

직류철도 급전계통 고장점표정

양언필, 강상희, 이승재, 최면송
명지대학교

A Fault Location Algorithm for on DC Railway Systems

Eon-Phil Yang, Sang-Hee Kang, Seung-Jae Lee, Myeon-Song Choi
Myongji Univ.

Abstract - If a fault occurs in the DC railway system, it is important to find fault location and to remove it immediately for prompt repair. The aim of the present paper is to locate the position of the fault by using Kirchhoff's voltage law(KVL). The DC railway system is simulated using Power System Blockset(PSB) in Matlab Toolbox.

1. 서 론

급전회로에 단락사고 등이 발생했을 경우에는 사고전류를 신속히 검출하고 사고의 확대를 방지하여 전기차와 설비를 보호해야 하므로 보호장치를 설치해야한다. 이에 따라 개발된 고장선택계전기가 직류·교류의 구간에 넓게 사용되어지고 있다[1].

급전계통에서 사고는 기본적으로 두 종류로 나눌 수 있다. 변전소 근방에서 사고가 일어나는 경우와 변전소에서 멀리 떨어진 곳에서 사고가 일어나는 경우로 나눌 수 있다[2]. 부하 차량의 기동 전류는 원거리 사고 전류보다 클 경우가 있으므로 원거리 사고 전류를 부하전류로부터 구별하는 것이 중요하다. 이 방법 중 한가지 방법이 전류 변화비(di/dt)를 이용한 고장선택계전기(50F)이다[3]. 직류 급전구간이 교류 급전계통보다 비교적 짧고 고장선택계전기에 의하여 근거리 또는 원거리 정도의 고장 거리를 판별함에 따라 직류철도 급전계통에 고장점표정 장치는 아직 사용되어지지 않고 있다. 그러나 고장 발생 후 정전시간을 최소화하기 위해서는 고장 발생 지점을 정확히 계산하고 사고구간을 신속히 보수해야 하므로 직류철도 급전계통에서도 고장점표정장치를 설치하여야 할 필요가 있다.

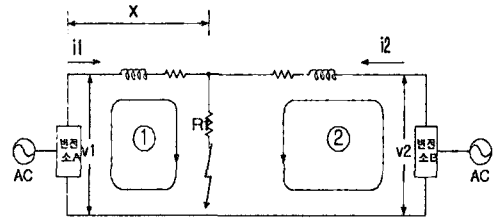
본 논문에서는 변전소 양단에서 취득한 전압, 전류를 이용하여 키르히호프 전압법칙에 근거한 고장점표정 알고리즘을 제안하였다. 직류철도 급전계통을 모의하기 위해 변전소, 급전선, 철도부하를 Matlab Toolbox중 하나인 Power System Blockset(PSB)을 사용하여 모의하였다.

2. 직류급전계통에서의 고장점표정

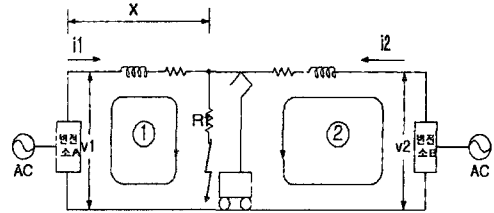
2.1 직류급전계통 모의

직류급전계통의 사고모의는 전철부하가 없는 단선병렬 급전계통(그림_1)에서의 단락사고와 전철부하가 있는 단선병렬급전계통(그림_2)에서의 단락사고, 그리고 상선 및 하선에 부하가 있는 복선 병렬급전계통(그림_3)에서의 단락사고를 Power System Blockset을 사용하여 모의하였다.

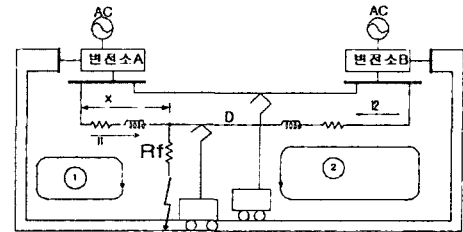
2.1.1 단선급전과 복선급전



그림_1. 부하가 없는 단선급전계통에서의 단락사고



그림_2. 부하가 있는 단선급전계통에서의 단락사고



그림_3. 상선 및 하선에 부하가 있는 복선 병렬급전계통에서의 단락사고

- x : A변전소에서 사고지점까지의 거리(pu)
- v_1, i_1 : 변전소 A의 계전점에서 측정된 전압, 전류
- v_2, i_2 : 변전소 B의 계전점에서 측정된 전압, 전류
- R : 단위 길이당 전차선 저항
- L : 단위 길이당 전차선 인덕턴스
- R_f : 고장저항

2.1.2 변전소 모델링

교류를 직류로 변환하는 정류방식은 3상 전파 브리지 방식의 6펄스 방식을 사용하였고 2차측(직류측) 직류 정극 모선에서는 전압변동률 0.8%를 고려하여 1620V의 직류전압을 얻게 하였다. 교류입력 전압은 식(1)에 의거하여 1158.7V로 하였다.

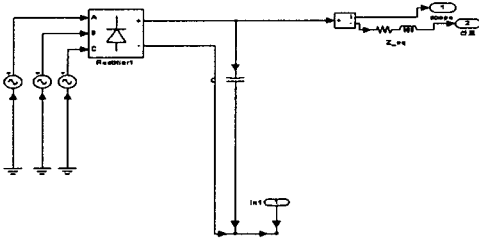
$$V_{o,dc} = \frac{P}{\pi} V_{LL,\beta} \sin\left(\frac{\pi}{P}\right) \quad (1)$$

여기서 $V_{o,dc}$: 변전소 출력직류전압

P : 정류기 펄스 수

$V_{LL,\beta}$: 교류입력 선간전압의 최대값

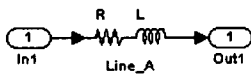
변전소 모델링의 구체적인 사항은 다음과 같다. 정류기는 유니버설 브릿지 정류기를 사용하였고 교류입력 측에는 단상 교류전압원 3개를 각각 120도의 위상 차를 두어 3상 교류입력부를 만들었다. 또한 직류출력단에는 맥동분을 제거하기 위하여 평활필터를 설치했으며 내부저항 $0.05[\Omega]$, 내부 인덕턴스 $1.1[mH]$ 인 정류기 내부 임피던스를 연결하였다.



그림_4. PSB를 사용한 변전소 모델링

2.1.3 급전선 모델링

급전선의 선로정수는 단위 길이를 입력하면 그 거리에 따른 전차선의 저항, 인덕턴스가 계산되어지게 하였다.



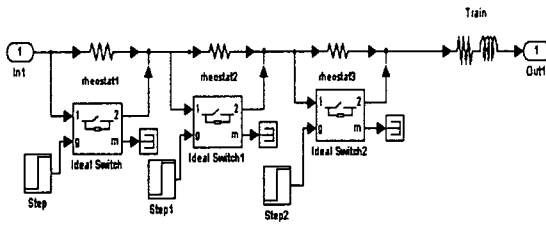
그림_5. PSB를 사용한 선로정수 모델링

전차선의 저항 $R=0.035[\Omega/km]$

전차선의 인덕턴스 $L=1.1[mH/km]$

2.1.4 전차부하 모델링

전차부하의 용량은 $1[MW]$ 로 하였으며 전차부하(Train) 전단에 3개의 저항을 각각 스위치를 연결시킴으로써 가변전항을 만들어서 부하전류의 특성곡선이 나오도록 하였다.

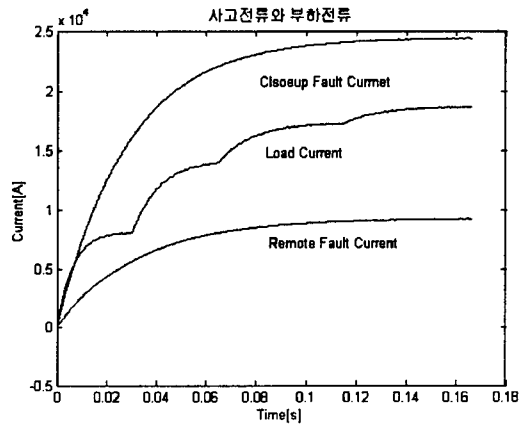


그림_6. PSB를 사용한 전차부하 모델링

2.2 고장선택계전기(50F)

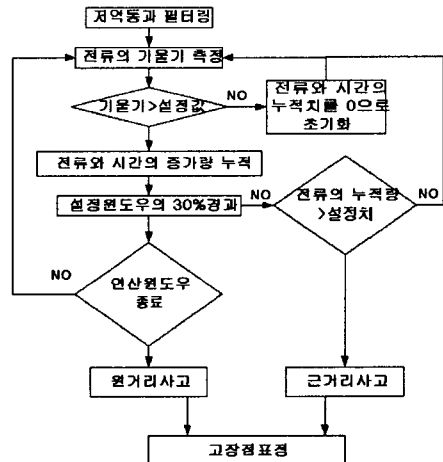
급전계통에서 사고는 기본적으로 두 종류로 나눌 수 있다. 변전소 근방에서 사고가 일어나는 경우와 변전소에서 멀리 떨어진 곳에서 사고가 일어나는 경우로 나눌 수 있다. 원거리 사고전류는 변전소의 등가 임피던스와 레일의 임피던스에 의하여 그 크기가 결정되어진다. 근거리 사고 전류는 변전소 등가 임피던스에 의해서 결정되어진다. 그런데 문제는 그림_7에서처럼 보여지는 것과 같이 변전소로부터의 원거리 사고전류가 부하 차량의 기

동전류보다 작을 수 있다는데 있다. 비록 원거리 사고전류의 크기가 부하 차량의 기동전류의 크기보다 작지만 그림_7에서 보여지는 것과 같이 원거리 사고 전류는 시간에 대한 전류의 변화가 꾸준히 지속되고 부하 차량의 기동전류는 항상 증감변동하고 있다. 고장선택계전기는 이 현상을 이용하여 전류 기울기를 측정하여 사고를 판단한다. 고장선택계전기의 프로그램 흐름은 다음과 같다.[4] 저역통과 필터링을 거친 전류의 초기 기울기를 측정하여 초기 기울기가 설정값 이상으로 전류가 증가한다면 전류증가량의 누적치와 시간의 누적치를 계산한다. 전류의 기울기(di/dt)가 설정기울기 아래로 내려가면 전류와 시간의 누적치를 0으로 초기화 시키고 다시 초기 기울기를 측정한다. 전류증가량의 누적치의 합이 고장선택계전기 연산원도우의 30%이내에서 설정값 이상으로 증가하였다면 근거리 사고로 판정한다. 고장선택계전기 연산원도우가 다 끝날때까지 전류의 기울기(di/dt)가 계속 설정기울기 이상으로 증가하였다면 원거리 사고로 판정한다. 부하전류의 경우는 초기 기울기가 설정초기 기울기 이상으로 증가하였지만 단계별로 증가하기 때문에(도중에 설정기울기 밑으로 내려가기 때문에) 사고로 판정하지 않는다. 이렇게 고장선택계전기가 근거리 사고, 원거리 사고를 판단한 후 고장거리를 계산하게 된다. 고장선택계전기와 고장점표정 알고리즘은 그림_8과 같다.



그림_7. 사고전류와 부하전류

2.2.1 고장선택과 고장점표정 흐름도



그림_8. 고장선택과 고장점표정 알고리즘 흐름도

2.3 고장점표정 방식

그림_1, 그림_2, 그림_3의 계통에서 변전소A에서 취득한 전류를 사용하여 고장선택계전기에 의해서 사고로 판정되면 변전소 양단의 전압과 급전선에 흐르는 사고전류 데이터를 사용하여 키르히호프 전압법칙에 의거하여 고장거리를 산출 한다.

2.3.1 고장점표정 알고리즘

그림_1에서 단락회로를 루프방정식으로 계산한다. 루프①에서는 회로방정식이 식(2)와 같이 표현된다.

$$v_1 = xL \frac{di_1}{dt} + xR i_1 + R_f(i_1 + i_2) \quad (2)$$

루프②에서는 회로방정식이 식(3)과 같이 표현된다.

$$v_2 = (1-x)L \frac{di_2}{dt} + (1-x)R i_2 + R_f(i_1 + i_2) \quad (3)$$

식(2)에서 식(3)를 빼주면 식(4)와같이 고장저항(R_f)이 계산 과정에서 사라지게된다.

$$v_1 - v_2 = xL \frac{di_1}{dt} + L \frac{di_2}{dt} + R i_1 + R i_2 - (L \frac{di_2}{dt} + R i_2) \quad (4)$$

A변전소에서 사고지점까지의 거리 x 에 관하여 정리하면 식(5)와 같이 표현된다.

$$x = \frac{v_1 - v_2 + (L \frac{di_2}{dt} + R i_2)}{L(\frac{di_1}{dt} + \frac{di_2}{dt}) + R(i_1 + i_2)} \quad (5)$$

2.4 사례연구

적용 모델계통은 단선급전계통(그림_1 및 그림_2)과 복선급전계통(그림_2)이며 부하의 영향까지 고려하였다. 양 변전소 급전구간은 5[km]이며 단선급전계통의 경우 고장위치를 A 변전소로부터 0.5[km], 1.5[km], 2.5[km], 3.5[km], 4.5[km]로 하고 복선 급전계통의 경우는 급전구간은 단선급전계통과 같으며 고장점 뒤 1[km]에 부하차량이 있는 것으로 하였다.

2.4.1 부하가 없는 단선급전계통에서의 단락사고

그림_1의 계통에서 각 거리별로 사고를 모의하고 고장 거리를 판별한 결과는 아래 표_1 같이 최대오차가 0.2% 이내인 비교적 정확한 고장거리를 얻을 수 있었다.

표_1. 부하가 없는 단선병렬급전에서의 고장점표정 오차

실제거리(km)	계산거리(km)	오차(%)
0.5	0.501	0.20
1.5	1.501	0.07
2.5	2.501	0.04
3.5	3.501	0.03
4.5	4.50	0.09

2.4.2 부하가 있는 단선급전계통에서의 단락사고

그림_2의 계통에서 각 거리별로 사고를 모의하고 고장 거리를 판별한 결과는 아래 표_2와 같이 최대오차가 1% 이내인 비교적 정확한 고장거리를 얻을 수 있었다.

표_2. 부하가 있는 단선병렬급전에서의 고장점표정 오차

실제거리(km)	계산거리(km)	오차(%)
0.5	0.505	1.00
1.5	1.503	0.20
2.5	2.507	0.28
3.5	3.509	0.26

2.4.3 상선 및 하선에 부하가 있는 상태에서 하선에 단락사고가 일어난 복선 병렬급전계통

그림_3의 계통에서처럼 상선에는 부하 차량이 있고 하선에서 부하차량 1[km]앞에서 각 거리별로 사고를 모의하고 고장거리를 판별한 결과는 아래 표_3과 같이 최대 오차가 0.6%이내인 비교적 정확한 고장거리를 얻을 수 있었다.

표_3. 복선병렬급전계통에서의 고장점표정 오차

실제거리(km)	계산거리(km)	오차(%)
0.5	0.503	0.60
1.5	1.503	0.20
2.5	2.506	0.24
3.5	3.510	0.29

3. 결 론

본 논문에서는 직류급전계통에 적용할 수 있는 고장점 표정 알고리즘을 제시하였다.

직류철도급전계통에서 단락사고가 발생하였을 때 고장 선택계전 알고리즘에 의해서 사고 여부를 판단하였으며 사고 데이터를 사용하여 키르히호프 전압법칙에 의거한 정확한 고장점표정 알고리즘을 제안하였다. 또한 고장저항을 계산과정에서 제거시킴으로써 고장저항의 영향을 배제 시켰다.

단락사고가 일어난 급전구간에 열차가 있을 경우 최대 1%의 오차율을 보였고 열차가 없을 경우에는 최대 0.2%의 오차율을 보였다.

본 논문에서 제시한 고장점표정 알고리즘은 직류철도 급전계통에서 단락사고나 지락사고시 고장점을 신속히 검출하여 고장시간을 최소화하고 신속한 복구를 하는데 기여할 것이다.

[참 고 문 헌]

- [1] "き電回路保護システム", 鉄道電化協會
- [2] R D White, "DC railway electrification supply system and protection", The Institution of Electrical Engineers, pp.D2-1~D2-14, 1999
- [3] C.S.Chang, T.Feng, A.M.Khambadkone and S.Kumer, "Remote short-circuit determination in DC railway systems using wavelet transform", IEE Proc.-Electr.Power Appl, Vol 147, No.6, pp.520~526, 2000
- [4] 정삼기, "전기철도 DC 급전계통 보호 및 협조", 한국철도기술, 통권30호, pp.78~83, July 2001
- [5] J.C.Brown, Ph.D, "Calculation of remote short circuit fault current for DC railways", IEE Proc.-B, Vol.139, No.4, July 1992