

비접지 DC 급전계통에서 전류형 지락보호계전 방법

Ground fault protective relaying schemes for DC traction power supply system

정상기¹ · 정락교² · 이성역² · 김연수² · 조홍식²

Sang-Gi Chung · Rag-Gyo Jeong · Sung-Hyeok Lee · Yun-Su Kim · Hong-Sik Cho

Abstract

In urban rail transit systems, ground faults in the DC traction power supply system are currently detected by the potential relay, 64P. Though it detects the fault it cannot identify the faulted region and therefore the faulted region could not be isolated properly. Therefore it could cause a power loss of the trains running on the healthy regions and the safety of the passengers in the trains could be affected adversely. Two new ground fault protective relay schemes that can identify the faulted region are presented in this paper. A current limiting device, called Device X, is newly introduced in both system, which enables large amount of ground fault current flow upon the positive line to ground fault. One type of the relaying schemes is called directional and differential ground fault protective relay which uses the current differential scheme in detecting the fault and uses the permissive signal from neighboring substation to identify the faulted region correctly. The other is called ground over current protective relay. It is similar to the ordinary over current relay but it measures the ground current at the device X not at the power feeding line, and it compares the current variation value to the ground current in Device X to identify the correct faulted line. Though both type of the relays have pros and cons and can identify the faulted region correctly, the ground over current protective relaying scheme has more advantages than the other.

Keywords : DC Power Distribution System, Protective Relay, Ground Fault, Urban Rail Transit, Traction Power

1. 서론

그림1은 도시철도 DC 급전시스템의 전형적인 접지보호 계전기, 64P,의 응용 예를 보여준다. 지락사고가 발생하면 사고전류가 접지저항기 R을 통해 흐른다. 계전기는 저항 R의 전위차를 측정하여 기준치(셋팅 값)와 비교하여 지락 사고 여부를 판단한다[1]. 이러한 지락보호계전방식은 지락사고 여부는 판단할 수 있으나 지락구간은 판단할 수 없는 치명적인 단점을 갖고 있다. 지락으로 인해 일단 대지 전위가 DC 네가티브 버스의 전위보다 높아지면 모든 변전소의 지락보호계전기 접지저항기로 지락전류가 흐르기 때문이다. 또한 지락전류의 양도 사고지점으로 부터의 거리와 관계없이 계전기 접지저항기의 저항 값에 의해 좌우 되므

로 일단 지락사고가 발생하면 사고구간뿐만 아니라 건전구간의 전원도 차단될 수 있다. 그림 2에서 보면 1번 차량 근처에서 지락사고가 발생하였으나 그림에서 보이는 모든 16개의 피더 차단기가 트립된다. 그러므로 건전구간을 운행하는 2번 차량도 전원이 차단되어 운행할 수 없게 된다. 만약 이러한 지락사고가 화재와 연관이 있을 경우 지하구간 혹은 터널구간을 운행하는 열차의 승객은 매우 위험한 상황에 직면할 수 있다. 결론적으로 현재의 지락사고 보호계전 방법은 사고구간을 판별하지 못하므로 승객의 안전에 위험을 초래할 수 있다. 본문에서는 새로운 보호계전방식 2가지가 제시된다. 하나는 지락과전류 보호계전기이고 다른 하나는 방향차동지락 보호계전기이다. 비 접지 계통에서는 지락이 발생하더라도 사고전류가 흐르지 않으므로 과전류계전기를 사용할 수 없다. 본문에서 제시되는 지락과전류 방식에서는 지락전류를 흐르게 하기 위하여 전류제한수 단 'X'의

1 정희원, 한국철도기술연구원, 책임연구원
2 정희원, 한국철도기술연구원, 선임연구원

개념을 새롭게 도입하였다. 이 전류제한 수단은 정상운전 시에는 매우 큰 저항의 특성을 나타내어 대지로부터의 누설전류흐름을 막고 지락사고 시에는 매우 작은 저항의 특성을 보여주어 지락전류의 흐름을 자유롭게 허용하는 기기이다. 지락과전류계전기는 지락사고 시에 이 전류제한수단 'X'를 통하여 흘러 들어오는 전류를 측정하여 지락사고 유무를 판단한다. 사고구간의 판별은 급전선 전류 변화 형태 및 사고전류 양으로서 판단된다. 방향차동지락보호계전기는 키르호프의 전류법칙을 이용하여 지락의 유무 및 사고구간을 판별한다. DC 급전시스템은 비접지 방식으로 운용되며 전류는 포지티브 급전선을 통해 변전소로부터 흘러나가고 주행레일 혹은 네가티브 컨덕터레일을 통해 변전소로 흘러 들어온다. 정상 운전상태에서는 변전소로부터 나가는 전류와 들어오는 전류는 항상 같으므로 변전소의 좌측 혹은 우측으로 나가는 전류의 합은 0이 되고 지락사고가 발생하면 대지를 통하여 변전소로 지락전류가 유입되므로 그 합은 0이 되지 않는다. 지락과전류 계전기에서는 지락전류의 양은 대지로부터 변전소 네가티브 버스로 흘러 들어오는 지락전류의 양을 측정하여 얻고 사고전차선의 구분은 지락전류의 양과 전차선 전류변화량을 비교함으로써 판단된다. 2가지 방법 모

두 충분한 지락전류를 얻기 위하여 전류제한수단 'X'의 설치가 필요하다.

2. 전류제한수단 'X'

DC 급전시스템은 전식 문제로 인하여 비접지로 운영되기 때문에 접지사고가 발생하더라도 지락전류가 거의 흐르지 않는다. 그러나 사고구간의 판별을 용이하게 하기 위해서는 충분한 양의 지락전류가 필요하므로 새로운 계전기에서는 전류제한수단 'X'를 도입하였다. 'X'는 그림 3 및 그림 4와 같이 정류기 네가티브 버스와 대지 사이에 설치된다. 전류제한수단 'X'는 그림 5에서 보여지는 바와 같이 비선형 V-I 특성을 갖고 있다. 즉, 단자 간 전위차가 작을 때는 고저항의 특성을 나타내어 마치 절연체와 같은 특성을 보여주며 단자 간 전위차가 클 때는 저저항의 특성을 보여주어 전류가 자유롭게 흐를 수 있는 도체와 같은 특성을 보여준다. 따라서 'X'를 설치함으로써 DC 급전시스템은 정상운전 시에는 비접지 계통으로 운영되고 일단 지락사고가 발생하면 계통이 접지시스템으로 운영되는 결과가 된다. 그림 5에서 세로축과 가로축은 각각 네가티브 버스와 대지사이의 전위차 및 전류량을 나타낸다. V_{min} 은 정상운전상태에서 네가티브 버스와 대지 사이에 나타날 수 있는 최대전압보다 큰 값이며 이 전위차에서도 대지누설전류가 일정 값 즉 여기서는 10mA 미만이어야 함을 보여준다. 물론 계전기 셋팅 값은 V_{min} 보다 커야한다. 좌표(V_{opers}, I_{thru})는 'X'가 그림 3과 같이 설치되고 지락사고 시의 전압 및 전류 동작 값을 나타낸다.

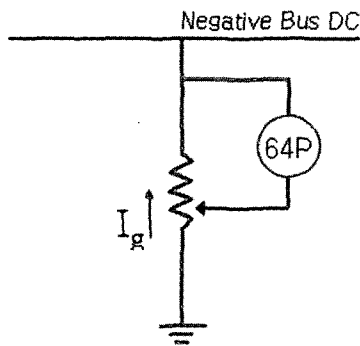


Fig. 1. Conventional ground fault protective relay

3. 지락과전류보호계전기

3.1 동작원리

지락과전류 보호계전시스템에서는 정류기의 네가티브 버스를 그림 4와 같이 전류제한수단 'X'를 통하여 직접 접지

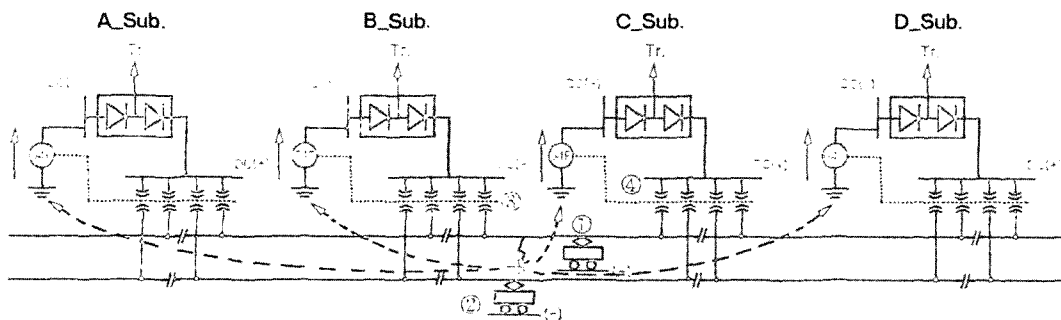


Fig. 2. Ground fault current flow in ungrounded DC traction power supply system

시키거나 혹은 저항 값을 작게 하여 그림 3과 같이 설치한다. 사고유무 및 사고구간의 판별은 변전소의 전류제한수단 'X'를 통해 흘러들어 오는 전류의 크기로서 판단된다. 사고구간의 변전소에서는 인접변전소 보다 항상 큰 지락사고전류가 흐른다. 그림 6의 급전 회로는 회로해석의 간략화를 위하여 사고 지점으로부터 왼쪽방향의 계통만을 등가로 표시한 것이다. 여기서의 목적은 사고지점으로부터 가까운 변전소, 즉 변전소 B로 흘러 들어가는 지락전류 I_b 가 사고지점으로부터 상대적으로 먼 변전소, 즉 변전소 A로 흘러 들어가는 지락전류 I_a 보다 항상 크다는 것을 보여주는 것이다. 또한 부하전류는 전류제한수단 'X'를 통해 흐르지 않으므로 생략되었다. 그림 6에서 보여지는 바와 같이 계통의 루프 방정식을 세우면 식 (1) 및 식 (2)와 같다.

$$V \approx I_a (R_s + R_a + R_b) + I_b R_b \quad (1)$$

$$V \approx I_b (R_s + R_b) + I_a R_b \quad (2)$$

식 (1)에서 식 (2)을 빼면 식 (3)과 같이되고 다시 정리하면 식 (4)와 같이되어 지락전류 I_b 는 지락전류 I_a 보다 항상 크

며 이것은 사고지점으로부터 가까운 변전소로 흘러 들어가는 지락전류가 사고지점으로부터 상대적으로 먼 변전소로 흘러 들어가는 지락전류보다 항상 크다는 것을 보여주는 것이다.

$$I_a (R_s + R_a) - I_b R_b = 0 \quad (3)$$

$$I_b - I_a = \frac{I_a R_a}{R_s} > 0 \quad (4)$$

또한 그림 7은 계전기의 동작시간지연 특성을 보여준다. 동작시간 지연특성은 반한 시 특성이므로 전류의 양이 크면 빨리 동작하고 전류의 양이 작으면 늦게 동작한다. 사고지점으로부터 가까운 변전소는 사고지점으로부터 먼 변전소보다 항상 큰 지락사고전류를 보므로 사고지점으로부터 가까운 변전소의 차단기가 먼저 동작하여 사고구간을 격리시킨다. 변전소 B 왼쪽방향에서 지락사고 발생되었을 경우에 그림 7에서 보면 $t_{a1} > t_{b1}$ 이고 $t_{a2} > t_{b2}$ 이므로 A 변전소의 차단기가 동작하기 이전에 항상 B변전소의 차단기가 먼저 동작하여 사고구간만을 계통에서 격리시킨다. 또한 변전소 B 계전기가 고장으로 동작하지 못할 경우 변전소 A 계전기가

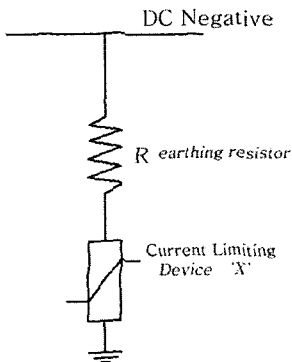


Fig. 3. Current control device 'X' in directional and differential relaying scheme

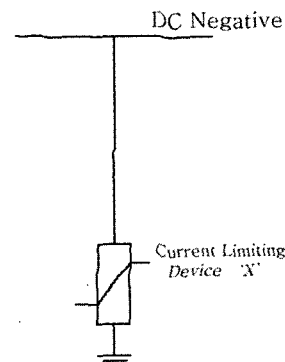


Fig. 4. Current control device 'X' in ground overcurrent relaying scheme

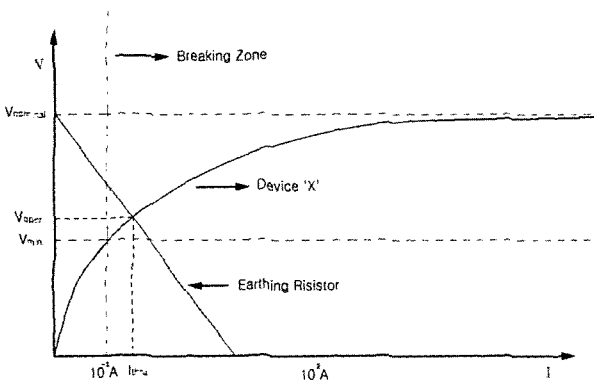


Fig. 5. V-I characteristic of the current control device 'X'

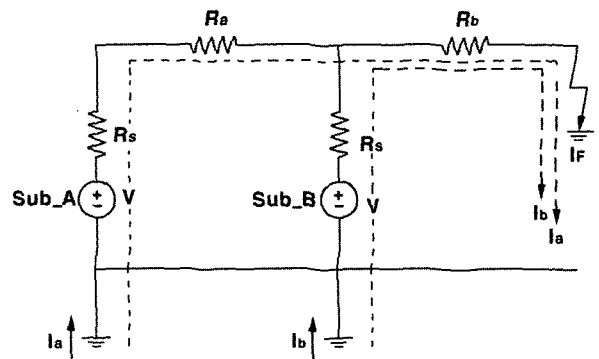


Fig. 6. Comparison of the ground current amount flowing into the substations far and near the fault location respectively. $I_a < I_b$

시간 지연 후 동작하므로 자연적으로 후비보호의 기능을 수행할 수 있다.

사고구간 내에서 사고 전차선이 좌, 우 혹은 상 하행선 중 어느 급전선에서 지락사고가 발생했는지의 판별은 지락전류의 변화량과 각 급전선 전류의 변화량을 비교함으로써 이

루어진다. 그림 8은 지락사고전류를 계산하기 위하여 일반적인 급전계통의 등가회로를 보여준다. 그림 8에서 지락전류 i_F 는 식 (5)와 같다. 식 (5)에서 i_F , E , R , L 및 t 의 단위는 각각 [A], [V], [Ω], [H] 및 [sec]이다. 또한 R 및 L 은 각각 그림 6에서의 $R = R_s + R_l$, $L = L_s + L_l$ 이다.

$$i_F = \frac{E}{R} (1 - e^{-\frac{R}{L}t}) \quad (5)$$

식 (5)의 i_F 는 사고 전차선으로부터 대지로 흘러 들어가는 지락전류 값이다. 변전소의 전류제한수단 'X'를 통해 흘러 들어오는 지락전류 값은 이 보다 작을 수 있다. 그것은 식 (5)의 지락전류가 각 변전소의 전류제한수단으로 분배되어 흘러 들어가기 때문이다(식 10 참조). 사고 급전선에서는 식 (5)의 i_F 값이 부하전류에 추가하여 증가할 것이므로 'X'에 흐르는 전류 량과 급전선의 전류의 변화 양을 비교함으로써 사고 급전선을 판별할 수 있다. 그림 9는 그림 6과 같은 지락사고에서의 사고급전선의 전류변화와 전류제한수단의 전류변화를 동일 시간 축으로 보여준다. 여기서 전류 변화량의 비교를 위한 윈도우의 크기 t_w 에 대하여 유의하여야 할 필요가 있다. 비교 윈도우의 크기란 식 (5)에서의 t 이다. 즉 전류 변화량의 크기는 t 의 함수이다. 비교에 충분한 크기의 전류변화량을 얻기 위해서는 충분한 크기의 t 가 필요하고 이 값이 최소 비교윈도우의 크기가 될 것이다. 예를 들어 시정수가 20ms인 계통에서 비교 윈도우 t_w 를 5ms로 하면 전류변화량은 식 (5)에 의하여 Steady State 지락전류 값($\frac{E}{R}$)의 22% 정도가 된다. 이 값이 지락사고로 인한 전류 증가량의 계측에 충분히 큰 양인가는 계전기 셋팅 시 검토되어야 한다.

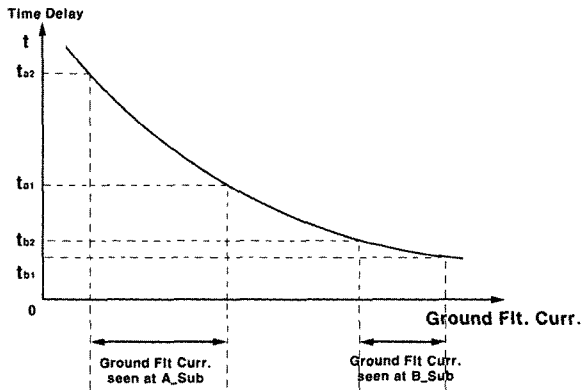


Fig. 7. Inverse time current characteristic of the ground over-current relay

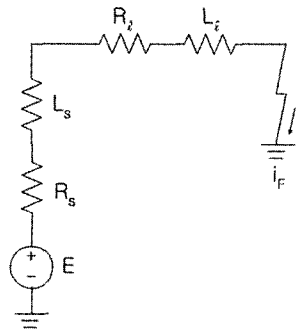


Fig. 8. Equivalent circuit for the ground fault current calculation

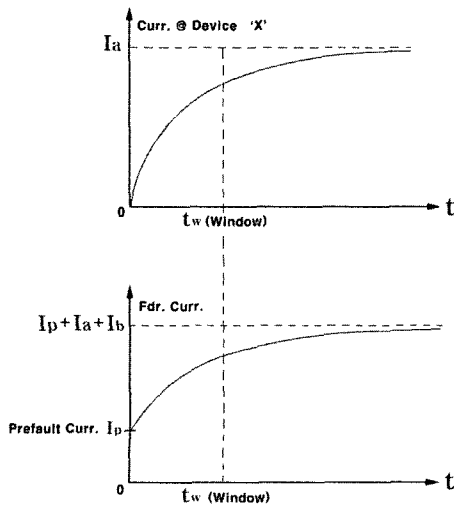


Fig. 9. Comparison of the current variations in the feeder lines and the current control device

3.2. 알고리즘

지락과전류보호계전기의 로직 플로우다이아그램은 그림 10과 같다. 전류 $I_1 \sim I_4$ 와 I_g 가 항시 측정된다(스텝2). I_g 는 계전기의 해당 셋팅 값과 비교되며 I_g 가 셋팅 값보다 크면 지락사고로 판단되며 그 후부터 시간 (T_d)은 누적되기 시작한다(스텝4). 또한 T_d 는 계전기에 내장된 시간지연특성(그림 7)의 T_{set} 와 비교된다. (스텝 5) T_{set} 는 시간 지연특성곡선 상에서 지락전류 값에 대응하여 정해진 지연 시간을 의미한다. 만약 T_d 가 T_{set} 보다 커지면 트립 신호를 내 보낸다. 그러나 트립 신호를 내보내기 전에 사고전차선 즉 변전소로부터 나가는 상, 하, 좌, 우 4개의 전차선 중 사고 전차선을 선택하여(스텝 6) 해당 차단기로 트립 신호를 내보낸다.

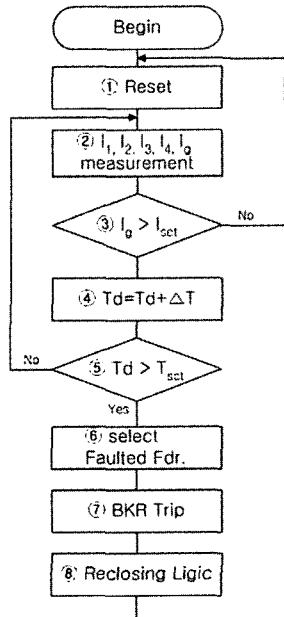


Fig. 10. Logic flow diagram of the ground overcurrent relay

4. 방향차동지락보호계전기

4.1 동작원리

방향차동지락보호계전기는 방향성 차동식 계전 방법 이용한다. 또한 계전기는 인접변전소로부터 트립허가 신호를 받아야 함으로 Pilot Permissive System이기도하다. 지락 사고는 변전소로부터의 모든 급전 및 귀환선로에 키르호프의 전류법칙을 적용함으로써 판별된다. 그림 11에서 B변전소와 B변전소의 왼쪽 모든 전력계통을 포함하는 구를 그리면 그 구에서 나오는 모든 전류의 합은 대지로부터의 누설 전류이다. 이것은 식 (6)과 같이 표현된다. 즉 구와 외부사이의 회로는 2개의 급전선, 2개의 귀환선 및 대지로부터의 누설전류회로의 5개이고 이 5개 전류의 합은 키르호프의 전류 법칙에 의해 0이 되어야 한다. 같은 방법으로 B변전소와 B 변전소 오른쪽 모든 전력계통을 포함하는 구를 그리고 이 구에 키르호프의 전류법칙을 적용하면 식 (7)과 같이 된다.

$$I_1 + I_2 + I_3 + I_4 = I_{g-R} \quad (6)$$

$$I_5 + I_6 + I_7 + I_8 = I_{g-L} \quad (7)$$

I_1, I_2, I_5, I_6 는 변전소의 4개 급전선로의 출력 전류의 측정값이고 I_3, I_4, I_7, I_8 는 변전소 4개 귀환회로 전류 값의 측정값이다. I_{g-R}, I_{g-L} 은 각각 변전소 좌 우 방향으로 부터의 대지 전류이며 따로따로 측정되는 값이 아니며 $I_1 \sim I_8$ 으로부터 계산된 값이다. 계전기 접지저항기에 흐르는 전류 I_g 가 측정되고, 계전기에 의해 오른쪽 방향 지락

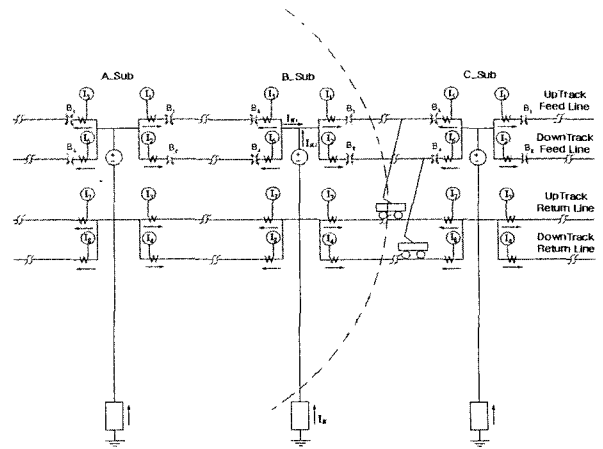


Fig. 11. Application of the kirchhoff's current law to each side of the substation in the directional and differential relaying scheme

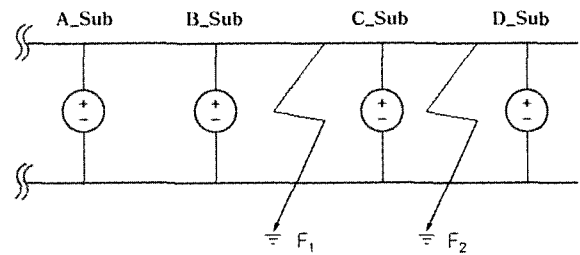


Fig. 12. Fault locations

사고로 판단되면 I_g 는 I_{g-R} 로 왼쪽방향의 지락사고로 판단되면 I_g 는 I_{g-L} 로 해석되는 것이다. I_{g-R}, I_{g-L} 은 정상상태에서는 매우 작은 누설전류 값이다. 왼쪽방향에서 지락사고 발생 시에는 식 (6),(7)는 식 (8),(9)와 같이 표현된다.

$$I_1 + I_2 + I_3 + I_4 = I_{g-L} > 0 \quad (8)$$

$$I_5 + I_6 + I_7 + I_8 = I_{g-R} \leq 0 \quad (9)$$

$$I_g = I_{g-R} + I_{g-L} \quad (10)$$

따라서 왼쪽방향에서 지락사고가 났을 경우는 식 (8)이 식 (9)보다 확실히 커지며 오른쪽방향에서 지락사고가 났을 경우에는 그 반대가 된다. 이것이 본 계전기에서의 사고방향 판단 방법이다. 즉 I_{g-R} 이 I_{g-L} 보다 크면 오른쪽방향에서의 지락사고이고 I_{g-L} 이 I_{g-R} 보다 크면 왼쪽방향에서의 지락사고를 의미한다. 사고의 유무는 I_g 의 크기에 의해 판단 된다. 지락사고가 없을 시는 I_g 는 대지누설전류로 매우 작은 값이 되며 지락사고가 발생하면 I_g 는 그림 5에서의 I_{thru} 와 같으며 계전기 접지저항기의 저항 값과 전류제한수단 'X'의 특성에 의해 결정된다. 지락사고가 감지되고 지락사고의 방향

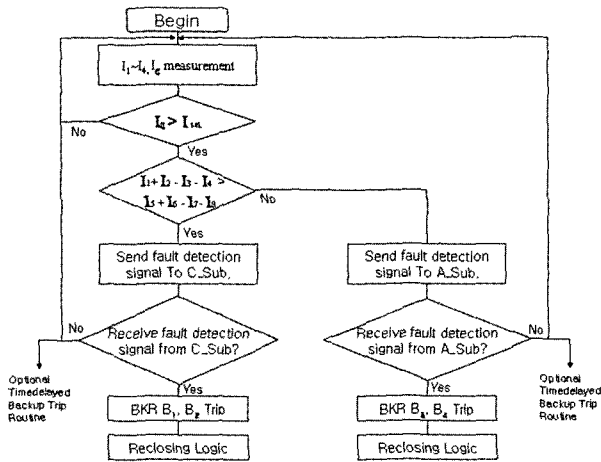


Fig. 13. Logic flow of the directional and differential relaying scheme

이 분석되면 그 방향의 인접변전소에 지락사고 감지 신호를 보낸다. 그리하여 왼쪽방향의 지락사고가 감지되고 왼쪽방향의 인접 변전소로부터 지락사고 감지신호를 받으면 사고는 자기변전소와 왼쪽 인접변전소 구간에서 발생한 것으로 판단되어 변전소 왼쪽방향의 모든 피더 차단기를 트립시킨다. 오른쪽 방향의 지락사고 시에도 유사하게 동작된다. 그림 12에서 보면 F_1 의 사고에는 B변전소의 오른쪽 C변전소의 왼쪽 Feeder 차단기가 모두 트립되어 B변전소와 C변전소 사이의 사고구간이 계통에서 격리된다. 그러나 아직 상행선 혹은 하행선 어느 선로에서 사고가 발생되었는지는 판단되지 않는다. 사고 선로의 판단은 사고 구간 격리 후 재폐로 수행 시 판단될 수 있다.

4.2 알고리즘

그림 13은 방향차동지락보호계전기의 알고리즘을 보여준다.

5. 계전방식의 비교

위에서 논의된 2가지 계전 방식 모두 장점과 단점을 가지고 있다. 과전류지락보호계전기는 방향차동계전방식에 비해 전류 측정요소도 적고 인접변전소와 사고감지 신호를 주고

Table 1. Comparison between the 2 relaying schemes

	차동방식	과전류 방식
전류측정 센서소 수	9	5
송수신장치	필요	불필요
사고전류 크기	작다	크다
동작시간	빠름	비교원도우만큼 지연
접지저항	큼	작거나 없음
재폐로	필요	불필요

받는 송수신장치도 필요 없으므로 하드웨어적으로 간단하다. 알고리즘 면에서도 사고구간 및 사고 전차선의 구분이 함께 이루어져 첫 번째 차단기 트립부터 사고전차선의 차단기만 트립시키므로 재폐로 수행 시 사고전차선이 판별되는 방향차동지락보호계전기에 비해 유리하다. 그러나 과전류지락보호계전기는 사고전차선의 판별을 위해 최소 비교원도우의 크기 (t_w)만큼은 차단기 트립이 지연되는 단점이 있다. 정류기 내 가티브 버스를 장치 'X'를 통해 직접 접지시키므로 지락전류의 양도 크므로 장치 'X'가 커질 수 있다. 표 1에서 2계전기의 장단점을 요약하였다.

6. 결론

본문에서는 도시철도 DC 급전시스템의 지락보호계전기의 문제점을 해결한 새로운 개념의 지락보호계전방식을 제시하였다. 기존의 보호계전방식은 전압형이므로 사고구간을 판별하기 어려웠으나 본문에서 제시되는 계전기는 전류형으로 과전류 혹은 차동방식을 이용하여 사고구간을 정확히 판별할 수 있었다. 지락보호를 위한 전류형 계전기는 비접지 계통에서는 근본적으로 사용할 수 없으나 전류제한수단 'X'를 도입하여 사용 가능하게 되었다. 2가지 방법의 비교에서는 과전류 방식이 차동방식에 비해 다소 유리하게 분석되었다.

참고 문헌

1. 전기(변전)분야실습교재, 서울특별시 도시철도공사, 1998