

DC철도 급전계통 보호시스템 구성

권영진, 강상희
명지대학교 차세대전력기술연구센터

오광해
철도기술연구원

이재경, 이명희
(주)젤파워

A Protection Scheme for DC Railway Systems

Y.J Kwon, S.H Kang,
NPTC Mowngii University

K.H Oh
KRRI

J.K Lee, M.H Lee
Kelpower

Abstract - 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 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 load starting current, the time constant of load current at 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. Secondly, to compose a protection scheme for DC railway systems is presented in this paper.

1. 서 론

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 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 부하전류와 고장전류의 시정수를 이용한 새로운 고장판단 알고리즘을 제안하고 기존방식인 ΔI 형 고장선택장치(50F) 및 그 외 부가적인 보호방식들을 구현하고 그 성능을 검증하였다.

2. 본 론

2.1 직류철도급전시스템 보호

2.1.1 직류철도급전시스템 보호방식

직류철도급전 시스템에서는 아크, 단락 등의 고장으로 부터 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 회로

에 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.

직류철도급전시스템에서 부하전류의 크기가 원거리 단락고장전류에 근접하여 교류계통과 같은 보호방식의 사용이 어렵기 때문에 ΔI 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 단락고장이라도 고장으로부터 근거리에 있는 B변전소의 54F가 고장을 먼저 인식하여 작동하면 마주보는 A변전소의 54F가 이 장치에 의해 연락 작동하므로 고장구간은 양쪽 변전소에서 완전히 차단된다.[1]

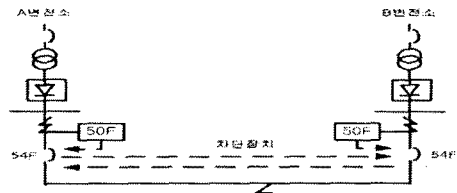


그림 1. 직류철도 급전시스템 보호방식

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 의해 그 크기가 결정되어지고 근거리 고장 전류는 변전소 등가 임피던스에 의해서 고장전류의 크기가 결정되어진다고 볼 수 있다. 그런데 문제는 변전소로부터 멀리 떨어진 원거리 고장전류나 고저항 지락고장전류의 크기가 전기철도 차량의 기동전류의 최대 크기보다 작을 수 있다는 데 있다.

ΔI 형 고장선택장치는 극히 짧은 시간 내(Δt)에 회로의 전류증가분(ΔI)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. 저역통과 필터링을 거친 전류의 기울기를 측정하여 기울기가 초기기울기 이상으로 전류가 증가한다면 전류증가의 누

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

2.1.3 부가 보호요소

주보호방식으로 쓰이는 50F, 54F, 연락차단 장치 이외에 보호의 신뢰성을 확보하기 위해서 직류 순시 과전류, 직류 한시 과전류, 직류 부족전압 및 열적 보호와 정류기에 고장이 발생하였을 때 정류기 쪽으로 흘러들어가는 역전류를 감지하여 정류기를 보호하는 역전류 계전 방식 등을 사용하고 있다. 본 논문에서는 이와 같은 부가 보호요소를 구현하여 그 성능을 검증하였다.

2.2 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 단락 등의 고장이 급전시스템에 발생한 경우에 변전소 급전회로에 흐르는 고장 전류는 고장의 종류, 고장점의 상태에 따라 다르지만 여러 가지 고장을 상정하여 실시된 시뮬레이션 결과 고장 전류의 파형은 고장점을 포함한 종합 회로정수(R, L)에 따라 결정되는 것으로 확인되었다. 그림2는 이와 같은 부하전류와 고장전류의 특성을 모의한 예이다.

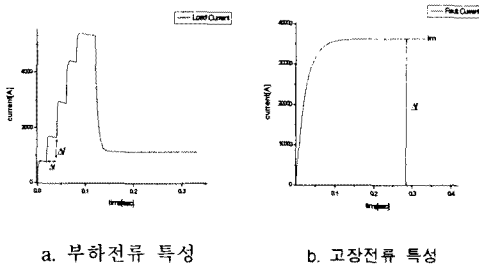


그림 2. 부하전류와 고장전류의 특성

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

2.2.2 최소자승법을 이용한 전류신호 시정수계산

그림2에서처럼 부하전류는 최대치가 되기까지 여러 단계를 거치기 때문에 각 단계별 ΔI 의 시정수는 고장전류 ΔI 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 이상의 성분을 무시하고 전개하여 식(1)에 대입하고 시간 t에 대한 방정식을 세우면 식(2)와 같다.

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

여기서,

$$K_1, K_1 K_2, \frac{K_1 K_2}{\tau}, \frac{K_1 K_2}{\tau^2} : \text{직류 크기}$$

$$K_3 \cos \theta_1, K_3 \sin \theta_1 : \text{기본파의 크기}$$

$$K_1 \cos \theta_2, K_1 \sin \theta_2 : \text{2조파의 크기}$$

$$K_5 \cos \theta_3, K_5 \sin \theta_3 : \text{3조파의 크기}$$

$$K_6 \cos \theta_4, K_6 \sin \theta_4 : \text{4조파의 크기}$$

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.

$$A \times X = S \quad (3)$$

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

여기서,

A: 기지수 행렬, X: 미지수 행렬, C: 샘플링 데이터

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

$$X = A^* S \quad (4)$$

$$A^* = [A^T A]^{-1} [A^T]$$

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 초기기울기는 전압을 인덕턴스로 나눈 값인

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

이므로 안전율 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 안전율 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 복선병렬급전계통에서 부하전류와 고장전류의 거리별(0.01, 1, 1.5, 2.4[km]) 시정수를 구한 결과 그림 3.4에서처럼 부하전류와 고장전류의 시정수는 매우 큰 차이를 나타내고 각각의 시정수는 거리에 비례하여 증가하는 현상을 나타내었다.

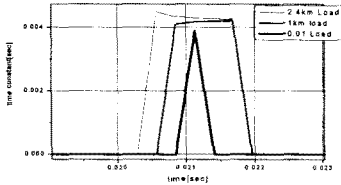


그림 3. 부하전류의 시정수 확대

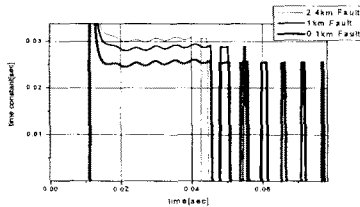


그림 4. 고장전류의 시정수

2.2.5 고장판단

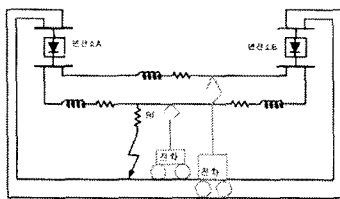


그림 5. 모델계통

새로운 고장판단 알고리즘과 기존 고장판단 방법을 검증하기 위하여 그림 5와 같은 모델계통에서 단선급전 시스템일 때 부하가 있는 경우에서의 고장, 그리고 복선급전시스템일 때 상선과 하선에 부하가 있고 하선에서 고장이 발생한 경우를 모의하였다. 고장판단 결과는 표 1.2와 같이 고장거리에 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. 아울러 그림 6.7은 부족전압 계전기와 순시 과전류 계전기와 한시 과전류 계전기의

동작결과를 나타내었다.

표1. 부하가 있는 단선급전계통에서의 고장판단 시간

고장거리	시정수	50F	시정수를 이용한 방법
0.01[km]	26.39[ms]	55[ms]	27[ms]
1.00[km]	30.86[ms]	55[ms]	27[ms]
1.50[km]	32.75[ms]	55[ms]	27[ms]
2.40[km]	34.96[ms]	55[ms]	27[ms]

표2. 상선 및 하선에 부하가 있는 복선급전계통에서의 고장판단 시간

고장거리	시정수	50F	시정수를 이용한 방법
0.01[km]	26.36[ms]	55[ms]	27[ms]
1.00[km]	30.79[ms]	55[ms]	27[ms]
1.50[km]	32.73[ms]	55[ms]	27[ms]
2.40[km]	34.16[ms]	55[ms]	27[ms]

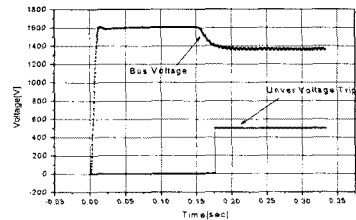


그림 6. 부족전압 계전기 동작결과

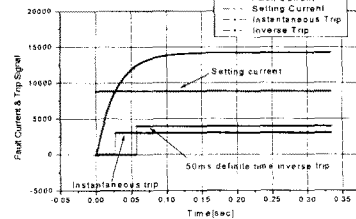


그림 7. 과전류 계전기 동작결과

2.3 급전계통 모델링

직류철도 급전계통 구성 및 모델링은 MATLAB에서 제공되는 전력계통 시뮬레이션 tool인 PSB(Power System Blockset)를 사용하였다.[4]

2.3.1 변전소와 급전선 및 레일 모델링

변전소는 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 그림 8에서처럼 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. 그림 15에서처럼 $Y_a - Y - A$ 결선의 3권선 변압기를 사용하면 2차측($Y - A$)은 각각 30° 의 위상차가 나므로 각 2차측에 연결된 6펄스 정류기를 통하면 12펄스의 출력을 갖는 정류기를 모델링 할 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.

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

여기서,

- $V_{o,dc}$: 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.

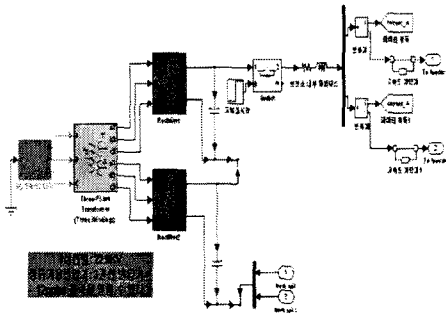


그림 8. PSB를 이용한 변전소 모델링

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

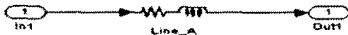


그림 9. PSB를 이용한 전차선 및 레일의 모델링

2.3.2 전기철도차량 모델링

전기철도차량의 용량은 1[MW]로 하였으며 전기철도차량 전단에는 전차부하의 기동전류의 특성을 얻기 위하여 그림10과 같이 4개의 저항에 각각 스위치를 연결시켜 가변저항을 만들어 부하전류의 기동특성이 나오도록 하였다.

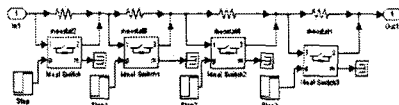


그림 10. PSB를 이용한 가변저항 전기철도 차량 모델링

3. 결 론

최소자승법을 사용하여 입력전류의 시정수를 구한 후 그 크기로써 고장을 판별하는 직류철도계통에서의 새로운 고장판단 알고리즘은 기존의 ΔI방법이나 di/dt방법보다 약 28[ms]정도 빠르게 고장을 판별하였으며, 기존의 보호 시스템과 함께 직류철도 급전계통에서 단락고장이나 지락고장시 고장을 보다 빨리 검출하여 고장시간을 최소화하고 신속한 복구를 하는데 기여할 것으로 사료된다.

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", 도시철도표준화 Kickoff Meeting, 2001
- [2] 정상기, "전기철도 DC 급전계통 보호 및 협조", 한국전기철도, 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] MATHWORKS, Power System Blockset User's Guide Version 2, 2001