
				1번	0.0195		0.1542	
				5번	0.0193		0.1523	
		직접 사용	0.8	1번	0.0319	0.2522		
				5번	0.0228	0.1799		
				1번	0.0228	0.1799		
				5번	0.0227	0.1797		

표 9. Zone1 39.5[km]지점 고장저항 50 [ $\Omega$ ]

고장거리	고장저항 [ $\Omega$ ]	$I_{70}$	$I_{50}$	반복 횟수	저항		리액턴스	
					계산값	실제값	계산값	실제값
39.5 [km]	50 [ $\Omega$ ]	추정 (0.8)	0.8	1번	1.7220	1.7222	13.6066	13.6078
				5번	1.7215		13.6020	
				1번	1.7154		13.5537	
				5번	1.7215		13.6018	
		직접 사용	0.8	1번	1.7290	13.6616		
				5번	1.7286	13.6584		
				1번	1.7223	13.6082		
				5번	1.7286	13.6583		

## 4. 결 론

거리계전기에서 리액턴스 효과에 의한 추정임피던스의 오차를 개선한 본 논문의 결론은 다음과 같다.

고장 발생 시에 실제 선로임피던스와 추정임피던스의 크기와 위상차를 수식화하였으며, 추정임피던스와 위상각을 추정하여 사용한 반복적인 임피던스 보정으로 고장저항과 영상분 상호작용에 의한 오차를 최소화하였다. 따라서, 제시된 알고리즘은 고장 발생시 부하조류와 고장저항에 거의 영향받지 않음을 확인하였다.

### [참 고 문 헌]

- [1] "직접접지제동 송전선로 고저항 지락보호대책연구" 최종 보고서, 전력연구원, pp 3-4, July, 1997
- [2] Yong-Jin Ahn, Sang-Hee Kang, Myong-Song Choi, Seung-Jae Lee, "An Accurate Fault Location Algorithm for Double-Circuit Transmission Systems", IEEE PES SM2000, pp1344-1349, 2000
- [3] 안용진, 강상희, 최면승, 이승재, "전류분배계수를 사용하는 병행 2회선 송전선로 고장점 표정 알고리즘", 대한전기학회 논문지, 제50권 3호, pp 146-152, 2001
- [4] 안용진, 강상희, 이승재, "리액턴스 효과를 최소화한 병행 2회선 송전선로 보호 거리계전 알고리즘", 대한전기학회 논문지, 제50권 1호, pp 38-44, 2001