

# 시정수를 이용한 직류철도급전계통에서의 고장판단 및 고장점표정 알고리즘

論文

52A-10-2

## A Fault Detection and Location Algorithm Using a Time Constant for DC Railway Systems

梁彦泌\* · 姜相熙\*\* · 權寧珍\*\*\*

(Eon-Phil Yang · Sang-Hee Kang · Young-Jin Kwon)

**Abstract** - When a fault occurs on railway feeders it is very important to detect the fault to protect trains and facilities. Because a DC railway system has low feeder voltage, The fault current can be smaller than the current of load starting. So it is important to discriminate between the small fault current and the load starting current. The load starting current increases step by step but the fault current increases at one time. So the type of  $\Delta I$  relay(50F) was developed using the different characteristics between the load starting current and the fault current. The load starting current increases step by step so the time constant of each step is much smaller than that of the fault current. First, to detect faults in DC railway systems, an algorithm using the time constant calculated by the method of least squares is presented in this paper. If a fault occurs on DC railway systems it is necessary to find a fault location to repair the faulted system as soon as possible. The second aim of the paper is to calculate the accurate fault location using Kirchhoff's voltage law.

**Key Words** : 직류철도, 시정수, 고장판단, 고장점표정, Power System Blockset

### 1. 서론

전기철도 급전시스템에서 단락고장 등이 발생했을 경우에는 전기차와 설비를 보호해야 하므로 고장을 신속히 검출하고 고장의 확대를 방지하기 위하여 보호장치를 설치해야 한다. 직류급전 방식은 급전전압의 크기가 작고 고저항 지락고장이나 고장위치가 변전소로부터 멀리 떨어져 있는 경우 고장전류의 크기가 작으므로 부하전류와 고장전류를 구별하기 어렵다는 문제를 지니고 있었다. 전기차의 기동전류는 최대전류가 되기까지 몇 단계를 거치고 고장전류는 그렇지 않기 때문에 이와 같은 부하전류와 고장전류의 특성을 비교하여 고장을 판단하는  $\Delta I$ 형 고장선택장치(50F)가 개발 되었다. 우리나라에서 발표된 직류철도시스템 보호에 관한 연구 자료들은 직류 급전시스템의 구성 및 특징[1]을 기술한 것들과 현재 외국에서 수입되어 설치 운용되어지고 있는 고장선택장치(50F)의 고장판단 방법과 설정방법[2]등을 기술하는 수준에 지나지 않았다.

부하의 기동전류는 단계적으로 증가하기 때문에 각 단계 별 부하전류의 시정수는 고장전류의 시정수와 비교할 때 매우 작은 특성을 지닌다. 본 논문에서는 이와 같은 부하전류와 고장전류의 시정수를 이용한 새로운 고장판단 알고리즘을 제안하였다.

를 제안하였다.

직류 급전구간(2~5km)이 교류 급전구간(10~15km)보다 비교적 짧고 고장선택장치에 의하여 근거리 또는 원거리 정도의 고장 거리를 판별함에 따라 직류철도급전시스템에서 아직 고장점표정장치가 사용되지 않고 있다. 그러나 고장 발생 후 정전시간을 최소화하기 위해서는 고장 발생 지점을 정확히 계산하고 고장구간을 신속히 보수해야 하므로 직류철도급전시스템에서도 고장점표정장치를 설치할 필요가 있다. 본 논문에서는 변전소 양단에서 취득한 전압, 전류를 이용하여 키르히호프 전압법칙에 근거한 고장점표정 알고리즘을 제안하였다.

### 2. 본론

#### 2.1 직류철도급전시스템 보호

##### 2.1.1 직류철도급전시스템 보호방식

직류철도급전 시스템에서는 아크, 단락 등의 고장으로부터 급전시스템을 보호하기 위하여 그림1처럼 고속도 차단기(54F)와 고장선택장치(50F) 및 연락차단장치의 조합으로 고장을 판단하고 연락차단에 의하여 고장구간을 격리시키는 방법을 사용하고 있다.[1]

고속도 차단기는 설정치를 초과하는 과대 전류가 회로에 유입된 경우 전류가 커지기 전에 조기에 극을 개방하여 고속도로 차단할 수 있는 기능을 갖춘 직류 차단기이다. 고속도 차단기는 방면별, 상·하선별의 회선마다 설치하며 선로를 개폐하고 부하측 단락고장시 과전류를 차단하여 급전 설비나 전기차를 보호한다.

\* 準 會 員 : 明知大學 電氣工學科 碩士

\*\* 正 會 員 : 明知大學 電氣工學科 教授 · 工博

\*\*\* 正 會 員 : 明知大學 電氣工學科 博士課程

接受日字 : 2003年 3月 10日

最終完了 : 2003年 8月 28日

직류철도급전시스템에서 부하전류의 크기가 원거리 단락 고장전류에 근접하여 교류계통과 같은 보호방식의 사용이 어렵기 때문에  $\Delta I$  형 또는  $di/dt$  형 고장선택장치가 개발되어 사용되고 있다.

연락차단장치는 병렬 급전하는 변전소 사이에 마주보는 54F를 연락선을 매개로 하여 상호간에 연동 차단하는 장치이며 고장 전류를 검출하는 기능은 없으나 이 장치를 사용하면 A변전소의 54F에서는 판별할 수 없는 원거리 점의 단락고장라이도 고장으로로부터 근거리에 있는 B변전소의 54F가 고장을 먼저 인식하여 작동하면 마주보는 A변전소의 54F가 이 장치에 의해 연락 작동하므로 고장구간은 양쪽 변전소에서 완전히 차단된다.[1]

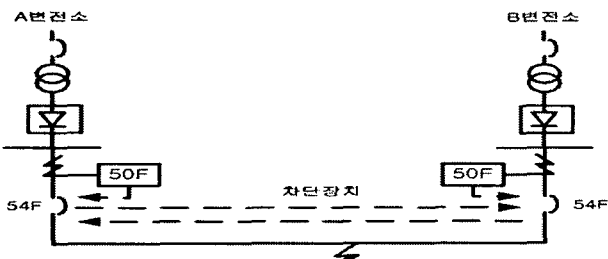


그림 1 직류철도 급전시스템 보호방식  
Fig. 1 The DC railway protection system

2.1.2 직류급전선 고장선택 장치

직류철도급전시스템에서의 고장은 기본적으로 두 종류로 나눌 수 있다. 변전소 근방에서 고장이 일어나는 경우와 변전소에 멀리 떨어진 곳에서 고장이 일어나는 경우로 나눌 수 있다. 원거리 고장전류는 변전소의 등가 임피던스와 레일의 임피던스에 의하여 그 크기가 결정되어지고 근거리 고장 전류는 변전소 등가 임피던스에 의해서 고장전류의 크기가 결정되어진다. 그런데 문제는 변전소로부터 멀리 떨어진 원거리 고장전류나 고저항 지락고장전류의 크기가 전기철도 차량의 기동전류의 최대 크기보다 작을 수 있다는 데 있다.

$\Delta I$ 형 고장선택장치는 극히 짧은 시간 내( $\Delta t$ )에 회로의 전류증가분( $\Delta I$ )이 설정치를 초과하였을 때 작동하고 54F를 트립시키는 장치이다. 장치 자체가 기동전류인지 단락전류인지를 판단하는 것은 아니나 작동치를 적절하게 설정하면 54F에 비해 더욱 넓은 범위 내에서 아크 단락을 판별하여 작동한다.[3]

원거리 고장전류는 시간에 대하여 전류가 꾸준히 증가하고 부하차량의 기동전류는 항상 증감변동하고 있다. 이와 같은 현상을 이용하여 고장을 판별하는  $di/dt$ 형 고장선택장치의 고장판단 알고리즘은 다음과 같다. 지역통과 필터링을 거친 전류의 기울기를 측정하여 기울기가 초기기울기 이상으로 전류가 증가한다면 전류증가의 누적치와 시간의 누적치를 계산한다. 전류의 기울기( $di/dt$ )가 도중에 나중기울기 아래로 내려가면 전류와 시간의 누적치를 '0'으로 초기화시키고 다시 기울기를 측정한다. 전류증가의 누적치 합이 고장선택장치 연산원도우 이내에서 설정값 이상으로 증가하

였다면 고장으로 판단하거나 연산원도우가 끝날 때까지 전류의 기울기( $di/dt$ )가 계속 나중기울기 이상으로 증가하면 고장으로 판단한다. 전기철도 부하의 기동전류의 경우는 기울기가 초기기울기 이상으로 증가하였지만 단계별로 증가하기 때문에(연산원도우가 끝나기 전에 나중기울기 아래로 내려가기 때문에) 고장으로 판정하지 않는다.[2]

2.2 새로운 고장선택 방법 및 고장점표정

2.2.1 부하전류와 고장전류

2.2.1.1 부하전류의 특성

부하전류의 최대치가 5,000[A]라고 하면 이 경우의 부하전류는 0에서 일시적으로 5,000[A]가 되는 것이 아니라 5,000[A]에 이르기까지 작은 전류의 폭으로 여러 단계를 거쳐 증가, 혹은 감소를 반복하면서 5,000[A]에 이르는 것으로 그림2는 이러한 상황을 시뮬레이션한 일례이다.

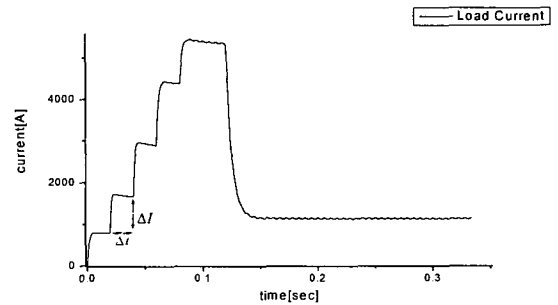


그림 2 부하전류의 특성곡선  
Fig. 2 The characteristic curve of a load current

그림2에서 각 단계의 전류 증가폭은 짧은 시간 중  $\Delta t$ 의 전류 증가량이 되므로 일반의 급전전류  $I$ 와 구별되고 통상 이를 급전전류의  $\Delta I$ 라 한다.

급전전류의  $\Delta I$  최대치는 그 구간을 운행하는 전차의 형식이나 편성 외에 당일의 운전상황의 변화에 따라서도 달라짐으로 이를 계산하기는 곤란하다. 계산이 불가능하기 때문에 실제로 측정하는 방법 밖에 없으며 실측을 위한 '직류기전전류 분석장치'가 개발되었다. 이 장치를 측정하고자 하는 회선에 일정 기간 설치해 두면 그 기간에 발생한  $\Delta I$  전류 최대치의 구분별 발생도수가 장치에 표시된다. 이와 같이 하여 여러 회선에 대해 측정한 자료에 의하면  $\Delta I$ 의 최대치와 급전전류의 최대치 사이에는 다음의 관계가 성립된다.[3]

$$\text{급전전류의 } \Delta I_{\max} \approx \text{급전전류 } I_{\max} \times (0.3 \sim 0.5)$$

2.2.1.2 부하전류의 주파수특성

그림3과 그림4에서처럼 부하전류의 주파수 특성은 직류 성분에 비하여 다른 정현파 성분들은 무시할 정도로 작으며 고조파 성분만을 비교하면 기본파나 다른 고조파에 비하여 3고조파가 가장 많이 나타나는 현상을 볼 수 있었다.

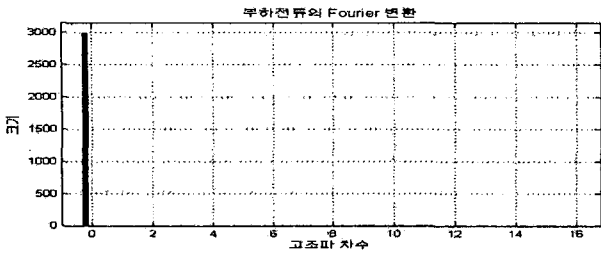


그림 3 부하전류의 주파수 스펙트럼  
Fig. 3 The frequency spectrum of a load current

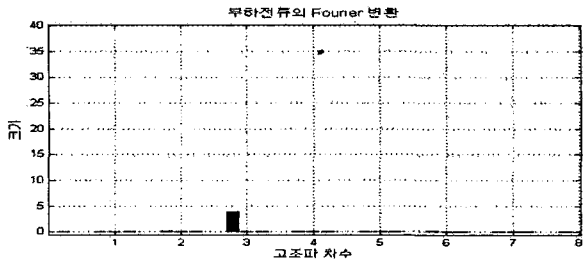


그림 4 직류성분을 제외한 부하전류의 주파수 스펙트럼  
Fig. 4 The frequency spectrum of a load current excluding the dc component

2.2.1.3 고장전류의 특성

단락 등의 고장이 급전시스템에 발생한 경우에 변전소 급전회로에 흐르는 고장 전류는 고장의 종류, 고장점의 상태에 따라 다르지만 여러 가지 고장을 상정하여 실시된 인공 단락고장 시험의 결과는 아크 단락이나 그렇지 않은 고장의 경우에도 고장 전류의 파형은 고장점을 포함한 종합 회로정수(R, L)에 따라 결정되는 그림5와 같은 과도전류에 가까운 것으로 확인되었다.

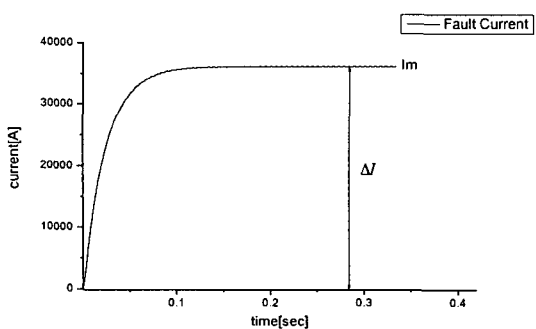


그림 5 고장전류의 특성 곡선  
Fig. 5 The characteristic curve of a fault current

따라서 단락 시에 흐르는 단락전류의 정상치  $I_m$ 은 단락 발생시의 전류 증가량  $\Delta I$ 가 되므로 다음의 관계가 성립된다.[3]

$$\text{단락전류의 } \Delta I \cong \text{단락전류의 정상치 } I_m$$

2.2.1.4 고장전류의 주파수 특성

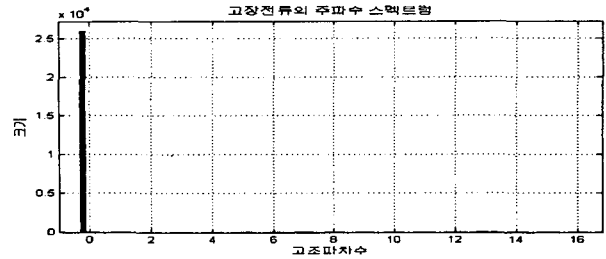


그림 6 고장전류의 주파수 스펙트럼  
Fig. 6 The frequency spectrum of a fault current

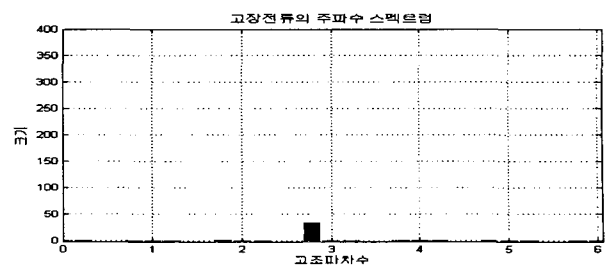


그림 7 직류성분을 제외한 고장전류의 주파수 스펙트럼  
Fig. 7 The frequency spectrum of a fault current excluding the dc component

그림6과 그림7에서처럼 고장전류의 주파수 특성은 직류 성분에 비하여 다른 정현파 성분들은 무시할 정도로 작으며 고조파 성분을 비교하면 기본파나 다른 고조파에 비하여 3고조파가 가장 많이 나타나는 현상을 볼 수 있었다.

2.2.2 최소자승법을 이용한 전류신호의 시정수계산

그림2에서처럼 부하전류는 최대치가 되기까지 여러 단계를 거치기 때문에 각 단계별  $\Delta I$ 의 시정수는 그림5에서의 고장전류  $\Delta I$ 의 시정수와 비교할 때 매우 작은 특성을 가진다. 새로운 고장판단 방법은 이와 같이 입력전류의 시정수 크기로서 고장판단을 하였고 최소자승법을 이용하여 입력전류의 시정수를 구하였다.

최소자승법은 미지수의 개수가 많을수록 많은 샘플 데이터가 필요하며 그 만큼 연산속도가 떨어지게 된다. 따라서 연산속도를 향상시키기 위하여 저역통과 필터를 사용하였으며 차단주파수는 300Hz로 하고 이득을 0.1로 하여 5조파 이상을 90% 이상 차단하게 하였다.

위와 같은 방법으로 입력신호를 직류 성분과 정현파(기본파+2조파+3조파+4조파)의 합으로 가정하였으며 식(1)이 그 가정식이다.

$$i(t) = K_1(1 - K_2 e^{-t/\tau}) + K_3 \sin(\omega t + \theta_1) + K_4 \sin(2\omega t + \theta_2) + K_5 \sin(3\omega t + \theta_3) + K_6 \sin(4\omega t + \theta_4) \quad (1)$$

식(1)의 직류성분을 Taylor series를 사용하여 4차 이상

의 성분을 무시하고 전개하면 식(2)와 같이 표현된다.

$$K_1(1 - K_2 e^{-t/\tau}) = K_1(1 - K_2(1 - \frac{t}{\tau} + \frac{t^2}{2\tau^2})) \quad (2)$$

식(2)를 식(1)에 대입 전개하면 식(3)과 같이 표현된다.

$$i(t) = K_1(1 - K_2(1 - \frac{t}{\tau} + \frac{t^2}{2\tau^2})) + K_3 \sin(\omega t) \cos \theta_1 + K_3 \cos(\omega t) \sin \theta_1 + K_4 \sin(2\omega t) \cos \theta_2 + K_4 \cos(2\omega t) \sin \theta_2 + K_5 \sin(3\omega t) \cos \theta_3 + K_5 \cos(3\omega t) \sin \theta_3 + K_6 \sin(4\omega t) \cos \theta_4 + K_6 \cos(4\omega t) \sin \theta_4 \quad (3)$$

식(3)을 시간 t에 대해서 방정식을 세우면 식(4)과 같이 표현된다.

$$i(t) = K_1 - K_1 K_2 + \frac{K_1 K_2}{\tau} t - \frac{K_1 K_2}{2\tau^2} t^2 + K_3 \cos \theta_1 \sin(\omega t) + K_3 \sin \theta_1 \cos(\omega t) + K_4 \cos \theta_2 \sin(2\omega t) + K_4 \sin \theta_2 \cos(2\omega t) + K_5 \cos \theta_3 \sin(3\omega t) + K_5 \sin \theta_3 \cos(3\omega t) + K_6 \cos \theta_4 \sin(4\omega t) + K_6 \sin \theta_4 \cos(4\omega t) \quad (4)$$

여기서,

- $K_1, K_1 K_2, \frac{K_1 K_2}{\tau}, \frac{K_1 K_2}{\tau^2}$  : 직류 크기
- $K_3 \cos \theta_1, K_3 \sin \theta_1$  : 기본파의 크기
- $K_4 \cos \theta_2, K_4 \sin \theta_2$  : 2조파의 크기
- $K_5 \cos \theta_3, K_5 \sin \theta_3$  : 3조파의 크기
- $K_6 \cos \theta_4, K_6 \sin \theta_4$  : 4조파의 크기

위와 같이 입력신호의 가정식은 12개의 미지수를 갖는다. 본 논문에서는 안정적인 시정수의 추출을 위해 60개의 선형 방정식을 세웠고 그 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + a_{13}x_3 + a_{14}x_4 + a_{15}x_5 + a_{16}x_6 + a_{17}x_7 + a_{18}x_8 + a_{19}x_9 + a_{110}x_{10} + a_{111}x_{11} + a_{112}x_{12} &= s_1 \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + a_{23}x_3 + a_{24}x_4 + a_{25}x_5 + a_{26}x_6 + a_{27}x_7 + a_{28}x_8 + a_{29}x_9 + a_{210}x_{10} + a_{211}x_{11} + a_{212}x_{12} &= s_2 \\ \vdots & \\ a_{601}x_1 + a_{602}x_2 + a_{603}x_3 + a_{604}x_4 + a_{605}x_5 + a_{606}x_6 + a_{607}x_7 + a_{608}x_8 + a_{609}x_9 + a_{610}x_{10} + a_{611}x_{11} + a_{612}x_{12} &= s_{60} \end{aligned}$$

여기서,

$$\begin{aligned} a_{m1} &= 1 & a_{m2} &= -1 & a_{m3} &= t & a_{m4} &= -\frac{t^2}{2} \\ a_{m5} &= \sin(\omega t) & a_{m6} &= \cos(\omega t) & a_{m7} &= \sin(2\omega t) & a_{m8} &= \cos(2\omega t) \\ a_{m9} &= \sin(3\omega t) & a_{m10} &= \cos(3\omega t) & a_{m11} &= \sin(4\omega t) & a_{m12} &= \cos(4\omega t) \\ x_1 &= K_1 & x_2 &= K_1 K_2 & x_3 &= \frac{K_1 K_2}{\tau} & x_4 &= \frac{K_1 K_2}{\tau^2} \\ x_5 &= K_3 \cos \theta_1 & x_6 &= K_3 \sin \theta_1 & & & & \\ x_7 &= K_4 \cos \theta_2 & x_8 &= K_4 \sin \theta_2 & & & & \\ x_9 &= K_5 \cos \theta_3 & x_{10} &= K_5 \sin \theta_3 & & & & \\ x_{11} &= K_6 \cos \theta_4 & x_{12} &= K_6 \sin \theta_4 & & & & \end{aligned}$$

이를 정리하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{matrix} A & \times & X & = & S \\ [60 \times 12] & \times & [12 \times 1] & = & [60 \times 1] \end{matrix}$$

위의 A 행렬이 정방행렬이 아니기 때문에 의사역행렬을 통해 미지수 X를 구하였다.

$$\begin{aligned} X &= A^* S \\ A^* &= [A^T A]^{-1} [A^T] \end{aligned} \quad (5)$$

식(5)에서 X의 세 번째 요소  $x_3 = \frac{K_1 K_2}{\tau}$  이고 X의 네 번째 요소  $x_4 = \frac{K_1 K_2}{\tau^2}$  이므로 세 번째 요소에서 네 번째 요소를 나눠주면 입력전류의 시정수를 구할 수 있다.

최소자승법을 사용하여 입력전류의 시정수를 구하여 고장을 판별하는 새로운 고장선택 방법의 알고리즘은 다음과 같다. 차단주파수가 300Hz이고 이득이 0.1인 저역통과 필터에 의하여 입력전류에 포함된 5조파 이후의 신호를 차단하였고 입력전류의 기울기가 고장판단기울기(62[kA/s])보다 크면 최소자승법을 사용하여 시정수를 구하고 시정수가 고장판단시간(10[ms])동안 설정시정수(16[ms])보다 크면 고장으로 판단하였다. 입력전류의 기울기가 도중에 고장판단기울기보다 작으면 시정수의 값을 '0'으로 하였다. 각 설정값들의 정정은 다음과 같이 하였다.

### ① 고장판단기울기

변전소 전원측 내부저항 0.05[Ω], 인덕턴스 1.1[mH], 급전선 및 레일의 저항 0.035[Ω/km], 인덕턴스 1.1[mH/km]로 하고 급전구간 길이는 3[km]로 하였다. 계전기의 가장 먼 보호구역(병렬 급전구간의 약 80%정도)이 2.4[km]로 보고 이 지점에서 고장이 발생하였을 때 전류의 초기 기울기는 전압을 인덕턴스로 나눈

$$\frac{1650}{1.1 \cdot 10^{-3} + 1.1 \cdot 10^{-3} \times 2.4} = 440 \text{ [kA/s]}$$

이므로 안전을 150%를 고려하면 초기기울기는 171[kA/s]가 된다[2]. 고장판단 기울기는 초기 기울기의 시정수 후에서의 기울기보다 작게 하여 62[kA/s]로 하였다.

### ② 고장판단시간 및 설정시정수

시정수는 거리에 따라 비례하므로 부하전류의 시정수 중 가장 큰 시정수는 보호구역 중 가장 먼 거리(2.4[km])에서 시정수(8[ms])이다. 그래서 고장판단을 위한 설정시정수는 안전을 100%를 고려하여 16[ms]로 하였다. 고장판단시간은 10[ms]로 하여 입력전류의 시정수가 설정시정수 이상의 값으로 고장판단시간 이상 지속시 고장으로 판단하게 하였다.

### 2.2.3 고장점 표정 알고리즘[6]

직류급전시스템의 급전구간이 교류급전시스템보다 비교

적 짧고 고장선택장치(50F)에 의하여 근거리 또는 원거리 정도의 고장 거리를 판별함에 따라 직류철도급전시스템에서는 고장점표정 장치를 아직 사용하지 않고 있다. 그러나 고장발생 후 정전시간을 최소화하기 위해서는 고장발생 지점을 정확히 계산하고 고장구간을 신속히 보수해야 하므로 직류철도 급전시스템에서도 고장점표정장치를 설치하여야 할 필요가 있다.

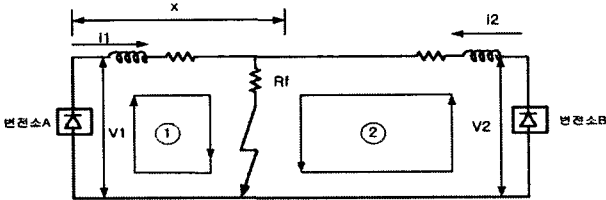


그림 8 부하가 없는 단선급전시스템에서의 단락고장  
Fig. 8 The short-circuit fault on the load single DC railway system

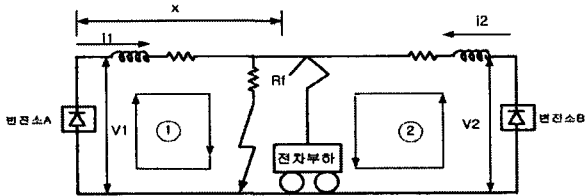


그림 9 부하가 있는 단선급전시스템에서의 단락고장  
Fig. 9 The short-circuit fault on the single DC railway system

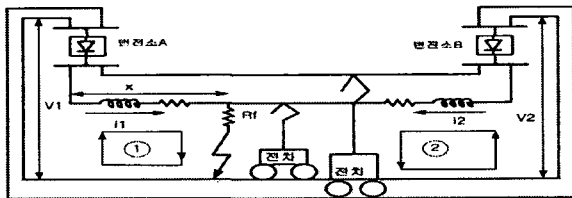


그림 10 상선 및 하선에 부하가 있는 복선급전시스템에서의 단락고장  
Fig. 10 The short-circuit fault on the double DC railway system with load on the upper feeder and lower feeder

여기서,  
 $x$ : 변전소A에서 고장점까지의 거리(pu)  
 $R_f$ : 고장저항  
 $v_1, v_2, i_1, i_2$ : 변전소 A,B의 계전점에서 측정된 전압, 전류

그림8~10의 시스템 변전소A로부터 취득한 전류를 사용하여 고장판단 알고리즘에 의거하여 고장으로 판정되면 변전소 양단의 전압과 급전선에 흐르는 고장전류 데이터를 사용하여 키르히호프 전압법칙에 의거하여 고장거리를 계산한다. 그림8의 경우에서 키르히호프 전압법칙을 만족시키는 방정식을 세워보면 다음과 같다. 우선 루프①에서는 전

압방정식이 식(6)과 같이 표현된다.

$$v_1 = xL \frac{di_1}{dt} + xRi_1 + R_f(i_1 + i_2) \quad (6)$$

루프②에서는 전압방정식이 식(7)과 같이 표현된다.

$$v_2 = (1-x)L \frac{di_2}{dt} + (1-x)Ri_2 + R_f(i_1 + i_2) \quad (7)$$

식(7)에서 식(6)을 빼주면 식(8)과 같이 고장저항  $R_f$ 가 계산과정에서 소거된다.

$$v_1 - v_2 = x(L \frac{di_1}{dt} + L \frac{di_2}{dt} + Ri_1 + Ri_2) - (L \frac{di_2}{dt} + Ri_2) \quad (8)$$

A 변전소에서 고장점까지의 거리  $x$ 에 관하여 정리하면 식(9)와 같이 표현된다.

$$x = \frac{v_1 - v_2 + (L \frac{di_2}{dt} + Ri_2)}{L(\frac{di_1}{dt} + \frac{di_2}{dt}) + R(i_1 + i_2)} \quad (9)$$

본 알고리즘의 흐름은 그림11과 같다.

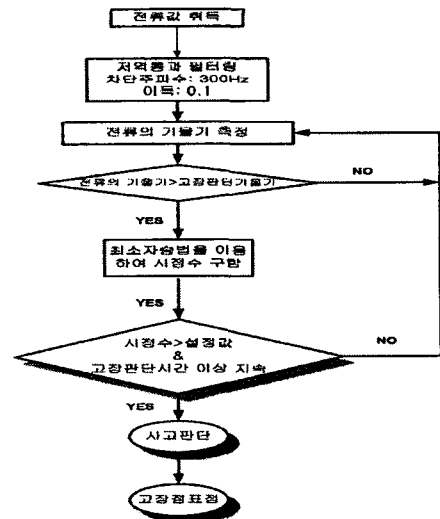


그림 11 고장판단 및 고장점표정 알고리즘 흐름도  
Fig. 11 The flow chart of the algorithm

### 2.2.4 부하전류와 고장전류의 시정수

최소자승법을 사용하여 복선병렬급전계통에서(그림10) 부하전류와 고장전류의 거리별(0.01[km], 1[km], 1.5[km], 2.4[km]) 시정수를 구한 결과 그림12에서처럼 부하전류와 고장전류의 시정수는 매우 큰 차이를 나타내고 그림13, 14에서 보이듯이 각각의 시정수는 거리에 비례하여 증가하는 현상을 나타내었다.

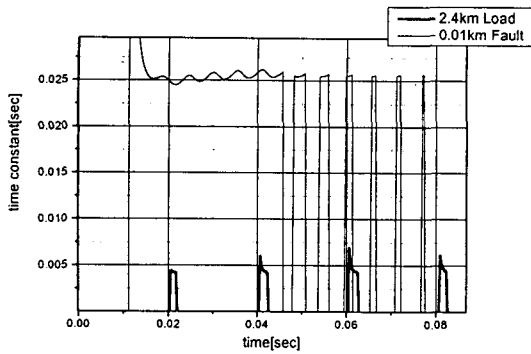


그림 12 고장전류와 부하전류의 시정수  
Fig. 12 The time constant of fault and load current

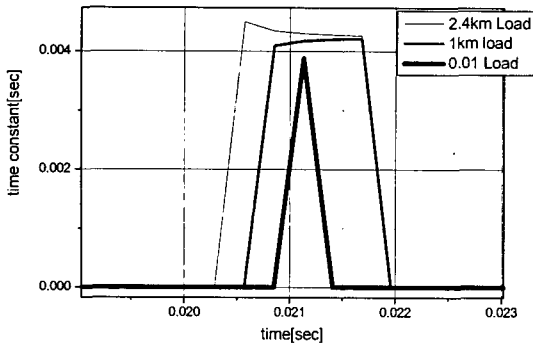


그림 13 부하전류의 시정수 확대  
Fig. 13 The enlarged time constant of a load current

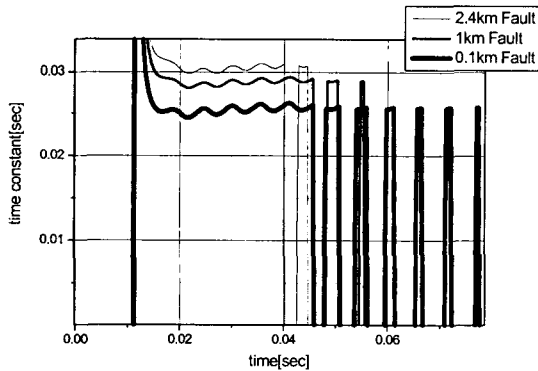


그림 14 고장전류의 시정수  
Fig. 14 The time constant of a fault current

2.2.5 고장판단 및 고장점표정 모의

새로운 고장판단 알고리즘과 고장점표정 알고리즘의 모의를 위하여 단선급전시스템에서는 부하가 없는 경우(그림 8)에서의 고장과 부하가 있는 경우(그림9)에서의 고장, 그리고 복선 급전시스템에서는 상선과 하선에 부하가 있고 하선에서 고장이 발생한 경우(그림10)를 모의하였다. 표1, 표 2, 표3과 같이 고장거리에 관계없이 새로운 고장판단 알고리즘은 모든 고장에 대하여 고장발생 후 27[ms]에서 고장

으로 판단하였고 고장판단 시간은 기존의 고장선택장치(고장판단시간은 약 55[ms])에 비해서 약 28[ms] 정도 빠르게 판단하였다.

그림8의 계통에서 고장거리를 판별한 결과는 아래 표1과 같이 최대 오차가 0.11%이내인 결과를 얻을 수 있었다. 그림9의 계통에서 고장거리를 판별한 결과는 아래 표2와 같이 최대 오차가 0.29%이내인 결과를 얻을 수 있었다. 그림 10의 계통에서처럼 상선에는 부하차량이 있고 하선에서는 부하차량 1[km]앞에서의 고장이 발생하였을 경우 고장거리를 판별한 결과는 아래 표3과 같이 최대 오차가 1.00%이내의 결과를 얻었다.

표 1 부하가 없는 단선 급전계통에서의 고장 및 고장점 표정  
Table 1 The fault detection time and the accuracy of location on a no load single DC railway

고장거리	시정수	고장판단시간	고장점표정	오차[%]
0.01[km]	26.25[ms]	27[ms]	0.010[km]	0.11
1.00[km]	30.36[ms]	27[ms]	1.001[km]	0.01
1.50[km]	31.67[ms]	27[ms]	1.501[km]	0.07
2.40[km]	32.31[ms]	27[ms]	2.401[km]	0.04

표 2 부하가 있는 단선급전계통에서의 고장 및 고장점 표정  
Table 2 The fault detection time and the accuracy of location on a load single DC railway

고장거리	시정수	고장판단시간	고장점표정	오차[%]
0.01[km]	26.39[ms]	27[ms]	0.010[km]	0.20
1.00[km]	30.86[ms]	27[ms]	1.002[km]	0.20
1.50[km]	32.75[ms]	27[ms]	1.503[km]	0.20
2.40[km]	34.96[ms]	27[ms]	2.407[km]	0.29

표 3 상선 및 하선에 부하가 있는 복선급전계통에서의 고장 및 고장점표정  
Table 3 The fault detection time and the accuracy of location on a double DC railway system with loads on the upper feeder and lower feeder

고장거리	시정수	고장판단시간	고장점표정	오차[%]
0.01[km]	26.36[ms]	27[ms]	0.010[km]	0.60
1.00[km]	30.79[ms]	27[ms]	1.010[km]	1.00
1.50[km]	32.73[ms]	27[ms]	1.503[km]	0.20
2.40[km]	34.16[ms]	27[ms]	2.406[km]	0.25

2.3 급전계통 모델링

직류철도 급전계통 구성 및 모델링은 MATLAB에서 제공되는 전력계통 시뮬레이션 tool인 PSB(Power System Blockset)를 사용하였다.[8]

2.3.1 변전소 모델링

변전소는 한국전력공사에서 보통 22.9[kV]를 수전하여 정류기용 변압기 1차측에 수전 전압이 가해진다. 그러면 정류기용 변압기 2차측에는 약 1,200[V]의 전압으로 변환되어

정류기의 2차측에는 1,500[V]의 직류전압이 발생된다. 이 전압을 직류 정극 모선에 병렬로 접속하여 이 모선으로부터 각 방향별로 전차선에 급전된다.[1]

이와 같은 실제 계통에 일치하도록 그림15에서처럼 22.9[kV]의 수전 전압을 갖는 3-phase inductive source 블록을 사용하여 교류 입력 부를 구성하였다.

정류 방식은 보통 변압기의 이용률이 높고 보다 정상적인 전류를 얻을 수 있도록 이중 3상 전파 브리지 방식의 12펄스 방식을 사용하는데 12펄스 정류기는 6펄스 정류기를 직렬로 연결함으로써 모의할 수 있다. 그림15에서처럼  $Y_g - Y - \Delta$ 결선의 3권선 변압기를 사용하면 2차측( $Y - \Delta$ )은 각각  $30^\circ$ 의 위상차가 나므로 각 2차측에 연결된 6펄스 정류기를 통하면 12펄스의 출력을 갖는 정류기를 모델링할 수 있다. 3권선 변압기의 용량은 4,480[kVA]로 하였고 정류기 출력 전압은 전압변동률 0.8%를 고려하여 1620[V]의 직류전압을 얻게 하였다. 변압기의 1차측 입력 전압은 식(10)에 의거하여 1158.7[V]로 하였다.

$$V_{o,dc} = \frac{P}{\pi} V_{LL,p} \sin\left(\frac{\pi}{P}\right) \quad (10)$$

- $V_{o,dc}$  : 정류기 출력직류전압
- $P$  : 정류기 펄스 수
- $V_{LL,p}$  : 교류입력 선간전압의 최대값

정류기 출력단에는 맥동분을 제거하기 위하여 평활필터를 설치했으며 변전소 내부임피던스는 저항 0.05[Ω]과 인덕턴스 1.1[mH]로 모의하였다.

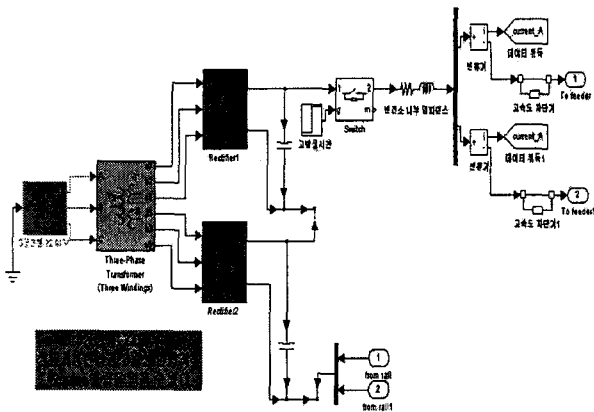


그림 15 PSB를 이용한 변전소 모델링  
Fig. 15 A substation modeling using PSB

### 2.3.2 급전선과 레일 모델링

급전선과 레일의 선로정수는 단위 길이를 입력하면 그 거리에 따른 급전선 및 레일의 저항, 인덕턴스가 계산되어 지게 하였다.

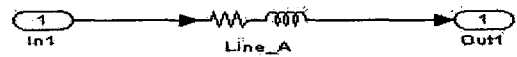


그림 16 PSB를 이용한 전차선 및 레일의 모델링  
Fig. 16 Feeder and rail modeling using PSB

### 2.3.3 전기철도차량 모델링

전기철도차량의 용량은 1[MW]로 하였으며 전기철도차량 전단에는 전차부하의 기동전류의 특성을 얻기 위하여 그림 18과 같이 4개의 저항에 각각 스위치를 연결시켜 가변저항을 만들어 부하전류의 기동특성이 나오도록 하였다.

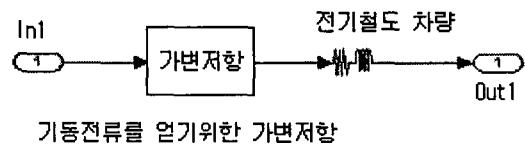


그림 17 PSB를 이용한 전기철도차량 모델링  
Fig. 17 A electrical train modeling using PSB

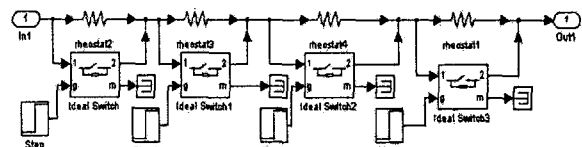


그림 18 PSB를 이용한 가변저항 모델링  
Fig. 18 A variable resistor modeling using PSB

## 3. 결 론

최소자승법을 사용하여 입력전류의 시정수를 구한 후 크기로서 고장을 판별하는 직류철도계통에서의 새로운 고장판단 알고리즘과 병렬 급전하는 직류철도급전시스템에서 양 단의 전압, 전류를 이용하여 키르히호프 전압법칙에 근거한 고장점표정 알고리즘을 제안하였다. 새로운 고장판단 알고리즘은 기존의  $\Delta I$ 방법이나  $di/dt$ 방법보다 약 28[ms]정도 빠르게 고장을 판별하였고 고장점표정 알고리즘은 최대 1.0%의 오차율을 보였다.

본 논문에서 제시한 고장판단 알고리즘과 고장점표정 알고리즘은 직류철도 급전계통에서 단락고장이나 지락고장시 고장을 보다 빨리 검출하고 정확한 고장점을 계산하여 고장시간을 최소화하고 신속한 복구를 하는데 기여할 것이다.

### 감사의 글

본 연구는 2002년도 과학기술부 및 한국과학재단 지원 ERC(Engineering Research Center)프로그램과 한국철도기술연구원의 지원에 의하여 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] 오광해, “도시철도 급전시스템 표준화연구”, 도시철도 표준화 Kickoff Meeting, 2001
- [2] 정상기, “전기철도 DC 급전계통 보호 및 협조”, 한국 전기철도, 30호, pp.78-83, 2001
- [3] 鐵道電化協會, 電回路保護システム,勝美印刷株式會社 pp.1, 1987
- [4] 강상희, 이승재, 노재근, 양언필, 정종진 “거리계전 알고리즘별 특성 비교”, 대한전기학회 춘계학술대회 논문집, pp.34-35, 2001
- [5] 정상기, 이병송, 정락교, 박성혁 “전기철도 DC 급전시스템의 보호 및 사고전류해석”, 대한전기학회 춘계학술대회 논문집, pp.30-33, 2001
- [6] 강상희, 이승재, 최면송, 양언필, “직류철도 급전계통 고장점표정”, 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp. 3-5, 2002
- [7] 電氣學會, “直流電氣鐵道における保護およびける保護 協調け關する調査”, 電氣學會技術報告, 542호, 1995
- [8] MATHWORKS, Power System Blockset User’s Guide Version 2, 2001

저 자 소 개



**양 언 필(梁彦泌)**  
 1974년 6월 23일생. 2003년 명지대 공대 전기 전기공학과 졸업(석사). 현재 한국 특허정보원 근무.  
 Tel : 02-3452-8144, Fax : 02-3452-2966  
 E-mail : epyang@kipi.or.kr



**강 상 희(姜相熙)**  
 1962년 8월 15일생. 1985년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 현재 명지대 공대 전기정보제어공학부 부교수.차세대전력기술연구센터 연구원.  
 Tel : 031-330-6364, Fax : 031-321-0271  
 E-mail : shkang@mju.ac.kr



**권 영 진(權寧珍)**  
 1974년 10월 16일생. 2000년 명지대 공대 전기공학과 졸업. 2002년 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정. 차세대전력기술연구센터 연구원.  
 Tel : 031-336-3280, Fax : 031-321-0271  
 E-mail : yjkwon@mju.ac.kr