

대칭분 전압을 이용한 송전선로 보호용 고장상 선택 알고리즘

이명수^{0*}, 김수남^{*}, 이재규^{**}, 유석구^{*}
 *한양대학교, **대덕대학

Phase Selection Algorithm using Sequence Voltages for Transmission Line Protection

Myoung-Soo Lee^{0*}, Soo-Nam Kim^{*}, Jae-Gyu Lee^{**}, Seok-Ku You^{*}
 *Hanyang Univ. **Dae Duk Col.

Abstract - A reliable fault type identification (phase selection) plays a very important role in transmission line protection, particularly in Extra High Voltage (EHV) networks. The conventional fault type identification algorithm used the phase difference between positive and negative sequence current excluding load current. But, it is difficult to pick out only fault current since we can not know when a fault occurs and identify the fault type in weak-infeed conditions that dominate zero-sequence current in phase current.

The proposed algorithm can identify the accurately fault type using the sum of unit vectors which are calculated by positive-sequence voltage and negative-sequence voltage.

1. 서 론

모든 보호시스템에서 중요시되는 것은 계통 안정도를 유지하기 위하여 고장 구간을 전선 구간으로부터 가능한 빨리 분리시키는 것이다. 가공선로에서 대부분의 선로 고장은 일시적인 고장이므로 전력공급을 짧은 시간동안 차단하였다가 다시 공급하면 대부분의 일시적인 고장은 제거될 수 있다. 이러한 이유 때문에 자동 재폐로 계전 요소가 전력계통에 도입되었다. 자동 재폐로 계전 요소는 1선 지락 고장과 2선 고장(2선 지락 고장, 2선 단락 고장)을 정확하게 구별함으로써 단상 차단/단상 재폐로 또는 3상 차단/3상 재폐로를 고장 유형(1선 지락 고장, 2선 고장)에 따라 선택적으로 적용하여 계통의 안정도를 향상시킬 수 있다. 또한, 거리 계전 요소 등과 같은 계전 요소들의 본질적인 부정확성으로 인한 오동작을 방지하거나, 고장점 추정 알고리즘에 정확한 정보를 제공하기 위해서도 빈번히 사용된다[1].

기존의 고장상 선택 알고리즘은 부하전류를 제외한 정상분 고장전류와 역상분 고장전류의 위상차를 이용하여 고장상을 판별하고 있다[2]. 그러나 이러한 알고리즘은 실제로 구현할 때, 고장 발생 시각을 알 수 없기 때문에 계전기가 측정된 전류에서 고장분 전류만을 추출한다는 것은 힘들다. 또한, 약전원(weak-infeed) 계통의 경우, 고장전류가 작으므로 순수 고장전류만으로 고장상을 판별한다는 것은 실적용상 부정확하다. 특히 우리나라 계통에서는 선로를 보호하기 위하여 모선 전압을 사용하고 있고, 이 모선전압은 계전기 설치점에서의 3상 완전 고장과 같이 3상 모두의 전압이 0이 되는 경우를 제외하면 고장 유형을 판별하기에 충분한 대칭분 전압이 존재하므로 고장상 판별 알고리즘의 기준으로 적절하다고 판단된다.

따라서 본 논문에서는 고장전류보다 고장 전압을 이용한 고장상 선택 알고리즘을 제시하고자 한다. 고장상 판별을 위해 각 상의 정상분 전압과 역상분 전압을 구한 후 이들 전압을 이용하여 정상분 전압과 역상분 전압의 단위벡터를 계산하고 정상분 전압의 단위벡터와 역상분

전압의 단위벡터의 벡터합의 크기를 이용하여 정확하게 고장상을 판별하는 방법을 제안하였다.

2. 기존의 고장상 선택 알고리즘

기존의 고장상 선택 알고리즘은 A상 정상분 전류와 A상 역상분 전류의 위상관계를 이용하였고 영상분 전류의 크기를 이용하여 2선 지락 고장과 2선 단락 고장을 구별하고 있다. 또한 3상고장은 영상전류 및 역상전류의 크기가 기준값(I_{0LVL} , I_{2LVL})보다 작으면 3상고장으로 판단하였다[2].

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

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

또한 고장상 판단 기준값에 $\pm 30^\circ$ 이하의 여유를 주어 고장상을 판단하여야 한다. 이 여유가 크면 동작 속도는 빨라지나 정확한 고장상 판별이 어려워지고 여유가 작으면 동작속도는 느려지나 정확한 고장상을 판별할 수 있다. 따라서 정확한 고장상 판별을 위해 동작 속도도 조금 느리지만 여유를 $\pm 7.5^\circ$ 로 줄여서 사용한다[3].

3. 대칭분 전류를 이용한 고장상 선택 알고리즘

부하전류를 포함한 각 상 정상분 전류의 단위벡터와 역상분 전류의 단위벡터의 벡터합의 크기를 이용한 고장상 선택 알고리즘은 고장전류의 크기가 큰 경우에는 정확하게 고장상을 판별할 수 있지만 고저항 지락 고장과 같이 고장 전류의 크기가 작아지게 되면 고장상 판별이 어려워진다. 이는 부하전류를 포함한 고장전류의 크기가 정상상태의 부하전류의 크기보다 더 작아질 수도 있어서 고장상을 판별하기 위한 정보가 왜곡되기 때문이다[4].

4. 대칭분 전압을 이용한 고장상 선택 알고리즘

우리나라 계통에서는 선로를 보호하기 위하여 모선 전압을 사용하고 있고, 이 모선전압은 계전기 설치점에서의 3상 완전 고장과 같이 3상 모두의 전압이 0이 되는 경우를 제외하면 고장 유형을 판별하기에 충분한 대칭분 전압이 존재한다. 따라서 본 논문에서는 계전기가 측정된 각 상 모선전압을 이용하여 고장상을 판별하는 방법을 제시하였다.

고장상 선택을 위한 정상분 전압과 역상분 전압을 구하기 위해 식 (2)처럼 선로 고장시 선로에서의 전압 강하를 보정한 각 상 전압을 이용한다[5][6][7].

$$\begin{aligned} V_{AF} &= V_A - Z_{IL} \cdot \left[I_A + \frac{Z_{0L} - Z_{1L}}{3Z_{1L}} \times (3I_0) \right] \\ V_{BF} &= V_B - Z_{IL} \cdot \left[I_B + \frac{Z_{0L} - Z_{1L}}{3Z_{1L}} \times (3I_0) \right] \\ V_{CF} &= V_C - Z_{IL} \cdot \left[I_C + \frac{Z_{0L} - Z_{1L}}{3Z_{1L}} \times (3I_0) \right] \end{aligned} \quad (2)$$

식 (2)로부터 계산된 각 상 전압을 이용하여 각 상의 정상분 전압(V_{1AF} , V_{1BF} , V_{1CF})과 역상분 전압(V_{2AF} , V_{2BF} , V_{2CF})을 계산하고 계산된 정상분 전압과 역상분 전압의 크기를 같게 만들기 위해 식 (3)을 이용하여 정상분 전압과 역상분 전압의 단위벡터를 구한다.

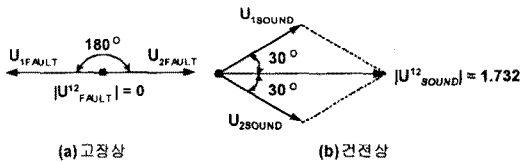
$$\begin{aligned} U_{1A} &= \frac{V_{1AF}}{|V_{1AF}|}, & U_{2A} &= \frac{V_{2AF}}{|V_{2AF}|} \\ U_{1B} &= \frac{V_{1BF}}{|V_{1BF}|}, & U_{2B} &= \frac{V_{2BF}}{|V_{2BF}|} \\ U_{1C} &= \frac{V_{1CF}}{|V_{1CF}|}, & U_{2C} &= \frac{V_{2CF}}{|V_{2CF}|} \end{aligned} \quad (3)$$

여기서, U_{1A} , U_{1B} , U_{1C} : 정상분 전압 단위 벡터
 U_{2A} , U_{2B} , U_{2C} : 역상분 전압 단위 벡터

식 (3)으로부터 계산한 정상분 전압의 단위벡터와 역상분 전압의 단위 벡터를 이용하여 식 (4)와 같이 두 단위 벡터의 벡터합을 구한다.

$$\begin{aligned} U_A^{12} &= U_{1A} + U_{2A} \\ U_B^{12} &= U_{1B} + U_{2B} \\ U_C^{12} &= U_{1C} + U_{2C} \end{aligned} \quad (4)$$

그림 1은 1선 지락 고장시 고장상과 건전상의 정상분 전압의 단위 벡터와 역상분 전압의 단위 벡터의 벡터합의 크기를 나타낸 것이다.



(a) 고장상

(b) 건전상

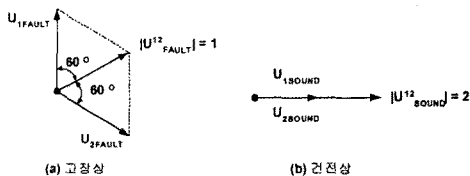
그림 1. 1선 지락 고장시 고장상과 건전상의 단위벡터 합
 그림 1에서 고장상의 단위 벡터합의 크기는 0이 되고 건전상의 단위벡터합의 크기는 1.732가 됨을 알 수 있다. 이를 1선 지락 고장의 고장 유형(AG, BG, CG)에 대해 각각 정리하면 표 1과 같다.

표 1. 1선 지락 고장시 단위 벡터합의 크기

고장유형	AG	BG	CG
U_A^{12}	0	1.732	1.732
U_B^{12}	1.732	0	1.732
U_C^{12}	1.732	1.732	0

표 1에서 1선 지락 고장시, 고장상과 건전상은 0과 1.732사이의 값으로 구별할 수 있다. 즉, 1.732보다 작으면 고장상이라고 할 수 있다. 본 논문에서는 계전기 오차 및 PT 오차에 의한 영향 때문에 발생할 수 있는 오동작을 방지하고 1선 고장시 고장상과 건전상의 구분을 확실하게 하기 위하여 고장상 판단 기준값을 1.732와 0의 거의 중간값인 1.0으로 선택하였다.

그림 2는 2선 고장시 고장상과 건전상의 정상분 전압의 단위 벡터와 역상분 전압의 단위 벡터의 벡터합의 크기를 나타낸 것이다.



(a) 고장상

(b) 건전상

그림 2. 2선 고장시 고장상과 건전상의 단위벡터합

그림 2에서 건전상의 단위 벡터합의 크기는 2가 되고 고장상의 단위 벡터합의 크기는 1이 됨을 알 수 있다. 이를 2선 고장의 고장 유형(ABG, BCG, CAG, ABS, BCS, CAS)에 대해 각각 정리하면 표 2와 같다.

표 2. 2선 고장시 단위 벡터합의 크기

고장유형	ABS	BCS	CAS	ABG	BCG	CAG
U_A^{12}	1	2	1	1	2	1
U_B^{12}	1	1	2	1	1	2
U_C^{12}	2	1	1	2	1	1

표 2에서 2선 고장시, 고장상과 건전상은 1과 2사이의 값을 이용하여 구분할 수 있음을 알 수 있다. 즉, 2보다 작으면 고장상이라고 할 수 있다. 본 논문에서는 2선 지락 고장시 건전상과 고장상 구분을 위한 기준값으로 1.735를 사용하였다. 이 값은 1선 지락 고장시 2선 고장용 고장상 선택 알고리즘이 오동작하지 않도록 1선 지락 고장시 건전상의 정상분과 역상분 전압의 단위 벡터합의 크기인 1.732보다 더 큰 값으로 선정된 것이다.

그런데 표 1과 표 2에서 1선 지락 고장의 판단 기준값이 2선 고장시 고장상의 단위벡터 합의 크기와 같으므로 1선 지락 고장시 건전상을 2선 지락 고장의 고장상으로 오판할 수 있다. 따라서 1선 지락 고장과 2선 고장을 구분할 수 있는 기준으로 영상전압과 역상전압의 비를 이용하였다. 각 고장 유형에 따른 영상 전압과 역상 전압의 비는 표 3과 같다.

표 3. 고장 유형에 따른 영상 전압과 역상 전압의 비

고장유형	$ V_0 / V_2 $
1선지락	$ Z_0 / Z_2 $
2선단락	0
2선지락	$ Z_0Z_2 / Z_2(Z_0+3R_G) $

표 3에서 영상 임피던스가 역상 임피던스보다 큰 값을 가지므로 1선 지락 고장시 영상전압과 역상전압의 비는 1보다 큰 값을 갖고 2선 지락 고장시 지락저항에 의해 영상전압과 역상전압의 비는 1이하의 값을 갖는다. 따라서 본 논문에서는 영상 전압과 역상 전압의 비가 1.5보다 작을 경우엔 2선 지락 고장으로 간주하고 클 경우엔 1선 지락 고장으로 판단하였다.

제안한 알고리즘의 흐름도는 그림 3과 같다.

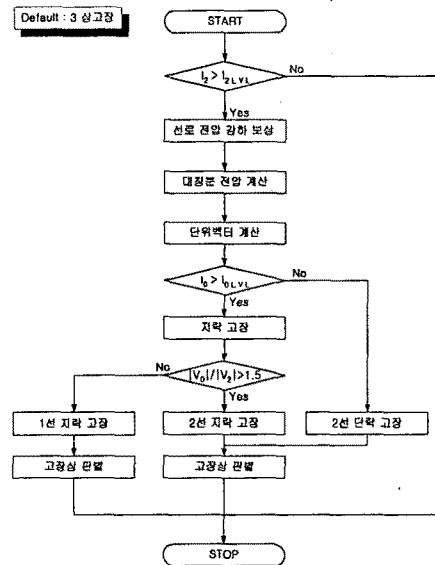


그림 3. 제안한 고장상 선택 알고리즘 흐름도

4. 시뮬레이션 및 고찰

본 논문에서 제시한 고장상 선택 알고리즘의 타당성을 검증하기 위하여 그림 4와 같은 154(kV)급 양단 전원 병행 2회선 송전계통에서 시뮬레이션하였고, EMTDC를 이용하여 cycle당 24 샘플로 고장 데이터를 생성하였다. 고장 데이터는 선로 길이가 25(km)인 송전선에서 계전

기 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.

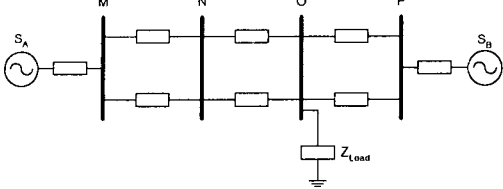


그림 4. 양단전원 병행 2회선 모델 계통

표 6. 모델 계통 데이터

구 분	정상분 임피던스	영상분 임피던스	
		Self	Mutual
전원	S_A	$5.0854 + j36.649$	$10.968 + j83.281$
(Ω)	S_B	$1.2280 + j9.9167$	$4.198 + j21.596$
선로(Ω/km)		$0.1006 + j0.4667$	$0.309 + j1.3094$
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 5는 선로의 80%지점에서 고장저항이 0Ω인 A상 지락 고장시 기존 알고리즘과 제안한 알고리즘의 고장상 판단 결과를 비교하여 나타낸 것이다.

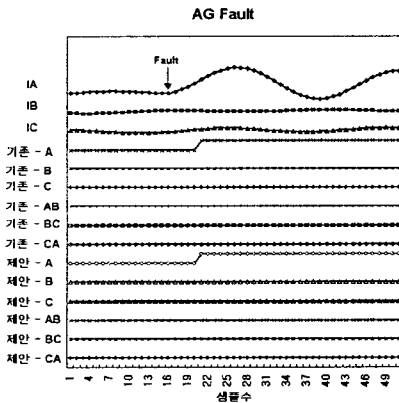


그림 5. A상 지락고장(80%, Rf=0Ω)

그림 5에서 기존 알고리즘과 제안한 알고리즘은 모두 고장발생시점에서 4/24cycle후에 고장상을 판별하였다.

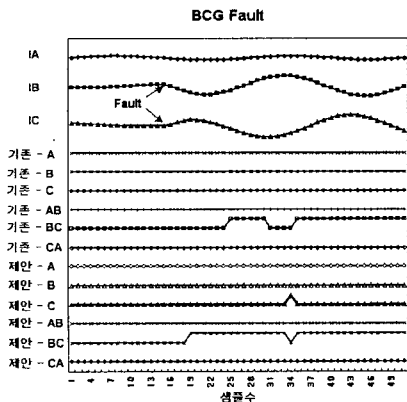


그림 6. BC상 지락고장(150%, Rf=10Ω)

그림 6은 선로의 150%지점에서 고장저항이 10Ω인 BC상 지락 고장시 기존 알고리즘과 제안한 알고리즘의 고장상 판단 결과를 비교하여 나타낸 것이다.

그림 6에서 기존 알고리즘과 제안한 알고리즘은 고장 발생시점에서 20/24cycle후에 고장상을 판별하였다. 기존 알고리즘과 제안한 알고리즘은 각각 고장 발생 후 10/24cycle과 4/24cycle에서 처음으로 고장상을 판별하였으나 고장발생 때문에 나타나는 과도 현상으로 인하여 기존 알고리즘은 고장상 판단후 4샘플이 고장이 아니라고 판단하였지만 제안한 알고리즘은 고장상 판단후 단지 1샘플만이 고장이 아니라고 판단하였다. 따라서 기존 알고리즘보다 제안한 알고리즘이 과도상태에서의 성능이 보다 우수하다는 것을 알 수 있다.

그림 7은 선로의 250%지점에서 고장저항이 20Ω인 BC상 단락 고장시 기존 알고리즘과 제안한 알고리즘의 고장상 판단 결과를 비교하여 나타낸 것이다.

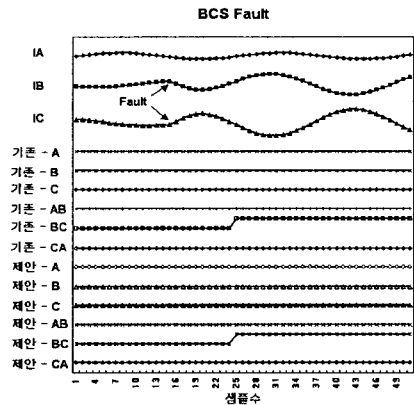


그림 7. BC상 단락고장(250%, Rf=20Ω)

그림 7에서 기존 알고리즘과 제안한 알고리즘은 모두 고장발생시점에서 10/24 cycle후에 고장상을 판별하였다.

5. 결 론

본 논문에서는 실제 계전기를 구현할 때 고장 발생시각을 알 수 없으므로 순수 고장전류만을 정확하게 추출하는 것은 힘들고, 약전원 계통에서 고장 발생시 고장점으로 유입되는 고장 전류가 작기 때문에 대칭분 전압을 이용한 고장상 선택 알고리즘을 제안하였다. 제안한 알고리즘은 기존의 알고리즘보다 2선 지락 고장시 과도 상태에서 더 안정적으로 동작하였으며 1선 지락 고장 및 2선 단락 고장의 경우엔 거의 동일하게 동작하였다.

향후 약전원 계통 및 강전원(strong source) 계통등에 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] 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
- [4] 이승재, 이명수, 이재규, 유석규, "대칭분 전류를 이용한 고장상 선택 알고리즘", 전기학회 하계학술대회, 2001
- [5] GE, "Single-Pole Tripping with SLYP-SLCN Relay System Description and Application"
- [6] Mitsubishi, "Instruction Manual Digital Distance Relay Scheme Type MDT-F", Ver. F, 1999.
- [7] Toshiba, "Numerical Distance Relay Type GRZ - 100"