

# 비접지 DC 급전시스템에서의 Delta-I 지락보호계전 시스템

論 文

55A-12-4

## Development of Delta-I ground fault Protective Relaying Scheme for DC Traction Power Supply System

鄭相基<sup>†</sup> · 權三榮<sup>\*</sup> · 鄭滌聖<sup>\*\*</sup> · 金周落<sup>\*\*\*</sup>

(Sang-Gi Chung · Sam-Young Kwon · Ho-Sung Jung · Ju-Rak Kim)

**Abstract** - In DC tracking power supply system, ground faults are currently detected by the potential relay, 64P. Though 64P relay detects ground fault, it cannot identify the faulted region which causes long traffic delays and safety problem to passengers. A new ground fault protective relay scheme,  $\Delta I$  ground fault protective relay, that can identify the faulted region is presented in this paper. In  $\Delta I$  ground fault protective relaying scheme, ground fault is detected by 59, overvoltage relay, which operates ground switch installed between the negative bus and the ground. It preliminarily chooses the faulted feeder after comparing the current increases among feeders and trips the corresponding feeder breaker. After some time delay, it then recloses the breaker if it finds the preselected feeder is not the actual faulted feeder. Whether or not the preselected feeder is the actual faulted feeder is determined by checking the breaker trip status in the neighboring substation in the direction of the tripped breaker. If the corresponding breaker in the neighboring substation is also tripped, it finally judges the preselected feeder is actually a faulted feeder. Otherwise it recloses the tripped breaker. Its algorithms is presented and verified by EMTP simulation.

**Key Words** : Protective Relay, Ground Fault, DC Power Supply System, delta I, Traction Power

### 1. 서 론

국내의 지하철 차량은 모두 DC 1500V로 구동되고 있으며 경량전철차량은 DC 750V로 구동되는 것이 표준화 되어 있다. 이러한 도시철도 차량에 전력을 공급하는 DC 급전시스템에서 지락사고가 발생하였을 경우, 지락사고감지장치인 64P 보호계전기가 동작하여 변전소의 모든 급전선 차단기를 트립시킴으로써 인명과 전기시설물을 보호하고 있다. 그러나 현재 운용되고 있는 64P 보호계전기는 지락사고의 감지 기능은 뛰어나나 지락사고 선로 및 지락사고 구간은 판별하지 못하는 단점을 갖고 있다. 따라서 지락사고 시에 지락사고가 발생된 급전선의 차단기만 동작하는 것이 아니고 변전소의 모든 급전선 차단기가 동작한다. 나아가서 급전시스템 내의 지락사고는 시스템 내의 여러 변전소에서 감지되고 감지된 변전소의 모든 급전선 차단기가 동작하므로 광범위한 범위로 전력급전이 차단되어 도시 전기철도 교통에 심각한 장애를 초래하곤 한다.<sup>1)</sup> 그림 1은 기존의 64P 지락보호계전기의 운영 예를 보여준다. 그림 1에서 RU, RD, LU 및 LD는 각각 우측 상행선, 우측 하행선, 좌측 상행선 및 좌측 하행선 급전선의 차단기를 가리킨다. 정류기의 네가티브 버스는 대지로부터 절연되어 있으며 오직 변전소에서 64P 보호계전기 내의 고 저항을 통해서만 접지되어 있다. DC 전류

는 정류기 포지티브 버스에서 급전선차단기와 포지티브 급전선을 거쳐 차량에 공급된다. 차량에 공급된 DC 전류는 추진 모터의 구동에 사용되며 귀환전류는 네가티브 급전선을 통해 정류기 네가티브 버스로 돌아온다. 국내 지하철시스템에서는 네가티브 급전선으로 주행레일이 사용되고 있다. 이러한 DC 급전시스템에서 64P 보호계전기는 대지와 정류기 네가티브 버스사이의 전위차를 감시하며 그 전위차가 사전 설정치 이상이 되면 지락사고 발생으로 판단하여 변전소 내 모든 급전선 차단기를 차단시킨다. 그림에서 지락사고  $F_1$ 이 발생하면 정류기 포지티브 버스의 전위가 대지전위에 접근한다. 따라서 64P 계전기가 감시하고 있는 정류기 네가티브 버스와 대지사이의 전위는 정류기 양단 전압 수준으로 높아져서 64P가 동작한다. 64P의 동작은 변전소의 모든 급전선 차단기를 트립시킨다. 따라서 그림의  $F_1$  지락사고의 경우 변전소 B의 급전선 차단기 4개와 변전소 C의 급전선 차단기 4개가 모두 트립된다. 바람직한 보호계전시스템은 이 경우에 변전소 B의 'RU' 차단기와 변전소 C의 'LU' 차단기만을 트립시켜 변전소 B와 변전소 C 사이의 상행선만을 시스템으로부터 격리시키는 것이다. 더구나  $F_1$  지락사고 시에 변전소 B, C 외에 다른 변전소의 64P도 동작할 수 있으므로 매우 광범위한 구역의 전력공급이 차단되어 대중교통수단 운영에 막대한 차질을 가져올 수 있다. 더구나 지하구간이나 터널에서 이러한 사고가 발생 할 경우 승객의 안전에 위협을 초래할 수도 있다. 본문에서는 위의 문제점을 해결하기 위하여 사고구간의 판별 능력과 사고 급전선의 판별 능력 2가지 기능이 추가된  $\Delta I$  지락보호계전시스템의 동작 개념 및 EMTP 모의를 통한 기술 타당성을 제시한다.

† 교신저자, 正會員 : 한국철도기술연구원, 수석연구원  
E-mail : sgchung@krti.re.kr

\* 正會員 : 한국철도기술연구원, 책임연구원

\*\* 正會員 : 한국철도기술연구원, 선임연구원

\*\*\* 正會員 : 한국철도기술연구원, 선임연구원

接受日字 : 2006年 8月 3日

最終完了 : 2006年 10月 17日

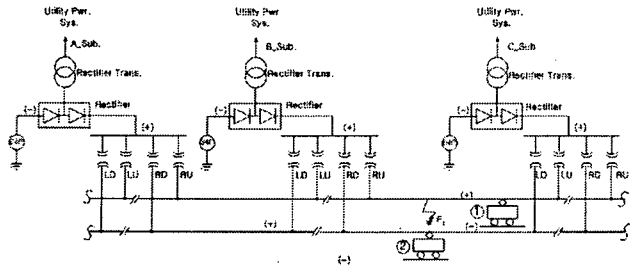


그림 1 DC 급전시스템과 지락보호계전장치  
 Fig. 1 Ground fault protective relaying scheme in DC traction power supply system

2. 본 론

2.1 접지스위치

DC 급전시스템은 비접지 방식으로 운영되므로 지락사고 전류가 상대적으로 매우 작다.  $\Delta I$  지락보호계전시스템에서는 지락사고 시, 사고구간 및 사고 급전선을 판별하기 위하여 사고전류가 이용되며 충분한 양의 사고전류를 얻기 위하여 접지스위치가 설치된다. 접지스위치는 평상시에는 열려 있어서 급전시스템은 비접지로 운영되며 지락사고가 발생하면 닫혀서 충분한 지락전류가 흐를 수 있는 회로를 구성하여 준다. 접지스위치는 그림 2와 같이 정류기 부극(negative bus)과 대지 사이에 설치되며 정극(positive) 급전선에서 지락이 발생하면 과전압계전기 59가 지락을 감지하여 접지스위치  $S_g$ 를 닫는다.

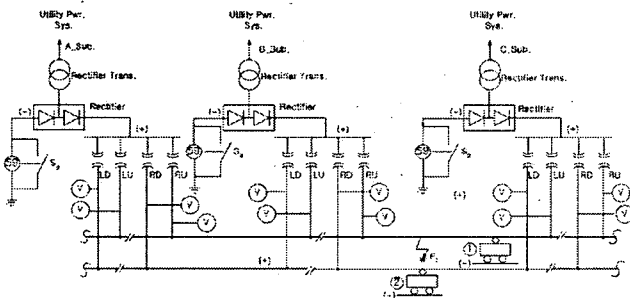


그림 2  $\Delta I$  지락보호계전시스템 운영개념  
 Fig. 2  $\Delta I$  ground fault protective relaying scheme

2.2.  $\Delta I$  지락보호계전시스템

2.2.1 동작 개념

$\Delta I$  지락보호계전시스템에서 지락사고의 감지는 과전압계전기 59에 의해 수행되며 지락사고구간의 판단은 차단기 재폐로에 의해 수행된다. 59는 그림 2와 같이 정류기 부극과 대지 사이에 설치되어 양단 전위차를 측정하고 설정치와 비교하여 설정치 이상이면 동작한다. 정극 급전선에서 지락이 발생하면 부극과 대지사이의 전압이 상승함으로 59가 과전압 즉 지락을 감지하여 접지스위치( $S_g$ )를 닫는다. 접지스위치가 닫히면 사고가 발생한 급전선의 전류가 급격히 증가한다.  $\Delta I$ 지락보호계전기는 변전소로부터의 4개의 급전선에 대하여 일정시간,  $\Delta t_w$ (그림 3 참조) 내의 전류증가,  $\Delta I_w$

를 비교하여 가장 큰 증가가 있는 급전선을 예상 지락사고 급전선으로 판단하여 해당 차단기를 트립시킨다. 그림 3에서  $i_{fss}$ 는 사고전류의 정상상태 값이며,  $i_{preflt}$ ,  $t_f$ ,  $i_f$ ,  $t_w$ 는 각각 사고 직전 부하전류, 59계전기 지락사고 감지시각, 지락사고전류, 지락사고전류 측정을 위한 타임윈도우를 가리킨다. 전예상사고 급전선으로 판단된 급전선은 지락사고 방향의 인접변전소에서 재폐로지연시간  $TD_{reclose}$  내에 동일 급전선의 차단기가 트립되었다는 정보를 받아야 실제 지락사고 급전선으로 최종 인식된다. 만약  $TD_{reclose}$ 내에 지락사고 방향의 인접변전소에서 예상지락사고 급전선의 차단기가 지락사고로 동작하였다는 정보를 받지 못하면 예상지락사고 급전선이 실제지락사고 급전선이 아니라고 인식되어 트립된 차단기는 재폐로 된다. 이상 설명된 바와 같이  $\Delta I$  지락보호계전시스템의 동작은 크게 나누어 3개의 스텝으로 구분될 수 있다. 즉 첫째 59가 지락을 감지하고 접지스위치를 닫는 단계, 둘째  $\Delta I_w$ 를 산출하여 예상지락 급전선의 차단기를 트립시키는 단계, 셋째 트립된 차단기 방향의 인접변전소의 동일 급전선 차단기의 동작여부를 확인하여 실제 지락급전선을 판별하는 단계로 나눌 수 있다. 그림 3과 식 (1)은 둘째 단계인 각 급전선의 전류증가( $\Delta I_w$ )를 구하는 과정을 설명한다. 그림 3에서  $i_{preflt}$ 는 지락사고 직전의 부하전류이고  $t_f$ 는 지락사고 시각이다. 정확한 지락발생시각  $t_f$ 는 알 수 없으나 59 계전기의 동작 시각으로 대처하여도 실제 지락발생시각과 59 계전기의 동작시각과의 차이가 매우 미미하므로 사고 급전선의 선택과정 즉 ‘급전선 별로  $\Delta I_w$ 를 산출하고 상호 비교하여  $\Delta I_w$ 가 가장 큰 급전선을 선택’의 결과에는 영향이 없다고 판단된다. 혹은 59 픽업(pick up)시간을 고려하여 실제 지락발생시각을 가정할 수도 있다. 귀환회로로 주행레일을 이용하지 않고 제 4궤조라는 별도의 컨덕터레일을 애자 위에 설치하여 사용할 경우는  $t_f$  대신에 접지스위치의 단락시각  $t_{on}$ 을 사용하여도 좋다.  $\Delta I_w$ 의 산출에 필요한 지락사고전류의 측정시간, 즉 타임윈도우  $\Delta t_w$ 는 충분히 짧아서  $\Delta I_w$ 의 산출에 부하전류의 영향을 극소화 시켜야 한다. 59 및 접지스위치의 동작시간에 전차선로의 시정수를 합한 값이면 적당하다고 판단된다. 위에서 설명된 제 4궤조를 귀환회로로 이용하는 DC 급전시스템의 경우는 타임 윈도우 시작점이  $t_f$ 가 아니라  $t_{on}$ 이 되므로  $\Delta t_w$ 의 설정 시 59 및 접지스위치의 동작시간이 고려되지 않으므로 주행레일을 귀환회로로 이용하는 시스템에 비하여 훨씬 짧게  $\Delta t_w$ 를 설정 할 수 있다.  $\Delta t_w$ 가 짧을수록 부하전류변화의 영향을 덜 받으므로 오동작 발생 가능성이 훨씬 줄어든다.  $\Delta I_w$  산출에는 식 (3)보다 식 (1) 혹은 식(2)가 유리하다. 식 (1) 혹은 식(2)는 계측의 에러나 계측신호의 노이즈에 영향을 훨씬 덜 받는다. 또한  $t_f$ 나  $t_{on}$ 의 에러 영향도 최소화 된다. 접지스위치를 사용하여 충분한 지락사고전류가 흐르므로 지락사고가 정류기 모선에서 발생하였을 경우는 버스차동계전기를 사용하여 보호할 수 있다.<sup>2)</sup>

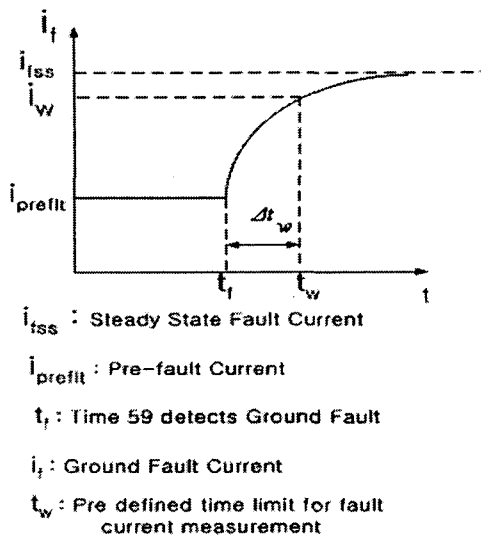


그림 3 DC 급전시스템에서 지락전류의 전형적인 변화모습  
 Fig. 3 Typical fault current in DC traction power supply system

$$\Delta I_w = \int_{t_f}^{t_w} (i_f - i_{preflt}) dt \quad (1)$$

$$\Delta I_w = \int_{t_{on}}^{t_w} (i_f - i_{preflt}) dt \quad (2)$$

$$\Delta I_w = i_w - i_{preflt} \quad (3)$$

$\Delta I$ 지락보호계전시스템의 동작 중 세 번째 단계는 지락 사고 구간을 판별하는 것이다. 그림 4는 DC 급전변전소 4개와 그 사이에 연결된 급전선을 보여준다. 변전소 사이에는 일반적으로 상선 하선의 2개의 급전선이 있으나 그 중 한 선만 표시되었다. 그림 4에서  $F_1$  지락사고 시  $\Delta I$ 지락보호계전시스템의 2단계 동작결과 변전소 A의 차단기 R, 변전소 B의 차단기 R, 변전소 C의 차단기 L 및 변전소 D의 차단기 L이. 예상지락급전선의 차단기로 트립될 것이다. 세 번째 단계에서는 예상지락급전선의 차단기 중 실제 지락사고가 발생되지 않은 구간의 차단기를 재폐로하는 단계이다. 실제 지락사고가 발생한 구간인지 아닌지의 판별은 서로 마주보고 있는 차단기가 모두 동작 했는지 아니면 한 쪽만 동작했는지를 검사하여 수행된다. 즉 동일 급전선에 서로 마주보며 위치하고 있는 차단기가 모두 동작하면 실제 지락사고가 발생된 급전선으로 판단하고 한 쪽의 차단기만 동작하면 실제 지락사고가 발생하지 않은 구간으로 판단된다. 그림 4의 경우에는 변전소 B의 R 차단기와 변전소 C의 L 차단기는 서로 마주보고 있는 차단기로 모두 동작하였으므로 계속 트립상태로 유지되나 나머지 차단기는 모두 재폐로 된다. 결과적으로 지락사고가 발생된 변전소 B의 R 차단기와 변전소 C의 L 차단기 사이만 시스템에서 격리된다. DC 1500V 급전시스템의 경우 인접 변전소간 간격은 대략 4~5 km 이다. 서로 마주보고 있는 차단기가 동작하였는지? 에 대한 확인 작업은 변전소간 데이터 신호 송수신장치에 위해서도 가능하며 간단하게는 그림 2처럼 차단기 부하 단의 전압을 측정하여 수행할 수도 있다. 즉 트립된 차단기의 부하 쪽

전압이 설정치 이상이면 동일 급전선에 마주보며 설치된 차단기가 트립되지 않은 것이며 설정치 이하이면 트립된 것으로 간주할 수 있다.

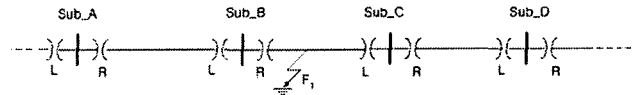


그림 4 DC 급전계통 간략도, 상선, 하선 중 1개 급전선만 표시됨.  
 Fig. 4 Simplified traction power supply system.

### 2.2.2 동작로직 플로우다이하그램

그림 5는  $\Delta I$ 지락보호계전시스템의 로직 플로우다이하그램(logic flow diagram)을 보여준다. 스텝 1 및 2는 지락사고를 감지하여 접지스위치를 단락시키는 단계이며 스텝 3~6은 예상지락급전선을 선택하여 해당차단기를 트립시키는 단계이다. 스텝 4에서는 단락되었던 접지스위치를 다시 개방한다. 접지스위치를 개방함으로써 지락사고전류의 흐름을 차단할 수 있고 또한 다른 변전소의 59도 동작할 수 있도록 한다. 즉 한 변전소의 59가 먼저 지락을 감지하여 접지스위치 차단기 단락되면 대지전위와 정류기 부극사이의 전위차가 작아져 다른 변전소의 지락 감지용 과전압보호계전기 59가 지락을 감지 못하는 경우에 대비하는 것이다. 그림 4에서 보면  $F_1$  지락사고에서 변전소 A의 59가 동작하여 접지스위치 차단기 단락될 때까지 변전소 B의 59가 동작하지 못하였다면 대지전위와 정류기 부극사이의 전위차가 작아져 변전소 B의 59는 계속해서 지락을 감지 못해 결과적으로  $\Delta I$ 지락보호계전시스템은 실패하게 되는 것을 방지하기 위함이다. 스텝 5에서는 각 급전선의  $\Delta I_w$ 를 산출하여 가장 큰  $\Delta I_w$ 를 보

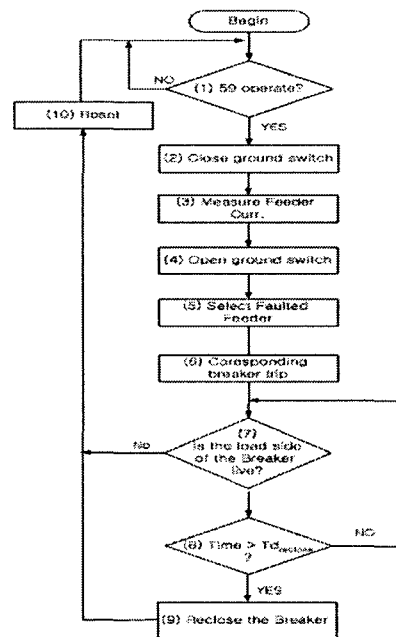


그림 5  $\Delta I$ 지락보호계전기의 로직플로우다이하그램  
 Fig. 5 Logic flow diagram of  $\Delta I$  ground fault protective relay

이는 급전선을 예상지락급전선으로 선택하고 스텝 6에서 예상지락급전선의 차단기를 트립시킨다. 스텝 7~9는 예상지락급전선 중 실제로 지락이 발생되지 않은 급전선의 차단기를 다시 재폐로시키는 단계이다. 재폐로 지연시간  $Td_{reclose}$  를 주는 이유는 앞서 설명된 바와 같이 한 변전소에서 접지스위치가 단락과 개방을 한 다음에 다른 변전소에서 지락을 감지하여 예상지락급전선을 트립시킬 때 까지의 지연시간을 고려한 것이며, 재폐로 지연시간  $Td_{reclose}$  는 1초 정도면 적당하다고 판단된다.

2.3 EMTP 시뮬레이션

지락사고가 발생하였을 경우 지락전류의 변화 모양 및 정류기 부극과 대지사이의 전위변화 형태는 정류기 부극으로의 귀환전류 회로의 대지와와의절연 상태에 따라 크게 달라진다. 즉 주행레일이 귀환전류회로로 사용되는 경우는 주행레일의 대지와와의 절연이 완전하지 않기 때문에 지락사고가 발생하면 상당량의 지락전류가 흐르며 따라서 접지스위치의 단락 시 지락전류변화가 상대적으로 작다. 한편 귀환전류회로로 제4궤조라 불리는 컨덕터레일을 애자위에 설치하여 사용하는 경우는 지락사고가 발생하더라도 지락전류가 거의 흐르지 않는다. 따라서 이 경우는 접지스위치의 단락과 함께 지락전류 및 정류기 부극과 대지사이의 전위 변화가 상대적으로 크게 나타난다. EMTP 시뮬레이션은 이 2가지 경우에 대하여 모의를 하였다.

2.3.1 주행레일을 귀환회로로 사용하는 DC 1500V 도시 철도시스템

2.3.1.1 차량부하 모의

그림 6은 DC 1500V 급전시스템 모델을 보여준다. 차량의 모의는 차량 부하전류가 가장 급격하게 증가하는 경우를 모의하였다.  $\Delta I$ 지락보호계전시스템에서는 사고급전선을 급전선 중 가장 큰 전류증가를 보이는 급전선으로 선택한다. 따라서 가장 큰 부하전류 증가를 모의함으로써 부하전류의 증가가  $\Delta I$ 지락보호계전시스템의 알고리즘에 영향을 주지 않는다는 것을 보여주기 위함이다. 차량시험보고서에 따르면 도시 중량철도의 경우, 차량부하전류의 증가는 만차 차량 1대당 최대 70A/s로 보고된다. 10량 1편성의 경우 700A/s 전류증가이며 차량 2개 편성에서 동시에 최대 증가율로 부하전류가 증가한다면 1400A/s이다. 그림 6의 모델에서는 차량 부하를 변전소 사이에서 1400A/s로 시감에 비례하여 증가하는 전류 원으로 모의하였다. 또한 차량 부하의 위치와 지락 사고발생 위치는 보호계전기 오동작 가능성이 높은 곳으로 위치시켰다.

2.3.1.2 급전시스템 모의

그림 6과 같이 4개의 급전변전소와 각 급전변전소간 간격은 5km이며 각 급전변전소 사이에 상 하행 급전선이 모의되고, 차량 부하는 시스템에 1개가 모의 되었다. 그림 7은 변전소의 모델이며 내부저항 0.02ohm은 9000kw 정류시스템의 전압변동율 8%를 기준으로 산출되었고 내부 인덕턴스는 0.02mH로 하였다.<sup>3)</sup> 그림 8 및 그림 9는 급전선 및 주행레일의 모델이다. 주행레일의 저항 및 대지누설저항은 각각

0.017 [ $\Omega$ /km], 20 [ $\Omega \cdot km$ ]로 하였다.1) 지락사고는 3옴의 접지저항을 갖는 접지스위치를 시각 1ms에 단락시킴으로써 모의되었다. 변전소 B 및 변전소 C의 접지스위치는 3ms에 단락되고 7ms에 다시 개방되며, 변전소 A 및 변전소 D의 접지스위치는 10ms에 단락되고 15ms에 다시 개방되는 것으로 모의하였다. 표 1은 사용된 DC 1500V 급전시스템 모델 특성이다.

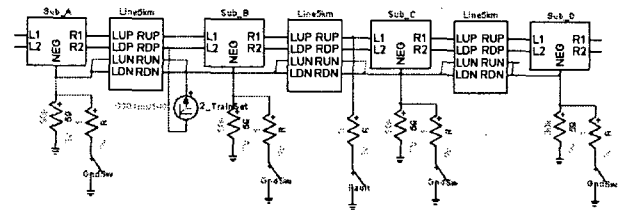


그림 6 EMTP-RV의 DC 1500V 급전시스템 지락모의 모델  
Fig. 6 EMTP-RV model of ground fault in DC 1500V traction power supply system

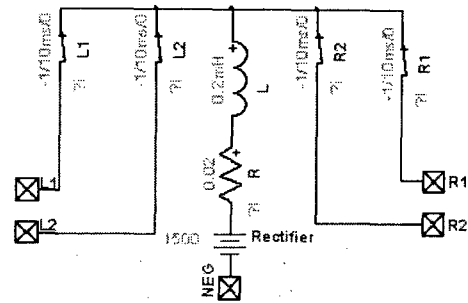


그림 7 그림 6에서 변전소 모델의 내부회로  
Fig. 7 Internal circuit of the substation model in Fig. 6

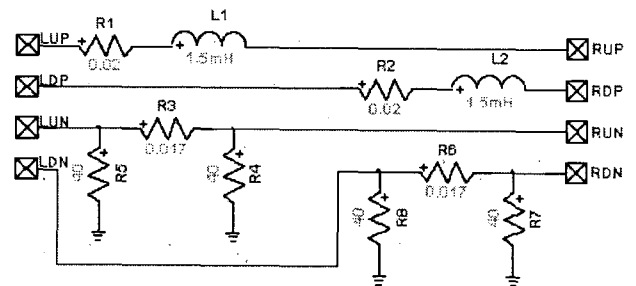


그림 8 그림 9에서 선로 1km 모델의 내부회로  
Fig. 8 Internal circuit of the model of line 1km in Fig. 9

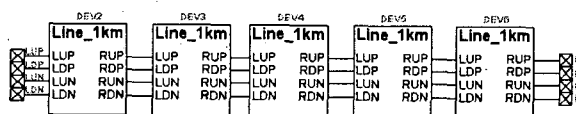


그림 9 그림 8에서 선로 5km 모델의 내부 구성  
Fig. 9 Configuration of the line 5 km model in Fig. 8

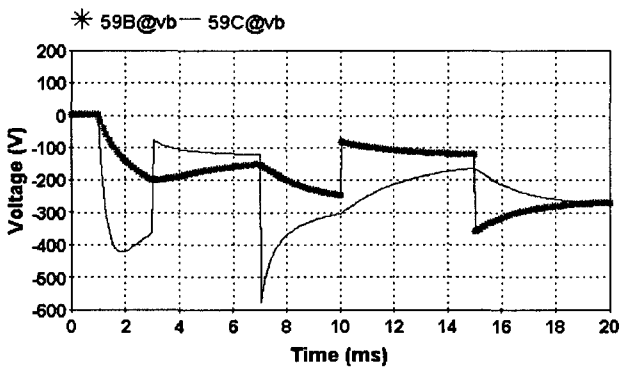
표 1 DC 1500V 급전시스템 모델 특성

Table 1 Parameter values of the model of DC 1500V traction power supply system

항 목	값
1 변전소 내부 저항	0.02 [ohm]
2 변전소 내부 인덕턴스	0.2 [mH]
3 급전선로 저항	0.02 [ohm/km]
4 급전선로 인덕턴스	1.5 [mH/km]
5 주행 레일	0.017 [ohm/km]
6 주행레일 누설접지저항	20 [ohm · km]
7 접지스위치 접지저항	1 [ohm]
8 지락 접지저항	3 [ohm]
9 59 계전기 접지저항	30 [k ohm]

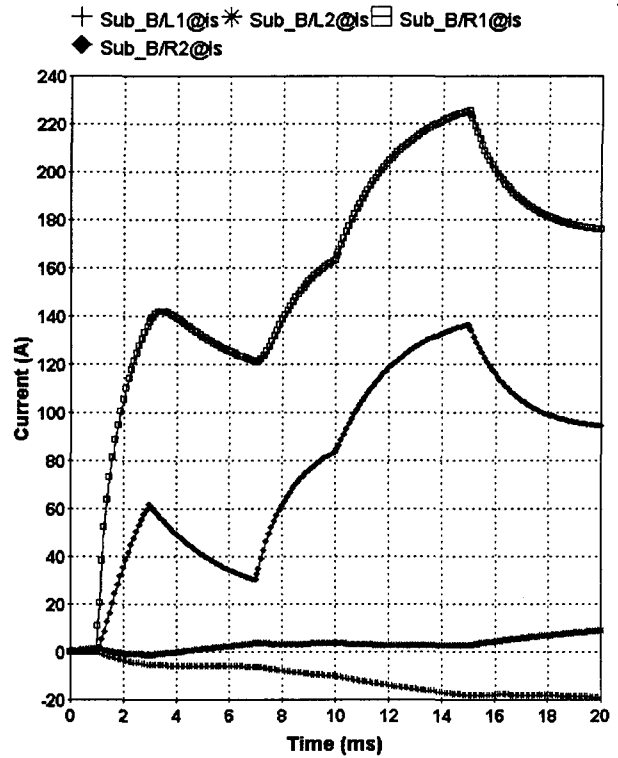
2.3.1.3 모의 결과 및 분석

아래 그림 10은 변전소 부극의 전위 변화 모습을 보여준다. 그림 10에서 59B@vb 및 59C@vb는 각각 B변전소 및 C 변전소의 59계전기가 측정한 정류기 부극과 대지 사이의 전압이다. 지락발생 위치가 변전소 C에 가깝기 때문에 변전소 C 부극 전위 크기가 변전소 B의 부극전위보다 더 크다. 지락사고는 이 2 변전소 사이에서 발생하였으므로 변전소 B와 변전소 C의 59 계전기가 모두 지락사고를 볼 수 있어야 한다. 변전소 C에서 접지스위치가 단락되었을 시, 즉 3ms 시각에서 변전소 B 부극 전위 크기가 줄어 변전소 B의 59 계전기 설정치가 이 값보다 클 경우는 변전소 B의 59 계전기는 동작하지 않을 수 있다. 이러한 오작동을 방지하기 위하여 3.2절의 로직플로우다이아그램 스텝(9)에서 접지스위치를 다시 개방시켰다. 개방 결과 시각 7ms에서 변전소 B의 부극전위 크기가 다시 상승한다. 그림 11은 변전소 B의 4개 급전선의 지락전류 변화모습을 보여준다. 그림 6에서 보여주는 바와 같이 변전소 B의 L2 급전선에 차량 2편성의 부하를 모의하였다. 이것은 부하전류의 영향을 검토하기 위함이었다. 그림 11에서 Sub\_B/L1@is, Sub\_B/L2@is, Sub\_B/R1@is 및 Sub\_B/R2@is는 각각 그림 6의 변전소 B의 좌측 상선전류, 좌측하선전류, 우측상선전류, 우측하선전류를 의미한다. 그림 11에서 보여주는 바와 같이 L2 급전선



Rectifier Negative Bus Potential at Substation B & C

그림 10 변전소 B 및 C의 정류기 부극 전위 변화  
Fig. 10 Changes of rectifier negative bus potentials in substation B & C



Fault Currents in 4 feeders from Substation B

그림 11 변전소 B의 급전선 전류변화  
Fig. 11 Currents in 4 feeders in substation B

의 전류 증가량은 지락사고 급전선인 R1 급전선의 전류 증가량에 비해 매우 미미하여  $\Delta I$ 지락보호계전시스템의 지락 발생 급전선의 선택은 정확하게 수행될 수 있다.

2.3.2 컨덕터레일을 귀환회로로 사용하는 DC 750V 도시철도시스템

2.3.2.1 차량부하 모의

차량 모의는 한국표준형의 고무차륜 AGT 차량을 모의하였다. 2.3.1.1에서 설명된 바와 같이 차량 부하전류가 가장 급격하게 증가하는 경우를 모의하였으며 데이터는 한국철도기술연구원 시험 데이터를 사용하였다. 최대 부하전류증가율은 중량 18톤 차량 2량 1편성의 경우 72A/s로 측정되었다. 편성 당 최대 차량수가 6대이고 변전소사이에서 2편성이 최대 부하전류증가율로 운전된다면 432A/s이다. 따라서 차량모델은 1차함수로 증가하는 전류 원으로 모의되었다.

2.3.2.2 급전시스템 모의

그림 12와 같이 4개의 급전변전소와 각 급전변전소간 간격은 2km 이며 각 급전변전소 사이에 상 하행 급전선이 모의되고, 차량 부하는 시스템에 1개가 모의 되었다. 전차선로는 급전 및 귀환 선로에 모두 컨덕터레일을 사용하는 1500A 용량의 제3계조시스템을 모의하였다. 귀환회로는 절연체 위에 설치되어 대지와는 완전절연된 것으로 간주하였다. 표 2는 사용된 DC 750V 급전시스템 모델 특성이다. 지락사고모의 및 지락사고에 의한 접지스위치 동작은 DC 1500V 급전시스템 모의 경우와 동일하게 수행되었다.

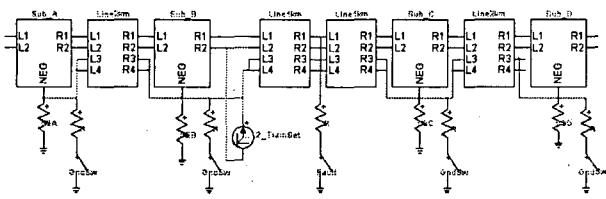


그림 12 EMTP-RV의 DC 750V 급전시스템 지락모의 모델  
 Fig. 12 EMTP-RV model of ground fault in DC 750V traction power supply system

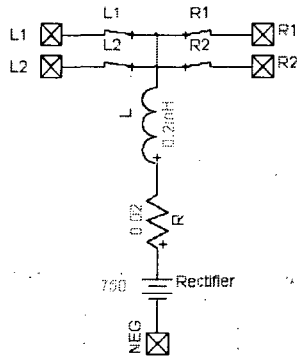


그림 13 그림 12에서 변전소 모델의 내부회로  
 Fig. 13 Internal circuit of the substation model in Fig. 12

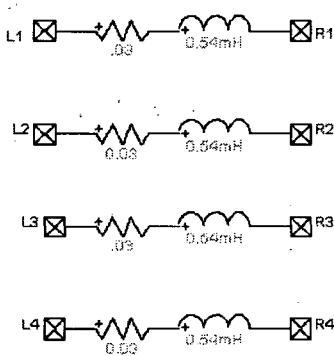


그림 14 그림 13에서 선로 1km 모델의 내부회로  
 Fig. 14 Internal circuit of the model of line 1km in Fig. 13

표 2 DC 750V 급전시스템 모델 특성  
 Table 2 Parameter values of the model of DC 750V traction power supply system

항목	값
1 변전소 내부 저항	0.02 [ohm]
2 변전소 내부 인덕턴스	0.2 [mH]
3 급전선로 저항	0.03 [ohm/km]
4 급전선로 인덕턴스	0.54 [mH/km]
5 귀환선로 저항	0.03 [ohm/km]
6 귀환선로 인덕턴스	0.54 [mH/km]
7 접지스위치 접지저항	1 [ohm]
8 지락 접지저항	3 [ohm]
9 59 계전기 접지저항	30 [k ohm]

2.3.2.3 모의 결과 및 분석

아래 그림 15는 변전소 부극의 전위 변화 모습을 보여준다. 그림 15에서 59A@vb, 59B@vb, 59C@vb 및 59D@vb는 각각 A 변전소, B 변전소 C 변전소 및 D 변전소의 정류기 부극전위를 가리킨다. 귀환회로가 대지로부터 완전 절연되어 있으므로 지락 전류는 변전소의 59 계전기 접지저항 및 접지스위치를 통해서만 흐르게 된다. 어느 한 변전소의 접지스위치가 단락되면, 정류기 부극의 전위는 DC 1500V 급전시스템의 경우와 마찬가지로 대지전위에 접근한다. 즉 어느 한 변전소의 접지스위치가 단락되어 있는 한, 다른 변전소의 59는 지락을 감지하지 못할 수도 있음을 의미한다. 물론 접지스위치가 개방된 후에는 부극전위가 다시 내려가서 59이 지락사고를 감지할 수 있게 된다. 그림 16은 변전소 B의 2개 급전선 전류변화를 보여준다. 그림 16에서 Sub\_B/R1 및 Sub\_B/R2는 그림 6 B변전소의 우측 상선 및 하선의 전류를 의미한다. R1 급전선은 지락사고 발생급전선이고 R2 급전선은 부하전류가 최대 증가율로 증가하는 2편성의 차량에 전력을 공급한다. R1 급전선의 전류 증가가 R2 급전선의 부하전류 증가보다 훨씬 크므로 사고 급전선은 명확하게 판단될 수 있다. 즉 Δ/지락보호계전시스템의 동작알고리즘으로 사고 감지와 사고 급전선의 판단을 명확하게 수행할 수 있음을 보여준다.

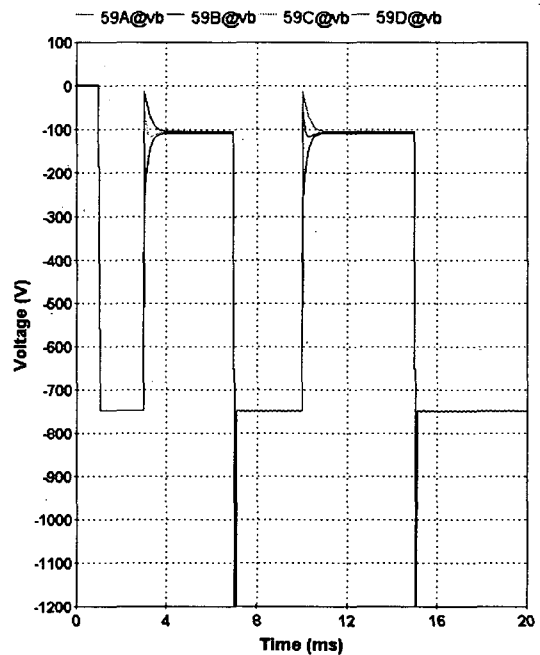


그림 15 변전소 B 및 C의 정류기 부극 전위 변화  
 Fig. 15 Changes of rectifier negative bus potentials in substation B & C

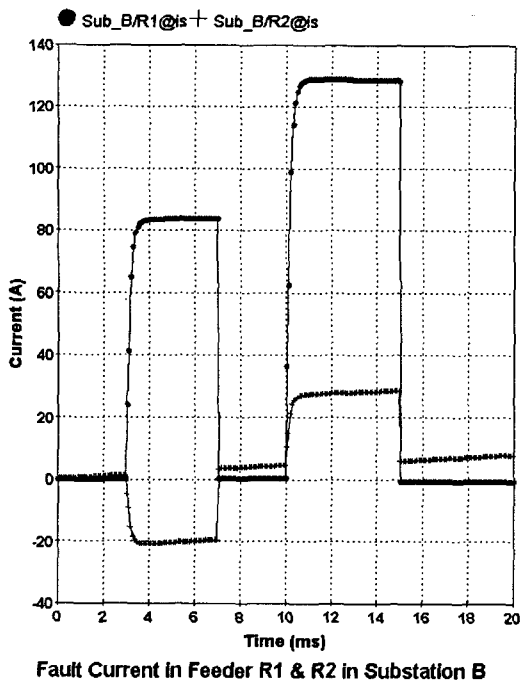


그림 16 변전소 B의 급전선 R1 및 R2의 전류변화  
 Fig. 16 Currents in R1 & R2 feeders in substation B

### 3. 결 론

기존의 64P 보호계전기로도 지락의 보호는 충분하였으나 64P 계전기가 선택성이 결여되어 장시간 동안 광범위하게 전원을 차단함으로써 도시철도시스템에 극심한 교통체증을 유발하곤 하였다.  $\Delta I$ 지락보호계전시스템은 지락의 감지 부분에서는 기존의 64P 기능을 그대로 이용하였으므로 보호기능은 기존의 64P처럼 충분하다고 판단되며 계전기에 선택성을 추가하여 사고급전선의 사고 구간만을 차단할 수 있어 기존 64P 계전기의 장시간 광범위한 구역의 전원차단 문제점을 해결하였다. 또한 접지스위치를 사용하므로 정류기 모선사고는 버스 차동계전기로 보호가 가능하게 되는 것도 큰 개선사항이 될 것이다. 세부 알고리즘에서는 귀환회로가 대지로부터 완전 절연이 되어 있는지의 여부에 따라 접지전류의 변화모습이 다르기 때문에 달라질 수 있다. 이상과 같이  $\Delta I$ 지락보호계전시스템의 알고리즘은 지락사고 구간 및 지락급전선의 판별을 가능하게 함으로써 지하철 수송시스템의 신뢰성 및 안전성을 한층 높일 수 있을 것으로 판단된다.

### 참 고 문 헌

- (1) Toru Aihara, Shin-ichi Hase, Hiroaki Morimoto, "Development of a DC feeding bus ground fault detection system for railway substation", 2005한중일 기술교류회, June 2005.
- (2) 정상기, 정락교, 조홍식, 이안호, 권삼영, "DC 급전시스템의 지락보호계전시스템 개발", 전기학회논문집, Vol.54A, Sep. 2005
- (3) 일본철도전화협회, 급전회로보호시스템, P9

## 저 자 소 개



### 정상기 (鄭相基)

1974년 서울공대 전기과 졸업. 1980년 미국 위스칸신주립대학 전기공학 석사. 2002년 명지대학교 전기공학 박사 현재 한국철도기술연구원 수석연구원  
 Tel : 031-460-5733  
 Fax : 031-460-5459  
 E-mail : sgchung@krri.re.kr



### 권삼영 (權三榮)

1962년 8월 22일생. 1984년 2월 한양대 전기공학과 졸업. 1997년 2월 한양대 산업대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정. 1997년~현재 한국철도기술연구원.  
 Tel : 031-460-5425  
 Fax : 031-460-5459  
 E-mail : sykwon@krri.re.kr



### 정호성 (鄭濤聖)

1990년~1995년 : 성균관대학교 전기공학과 학사, 1996년~1998년 성균관대학교 전기공학과 석사, 1998년~2002년 성균관대학교 전기전자및컴퓨터공학부 박사, 2002~현재 : 한국철도기술연구원 전기신호연구본부 선임연구원  
 Tel : 031-460-5116  
 Fax : 031-460-5459  
 E-mail : hsjung@krri.re.kr



### 김주락 (金周落)

1974년 3월 22일생. 1997년 홍익대 전자전기제어공학과 졸업. 1999년 동 대학원 전기제어공학과 졸업(석사). 2000년~현재 한국철도기술연구원 선임연구원  
 Tel : 031-460-5411  
 Fax : 031-460-5459  
 E-mail : jrkim@krri.re.kr