

## 전기철도 DC급전시스템의 보호 및 사고전류해석

정상기, 이병송, 정락교, 박성혁  
한국철도기술연구원

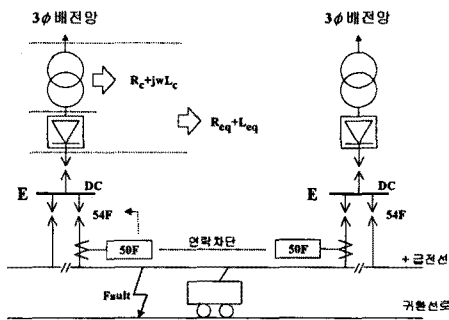
### Fault analysis and protection of the DC traction power supply system

S.G.Chung, B.S.Lee, R.K.Jeong, S.H.Park  
Korea Railroad Research Institute

**Abstract** - 도시철도 DC 급전시스템은 부하전류가 사고전류보다 클 수 있는 특성을 가지고 있다. 이러한 이유로 DC 급전시스템에서는 di/dt를 측정하여 사고전류를 부하전류로부터 구분하고 있다. 이것은 사고전류의 di/dt와 부하전류의 di/dt는 서로 다른 상이한 특성을 보이고 있기 때문이다. 본문에서는 DC도시철도급전시스템에서 흔히 사용되는 di/dt 계전기와 이의 설정을 위한 사고전류의 분석 및 설정방법에 대해 알아본다.

### 1. 서 론

도시전기철도의 DC 급전시스템의 기본개념은 그림\_1과 같으며, 본문에서는 그림의 F와 같이 단락사고가 일어난 경우 사고구간을 어떻게 격리하는가? 에 대한 내용이다. 우선 단락사고가 일어난 경우 관제되는 보호기기는 고속도차단기(54F), 고장선택계전기(50F) 및 연락차단장치(85F)가 있다. 고속도차단기는 스스로 흐르는 전류에 반응하여 그 전류 값이 설정치 이상이면 스스로 차단기를 trip한다. 또한 연락차단장치(85F)란 차단기가 사고에 의해 차단할 경우 함께 부하전류를 공급하고 있는 마주보고 있는 차단기에 trip 신호를 보내 마주보고 있는 차단기도 trip하게 함으로써 사고구간을 격리시킨다. 고장선택계전기(50F)는 사고전류를 부하전류로부터 구분하여 차단기에 trip 신호를 주는 계전기로 사고전류를 부하전류로부터 구분하는 방법과 계전기 설정방법에 대해 알아본다.



그림\_1 DC전기철도 급전시스템 개념

의한 것이고 전기회로의 각 파라미터는 다음과 같이 구해진다. Req 및 Leq는 DC 출력단에서 본 전원쪽의 저항 및 인덕턴스이며 식(1) 및 식(2)에 의해 구한다[1]. 식(1) 및 식(2)에서 Rc 및 Lc는 각각 정류기용 변압기 및 전원측의 저항 및 인덕턴스를 의미한다.

$$Req = 1.5Rc + 3\omega Lc / \pi \quad (1)$$

$$Leq = 1.5Lc \quad (2)$$

Ra 및 Ea는 각각 고장점저항 및 아크전압으로 1500v DC 가공급전계통에서 각각 0~0.1Ω, 300vDC의 값이 적용되고 강체도선 및 Third Rail의 경우는 고려되지 않는다.[2] 고장점저항 및 아크전압이 고려되지 않을 경우 단락전류는 식(3) 및 그림\_3과 같이 된다.

$$i(t) = \frac{E}{R} * (1 - e^{-\frac{R}{L}t}) \quad (3)$$

RI= 변전소에서 사고지점까지 급전선 및 귀선의 저항

LI= 변전소에서 사고지점까지 급전선 및 귀선의 인덕턴스

$$R = Req + RI$$

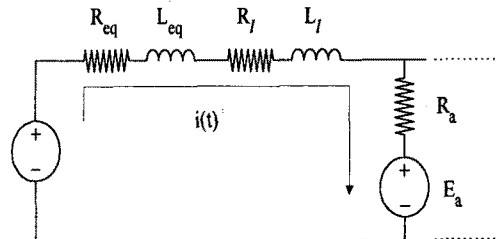
$$L = Leq + LI$$

단락전류의 정상치:  $I_m = \frac{E}{R}$

돌진율:  $(\frac{di}{dt}) = \tan \theta = \frac{E}{L}$

회로계수:  $\alpha = \frac{R}{L}$

시정수:  $T = \frac{1}{\alpha}$

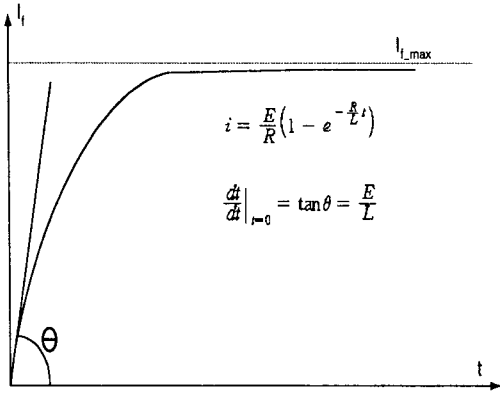


그림\_2 직류급전계통 단락사고 모델링

### 2. 본 론

#### 2.1 . 사고전류의 분석

그림\_2는 그림\_1의 계통의 단락사고를 전기회로로 모

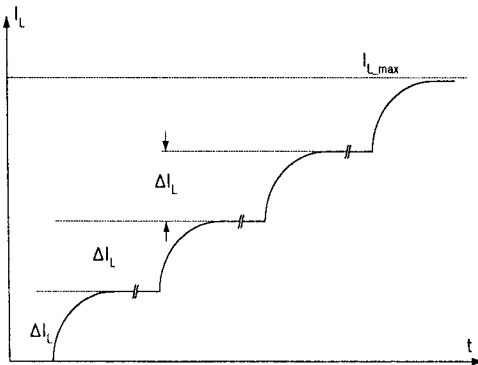


그림\_3 단락사고전류의 모양

### 2.2 부하전류의 분석

부하전류는 그림\_4에서 보여지는 바와 같이 여러 단계를 거쳐 최대부하전류(I<sub>max</sub>)에 이른다. 이러한 변화의 모양은 도시철도의 특성 및 운행방법 등에 따라 변하는 것으로 각 단계별 부하전류의 변화를 ΔI(부하)라고 하면 ΔI(부하)와 최대부하전류(I<sub>max</sub>(부하))와는 경험적으로 식(4)의 관계를 보인다.

$$\Delta I(\text{부하}) = I_{\text{max}}(\text{부하}) \times (0.3 \sim 0.5) \quad (4)$$



그림\_4 부하전류의 변화모양

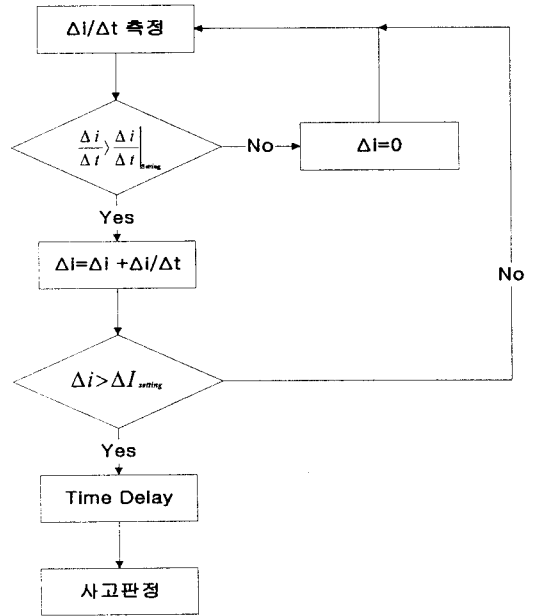
### 2.3 고장선택계전기(50F)의 특징

일반적으로 교류배전계통에서는 단락사고전류가 부하전류에 비해 매우 크므로 계전기(50)에 의해 전류의 크기가 설정치 이상이 되면 순시 차단한다. 직류철도 DC 급전시스템에서는 부하전류의 크기가 원거리 단락사고전류에 근접하여 교류계통과 같은 보호방법이 어려우므로 소위 ΔI 계전기 혹은 di/dt 계전기라 하는 독특한 계전기가 사용되고 있다. 최근 이러한 계전기는 대부분 digital 방식이고 이들 계전기의 동작원리 중 많이 사용되는 2가지를 소개하면 다음과 같다

#### 2.3.1 기술기 추적형 50F

기술기추적형은 기술기(di/dt)와 ΔI의 두가지를 설정한다. 전류가 설정기술기( $\frac{di}{dt}$ (설정)) 이상의 기술기로

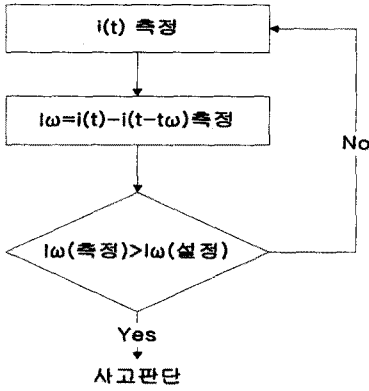
계속 증가하여 증가분의 전류누적치가 ΔI(설정)을 초과하면 사고로 판정된다. 전류증가 도중에 기술기(di/dt)가  $\frac{di}{dt}$ (설정) 아래로 내려가면 전류누적치를 0으로 reset한다. 부하전류의 경우는 궁극적인 크기가 ΔI(설정)을 초과하더라도 단계별로 증가하기 때문에, 즉  $\frac{di}{dt}$ (설정) 이상의 기술기로 계속 증가하지 않기 때문에, 사고로 판정되지 않는다. 이 방법의 알고리즘 개요는 그림\_5와 같다.



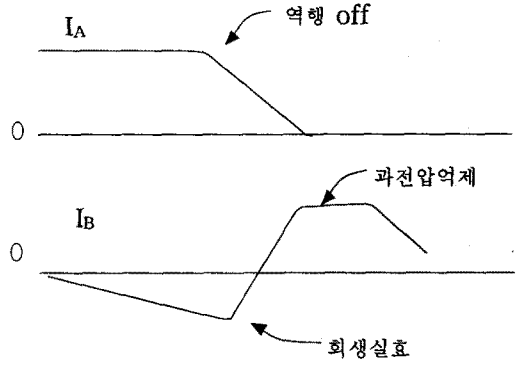
그림\_5 기술기추적형계전기의 알고리즘 개요

#### 2.3.2 윈도우형 50F

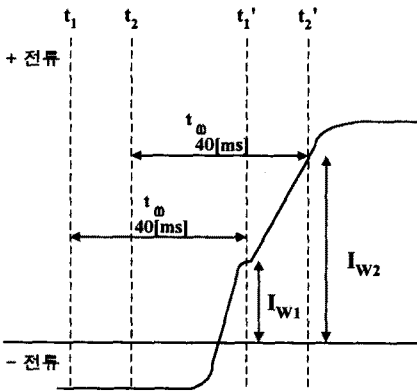
윈도우형 50F에서는 윈도우폭(tw)과 tw 시간의 전류변화폭(Iw)를 설정한다. 윈도우폭과 전류폭의 개념은 그림\_7에 보여진다. 그림\_7에서 보면 전류폭의 측정에 마이너스 전류부분은 고려되지 않은 것을 알 수 있다. 이 이유는 회생제동을 하고 있는 차량 때문이다. 그림\_8과 그림\_9를 참조하면서 차단기 B에서 불 대의 전류를 살펴보자. 변전소로부터 전류가 흘러 나가는 전류를 Plus 전류로 한다. 회생차에서 회생제동을 하면 회생전류가 변전소를 통하여 역행차로 전류를 공급한다. I<sub>B</sub>는 마이너스가 된다. 역행차가 역행을 멈추면 회생차로부터의 전류 유입은 0이 된다. 회생차가 계속해서 회생제동을 하면 회생차의 판도전압은 상승하고 일정전압 이상이 되면 전압조정을 위해 단시간동안 전압억제저항에 연결되어 에너지를 소모시킨다. 이때 변전소로부터의 전류가 유입되며 I<sub>B</sub> 전류는 Plus가 된다. 이것은 분명히 사고가 아니기 때문에 마이너스 전류는 계산하지 않는 것이다. 이 계전기에서 전류폭 Iw에 대한 분석은 tw 시간 후에나 가능하므로 사고전류의 판단에는 최소 tw의 시간이 필요하다. 이 방법의 알고리즘개요는 그림\_6과 같다.



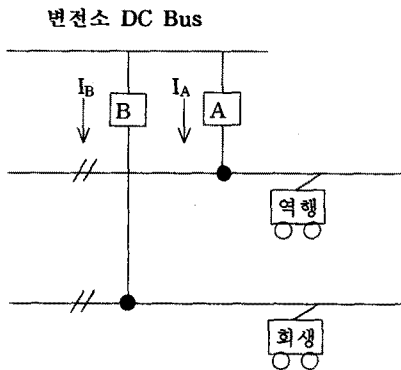
그림\_6 윈도우형 계전기의 알고리즘 개요



그림\_9 희생제동시의 전류변화



그림\_7 윈도우형계전기의 tw 및 Iw의 개념



그림\_8 역행 및 희생제동 차량

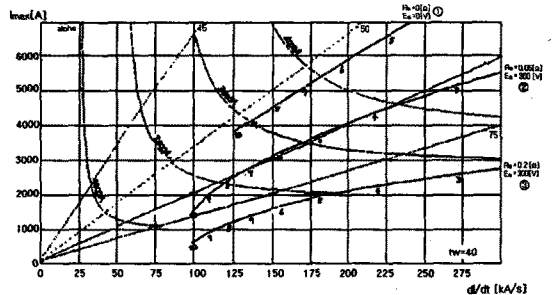
## 2.4 고장선택장치(50F)의 설정

### 2.4.1 윈도우형

윈도우형에서  $t_w$ 의 설정은 일반적으로 보호구간 중 최원거리에 사고를 가정 한 후 사고회로를 모의하여 그 회로의 시정수(L/R)로 한다. 이렇게 계산하면 지하철의 경우(일본 예) 시정수가 38ms 정도 된다고 보고되고 있다. 이 경우는 완전단락사고(고장점저항 및 아크전압이 고려 안됨)에 대한 값이고 고장점저항 및 아크전압을 고려하면 시정수가 20ms로 감소된다. 어떤 경우든  $t_w$ 의 설정은 20ms 이상으로 하도록 권고되고 있다.  $I_w$ 의 설정은 부하전류에 동작하지 말아야 하며( $I_w$  설정의 하한 값) 또한 사고전류에는 반드시 동작하도록( $I_w$ 의 상한 값) 설정되어야 한다. 식(4)에 의하면 짧은 시간내의 부하전류의 증가폭은  $I_{max}$ 의 30~50%이므로 위의 첫 번째 조건을 위해서는  $I_w(\text{설정})$ 의 하한 값은 식(5)와 같다.

$$I_w(\text{설정}) > I_{max} \times (0.5 \sim 0.6) \text{ ----- (5)}$$

두 번째 조건을 위해서는 최소사고전류를 계산하여  $I_w$ 의 설정을 이 값보다 작게 하여야 하는데, 이 최소 전류 값이 식(5)에 위배되는 경우에는 보호구간의 중간 점에서 사고전류 값보다 작게  $I_w(\text{설정})$ 를 정하여야 한다(남은 50%의 구간은 마주보고 있는 변전소 50F의 처리기대) 윈도우 폭이 결정되면 계전기의 보호특성이 그림 10과 같이 결정된다.



그림\_10 윈도우형계전기 보호특성, tw=40ms

그림\_8은  $t_w=40ms$  경우의 보호특성을 나타낸다. 세로축은 E/R이며 단락전류의 정상치를 나타내고 가로축은

E/L로  $di/dt$ 를 나타낸다. 그림에서 1000A, 2000A, ...의 지수곡선은  $I_w$ 의 설정 값이다. 지수곡선 위에 고장점이 표시되면 보호가 되는 지점이며 지수곡선 아래는 보호가 안 되는 구역이다. 선 ①, ②, ③은 변전소의 내부저항 및 인덕턴스를 각각  $0.05\Omega$ ,  $1.1mH$ 로 가정하고 선로의 km당 저항 및 인덕턴스가 각각  $0.035\Omega$ ,  $1.1mH$ 의 급전계통에서 단락사고가 발생할 경우를 나타낸다. 선 ①~③에서 10, 9, 8, 7...의 숫자는 단락사고지점과 변전소간의 거리이다. ①은 완전단락사고의 경우이고 ②는 고장점 저항이  $0.05\Omega$ , 아크전압이 300v, ③은 고장점 저항이  $0.2\Omega$ , 아크전압이 300v의 경우를 각각 보여준다. 그림에서 나타나듯이 완전단락인 경우에는 보호가 되는 지점도 고장점저항이나 아크전압이 증가할수록 아래로 움직여  $I_w$  설정곡선 아래로 내려감으로, 설정 후에 보호특성곡선 위에서 다시 검토해볼 필요가 있다.

실제  $I_w$  설정은 위와 같이 계산한 값으로  $I_w$ 를 임시 설정한 후에 상당기간 운전하고 계전기에 표시되는 기간 중의  $I_w$ 의 최대 값과 설정치를 비교하여 상당한 차이가 있을 경우 그 설정 값을 내리는 방법으로 하고 있다.

## 2.4 기타

지금까지 논의된 사항은 기본적인 내용이다. 실제의 경우는 조금 다르다. 인접된 변전소와 병렬로 전력을 공급하므로 단락사고의 전류도 병렬로 공급된다. 전차선의 선로경수도 상수가 아니라 시간 및 전류의 함수이다 (표피효과). 계전기의 설정은 차량의 보호장치 및 변전소의 다른 계전기와도 협조되어야 한다. 이러한 사항들을 묶어서 보호계전시스템에 대한 표준화가 확립할 필요가 있다

## 3. 결 론

논의된 사항은 전기철도 직류급전계통보호의 기본적인 내용이다. 또한 계전기 설정에는 여러 가지 추가 고려사항이 있을 수 있다. 이러한 사항들을 변전소마다, 호선마다 일일이 검토할 수도 있으나 검토하는 때와 사람에 따라 서로 다른 결과를 만들게 된다. 이것은 보호계전시스템의 유지관리를 어렵게 만드는 요인이다. 보호계전기는 한 번만 오동작을 해도 그 손실은 어마어마하게 크고 이로 인한 피해가 일반대중에 광범위하게 미친다. 보호계전 계통의 표준화와 계전기의 설정절차 및 기준을 명확히 확립할 필요가 있다.

### (참 고 문 헌)

- [1] FUJIMURA, T., and HONDA, S.: "Short Circuit based on rectifier circuits at DC substations", RT Japanese National Railways, Quarterly reports, V 4, pp.194-199
- [2] 鐵道電化: "급전회로보호시스템", 198
- [3] 일본직류전기철도보호기술조사전문위원회: "직류전기철도 보호 및 보호협조조사", 일본전기학회, 1995