

대칭분 전류를 이용한 송전선로 보호용 고장상 선택 알고리즘

이 승 재*, 이 명 수*, 이재규**, 유석구*
 *한양대학교, **대덕대학

Phase Selection Algorithm using Symmetrical Components for Transmission Line Protection

Seung-Jae Lee^{U*}, Myoung-Soo Lee^{*}, Jae-Gyu Lee^{**}, Seok-Ku You^{*}
^{*}Hanyang Univ. ^{**}Dae Duk Col.

Abstract - This paper presents a fault phase selection algorithm for transmission line protection by means of the symmetrical components. Accurate fault phase selection is necessary for correct functioning of transmission line relaying, particularly in Extra High Voltage (EHV) networks. The conventional phase selection algorithm used the phase difference between positive and negative sequence current excluding load current. But, it is difficult to abstract only fault current since we can not know the time which a fault occurs. The proposed algorithm can select the accurately fault phase using fault current contained pre-fault current.

1. 서 론

모든 보호시스템에서 중요시되는 것은 계통 안정도를 유지하기 위하여 고장구간을 건전구간으로부터 가능한 빨리 분리시키는 것이다. 가공선로에서 대부분의 선로 고장은 1선지락의 일시적인 사고이므로 고장상의 전력 공급을 일시적으로 끊으면 대부분의 일시적인 고장은 제거될 수 있다. 이러한 이유 때문에 자동재폐로 계전요소가 전력계통에 도입되었다. 자동 재폐로 계전요소는 정확한 고장상을 구분하더라도 1선 지락 고장시 고장상만을 단상 재폐로하여 전력계통의 안정도를 향상시킨다. 또한 거리 계전요소와 과전류 계전요소등과 같은 계전요소들은 계전 알고리즘의 본질적인 부정확성으로 인하여 오동작 할 수 있기 때문에 이러한 계전요소들의 오동작을 방지하기 위하여 고장상만을 선택하여 차단을 허용하도록 하는 고장상 선택 계전요소를 필요로 한다. 즉, 신뢰성 있는 고장상 선택 계전요소는 자동 재폐로 계전요소 및 거리 계전요소와 함께 매우 중요한 역할을 한다 [1].

기존의 고장상 선택 알고리즘은 부하전류를 제외한 역상분, 영상분 고장전류의 크기와 정상분, 역상분 고장전류의 위상차를 이용하여 고장상을 판별하고 있다[2]. 그러나 고장발생시각을 알 수 없기 때문에 계전기가 측정 한 전류에서 고장분 전류만을 추출한다는 것은 힘들다. 본 논문에서는 고장상 판별을 위해 각 상의 부하전류가 포함된 정상분, 역상분 및 영상분 전류의 단위 벡터를 구하고 정상분 전류의 단위벡터와 역상분 전류의 단위 벡터의 합을 이용하여 정확하게 고장 유형을 판별하는 방법을 제시하였다.

2. 기존의 고장상 선택 알고리즘

기존의 고장상 선택 알고리즘은 정상분과 역상분 전류의 위상관계를 이용하였다. 표 1은 각 고장유형(AG, BG, CG, AB, BC, CA, ABG, BCG, CAG, ABC)에 대한 대칭분 전류의 크기와 위상관계를 나타낸다. [3]

표 1 고장형태에 따른 대칭분 전류의 크기와 위상관계

고장형태	정상분 전류	역상분 전류	영상분 전류
A상 지락			a_0, b_0, c_0
B상 지락			a_0, b_0, c_0
C상 지락			a_0, b_0, c_0
AB상 단락			
BC상 단락			
CA상 단락			
AB상 지락			a_0, b_0, c_0
BC상 지락			a_0, b_0, c_0
CA상 지락			a_0, b_0, c_0
ABC상 사고			

그림 1은 고장 발생시 정상분전류와 역상분 전류의 위상관계를 나타낸다.

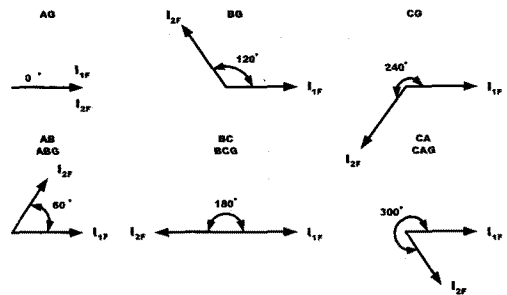


그림 1 불평형 고장시 정상분 전류와 역상분전류의 위상관계

그림 1에서 2선 지락고장과 2선 단락고장을 구별할 수 없으므로 영상분 전류의 크기를 이용하여 지락고장과 단락고장을 구별하고 있다. 또한 3상고장은 영상전류 및 역상전류의 크기가 기준값(I_{0LVL} , I_{2LVL})보다 작으면 3상 고장이라고 판단한다.[2]

그러나 이 알고리즘은 계전기가 측정하는 순수한 고장 전류를 이용한다. 고장 발생후, 계전기 설치점에서 측정되는 전류는 식 (1)과 같이 부하전류(I_{Load})와 순수 고장 전류(I_F)의 합으로 표시되는데, 정확한 고장 발생시점을 알 수 없기 때문에 고장 발생시점의 부하전류를 알기 힘들다.

$$I_{Ry} = I_{Load} + I_F \quad (1)$$

또한 그림 1의 고장상 판단기준값에 $\pm 30^\circ$ 이하의 여유를 주어 고장상을 판단하여야 한다. 이 여유가 크면 동작 속도는 빨라지나 정확한 고장상 판별이 어려워진다. 따라서 정확한 고장상 판별을 위해 동작 속도는 조금 느리지만 여유를 $\pm 7.5^\circ$ 로 줄여 사용한다.[4]

3. 새로운 고장상 선택 알고리즘

본 논문에서는 부하전류를 포함한 계전기의 측정 전류를 이용하여 고장상을 구별하는 방법을 제시하였다. 정상분 전류와 역상분 전류의 크기를 같게 만들기 위해 계전기가 측정한 각 상 전류로부터 정상분, 역상분 전류를 구한 후, 식 (2)처럼 정상분 전류와 역상분 전류의 단위벡터를 구한다.

$$\begin{aligned} U_{a1} &= \frac{I_{a1}}{|I_{a1}|}, & U_{a2} &= \frac{I_{a2}}{|I_{a2}|} \\ U_{b1} &= \frac{I_{b1}}{|I_{b1}|}, & U_{b2} &= \frac{I_{b2}}{|I_{b2}|} \\ U_{c1} &= \frac{I_{c1}}{|I_{c1}|}, & U_{c2} &= \frac{I_{c2}}{|I_{c2}|} \end{aligned} \quad (2)$$

여기서,

U_{a1}, U_{b1}, U_{c1} : 각 상 전류의 정상분 전류 단위 벡터
 U_{a2}, U_{b2}, U_{c2} : 각 상 전류의 역상분 전류 단위 벡터

식 (2)로부터 계산한 정상분 전류와 역상분 전류의 단위 벡터를 이용하여 식 (3)과 같이 벡터합을 구한다.

$$\begin{aligned} U_a^{12} &= U_{a1} + U_{a2} \\ U_b^{12} &= U_{b1} + U_{b2} \\ U_c^{12} &= U_{c1} + U_{c2} \end{aligned} \quad (3)$$

표 2는 2선 고장시 정상분 전류의 단위 벡터와 역상분 전류의 단위 벡터의 벡터합의 크기를 나타낸 것이다.

표 2. 2선 고장시 정상분과 역상분 전류의 단위 벡터합의 크기

고장유형	AB	BC	CA	ABG	BCG	CAG
U_a^{12}	1.732	0	1.732	1.732	0	1.732
U_b^{12}	1.732	1.732	0	1.732	1.732	0
U_c^{12}	0	1.732	1.732	0	1.732	1.732

표 2에서 2선 고장시 고장상과 건전상은 1.732와 0 사이의 값을 이용하여 구분할 수 있음을 알 수 있다. 즉, 0보다 크면 고장상이라고 할 수 있다. 본 논문에서는 계전기 오차 및 CT 오차에 의한 영향 때문에 발생할 수 있는 오동작을 방지하고 2선 고장시 고장상과 건전상의 구분을 확실하게 하기 위하여 고장상 판단 기준값을 1.732와 0의 거의 중간값인 1.0으로 선택하였다.

표 3은 1선 지락 고장시 정상분 전류의 단위 벡터와 역상분 전류의 단위 벡터의 벡터합의 크기를 나타낸 것이다.

표 3. 1선 지락고장시 정상분과 역상분 전류의 단위 벡터합의 크기

고장유형	AG	BG	CG
U_a^{12}	2	1	1
U_b^{12}	1	2	1
U_c^{12}	1	1	2

표 3에서 1선 지락 고장시 고장상과 건전상은 2와 1 사이의 값으로 구별할 수 있다. 본 논문에서는 1선지락 고장시 건전상과 고장상 구분을 위한 기준값으로 1.74를 사용하였다. 이 값은 2선 고장시 1선 지락고장이라고 오판하지 않도록 2선 고장시 고장상의 정상분과 역상분 전류의 단위 벡터합인 1.732보다 더 큰 값으로 설정한 것이다. 그런데 표 2와 3으로부터 알 수 있듯이 1선 지락고장시 2선 고장의 고장상 판단기준값이 1선 지락고장시 건전상의 단위벡터합과 같으므로 계전기 및 CT의 오차 등으로 인해 1선지락고장의 건전상을 2선 고장으로 오판할 수 있다. 따라서 1선 고장과 2선고장을 구분할 수 있는 기준으로 영상전류와 역상전류의 비를 이용하였다. 각 고장유형에 따른 영상 전류와 역상 전류의 비는 표 4와 같다.

표 4. 고장 유형에 따른 영상전류와 역상 전류의 비

고장유형	$ I_0 / I_2 $
1선지락	1
2선단락	0
2선지락	$\frac{Z_2}{Z_0 + 3Z_1}$

표 4에서 2선 지락고장이 완전지락이라면 $Z_1 = 0$ 이므로 영상과 역상전류의 비는 역상임피던스와 영상임피던스의 비와 같다. 여기서 영상 임피던스가 역상 임피던스보다 큰 값을 가지므로 영상과 역상전류의 비는 0에 가까운 값을 갖는다. 따라서 본 논문에서는 영상과 역상 전류의 비가 0.5보다 작을 경우엔 2선 고장으로 간주하고 클 경우엔 1선 고장으로 판단하였다. 제한한 고장상 선택 알고리즘의 흐름도는 그림 2와 같다.

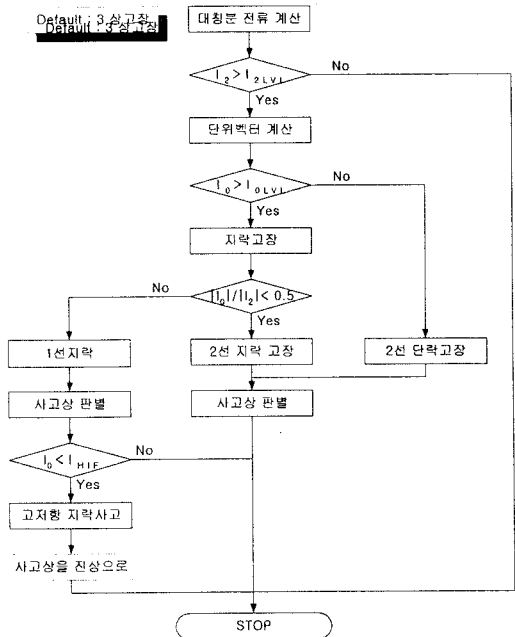


그림 2 고장상 선택 알고리즘 흐름도

그런데, 고저항 지락고장시 계전기가 측정하는 전류는 고장전류의 크기가 작아져서 부하전류의 위상과 고장전

류의 위상이 틀리기 때문에 정상상태의 부하 전류보다 더 작아질 수 있다. 따라서 부하전류를 포함한 고장상 선택 알고리즘이 판단한 고장상은 지상으로 이동하게 된다. 일반적으로 CT 1차측 영상 전류가 120A이하로 흐르면 고저항 지락고장으로 간주하고 있다. 따라서 고저항 1선지락고장을 판단하기 위한 기준으로 영상전류와 영상 전류의 크기를 이용하였다. 본 논문에서는 600/5 CT를 사용하였기 때문에 영상과 역상전류의 크기가 1.0A보다 작으면 고저항 지락고장으로 판단하였다.

4. 사례 연구

본 논문에서 제시한 고장상 선택 알고리즘의 타당성을 검증하기 위하여 그림 3과 같은 154(kV)급 양단 전원 병행 2회선 송전선로를 PSCAD/EMTDC를 이용하여 cycle당 24샘플로 고장 데이터를 생성하였다. 고장 데이터는 선로 길이가 25(km)인 송전선에서 계전기 설치점 근방과 Zone 1, Zone 2, Zone 3의 경계점 부근에서 고장 저항(0(Ω), 10(Ω), 20(Ω), 30(Ω))을 변화시켜 9가지의 고장을 모의하였다.

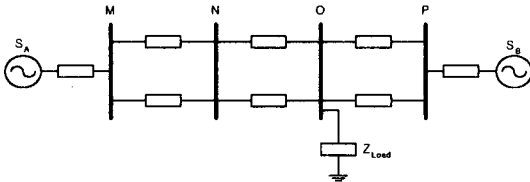


그림 3 양단전원 병행 2회선 모델 계통

표 5. 모델 계통 데이터

구 분	정상분 임피던스	영상분 임피던스	
		Self	Mutual
전원 (Ω)	S_A	5.0854+j36.649	10.968+j83.281
	S_B	1.2280+j9.9167	4.198+j21.596
선로(Ω /km)	0.1006+j0.4667	0.309+j1.3094	0.208+j0.696
부하(Ω)	155.1+j50.9	-	-

각 고장 유형에 따라 고장저항을 0(Ω), 10(Ω), 20(Ω), 30(Ω)으로 변화시켰을 때 제안한 알고리즘은 각 고장유형에 따라 정확하게 고장상과 건전상을 구분하였다. 그림 4는 선로의 80%지점에서 고장저항이 30 Ω 인 A상 지락고장시 기존의 알고리즘과 제안한 알고리즘의 고장상 판단 결과를 비교하여 나타낸 것이다.

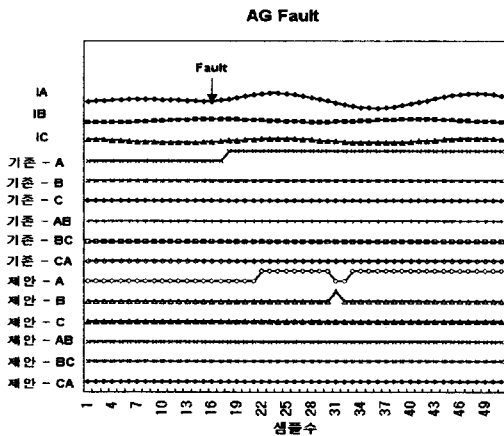


그림 4 A상 지락고장(80%, $R_f=30\Omega$)

그림 4에서 기존 알고리즘과 제안한 알고리즘은 모두 정확하게 고장상을 구분할 수 있었다. 기존 알고리즘은

고장발생시점에서 2/24 cycle후에 고장상을 판별하였고, 제안한 알고리즘은 고장발생시점에서 17/24 cycle 후에 고장상을 판별하였다. 제안한 알고리즘의 동작 속도는 기존 알고리즘보다 15/24 cycle정도 늦지만 거리계전요소와 과전류 계전요소 등과 같은 계전요소들의 동작속도가 보통 고장발생 후 1 cycle이후인 점을 감안한다면 이들 계전요소와 제안한 알고리즘이 보호 협조하여 동작하는 데는 문제가 없다.

그림 5는 선로의 250%지점에서 고장저항이 30 Ω 인 AB상 지락고장시 기존의 알고리즘과 제안한 알고리즘의 고장상 판단 결과를 비교하여 나타낸 것이다.

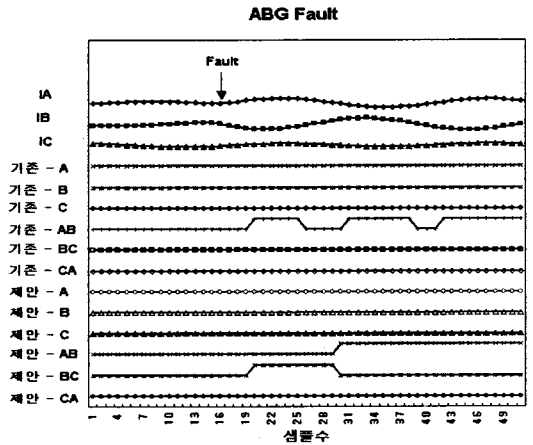


그림 5 AB상 지락고장(250%, $R_f=30\Omega$)

그림 5에서 기존 알고리즘과 제안한 알고리즘은 모두 정확하게 고장상을 구분할 수 있었다. 기존 알고리즘은 고장발생시점에서 26/24 cycle후에 고장상을 판별하였고, 제안한 알고리즘은 고장발생시점에서 14/24 cycle후에 고장상을 판별하였다. 제안한 알고리즘의 동작 속도는 기존 알고리즘보다 12/24 cycle정도 빠르게 동작하였다.

5. 결 론

본 논문에서는 실제 계전기를 구현할 때 순수 고장전류만을 정확하게 추출하는 것은 힘들기 때문에 부하전류를 포함한 고장상 선택 알고리즘을 제안하였다. 제안된 알고리즘은 계산된 단위벡터의 합과 판단기준값의 여유가 크기 때문에 정확한 고장상 판별이 가능하였다.

향후 고장 발생시 고장점으로 유입되는 고장전류가 작은 약전원(weak-infeed) 계통 및 고장발생시 전압변동이 작은 강전원(strong source) 계통과 차단기의 차단시간 차이에 의한 고장전류 반전(fault current reversal)에 적용되었을 때, 제안한 알고리즘의 응용에 관한 연구가 필요하다고 사료된다.

(참 고 문 헌)

- (1) ABB, "REL521 User's Guide", 1996.
- (2) GE, "DLP-Digital Line Protection", 1997
- (3) Walter A. Elmore, "Protective Relaying Theory and Applications", Marcel Dekker, 1982
- (4) B. Kasztenny, B. Campbell, J. Mazereeuw, "Phase Selection for Single-Pole Tripping - Weak Infeed Conditions and Cross-Country Faults", 27th Western Protective Relay Conference, 2000