

技術報告

서울地下鐵 直流給電系統의 故障計算 및 檢討

朴 相 疇* · 鄭 明**

—차 리—

- 1. 序 論
- 2. 地下鐵의 電力系統構成
 - 2.1 地下鐵의 電氣方式
 - 2.2 送變電設備
 - 2.3 直流給電設備
 - 2.4 電氣車의 負荷特性

- 3. 直流給電系統의 地格故障
 - 3.1 直流給電系統의 地格
 - 3.2 故障電流의 一般式
- 4. 故障電流의 計算 및 檢討
 - 4.1 代表的인 區間의 故障電流
 - 4.2 並列給電區間의 各故障點에 小한 故障電流

1. 序 論

근대 대도시 대중 교통의 혁신적인 수단으로 지하철이 선진국에서 이용된 것은 이미 오래이나, 우리나라에서는 1974년 8월에 종로선(제 1 호선)이 개통되므로 대중 교통량의 처리, 도심지 집중 인구의 분산, 교통 공해등의 경감을 이룰 수 있는 첫 단계에 들어 가게 되었다.

서울 지하철은 직류 1500V 전기방식을 채택하고 있는데, 직류 전차 선로의 특징은 부하가 이동하며, 그 부하 자체도 변화가 격심하고, 부하 전류가 비교적 크며, 따라서 전압 강하, 고장 전류의 차단등이 문제가 된다고 하겠다.

여객의 신속한 대량 수송을 목적으로 하고 있는 지하철에서 급전 계통의 고장은 인명의 피해 및 교통의 장애와 직결되는 문제이므로 고장의 발생을 예방하는 것은 물론 일단 발생한 고장은 신속히, 그리고 완전하게 제거하여야 한다.

직류 급전 계통의 고장은 트롤리선(trolley wire)과 레일 사이의 단락이며, 이것은 또한 1선지락 고장이다. 이 고장 전류와 격변하는 부하 전류를 정확하게 판별하여 고장 전류만 차단하기 위하여는 선별 차단 방식이 필요할 뿐 아니라, 직류 차단 전류는 교류의 경우에 비하여 일반적으로 차단이 어렵기 때문에 고장 전류를 신속히 차단할 수 있는 고속도 차단기가 필요하다.

그러므로 본고에서는 이러한 기초자료를 얻기 위해

직류 급전 계통의 고장 전류를 계산하고 검토하고자 한다. 이를 위하여 먼저 지하철의 전력 계통에 대한 구성 개요를 살펴보고, 직류 급전 계통의 정상 운전 특성 중에서 나타나는 일반적인 특성 검토와 고장 전류의 계산을 하여 본 것이다.

2. 地下鐵의 電力系統構成

2.1 地下鐵의 電氣方式

지하철은 전기 철도 방식을 채택하는 것이 보통이다. 전기 철도의 전기차에 저력을 공급하는 전차 선로의 급전 방식은 교류의 경우 단상 또는 3상의 여러 가지 전압(6.6KV, 11KV, 15KV, 16KV, 20KV, 25KV), 여러 가지 주파수(16HZ, 25HZ, 50HZ, 60HZ) 등으로 구분되며, 직류의 경우 500V, 600V, 750V, 1500V, 300V 등의 전압으로 구분되는데, 지하철에서는 직류 1500V이하가 주로 사용되고 있다.

서울 지하철에서는 직류 1500V를 전기 방식으로 채택하고 있으며, 앞으로 건설될 지하철에서도 동일한 전기 방식을 채택할 것이다.

또한 서울 지하철과 연결되는 철도청의 전철은 교류 단상 25KV, 60HZ의 전기 방식을 채택하고 있으므로 지하철과 일반 철도의 연결 지점은 50m의 교차구간을 설치하여 전기차가 이 구간을 통과하는 동안에 교류에서 직류 또는 직류에서 교류로 자동 전환되어 수신할 수 있게 되어 있으며, 따라서 전기차는 교차 양구간에 겸용할 수 있는 교차 양용 전기차가 사용되고 있다.

2.2 送變電設備

그림 2.1의 전력 계통과 같이 전차 운전과 부대설비에 공급하기 위하여 지하철 자체의 변전소를 시청앞,

* 正會員 · 延世大 理工大副教授(工博) · 當學會 編修委員
 ** 正會員 · 東亞建設產業(株)電氣部 電氣課長

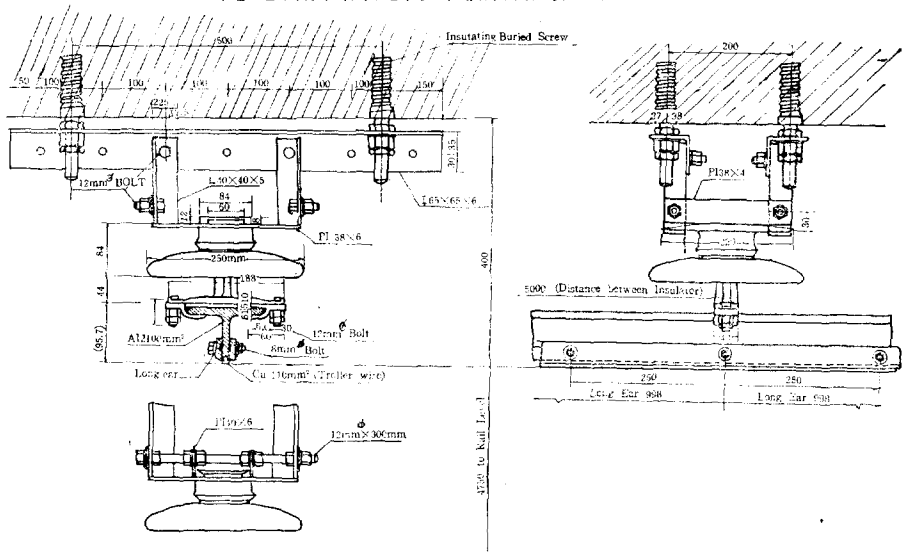


그림 2.2 강체 전차선 모형도

경동선이 일체화 되어 있으므로 일반 카테나리식의 급전선과 트롤리선의 최대 간격만큼 터널의 높이를 낮게 할 수 있으므로 터널 단면적 축소로 인한 공사비의 절감과 전차선 지지물의 견고성으로 인한 단선 방지의 장점이 있다.

급전 계통의 귀선은 좌우 궤도가 하나의 회로를 구성하는데, 지하철 구간에서는 규격 50kg/m의 레일을 사용하고 있으며 레일 본드에 의하여 전기적으로 접속되어 있다.

2.4 電氣車의 負荷特性

전차 또는 전기 기관차가 취하는 부하전류는 전기차의 형식, 노치(notch) 및 속도등에 의하여 크게 변한다. 또 전차선로 전 구간에는 열차 운행표에 의한 다수의 열차가 운전되고 있으므로 급전 선로에는 이들 열차군의 합성 전류가 각 선로의 위치에 따라 상이한 부하 분포로 흐르게 되므로 공급 변전소의 부하 전류 변동은 적심하게 된다.

따라서 고장 전류 계산을 위하여 열차가 주어진 운행표에서 등간격으로 또는, 단일 열차의 분포등으로 운전된다고 가정하고 부하 특성 고찰에 필요한 사항만 열거하면 다음과 같다.

(1) 전기차의 1시간 정격

통근형 열차와 같이 운전, 정지가 반복되는 철도에서는 일반적으로 1시간 정격을 사용하는데, 이것은 정격 운전 조건에서 1시간 연속 운전으로 전동기 각 부 온도상승이 규정치를 넘는 일 없이 전동기축이 발생하는 출력을 말한다.

- 전동차 1대의 1시간 정격 출력 : 960KW
- 전동기 1대의 1시간 정격 출력 : 120KW
- 정격 전압 : 375V
- 정격 전류 : 360A

정격 출력 960KW때는 8대의 전동기가 4대씩 직렬로 연결되어 이 전동기군을 다시 병렬로 연결된 것이므로 이 때의 입력전류는 $360A \times 2 = 720[A]$

(2) 전기차의 연속 정격과 상정 부하 전류

일반적으로 1시간 정격에 대한 연속 정격비는 85~90%이므로 이의 중간치를 87.5%를 잡으면 전동차 1대의 연속 정격 전류는

$$360 \times 2 \times 0.875 = 630[A]$$

이다. 서울 지하철에서는 1974년 운전개시 년도와 1981년에 대하여 최대 연속 정격 전류를 위의 값에 가까운 600A를 상정 최대 전류로 잡으며, 그림 2.3과 같은 전동기의 특성곡선에 의하면 전동기 전류 600[A], 정격 제자율 80%에서 토오크는 150[kg-m]이고, 전동기 전류 450[A], 정격 제자율 40%에서 70[kg-m]가 된다.

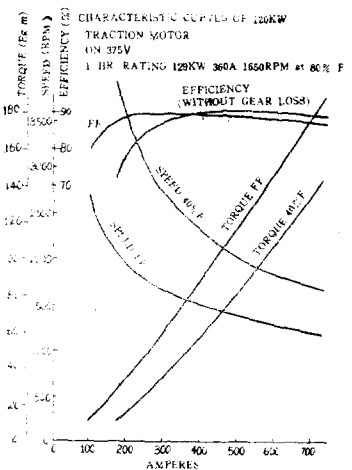


그림 2.3 전동기의 특성 곡선

(3) 열차의 편성

열차는 제어차(T 또는 Tc)와 전동차(M 또는 M')로 편성되는데 1974년 6량 편성, 6M 2T

1981년 10량 편성, 6M 4T

로 계획되어 있어 이것으로 상정 부하를 계산한다.

(4) 열차 속도와 열차 간격

열차의 속도에는 철도의 종류, 선로상태, 전기차의 성능 등으로 결정되는 최고 속도, 운전 구간의 거리틀도중의 정차 시분을 제외한 순 주행 시분(純走行時分)으로 나눈 평균 속도 운전 거리를 도중의 정차 시분을 포함한 전 운전 시분(순 주행시+정차 시분)으로 나눈 표정속도(表定速度: schedule speed)의 3 종류로 나눈다.

평균 속도를 V_m , 표정 속도를 V_s 라면

$$V_m = \frac{\sum S}{\sum T} \text{ [km/H]} \dots\dots\dots (2.1)$$

$$V_s = \frac{\sum S}{\sum T + \sum t} \text{ [km/H]} \dots\dots\dots (2.2)$$

여기서 $\sum T = T_1 + T_2 + T_3 \dots\dots\dots [H]$

= 각 역 사이의 주행 시분의 합

$$\sum t = t_1 + t_2 + t_3 \dots\dots\dots [H]$$

= 각 역 정차 시분의 합

$$\sum S = S_1 + S_2 + S_3 \dots\dots\dots [km]$$

= 각 역 사이의 거리의 합

위의 정의에서 나타내는 바와 같이 열차 운행표에서는 열차의 표정 속도에 의하여 각 열차 사이의 평균 간격을 계산할 수 있고 서울 지하철에서는 러시·아워에 대한 열차 운영을 1974년에 5분 간격으로 표정 속도는 각각

서울→청량리 31.6 [km/hr]

청량리→서울 30.4 [km/hr]

을 잡고 있다. 따라서 열차의 평균 간격은

$$\text{서울} \rightarrow \text{청량리} \quad 3.16 \times \frac{5}{60} = 2.64 \text{ [km]}$$

$$\text{청량리} \rightarrow \text{서울} \quad 30.4 \times \frac{5}{60} = 2.54 \text{ [km]}$$

1981년에 2분 30초에 각각 위와 동일한 표정 속도일 때 열차의 평균 간격은

$$\text{서울} \rightarrow \text{청량리} \quad 2.64 \times \frac{2.5}{5} = 1.32 \text{ [km]}$$

$$\text{청량리} \rightarrow \text{서울} \quad 2.54 \times \frac{2.5}{5} = 1.27 \text{ [km]}$$

즉, 열차 운행 시간 간격이 절반으로 줄어들면, 운행되는 열차의 거리 간격도 절반으로 줄어들음을 의미한다.

(5) 전압 강하와 그 영향

전차선의 전압 강하는 급전선, 트롤리선, 귀전선 등에서의 전압 강하의 종합이다. 전차의 운행에 영향을 줄 수 있는 전압 강하의 발생 원인은 정상 공급 상태

에서 전차 부하의 밀집 또는 증가, 공급 변전소의 일부 정지등에 의한 것으로 대별된다.

전압 강하가 커지면 다음과 같은 점에서 열차 운전 에 직접적인 영향을 미치게 된다. 즉,

(가) 전기차 보조 기기의 기능 상실

전기차는 제어회로 전원용 전동발전기나 전동 공기 압축기등의 보조 기기를 사용하고 있다. 전기차의 판타그래프의 전압이 1500V에서 700V로 강하하면 전동 발전기의 발생 전압은 105V에서 65V정도로 강하하며, 저압 기기의 정상 동작 최저전압 한도인 60V에 가까워지므로 이 한도를 넘으면 제어회로의 기능 상실로 전기차의 운전이 불가능하여 진다.

전기차의 전압 강하 한도는 직류 계통에서 통상 40~50%정도이며, 직류 1500V방식에서는 보통 750V 저전압 계전기를 사용하며, 전압 변동폭을 제한할 경우에는 900V를 한도로 하고 있다.

(나) 전기차 속도 특성의 저하

전기차의 주 전동기는 일반적으로 직권 전동기가 사용되고 있으나, 그 속도 특성은 동일한 권인력에 대해 전차선의 전압에 거의 비례하여 변화하므로 전차선 전압의 강하에 비례하여 속도가 저하한다.

이 결과 표정 속도를 유지하기 위하여 필연적으로 역행 시간(power running time)을 길게 하여야 하며, 전력 소비량의 증대, 주 전동기의 온도 상승을 일으키고 따라서 표정 속도를 유지할 수 없게 되어 운행 시간표에 차질을 가져 오게 된다.

3. 直流給電系統의 地絡故障

3.1 直流給電系統의 地絡

직류 급전 계통 특히 전차 선로에 접지 사고가 발생하여 고장 전류가 흐를 경우 이를 확실하게 선택 차단하여 사고의 확대 및 파급을 방지하고 전기차와 전차 선로를 보호하여야 한다.

그런데 전기 철도의 부하는 격심한 변동 부하이기 때문에 상사의 운전 전류에 의하여도 오동작하기 쉬우므로 보호 장치는 충분한 선택 능력이 있어야 한다.

교류 전기 철도는 일반 교류 전력 계통과 마찬가지로 과전류 계전기등에 의한 보호 방식을 채용할 수 있으나, 직류 방식에서는 교류 방식보다 비교적 낮은 선로 전압 수준이므로 부하 전류가 크며, 일반적으로 병렬 급전을 행하고 있으므로 사고 전류의 선택이 곤란하다.

전철용 직류 급전 계통은 교류 급전 계통에 비하여 현저한 특색을 갖고 있기 때문에 이를 회로 보호면에

서 보면 다음과 같다.

① 비교적 저전압(직류 1500V), 대전류(5~6KA)를 전기차에 공급한다.

② 변전소 부근에서 단락 고장 전류가 대단히 크며, 대용량의 변전소에서는 80[KV]에 달하는 경우가 있다.

③ 직류의 고장 현상은 교류의 경우보다 과도 현상을 더욱 자세히 고려하여야 하며, 직류 전류의 차단이 교류에 비해 어렵다.

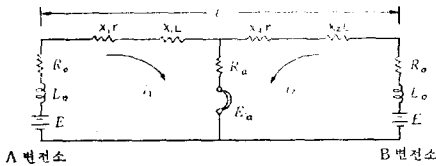
3.2 故障電流의 一般式

고장 전류의 추정에는 선로정수, 즉 급전 회로의 저항과 인덕턴스 외에 변전소 기기 내부 저항과 인덕턴스, 그리고 인덕턴스 고장점의 예상 아이크 전압 및 그 저항을 알고 있어야 한다.

일반적으로 급전 회로의 인덕턴스는 제조에 흐르는 전류의 크기에 따라 변화하는 수도 있어 고정된 것으로 단정하지 못하나 각 전차 선로의 측정 결과에 의하면 1[mH/km] 정도이다.

아아크 전압은 인공 실험 결과에 의하면 단락 전류에 있어서 300~400[V]가 가장 많은 빈도를 보이고 있으며, 여기서는 고장 전류의 계산에 $E_a=300[V]$ 를 취한다.

직류 급전 선로의 등가 회로는 양쪽 변전소에서 병렬 공급되는 경우는 그림 3.1과 같다.



단, r, L : 급전 선로의 단위 거리당 저항 및 인덕턴스
 R_0, L_0 : 정류 장치의 2차측 내부 저항 및 인덕턴스
 E : 직류 급전선의 모선 전압
 추간 거리: $l = X_1 + X_2$

그림 3.1 직류 급전 선로의 등가 회로

사고가 발생하여 양쪽 변전소에서 고장 전류 i_1, i_2 가 고장점에 흐를 때 다음의 관계식이 성립한다.

$$\left. \begin{aligned} (R_0 + X_1r + R_a)i_1 + (L_0 + X_1L)\frac{di_1}{dt} + R_a i_2 &= E - E_a \\ rR_0 i_1 + (L_0 + X_2L)\frac{di_2}{dt} + (R_0 + X_2r + R_a)i_2 &= E - E_a \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(3.1)$$

식 (3.1)에서 열고자 하는 결과는 $t \rightarrow \infty$ 때의 영구 단락 전류 $(i)t = \infty$ 즉, $(i)t = \infty = \Delta I$ 와 $t=0$ 때의 전류 변화율 즉, 돌진율 $(\frac{di}{dt})_{t=0}$ 의 두가지이므로 미분정식의 완전해는 생략하고, $(i)t = \infty$ 와 $(\frac{di}{dt})_{t=0}$ 를 각각 바로 구하기로 한다.

먼저 $t \rightarrow \infty$ 에서 영구 고장 전류가 크면 $\frac{di_1}{dt} = \frac{di_2}{dt} = 0$ 가 되어

$$\left. \begin{aligned} (R_0 + X_1r + R_a) i_1 + R_a i_2 &= E - E_a \\ R_a i_1 + (R_0 + X_2r + R_a) i_2 &= E - E_a \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(3.2)$$

$$\therefore (i_1)_{t=\infty} = \frac{\begin{vmatrix} E - E_a & R_a \\ E - E_a & R_0 + X_2r + R_a \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} R_0 + X_1r + R_a & R_a \\ R_a & R_0 + X_2r + R_a \end{vmatrix}} = \frac{(R_0 + X_2r)(E - E_a)}{(R_0 + X_1r)(R_0 + X_2r) + R_a(2R_0 + X_1r + X_2r)} \dots\dots\dots(3.3)$$

마찬가지로

$$\therefore (i_2)_{t=\infty} = \frac{(R_0 + X_1r)(E - E_a)}{(R_0 + X_1r)(R_0 + X_2r) + R_a(2R_0 + X_1r + X_2r)} \dots\dots\dots(3.4)$$

따라서 고장점에 흐르는 고장 전류는 i_1 과 i_2 의 합이므로

$$i_1 + i_2 = \frac{(2R_0 + X_1r + X_2r)(E - E_a)}{(R_0 + X_1r)(R_0 + X_2r) + R_a(2R_0 + X_1r + X_2r)} \dots\dots\dots(3.5)$$

또 고장점의 구간 중앙에 위치한다면 $X_1 = X_2 = \frac{1}{2}l$ 이고 양 변전소에서 공급되는 고장 전류는

$$i_1 = i_2 = \frac{E - E_a}{R_0 + \frac{1}{2}L + 2R_a} \dots\dots\dots(3.6)$$

식(3.1)은 $t=0$ 에서도 성립하므로

$$\left. \begin{aligned} (R_0 + X_1r + R_a) (i_1)_{t=0} + (L_0 + X_1L) \left(\frac{di_1}{dt}\right)_{t=0} + R_a (i_2)_{t=0} &= E - E_a \\ R_0 (i_1)_{t=0} + (L_0 + X_2L) \left(\frac{di_1}{dt}\right)_{t=0} + (R_0 + X_2r + R_a) (i_2)_{t=0} &= E - E_a \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(3.7)$$

그런데 $(i_1)_{t=0}, (i_2)_{t=0}$ 는 모두 0이다.

그러므로

$$\left. \begin{aligned} (L_0 + X_1L) \left(\frac{di_1}{dt}\right)_{t=0} &= E - E_a \\ (L_0 + X_2L) \left(\frac{di_2}{dt}\right)_{t=0} &= E - E_a \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(3.8)$$

이 식에서

$$\left. \begin{aligned} \left(\frac{di_1}{dt}\right)_{t=0} &= \frac{E - E_a}{L_0 + X_1L} \\ \left(\frac{di_2}{dt}\right)_{t=0} &= \frac{E - E_a}{L_0 + X_2L} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(3.9)$$

식(3.9)의 $(\frac{di_1}{dt})_{t=0}, (\frac{di_2}{dt})_{t=0}$ 는 과도 전류가 그러는 곡선이 $t=0$ 에서 가지는 곡선의 접선 기울기 또는 단락 전류의 $t=0$ 에서의 변화율을 나타내며, 이것을 달리 단락 전류의 상승율 또는 돌진율(突進率: rate of rise)이라 부른다. 돌진율은 직류 단락 전류의 특성에서 고려하여야 할 사항으로서 차단기의 동작 특성, 운전 전류의 변동이 격심한 직류 전차 선로에서 운전 전

류의 고장 전류를 구분하여 선택 차단하는데 중요한 판별의 기준이 된다.

4. 故障電流의 計算 및 檢討

앞에서 구한 단락 전류의 계산식으로부터 실제 선로의 단락 전류를 계산하기 위한 선로 정수는 다음과 같다.

- E : 선로 전압 1500[V]
- E_o : 고장점 아아크 전압 300[V]
- R_o : 고장점의 저항 0.05[Ω]
- r : 급전 회로의 단위 길이당 저항 0.0362[Ω/km]
- L : 급전 회로의 단위 길이당 인덕턴스 1.1[mH/km]
- L_o : 변전소의 직류 등가 인덕턴스 1.1[mH]
- R_o : 변전소의 직류 등가 저항은 다음 식으로 구한다.

$$\begin{aligned} \epsilon &: \text{변압기의 전압 변동율 } 7.8[\%] \\ P &: \text{변전소의 변압기 용량 합계 [KW]} \\ R_o &= \frac{\epsilon \times E^2}{P} \times 10^{-5} [\Omega] \dots\dots\dots (4.1) \end{aligned}$$

위의 선로 정수에서 선로 전압 1500[V]와 급전 회로의 단위 길이당 저항 0.0362[Ω/km]

변전소의 내부 저항을 제외한 나머지 정수는 모두 건설 당시의 실측에 의하여 표준치로 인정되는 수치로 나타낼 것이다.

4.1 代表的인 區間의 故障電流

(1) 시청알 변전소—종로 5가 변전소 사이 병렬 급전

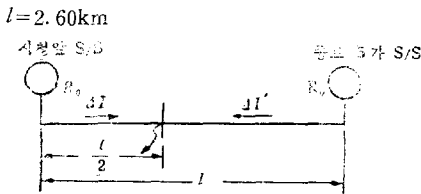


그림 4.1 시청알S/S—종로 5가 S/S 병렬 급전 구간 단선도

시청알 변전소의 내부 저항은

$$R_{o1} = \frac{7.8 \times 1500^2}{4000} \times 10^{-5} = 0.044 [\Omega] \quad (1974\text{년})$$

$$R_{o2}' = \frac{7.8 \times 15000^2}{8000} \times 10^{-5} = 0.022 [\Omega] \quad (1981\text{년})$$

또한 종로 5가 변전소의 내부 저항은

$$R_{o2} = 0.044 [\Omega] \quad (1974\text{년})$$

$$R_{o2}' = 0.022 [\Omega] \quad (1981\text{년})$$

고장점이 양 변전소의 중앙에 위치한다면 1974년의 고장 전류 ΔI, ΔI'는

$$\Delta I = \frac{1500 - 300}{0.044 + \frac{1}{2} \times 0.0362 \times 2.6 + 2 \times 0.05} = 6280 [A]$$

$$\begin{aligned} \Delta I' &= \frac{1500 - 300}{0.022 + \frac{1}{2} \times 0.0362 \times 2.6 + 2 \times 0.05} \\ &= 7100 [A] \end{aligned}$$

$$\text{돌진율은 } \left(\frac{di}{dt} \right)_{t=0} = \frac{E - E_o}{L_o + X_1 L}$$

여기서 L_o = 1.1 [mH]

$$L = 1.1 \text{ [mH]}$$

$$X_1 = \frac{2.6}{2} \text{ [km]}$$

$$\left(\frac{di}{dt} \right)_{t=0} = \frac{1500 - 300}{1.1 + 1.3 \times 1.1} = 474 \text{ [KA/S]}$$

(2) 종로 5가 변전소—계기동 변전소 사이 병렬 급전

$$l = 2.89 \text{ [km]}$$

$$R_o = 0.044 \text{ [}\Omega\text{]}$$

$$R_o' = 0.022 \text{ [}\Omega\text{]}$$

$$\begin{aligned} \Delta I &= \frac{1500 - 300}{0.044 + \frac{1}{2} \times 0.0362 \times 2.89 + 2 \times 0.05} \\ &= 6110 [A] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta I' &= \frac{1500 - 300}{0.022 + \frac{1}{2} \times 0.0362 \times 2.89 + 2 \times 0.05} \\ &= 6890 [A] \end{aligned}$$

$$\text{돌진율은 } \frac{di}{dt}_{t=0} = \frac{1500 - 300}{1.1 + \frac{2.89}{2} \times 1.1} = 446 \text{ [KA/S]}$$

(3) 시청알 변전소—서울역 교차 구간

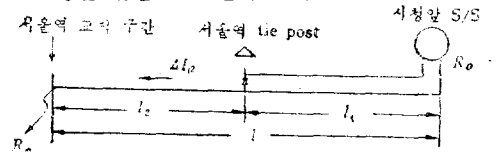


그림 4.2 시청알 S/S—서울역 교차구간 단선도

상하선 병렬용 타이·포스트(tie post)가 투입되어 있고 고장점이 교차 구간에서 발생하였을 경우 고장 전류 ΔI₂는

$$\Delta I_2 = \frac{1500 - E_o}{R_o + r'l_1 + r'l_2 + R_o}$$

여기서 r'는 상하선이 병렬되어 있으므로 r' = 1/2 r

$$l_1 = 1.17 \text{ [km]} \quad l_2 = 0.55 \text{ [km]}$$

$$R_o = 0.044 \text{ [}\Omega\text{]} \quad R_o' = 0.022 \text{ [}\Omega\text{]}$$

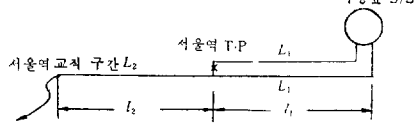
$$r' = \frac{1}{2} \times 0.352 = 0.181 \text{ [}\Omega\text{/km]}$$

$$\Delta I_2 = \frac{1500 - 300}{0.044 + 0.181 \times 1.17 + 0.0362 \times 0.55 + 0.05} = 8880 [A]$$

$$\Delta I_2' = \frac{1500 - 300}{0.022 + 0.181 \times 1.17 + 0.0362 \times 0.55 + 0.05} = 10610 [A]$$

$$\Delta I_1 = \frac{1}{2} \Delta I_2 = \frac{1}{2} \times 8880 = 4440 [A]$$

$$\Delta I_2' = \frac{1}{2} \Delta I_2' = \frac{1}{2} \times 10610 = 5305 \text{ [A]}$$



여기서 L_1, L_2 : 각 구간의 인덕턴스

그림 4.3 시청앞 S/S-서울역 교직 구간 선로 인덕턴스

돌진율은 타이·포스트의 고속도 차단기(High Speed Circuit Breaker)가 투입되어 있으므로

$$\begin{aligned} \left(\frac{di}{dt}\right)_{t=0} &= \frac{E-E_a}{L_o + \frac{1}{2}L_1 + L_2} \times \frac{1}{2} \\ &= \frac{1500-300}{1.1 + \frac{1}{2} \times 1.17 \times 1.1 + 0.55 \times 1.1} \times \frac{1}{2} \\ &= 255 \text{ [KA/S]} \end{aligned}$$

(4) (3)의 조건에서 타이·포스트가 개방되어 있을 때

$$\begin{aligned} \Delta I &= \frac{1500-E_a}{R_o + rL + R_a} \\ i &= 1.72 \text{ [km]} \\ R_o &= 0.044 \text{ [\Omega]} \\ R_o' &= 0.022 \text{ [\Omega]} \end{aligned}$$

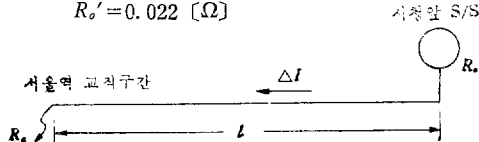


그림 4.4 시청앞 S/S-서울역 교직구간 단선로 (서울역 T·P개방)

$$\Delta I = \frac{1500-300}{0.044 + 0.0362 \times 1.72 + 0.05} = 7680 \text{ [A]}$$

$$\Delta I' = \frac{1500-300}{0.022 + 0.0362 \times 1.72 + 0.05} = 8935 \text{ [A]}$$

돌진율은 T·P고속도 차단기가 개방되어 있으므로

$$\begin{aligned} \left(\frac{di}{dt}\right)_{t=0} &= \frac{E-E_a}{L_o + iL} \\ &= \frac{1500-300}{1.1 + 1.72 \times 1.1} \\ &= 401 \text{ (KA/S)} \end{aligned}$$

(5) 제기동 변전소-청량리역 교직 구간

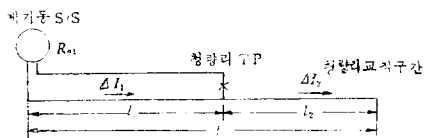


그림 4.5 제기동 S/S-청량리역 교직구간 단선도

타이·포스트의 고속도 차단기가 투입되어 있고 고장이 교직 구간에 발생하였을 경우 고장 전류 ΔI_2 는

$$\Delta I_2 = \frac{1500-E_a}{R_o + rL_1 + rL_2 + R_a}$$

여기서 $R_{o1} = 0.044 \text{ [\Omega]}$

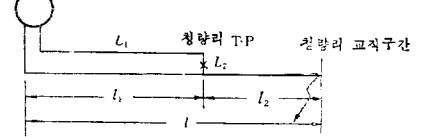
$$R_{o'1} = 0.022 \text{ [\Omega]}$$

$$r' = \frac{1}{2}r = \frac{1}{2} \times 0.0362 = 0.0181 \text{ [\Omega/km]}$$

$$\Delta I_2 = \frac{1500-300}{0.044 + 0.0181 \times 1.09 + 0.0362 \times 0.75 + 0.05} = 8520 \text{ [A]}$$

$$\Delta I_2' = \frac{1500-300}{0.022 + 0.0181 \times 1.09 + 0.0362 \times 0.75 + 0.05} = 10093 \text{ [A]}$$

돌진율은 타이·포스트의 고속도 차단기가 투입되어 있으므로 제기동 S/S



여기서 L_1, L_2 : 각 구간의 인덕턴스

그림 4.6 제기동 S/S-청량리역 교직 구간 선로 인덕턴스

$$\left(\frac{di}{dt}\right)_{t=0} = -\frac{E-E_a}{L_o + \frac{1}{2}L_1 + L_2} \times \frac{1}{2}$$

$$\begin{aligned} &= \frac{1500-300}{1.1 + \frac{1}{2} \times 1.09 \times 1.1 \times 0.75 \times 1.1} \times \frac{1}{2} \\ &= 238 \text{ [KA/S]} \end{aligned}$$

위에서 구한 결과를 요약하면 표 4.1과 같다.

표 4.1 대표적인 구간의 고장 전류

고장점의 위치	ΔI [A]	$\left(\frac{di}{dt}\right)_{t=0}$	비고
시청앞 S/S-종로 S/S	6280/7100	474	74/81
종로 S/S-제기동 S/S 중간 지점	6110/6890	446	
시청앞 S/S공급, 서울역 교직구간(T·P의 HSCB투입)	4440/5305	255	
제기동 S/S공급, 청량리역 교직구간(T·P의 HSCB투입)	8520/10090	238	

4.2 並列給電 區間의 各故障點에 대한 故障電流

고장점이 공급 변전소에 가깝고 멀어짐에 고장 전류가 변화함을 알아보기 위하여 어떤 병렬 급전구간에서 고장점을 여러곳 선택하여 계산한다. 병렬 급전구간에서도 단독 변전소 공급 구간과 마찬가지로 공급

변전소 고장점이 멀어지면 단락 전류는 줄어든다.

그런데 병렬 공급 구간에서 고장점이 구간의 중앙 지점에서 좌우 어느 쪽에 떨어져 있다고 하면 고장점과 가까워진 변전소에서 공급하는 고장 전류가 증가할 것이고 반대로 떨어진 쪽의 변전소에서 공급하는 고장 전류가 줄어들게 된다. 또 병렬 구간의 중앙에서 선로가 좌우 대칭이므로 변전소 직하에서 구간의 중앙 지점에 걸친 각 점의 고장 전류를 구하면 전 구간의 고장 특성을 알 수 있다.

여기에서는 지하철의 병렬 공급 구간이 가장 긴 종로 5가 변전소와 제기동 변전소 사이(2.89km)를 택하여 각 지점에서의 고장 특성을 계산한다.

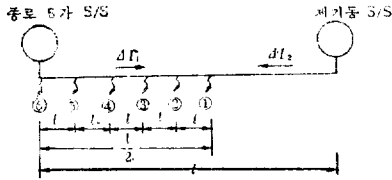


그림 4.7 종로 5가 S/S-제기동 S/S 병렬 급전 구간의 각 고장 지점

각 고장점을 ①에서 ⑥까지로 표시하고 고장점간의 간격은 구간 길이의 10분의 1로 한다.

1974년의 종로 5가에서 공급 고장 전류 ΔI_1 , 제기동 S/S에서 공급 고장 전류를 ΔI_2 라 하면 고장 특성은 다음과 같다.

(1) ① 지점의 고장

구간의 중앙 지점 고장으로서는 4.1의 (2) 경우에 해당하고

$$\Delta I_1 = \Delta I_2 = 6110 \text{ [A]}$$

$$\left(\frac{di}{dt}\right)_{t=0} = \left(\frac{di_2}{dt}\right)_{t=0} = 446 \text{ [KA/S]}$$

(2) ② 지점의 고장

양 변전소에서 공급하는 고장 전류의 크기는

$$\Delta I_1 = (i_1)_{t=0} = \frac{(R_o + X_2r)(E - E_a)}{(R_o + X_1r)(R_o + X_2r) + R_a + (2R_o + X_1r + X_2r)}$$

$$\Delta I_2 = (i_2)_{t=0} = \frac{(R_o + X_1r)(E - E_a)}{(R_o + X_1r)(R_o + X_2r) + R_a + (2R_o + X_1r + X_2r)}$$

고장의 위치는 종로 5가 S/S에서 구간 거리의 4/10 되는 지점으로

$$X_1 = \frac{4}{10}l, X_2 = \frac{6}{10}l, l = 2.89 \text{ [km]}$$

$$\begin{aligned} \therefore \Delta I_1 &= \frac{(0.044 + \frac{6}{10} \times 0.1046) \times 1500 - 3.0}{(0.044 + \frac{4}{10} \times 0.1046)(0.044 + \frac{6}{10} \times 0.1046) + 0.05(2 \times 0.044 + 0.1046)} \\ &= 6820 \text{ [A]} \end{aligned}$$

$$\therefore \Delta I_2 = \frac{10,044 \times \frac{4}{10} \times 0.1046 \times 1200}{0.0858 \times 0.1068 + 0.00963} = 5480 \text{ [A]}$$

$\Delta I_1, \Delta I_2$ 에 대한 돌진율은

$$\left(\frac{di_1}{dt}\right)_{t=0} = \frac{E - E_a}{L_o + X_1L}$$

$$\left(\frac{di_2}{dt}\right)_{t=0} = \frac{E - E_a}{L_o + X_2L}$$

$$\left(\frac{di_1}{dt}\right)_{t=0} = \frac{1500 - 300}{1.1 + \frac{4}{10} \times 2.89 \times 1.1} = 507 \text{ [KA/S]}$$

$$\left(\frac{di_2}{dt}\right)_{t=0} = \frac{1500 - 300}{1.1 + \frac{6}{10} \times 2.89 \times 1.1} = 409 \text{ [KA/S]}$$

(3) ③ 지점의 고장

종로 5가 S/S에서 구간 거리 l의 3/10되는 지점으로

$$X_1 = \frac{3}{10}l, X_2 = \frac{7}{10}l$$

$$\begin{aligned} \therefore \Delta I_1 &= \frac{(0.044 + \frac{7}{10} \times 0.1046) \times (1500 - 300)}{(0.044 + \frac{3}{10} \times 0.1046)(0.044 + \frac{7}{10} \times 0.1046) + 0.0093} = 7620 \text{ [A]} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta I_2 &= \frac{(0.044 + \frac{3}{10} \times 0.1046) \times (1500 - 300)}{0.07538 \times 0.11922 + 0.0963} \\ &= 4900 \text{ [A]} \end{aligned}$$

$$\left(\frac{di_2}{dt}\right)_{t=0} = \frac{1500 - 300}{1.1 + \frac{3}{10} \times 2.89 \times 1.1} = 585 \text{ [KA/S]}$$

$$\left(\frac{di_1}{dt}\right)_{t=0} = \frac{1500 - 300}{1.1 + \frac{7}{10} \times 2.89 \times 1.1} = 361 \text{ [KA/S]}$$

(4) ④ 지점의 고장

종로 5가 S/S에서 구간 거리 l의 2/10되는 지점으로

$$X_1 = \frac{2}{10}l, X_2 = \frac{8}{10}l$$

$$\begin{aligned} \Delta I_1 &= \frac{(0.044 + \frac{8}{10} \times 0.1046) \times (1500 - 300)}{(0.044 + \frac{2}{10} \times 0.1046)(0.044 + \frac{8}{10} \times 0.1046) + 0.00963} = 8560 \text{ [A]} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta I_2 &= \frac{(0.044 + \frac{2}{10} \times 0.1046) \times (1500 - 300)}{0.049 \times 0.1277 + 0.00963} \\ &= 4350 \text{ [A]} \end{aligned}$$

$$\left(\frac{di_1}{dt}\right)_{t=0} = \frac{1500 - 300}{1.1 + \frac{2}{10} \times 2.89 \times 1.1} = 692 \text{ [KA/S]}$$

$$\left(\frac{di_2}{dt}\right)_{t=0} = \frac{1500 - 300}{1.1 + \frac{8}{10} \times 2.89 \times 1.1} = 330 \text{ [KA/S]}$$

(5) ⑤ 지점의 고장

종로 5가 S/S에서 구간거리의 1/10되는 지점으로

$$X_1 = \frac{1}{10}l, X_2 = \frac{9}{10}l,$$

$$\Delta I_1 = \frac{(0.044 + \frac{9}{10} \times 0.1046)(1500 - 300)}{(0.044 + \frac{1}{10} \times 0.1046)(0.044 + \frac{6}{10} \times 0.1046) + 0.00963} = 9670 \text{ [A]}$$

$$\Delta I_2 = \frac{(0.044 + \frac{1}{10} \times 0.1046) \times (1500 - 300)}{0.0545 \times 0.1881 + 0.00963} = 3810 \text{ [A]}$$

$$\left(\frac{di_1}{dt}\right)_{t=0} = \frac{1500 - 300}{1.1 + \frac{1}{10} \times 2.89 \times 1.1} = 846 \text{ [KA/S]}$$

$$\left(\frac{di_2}{dt}\right)_{t=0} = \frac{1500 - 300}{1.1 + \frac{9}{10} \times 2.89 \times 1.1} = 311 \text{ [KA/S]}$$

(6) ⑥ 지점의 고장

변전소 직하이프로

$$\Delta I_1 = \frac{(0.044 + 0.1046)(1500 - 300)}{(0.044 + 0)(0.044 + 0.1046 + 0.00963)} = 11030 \text{ [A]}$$

$$\Delta I_2 = \frac{(0.044 + 0)(1500 - 300)}{0.044 \times 0.1486 + 0.00963} = 3260 \text{ [A]}$$

$$\left(\frac{di_1}{dt}\right)_{t=0} = \frac{1500 - 300}{1.1 + 0 \times 2.89 \times 1.1} = 1090 \text{ [KA/S]}$$

$$\left(\frac{di_2}{dt}\right)_{t=0} = \frac{1500 - 300}{1.1 + 2.89 \times 1.1} = 280 \text{ [KA/S]}$$

이상의 결과를 종합하면 표 4.2와 같다.

표 4.2 병렬 급전 구간의 각 고장점에 대한 고장 전류

고장지점	구분		고장점의 고장 전류 [A] ($\Delta I_1 + \Delta I_2$)	돌진율 [KA/S]		비고
	공급 고장 전류 [A] 종로 5가 S/S ΔI_1	계기동 S/S ΔI_2		$\left(\frac{di_1}{dt}\right)_{t=0}$	$\left(\frac{di_2}{dt}\right)_{t=0}$	
① 구간의 중앙 $X_1 = \frac{1}{2}$	6110	6110	12220	446	446	1974년 선로조건
② 종로 5가 S/S $X_1 = 4/10l$	6820	5480	12300	507	400	"
③ 종로 5가 S/S 에서 $X_1 = 3/10l$	7620	4900	12520	585	361	"
④ 종로 5가 S/S 에서 $X_1 = 2/10l$	8560	4350	12910	692	330	"
⑤ 종로 5가 S/S 에서 $X_1 = 1/10l$	9670	3810	13480	846	311	"
⑥ 종로 5가 S/S 직하 $X_1 = 0$	11030	3266	14290	1090	280	"

표 4.2에 의하면 고장점이 변전소에 가까워지는 경우 그 변전소의 고장 공급 전류는 증가하게 되고, 반대의 변전소에서는 고장 공급 전류가 감소하게 된다.

그러나 양쪽 변전소의 공급 고장 전류의 합, 바꾸어 말하면 고장점의 고장 전류 크기는 병렬 구간의 중앙에서 어느 변전소 쪽으로 접근하여 갈수록 완만하게 커지고 변전소 가까이에서 최대가 된다. 또 각 고장 전류의 돌진율도 고장 전류가 증가함에 따라 커짐을 알 수 있다.

참고 문헌

1. 서석인, 한국 철도의 전화 현황, 대한전기학회지, Vol. 24, No.1 pp.16-18 (1975)
2. 전춘생, 전기철도, 문운당(1973)
3. 서울특별시, 지하철망의 전기방식과 통행계에

관한 검토(1971)

4. 서울특별시, Specification for Subway Construction Project (1972)
5. 서울특별시, 전력설비 기기 취급설명서.
6. 海外鐵道技術協力協會, Seoul특별시 地下鐵建設實施 計劃檢討書 東京(1972)
7. 海外鐵道技術協力協會(東京), 電氣工作物 設計 施工標準
8. 飯田 眞, 電氣鐵道(最新高級電檢講座), 電氣書院(1966)
9. 電氣學會, 電氣鐵道ハンドブック, 電氣學會(1966)
10. 電氣學會, 電氣工學ハンドブック, 電氣學會(1967), pp.1513-1605 (29編)