

기동방식을 고려한 DC급전계통 보호알고리즘

권영진, 최동민, 강상희
명지대학교 차세대전력기술연구원

한문섭
철도기술연구원

이재경
(주)젤파워

A Protection Algorithm for DC Railway Systems Considering Train Starting

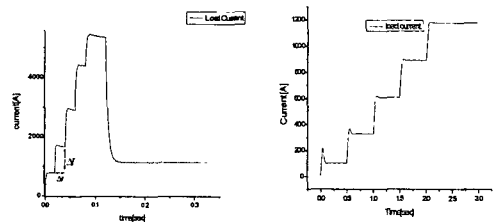
Y.J Kwon, D.M Choi, S.H Kang
NPTC, Mowngii University

M.S Han
KRRI

J.K Lee
Xelpower

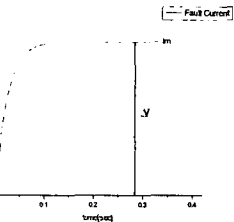
Abstract - A DC railway system has low feeder voltage, The remote fault current can be smaller than the current of load starting. So it is important to discriminate between the small fault current and the train starting current. The train starting current increases step by step but the fault current increases all at once. So the type of ΔI relay(50F) was developed using the different characteristics between the load starting current and the fault current. As for the train starting current, the time constant of train current at each step is much smaller than that of the fault current. To detect faults in DC railway systems, an algorithm that is independent of train starting current. This algorithm use the time constant calculated by the method of least squares is presented in this paper.

급전시스템에 발생한 경우에 변전소 급전회로에 흐르는 고장 전류는 고장의 종류, 고장점의 상태에 따라 다르지만 여러가지 고장을 상정하여 실시된 시뮬레이션 결과 고장 전류의 파형은 고장점을 포함한 종합 회로정수(R, L)에 따라 결정되는 것으로 확인되었다. 그림1은 이와 같은 부하전류와 고장전류의 특성을 모의한 예이다.



a. 저항기동 부하전류 특성

b. Chopper 기동 부하전류 특성



c. 고장전류 특성

그림 1. 부하전류와 고장전류의 특성

전기철도 급전시스템에서 지락 및 단락고장 등이 발생했을 경우에는 전기차와 설비를 보호해야 하므로 고장을 신속히 검출하고 고장의 확대를 방지하기 위하여 보호장치를 설치해야 한다. 직류급전 방식은 급전전압의 크기가 작고 고장위치가 변전소로부터 멀리 떨어져 있는 경우 고장전류의 크기가 작으므로 부하전류와 고장전류를 구별하기 어렵다는 문제를 지니고 있다. 전기차의 기동전류는 최대전류가 되기까지 몇 단계를 거치고 고장전류는 그렇지 않기 때문에 이와 같은 부하전류와 고장전류의 특성을 비교하여 고장을 판단하는 ΔI 형 고장선택장치(50F)가 개발되었다. 현재까지 직류철도시스템 보호에 관한 연구로는 직류 급전시스템의 구성 및 특징[1]을 기술한 것들과 현재 외국에서 수입되어 설치 운용되어지고 있는 고장선택장치(50F)의 고장판단 방법과 설정방법[2] 등에 관한 것이 발표되었다.

부하의 기동전류는 단계적으로 증가하기 때문에 각 단계별 부하전류의 시정수는 고장전류의 시정수와 비교할 때 매우 작은 특성을 지닌다. 본 논문에서는 이와 같은 시정수를 이용한 새로운 고장판단 알고리즘을 제안하였으며, 사례연구를 통해 직류급전 계통의 열차 기동시 부하 전류의 특성에도 영향을 받지 않는 정확하고 빠른 고장판단이 가능함을 검증하였다.

2. 본 론

2.1 새로운 고장선택 방법

2.2.1 부하전류와 고장전류의 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 일부 감소를 반복하면서 5,000[A]에 다다르는 반면 지락이나 단락 등의 고장이

부하전류와 고장전류의 주파수 특성은 직류성분에 비하여 다른 정현파 성분들은 무시할 정도로 작으며 고조파 성분만을 비교하면 기본파(60Hz기준)나 다른 고조파에 비하여 3고조파가 많이 나타나는 현상을 볼 수 있었다.

2.2.2 최소자승법을 이용한 전류신호 시정수계산

최소자승법을 이용하여 전류신호의 시정수를 계산하기 위하여 입력 전류신호를 직류 성분과 정현파(기본파+2조파+3조파+4조파)의 합으로 가정하였으며 식(1)이 그 가정식이다. 또한 가정한 주파수 이상의 주파수 성분을 차단하기 위하여 저역통과 필터를 사용하였으며 차단 주파수는 300Hz로 하고 이득을 0.1로 하여 5조파 이상을 90% 이상 차단하게 하였다.

$$i(t) = K_1(1 - K_2 e^{-t/\tau}) + K_3 \sin(\omega t + \theta_1)$$

$$+ K_4 \sin(2\omega t + \theta_2) + K_5 \sin(3\omega t + \theta_3) + K_6 \sin(4\omega t + \theta_4) \quad (1)$$

식(1)의 직류성분을 Taylor series를 사용하여 4차 이상의 성분을 무시하고 전개하여 식(1)에 대입하고 시간 t에 대한 방정식을 세우면 식(2)와 같다.

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

여기서,

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

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

$$\begin{bmatrix} A \\ \vdots \\ A \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} X \\ \vdots \\ X \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S \\ \vdots \\ S \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$[60 \times 12] \times [12 \times 1] = [60 \times 1]$$

여기서,

A: 기지수 행렬, X: 미지수 행렬, C: 샘플링 데이터

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

$$\begin{aligned} X &= A^* S \\ A^* &= [A^T A]^{-1} [A^T] \end{aligned} \quad (4)$$

식(4)에서 X의 세 번째 요소는 $x_3 = \frac{K_1 K_2}{\tau}$ 이고 X의 네 번째 요소는 $x_4 = \frac{K_1 K_2}{\tau^2}$ 이므로 세 번째 요소에서 네 번째 요소를 나눠주면 입력전류의 시정수를 구할 수 있다.

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)을 2.4[km]로 보고 이 지점에서 고장이 발생하였을 때 전류의 초기 기울기는 전압을 인덕턴스로 나눈 값인

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

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 설정 시정수

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

2.2.4 부하전류와 고장전류의 시정수

최소자승법을 사용하여 복선 병렬급전계통에서 부하전류와 고장전류의 거리별(0.01, 1, 1.5, 2.4[km]) 시정수를 구한 결과 그림 2,3,4에서처럼 부하전류와 고장전류의 시정수는 매우 큰 차이를 나타내고 각각의 시정수는 거리에 비례하여 증가하는 현상을 나타내었다. 또한 그림1에서 확인한 바와 같이 기동시 부하전류는 증감을 반복하므로 저항기동 방법의 시정수는 경우 그림2와 같으며, Chopper 기동 방법의 경우는 그림 3과 같다. 이 두 가지 기동모델의 경우 고장판단 시정수 값 이상으로 고장판단 시간만큼 지속되지 않음으로 고장으로 판별되지 않는다. 따라서 본 고장판단 알고리즘은 직류철도의 기동방식에 영향을 받지 않는 알고리즘이라 할 수 있다.

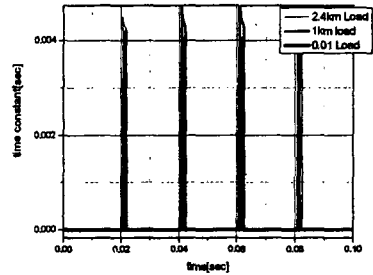


그림 2. 저항기동시 부하전류의 시정수

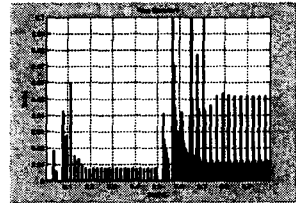


그림 3. Chopper 기동시 부하전류의 시정수

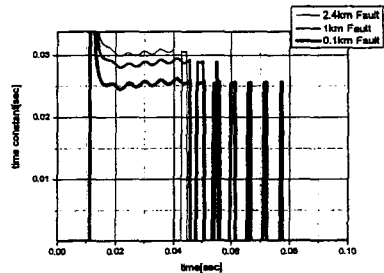


그림 4. 고장전류의 시정수

2.2.5 고장판단

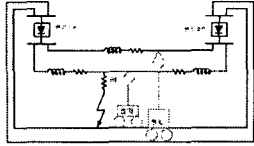


그림 5. 모델계통

새로운 고장판단 알고리즘을 검증하기 위하여 그림 5와 같은 복선 급전시스템일 때 상선과 하선에 부하가 있고 하선에서 고장이 발생한 경우를 모의하였다. 고장판단 결과는 표1과 같이 고장 거리에 관계없이 새로운 고장판단 알고리즘은 모든 고장에 대하여 고장발생 후 27[ms]에서 고장으로 판단하였고 고장판단 시간은 기존의 고장선택장치(고장판단시간은 약 55[ms])에 비해서 약 28[ms] 정도 빠르게 판단하였다.

표1. 상선 및 하선에 부하가 있는 복선급전계통에서의 고장판단 시간

고장거리	시정수	고장판단 시간
0.01[km]	26.36[ms]	27[ms]
1.00[km]	30.79[ms]	27[ms]
1.50[km]	32.73[ms]	27[ms]
2.40[km]	34.16[ms]	27[ms]

2.3 급전계통 모델링

직류철도 급전계통 구성 및 모델링은 MATLAB에서 제공되는 전력계통 시뮬레이션 tool인 PSB(Power System Blockset)를 사용하였다.[3]

2.3.1 Chopper 기동방식 전기철도차량 모델링

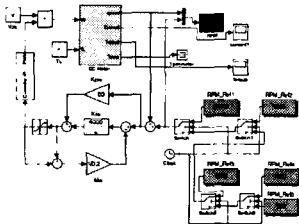


그림 6. Chopper 제어 회로

Chopper 제어 회로를 이용한 속도제어 차량은 그림 6과 같은 제어 회로로 구성하였으며, 전동차의 기동시 가변 속도 특성을 얻기 위해 전동기의 속도를 500rpm 단위로 증가 시켰다.

2.3.2 저항 기동방식 전기철도차량 모델링

전기철도차량의 용량은 1[MW]로 하였으며 전기철도 차량 전단에는 전차부하의 기동전류의 특성을 얻기 위하여 그림7과 같이 4개의 저항 가변저항으로 직류전동기의 기동 부하전류의 특성이 나오도록 하였다.

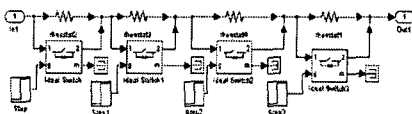


그림 7. PSB를 이용한 가변저항 전기철도 차량 모델링

2.3.3 변전소와 급전선 및 레일 모델링

정류 방식은 이중 3상 전파 브리지 방식의 12펄스 방식을 사용했는데 12펄스 정류기는 6펄스 정류기를 직렬로 연결함으로써 모의하였다. 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(5)에 의거하여 1158.7[V]로 하였다.

$$V_{o,dc} = \frac{P}{\pi} V_{LL,\beta} \sin\left(\frac{\pi}{P}\right) \quad (5)$$

여기서,

$V_{o,dc}$: 정류기 출력직류전압

P : 정류기 펄스 수

$V_{LL,\beta}$: 교류입력 선간전압의 최대값

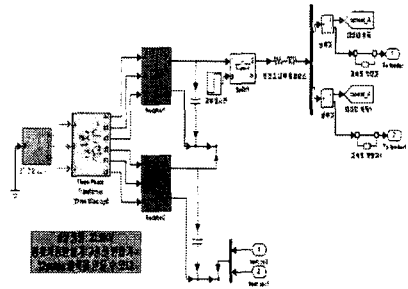


그림 8. PSB를 이용한 변전소 모델링

3. 결 론

최소자승법을 사용하여 입력전류의 시정수를 구한 후 그 크기로써 고장을 판별하는 직류철도계통에서의 새로운 고장판단 알고리즘은 기존의 ΔI 방법이나 di/dt 방법보다 약 28[ms]정도 빠르게 고장을 판별하였으며, 열차의 기동시 나타나는 부하 전류의 특성에 영향을 받지 않고 기존의 보호 시스템과 함께 직류철도 급전계통에서 단락고장이나 지락고장시 고장을 보다 빨리 검출하여 고장시간을 최소화하고 신속한 복구를 하는데 기여할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 한국철도기술연구원의 지원에 의하여 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] 오광해, "도시철도 급전시스템 표준화연구", 도시철도표준화 Kickoff Meeting, 2001
- [2] 정상기, "전기철도 DC 급전계통 보호 및 협조", 한국전기철도, 30호, pp.78-83, 2001
- [3] MATHWORKS, Power System Blockset User's Guide Version 2, 2001