

지하철 직류보호계전시스템의 동작특성에 관한 연구

A Study on Operational Characteristics of DC protective relay systems on the Subway

정현기* 정종진** 안태풍***
Jung, Hyun-Ki Jung, Jong-Jin An, Tae-Pung

ABSTRACT

The DC over current relay(76i) and the DC under voltage relay(mid-point relay, 80A) used mainly with DC protective relay system of DC electric railway in Korea, But the DC fault selective relay(50F) is applying to recently mainly. In this study, simulation to compare 76i/80A and 50F in the methods of protection and the operational characteristics were executed through verifying a calculation of short circuit current and using PSCAD/EMTDC transition program. As a result of this study, it was proved that while 80A runs in relation to the scale of fault resistance, 50F runs regardless of the scale of fault resistance or the length of rail.

국문요약

지하철에서는 직류보호계전시스템으로 정한시과전류계전기(76i)와 저전압계전기(Mid-point Relay, 80A)를 사용하여 직류급전계통을 보호하고 있었으나, 최근에는 보호방식으로 고장선택계전기(50F)를 주로 적용하고 있다. 본 연구에서는 현재 서울메트로 3·4호선에 적용하여 사용하고 있는 76i/80A와 50F 각각의 직류급전계통 보호방식을 비교하기 위해 단락고장계산식을 이용하여 분석하였으며 PSCAD/EMTDC 과도프로그램을 통한 시뮬레이션으로 연구하였다. 분석한 결과 80A는 고장저항의 크기에 따라 동작여부가 달라지고, 50F의 경우 고장저항의 크기나 선로의 길이가 변하더라도 일정시간이 지나면 설정값에 따라 동작함을 확인하였다. 이에 향후 직류보호계전시스템의 운영에 있어 합리적인 적용을 제시하고자 한다.

1. 서 론

직류급전방식의 전기철도인 서울메트로 3호선과 4호선에는 직류계통 전차선로를 보호하기 위해 정한시과전류계전기(76i)와 직류저전압계전기(Mid-point Relay, 80A)를 적용하고 있다. 이러한 76i와 80A는 오래전부터 사용된 보호기기이나, 최근에는 보호방식으로 고장선택계전기(50F)를 주로 적용하고 있다.

정한시직류과전류계전기 76i는 정격전류를 상회하는 전류가 일정시간 동안 통전되는 것을 막기 위한 계전기이며, 직류저전압계전기 80A는 전압에 따라 동작하는 계전기로서 상·하선에 공히 설치하여 설정치 이하의 전압이 되면 양 변전소 해당선로의 급전차단기를 트립(Trip)시키는 방식의 계전기이다. 그리

고 고장선택계전기 50F는 미소시간(Δt)동안 회로전류 증가분(ΔI)이 설정치를 초과할 때 작동하는 계전기이다.

본 연구는 현재 서울메트로 3·4호선 현장에 적용하고 있는 76i/80A 및 50F에 의한 보호방식을 각각 비교하고, 그 동작특성을 복선병렬 급전선 단락고장 계산식과 PSCAD/EMTDC를 이용 분석하여 향후 직류 보호계전시스템 운영에 있어 합리적인 적용을 제시하고자 한다.

2. 본 론

2.1. 직류저전압계전기(Mid-point Relay, 80A)

2.1.1. 동작원리

변전소에서 멀리 떨어진 전차선로의 가선이 레일과 접촉하는 경우와 차량 내부에서 가선측이 차체와 접촉되는 경우에 전차선로가 끊어지는 고장이 발생할 수 있고 이러한 고장발생 시 변전소에서 76i(과전류계전기)나 64P(지락계전기)로 검출을 못 할 수도 있다.

이러한 상황을 대비해서 1개의 급전구간내 변전소와 변전소의 중간지점에 가선과 레일사이의 전압으로 동작되는 80A를 상·하선 설치하여 설정전압이하가 되면 양 변전소 해당선로의 급전차단기를 트립시키는 방식을 서울메트로 3·4호선에서는 사용하고 있다.

다음은 전류-거리 곡선에 대한 공식이다.

$$I_{MP} = \frac{2(V_s - V_{UV})}{R_s + \frac{\rho \ell'}{2}} \quad : \text{ 거리에 따른 Mid-Point 전류}$$

$$I_{STC} = \frac{2(V_s - 0.6 V_s)}{R_s + \frac{\rho \times \ell'}{2}} \quad : \text{ 최대 기동전류}$$

최대 기동전류(I_{STC})는 전차가 선로에서 기동시 전기차에 설치된 저전압계전기가 동작되지 않도록 하는 최대 부하전류이며 이때의 전압은 급전전압(V_s)에 40%로 설정한다.

$V_s=600[V]$: 급전전압

$R_s=0.01[\Omega]$: 전원 내부 저항

$\rho=0.0275\Omega/\text{km}$: 선로 저항

$V_{UV}=0.5 \times V_s=300[V]$: 단락점 아크전압

그림1은 80A 설치 계통도이다. 그림2는 위 공식을 이용하여 계산한 전류 곡선으로서 위에 위치한 곡선이 I_{MP} 를 가리키며, 아래 곡선이 I_{STC} 를 가리킨다. 거리는 서울메트로 3·4호선의 변전소과 변전소의 거리가 5[km] 이상인 지점이 없어 5[km]로 계산하였다.

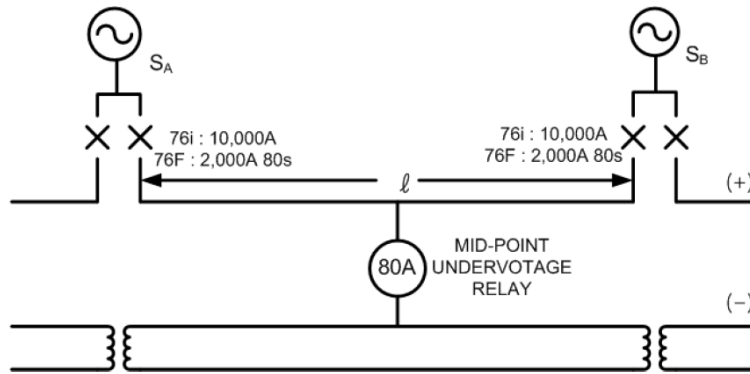


그림1 Midpoint Relay 80A 설치 계통도

그림2는 직류전기철도의 급전전압을 600[V]로 계산한 고장전류 값으로 이를 분석하면 단전원 급전일 경우에 76i(직류고속차단기에 있는 과전류계전기)의 고장전류 설정치가 10[kA]이면 선로길이 3.6km이내 사고는 76i가 고장을 차단하게 되나 그 이후로부터는 76F(정환시계전기)/80A(저전압계전기)가 고장전류를 검출하여 고장을 차단한다.

병렬 급전일 경우에는 양 변전소에 설치된 76i에 의해 5km이내의 모든 구간에서 고장이 차단됨을 볼 수 있다.

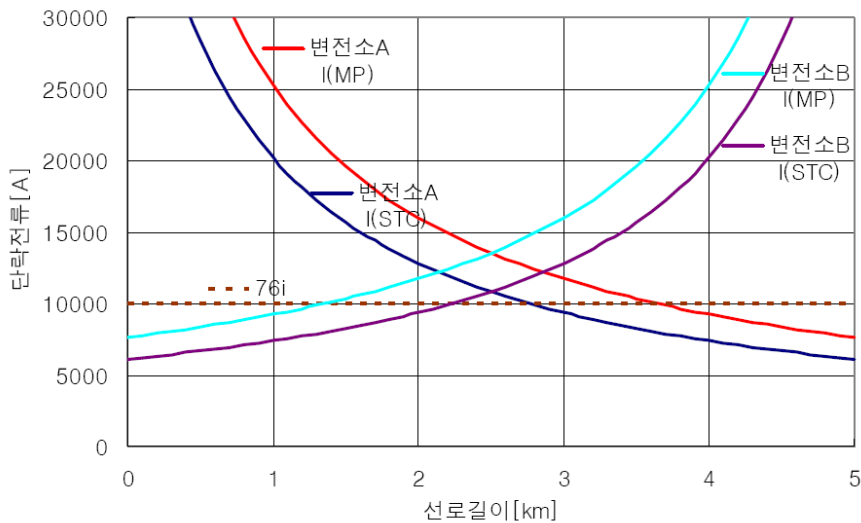


그림2 Mid-point Current Curves

결과적으로 600[V] 병렬 급전시스템에서는 80A는 선로길이가 5[km] 이상인 선로에 설치해야 의미가 있다. 그러나 고장전압(Arc Voltage)이 커질 경우에는 고장전류가 작아져서 76i가 동작하지 않는 경우에는 76F가 일정시간 지연 후 고장을 차단한다. 80A 검출감도를 좋게 하기 위해 설정값을 높게 할 경우 I_{MP} 곡선이 그림2의 I_{STC} 곡선 아래로 내려가게 되어 기동부하에 오동작하게 된다.

따라서 80A를 사용하고자 하는 경우는 선로길이가 5[km] 이상 되는 곳에 사용해야 한다. 그리고 1,500[V] 급전시스템인 경우에는 600[V] 시스템에 비해 고장전류가 상당히 크므로 80A의 동작특성이 더욱더 감소될 것이다.

2.2. 고장선택계전기(50F)

2.2.1. 급전전류의 특성

변전소 급전계통의 전류계의 최대지시가 3,000[A]이었다고 하면, 공급전류는 0~3,000[A]가 될 때까지 작은 전류 폭으로 몇 단계로 증가 또는 감소를 되풀이 한다. 공급전류 ΔI 의 최대치는 그 구간을 운행하는 전기차의 종류·편성·운행상황의 변화에 의해서 시시각각 변하기 때문에 이것을 계산하는 것은 매우 어렵다. 그러므로 “직류 급전전류 분석장치”를 사용하여 일정기간 동안 급전선로에 설치하여 ΔI 의 값을 측정해야 한다.

ΔI 의 최대치와 급전전류(I)의 최대치 사이에는 대략 다음과 같은 관계가 성립된다.

$$\text{급전전류 } \Delta I(\max) = \text{급전전류 } I(\max) \times (0.3 \sim 0.5)$$

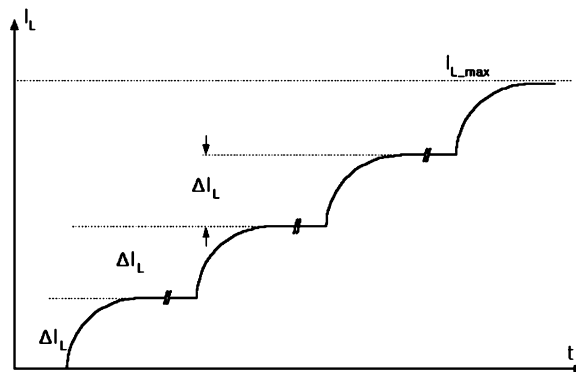


그림3 급전전류 특성곡선

2.2.2. 고장전류의 특성

아크 또는 단락 등의 고장이 전차선로에 발생한 경우, 변전소 계통에 흐르는 고장전류는 고장의 종류, 고장점의 상태에 따라서 다르지만 그 파형이 복잡한 형태로 나타나고 또한 원거리 고장일 경우 전류 값은 크게 달라진다.

그러나 아크 고장의 경우나 그렇지 않은 고장의 경우에도 고장전류 파형은 고장점을 포함한 종합 회로정수(RL 등)에 의해서 정해진다. 이러한 회로정수는 전차선로의 상황에 따라 계속 변하는 시변수 값이다.

2.2.3. 고장선택계전기의 원리

직류 급전회로에서 근거리 사고는 급격한 기울기를 가진 큰 전류로 나타나므로, 기울기와 전류의 변화량을 이용하여 고장 판별을 하는데 문제는 없다. 그러나 전차의 기동 부하는 전류의 변화량뿐만 아니라 기울기도 매우 큰 특성을 가지기 때문에 고장전류와 매우 유사한 특성을 갖게 된다.

또한 원거리에서 고장이 발생했을 경우 부하 전류보다 낮은 전류 변화량과 낮은 기울기 특성을 가질 수 있어 고장전류로 판단하기 매우 어려운 경우가 있다. 그러므로 고장선택계전기는 근거리 및 원거리 고장전류 판단하기 위하여 ΔI 와 di/dt 기능을 가지고 있다.

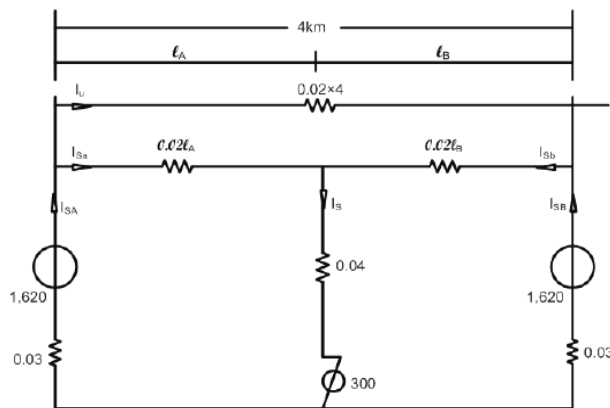
2.3. 복선병렬 급전회로의 단락고장 계산식 산출

단락전류의 ΔI 계산은 정상 값 계산이기 때문에 전기저항 회로의 정상전류 계산이 된다. 여기서는 급전전압 1,620[V], 변전소 등가 내부저항 0.03[Ω], 고장전압 300[V], 선로길이 4[km], 급전선 저항 0.02[Ω]로 하여 그림4의 등가회로를 이용하여 단락고장 계산식을 산출하고자 한다.

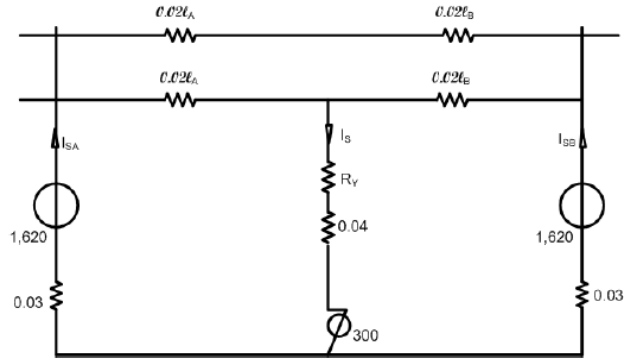
변전소 전압 특성 정수, 전차선로 회로 정수 등 급전회로 정수는 표1과 같다.

표1 변전소 전압 특성정수, 전차선로 회로정수

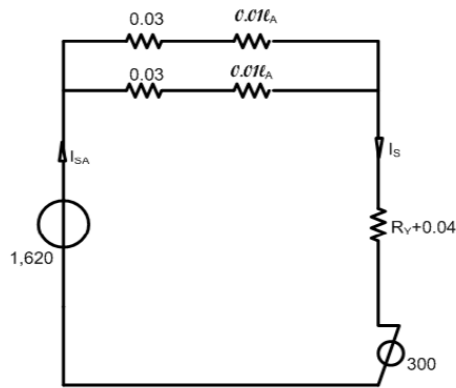
급전회로 정수	값
정류기의 전압 변동률(ε)	8%
정류기의 무부하 직류전압(E0)	1,620[V]
변전소 전압 변동률(ε0)	8%
변전소 등가무부하 직류전압(E00)	1,620[V]
변전소 등가 내부저항(r0)	0.03[Ω]
전차선로 저항(r)	0.02[Ω]
전차선로 공장	4[km]
단락점 아크 전압강하(ea)	300[V]
단락점 저항	(Rt) 0.04[Ω]



(a)



(b)



(c)

그림4 복선 병렬 등가회로

복선병렬 급전 회로도 위 그림4 계통도와 같으며 그림1(a)의 회로는 Δ -Y 변환에 의해 (b)가 된다. R_Y 는 그림5의 등가회로의 상·하선 계산을 용이하게 하기 위해 등가화한 것이다. 공식은 다음과 같이 산출 된다.

$$R_Y = \frac{0.02l_A \times 0.02l_B}{(0.02 \times 4) + 0.02l_A + 0.02l_B} = 0.002l_A l_B$$

$$I_S = \frac{343.2}{0.00092l_A l_B + 0.0713}$$

$$I_{SA} = \frac{1320(0.02l_B + 0.03)}{0.00092l_A l_B + 0.0173} = \frac{26.4l_B + 39.6}{0.00092l_A l_B + 0.0173}$$

$$I_{SB} = \frac{1320(0.02l_A + 0.03)}{0.00092l_A l_B + 0.0173} = \frac{26.4l_A + 39.6}{0.00092l_A l_B + 0.0173}$$

I_S : 단락점 전류 I_S 정상값

I_{SA} : 변전소 A에서 흐르는 단락전류 I_{SA} 의 정상값

I_{SB} : 변전소 B에서 흐르는 단락전류 I_{SB} 의 정상값

위에서 I_S , I_{SA} , I_{SB} 의 계산식으로 변전소 급전선에 설치되는 50F에서 감지하는 고장전류 값을 계산하기 위해 그림5의 회선 단락전류의 정상값 I_{Sa} , I_{Sb} , I_u 의 계산식을 산출한다.

$$I_{Sa} = \frac{0.5 \times (26.4l_B + 39.6)}{0.00092l_A l_B + 0.0173} + \frac{0.05l_B + 343.2}{0.00092l_A l_B + 0.0173}$$

$$= \frac{30.36l_B + 19.8}{0.00092l_A l_B + 0.0173}$$

$$I_{Sb} = \frac{30.36l_A - 19.8}{0.00092l_A l_B + 0.0173}$$

$$I_u = \frac{-3.96l_B + 19.8}{0.00092l_A l_B + 0.0173}$$

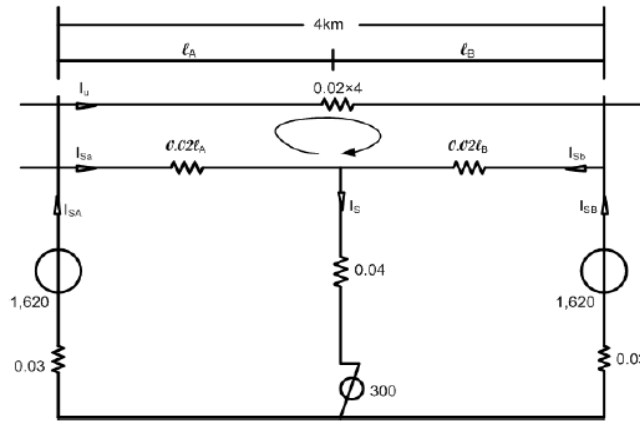


그림5 상하선 루프 회로

2.4. 단락전류의 ΔI 계산값과 그래프

각 지로(I_{Sa} , I_{Sb})에 흐르는 단락전류의 정상치(ΔI) 계산식을 사용하여 각각의 계산값과 그래프를 그려 보면, 전차선로 공장은 0~4[km]이며 급전회로 정수는 표1과 같다.

I_{Sa} 는 A변전소에서 전차선로에 공급하는 단락전류, I_{Sb} 는 B변전소에서 전차선로에 공급하는 단락전류, I_{SA} 는 A변전소에서 공급하는 단락전류, I_{SB} 는 B변전소에서 공급하는 고장전류, I_S 는 고장점에 흐르는 단락전류를 나타내며 l_a , l_b 는 변전소 A, B에 연계된 선로를 의미한다.

다음 표2와 그림6은 I_{Sa} (A변전소에서 전차선로에 공급하는 단락전류)와 I_{Sb} (B변전소에서 전차선로에 공급하는 단락전류)를 계산한 표와 그래프이다. 그림6의 그래프를 분석해 본 결과 76i의 설정치가 10[kA]로서 I_{Sa} 은 선로 길이 0~1[km]까지 I_{Sb} 는 선로 3~4[km]가 보호하며, 50F는 0.5~3.5[km]까지 보호할 수 있어 그 감도가 탁월하다고 할 수 있다.

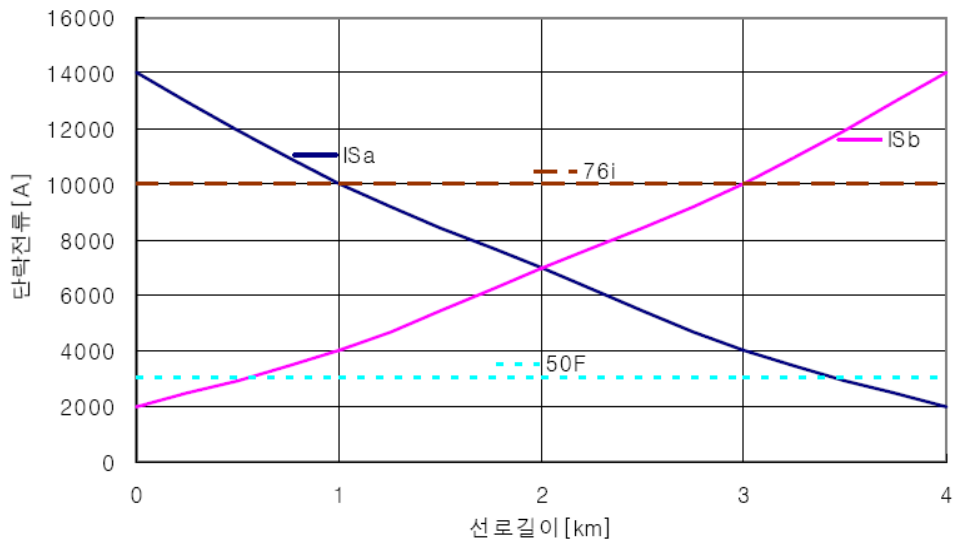


그림6 I_{Sa} , I_{Sb} 단락전류 그래프

표2 I_{Sa} , I_{Sb} 계산값

ℓ_a [km]	ℓ_b [km]	I_{Sa} [A]	I_{Sb} [A]
0	4	14000.181	2000.076
1	3	10000.045	4000.544
2	2	7000.001	7000.001
3	1	4000.544	10000.045
4	0	2000.076	14000.181

다음 표3과 그림7은 I_{SA} (A변전소에서 공급하는 단락전류)와 I_{SB} (B변전소에서 공급하는 고장전류)를 계산한 표와 그래프이다. 고장전류 값이 점차적으로 작아지는 그래프가 I_{SA} 이며 전류 값이 점차적으로 커지는 그래프가 I_{SB} 이다. I_{SA} 와 I_{SB} 그래프 분석결과 I_{SA} 는 선로길이가 증가 할수록 단락전류가 감소하며 I_{SB} 는 선로길이가 증가할수록 단락전류가 증가하는 것을 볼 수 있다.

표3 I_{SA} , I_{SB} 계산값

ℓ_a [km]	ℓ_b [km]	I_{SA} [A]	I_{SB} [A]
0	4	13000.305	4000.152
1	3	9000.153	5000.435
2	2	7000.011	7000.011
3	1	5000.435	9000.153
4	0	4000.152	13000.305

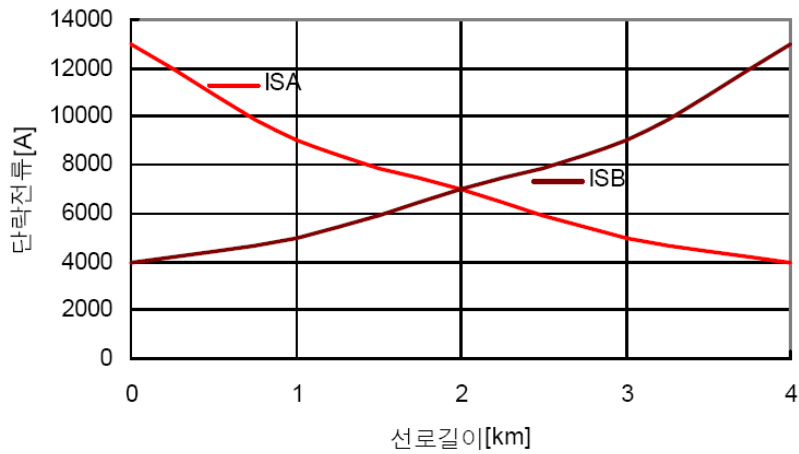
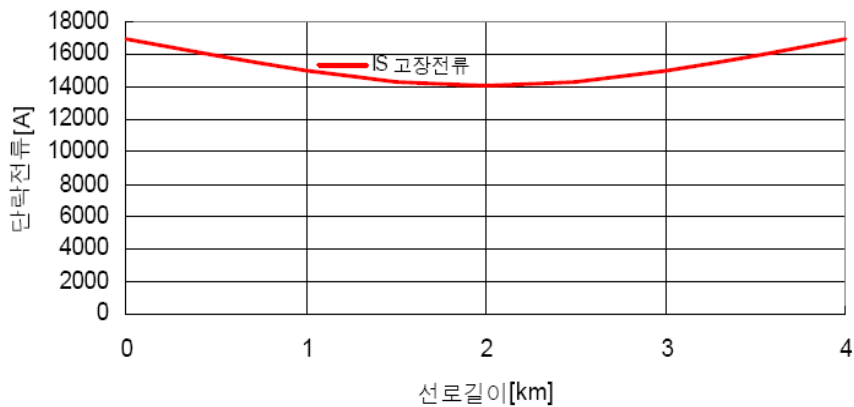


그림7 I_{SA} , I_{SB} 고장전류 그래프

다음 표4와 그림8은 I_s (고장점에 흐르는 단락전류)와 V_f (고장점 전압)을 계산한 표와 그래프이다. 그래프 분석 결과 I_s 는 선로 길이의 변화에 따라 단락전류가 감소하다가 다시 증가하는 것을 볼 수 있으며 V_f 고장점 전압 그래프를 분석한 결과, 80A는 0.6[km] 이전까지와 3.4[km]이후까지만 보호할 수 있다. 전압은 증가하다가 감소하는 현상을 볼 수 있다.

표4 고장점 전류, 전압 계산값

l_a [km]	l_b [km]	I_s [A]	V_f [V]
0	4	17000.457	880
1	3	15000	947
2	2	14000	972
3	1	15000	947
4	0	17000.457	880



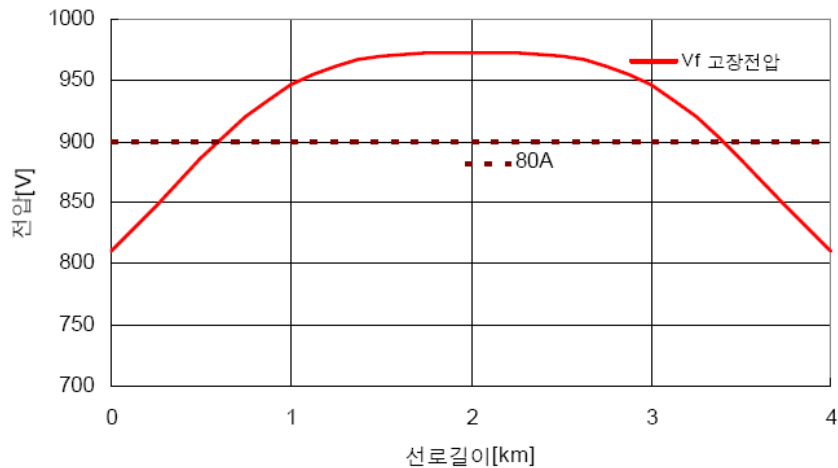


그림8 고장점 전류, 전압 그래프

2.5. 고장해석 시뮬레이션

지금까지는 50F와 Mid-point Relay 80A와의 동작특성을 단락전류 계산식으로 검증하였으나 이번에는 PSCAD/EMTDC를 사용하여 검증하고자 한다. 시뮬레이션에 사용된 시험급전계통은 2개의 급전변전소를 갖고 있으며 각 변전소 전압은 12[MVA] 1,500V DC 급전계통이다.

선로는 복선병렬 급전계통으로 모의하였으며 시뮬레이션은 각각의 경우에 대하여 선로거리 및 고장저항을 바꿔 가며 확인하였다. 시험급전계통에서 사용된 회로정수는 다음 표5와 같으며 고장은 선로의 중앙에서 발생한 것으로 모의하였다.

다음 시험급전계통에서 1a1은 A변전소에서 공급하는 고장전류를 측정하는 전류 1a2는 B변전소에서 공급하는 고장 전류, 1a는 고장점에서의 고장전류, V는 고장점 양단의 고장 전압을 측정한 것이다. 시뮬레이션은 선로 길이 4[km]인 Case1과 선로길이 5[km]인 Case2로 가정 하였으며 각각의 Case에 고장저항 (0.01[Ω], 0.05[Ω], 0.08[Ω], 0.1[Ω])을 변경하여 시뮬레이션 하였다.

표5 시험계통 회로정수

항 목	R [Ω]	L [mH]
1500 DC 모선 소스 임피던스	0.02	0.2
전차선/1km	0.02	1.5
레일/1km	0.017	-

2.5.1. Case 1 해석 결과 고찰

앞 절에서 기술한 급전계통 구성 형태와 기본 파라미터에 선로길이 및 고장저항을 변경하며 고장전류와 전압을 고찰하였다. 시뮬레이션 결과로서 80A와 50F의 동작 특성을 비교하였다. Case1의 선로 길이와 고장 저항은 다음의 표6과 같이 변경하여 모의 시험하였다.

표6 Case1 파라미터

선로길이	단락점 아크 전압강하	고장저항[Ω]
4km	300V	0.01
		0.05
		0.08
		0.1

2.5.1.1. 선로 길이 4[km], 단락점 아크 전압강하 300[V], 고장저항 0.01[Ω]

위 시험급전계통을 실제 선로라 하고, 또 고장발생 시간이 0.3[초], 고장저항이 0.01[Ω]이라 가정하고 모의한 결과, 다음 표7과 같은 시뮬레이션 결과를 얻을 수 있었다.

선로 중앙에서 고장발생시 고장전류는 20[kA]이고 고장발생 시점인 0.3[초]에서 80A가 감지하는 전압(V)을 분석한 결과, 전압이 1.887[kV]에서 0.421[kV]까지 전압강하가 발생됨을 확인할 수 있으며 이 경우 80A는 동작하게 된다.

같은 방법으로 50F가 감지하는 고장전류를 분석한 결과 고장발생 시점인 0.3[초]에서 0.01[초] 이후 고장 전류 ΔI가 4,577[A] 이상이 됨을 확인할 수 있어 50F의 동작 설정치를 3,000[A]라 가정하면 50F는 동작하게 된다.

표7 고장저항 0.01[Ω] 시뮬레이션 결과

계전기	동작 설정치	고장발생 전	고장발생 후	동작 여부
V(80A)	900[V]	1.887kV	500V	0
Ia1(50F)	3[kA]	0[A]	4.577kA	0

2.5.1.2. 선로 길이 4[km], 단락점 아크 전압강하 300[V], 고장저항 0.05[Ω]

다음 표8은 고장발생 시간이 0.3[초], 고장저항이 0.05[Ω]이라 가정하고 모의한 결과이다.

선로 중앙에서 고장발생 시 고장전류는 13[kA]이고 고장발생 시점인 0.3[초]에서 80A가 감지하는 전압(V)을 분석한 결과, 전압이 1.887[kV]에서 925[V]까지 전압강하가 발생됨을 확인할 수 있으며 이 경우 80A의 동작 전압이 900[V]인 경우에는 80A 계전기는 동작하게 된다.

같은 방법으로 50F가 감지하는 고장전류를 분석한 결과, 고장발생 시점인 0.3[초]에서 0.01[초] 이후에 50F 동작 고장전류 ΔI가 3,889[A] 이상이 됨을 확인할 수 있어 50F의 동작 설정치를 3,000[A]라 가정하면 50F는 동작하게 된다.

표8 고장저항 0.05[Ω] 시뮬레이션 결과

계전기	동작 설정치	고장발생 전	고장발생 후	동작 여부
V(80A)	900[V]	1.887kV	925V	0
1a1(50F)	3[kA]	0[A]	3.889 kA	0

2.5.1.3. 선로 길이 4[km], 단락점 아크 전압강하 300[V], 고장저항 0.08[Ω]

다음 표9는 고장발생 시간이 0.3[초], 고장저항이 0.08[Ω]이라 가정하고 모의한 결과이다. 선로 중앙에서 고장발생 시 고장전류는 9.882[kA]이고 고장발생 시점인 0.3[초]에서 80A가 감지하는 전압(V)을 분석한 결과, 전압이 1.887[kV]에서 1.087[kV]까지 전압강하가 발생됨을 확인할 수 있으며 이 경우 80A의 동작전압 설정치가 900[V]이라면 80A는 동작하지 않을 것이다.

그러나 선로 양단에 설치된 50F가 감지하는 고장전류를 분석한 결과, 고장발생 시점인 0.3[초]에서 0.01[초] 이후에는 50F 동작 고장전류 ΔI가 3,029[A] 이상이 됨을 확인할 수 있어 50F의 동작 설정치를 3,000[A]라 가정하면 50F는 동작하게 된다.

표9 고장저항 0.08[Ω]시뮬레이션 결과

계전기	동작 설정치	고장발생 전	고장발생 후	동작 여부
V(80A)	900[V]	1.887kV	1087 V	X
1a1(50F)	3[kA]	0[A]	3.466 kA	0

2.5.1.4. 선로 길이 4[km], 단락점 아크 전압강하 300[V], 고장저항 0.1[Ω]

다음 표10은 고장발생 시간 0.3[초], 고장저항이 0.1[Ω]이라 가정한 고장 모의결과이다. 선로 중앙에서 고장발생 시 고장전류는 8.556[kA]이고 고장발생 시점인 0.3초에서 80A가 감지하는 전압(V)을 분석한 결과, 0.3[초]에 전압이 1.887[kV]에서 1.158[kV]까지 전압강하가 발생됨을 확인할 수 있으며 이 경우 80A의 동작전압의 설정치가 900[V]이라면 80A는 동작하지 않을 것이다.

그러나 선로 양단에 설치된 50F 시뮬레이션을 분석한 결과, 고장발생 시점인 0.3[초]에서 0.01[초] 이후에는 50F 동작 고장전류 ΔI가 3,221[A] 이상이 됨을 확인할 수 있어 50F의 동작 설정치를 3,000[A]라 가정하면 50F는 동작하게 된다.

표10 고장저항 0.1[Ω] 시뮬레이션 결과

계전기	동작 설정치	고장발생 전	고장발생 후	동작 여부
V(80A)	900[V]	1.887kV	1158 V	X
1a1(50F)	3[kA]	0[A]	3.221 kA	0

2.5.2. Case 2 해석 결과 고찰

앞에서 기술한 급전계통 구성과 기본 파라미터를 사용 선로길이를 5[km]로 지정 고장저항을 변경하

며 고장전류 파형 및 전압파형 등을 고찰하였다. 그 결과로서 80A와 50F의 동작특성을 확인하였다. Case2의 선로길이 및 고장저항은 다음 표11과 같으면 이를 적용하여 시뮬레이션을 하였다.

표11 Case2 시뮬레이션 사례

선로 길이	단락점 아크 전압강하	고장 저항[Ω]
5km	300V	0.01
		0.05
		0.08
		0.1

2.5.2.1. 선로 길이 5[km], 단락점 아크 전압강하 300[V], 고장저항 0.01[Ω]

Case1의 경우와 같이 1a1, 1a2 파형은 50F 계전기의 동작파형이라 볼 수 있으며 V 파형은 80A의 동작파형이라 가정할 수 있다. 선로길이 5[km], 고장발생 시간 0.3[초], 고장저항 0.01[Ω]이라 가정하고 모의한 결과 다음 표12와 같은 시뮬레이션 결과를 얻을 수 있었다.

선로 중앙에서 고장발생 시 고장전류는 19.454[kA]이고 고장발생 시점인 0.3[초]에서 80A가 감지하는 전압(V)을 분석한 결과, 전압이 1.856[kV]에서 0.481[kV]까지 전압강하가 발생됨을 확인할 수 있으며 이 경우 80A는 동작하게 된다.

같은 방법으로 50F가 감지하는 고장전류를 분석한 결과, 고장발생 시점인 0.3[초]에서 0.01[초] 이후 고장전류 ΔI가 3,127[A]이상 됨을 확인할 수 있어 50F의 동작 설정치를 3,000[A]라 가정하면 50F는 동작하게 된다.

표12 고장저항 0.01[Ω] 시뮬레이션 결과

계전기	동작 설정치	고장발생 전	고장발생 후	동작 여부
V(80A)	900[V]	1.887kV	481 V	0
1a1(50F)	3[kA]	0[A]	3.127 kA	0

2.5.2.2. 선로 길이 5[km], 단락점 아크 전압강하 300[V], 고장저항 0.05[Ω]

선로 길이 5[km], 고장발생 시간 0.3[초], 고장저항 0.05[Ω]이라 가정하고 모의한 결과, 다음 표13과 같은 시뮬레이션 결과를 얻을 수 있었다.

선로 중앙에서 고장발생 시 고장전류는 12.108[kA]이고 고장발생 시점인 0.3[초]에서 80A가 감지하는 전압(V)을 분석한 결과, 전압이 1.856[kV]에서 883[V]까지 전압강하가 발생됨을 확인할 수 있으며 이 경우 80A의 동작전압이 900[V]인 경우에는 80A는 동작하게 된다.

같은 방법으로 50F가 감지하는 고장전류를 분석한 결과, 고장발생 시점인 0.3[초]에서 0.01[초] 이후에 50F 동작 고장전류 ΔI가 3,078[A]이상 됨을 확인할 수 있어 50F의 동작 설정치를 3,000[A]라 가

정하면 50F는 동작하게 된다.

표13 고장저항 0.05[Ω] 시뮬레이션 결과

계전기	동작 설정치	고장발생 전	고장발생 후	동작 여부
V(80A)	900[V]	1.887kV	883 V	0
Ia1(50F)	3[kA]	0[A]	3.078 kA	0

2.5.2.3. 선로 길이 5[km], 단락점 아크 전압강하 300[V], 고장저항 0.08[Ω]

선로길이 5[km], 고장발생 시간이 0.3[초], 고장저항 0.05[Ω]이라 가정하고 모의하여 다음 표14와 같은 시뮬레이션 결과를 얻을 수 있었다.

선로 중앙에서 고장발생 시 고장전류는 9.448kA이고 고장발생 시점인 0.3[초]에서 80A가 감지하는 전압(V)을 분석한 결과, 전압이 1.856[kV]에서 1.049[kV]까지 전압강하가 발생됨을 확인할 수 있으며 이 경우 80A의 동작전압 설정치가 900[V]이라면 80A는 동작하지 않을 것이다.

그러나 선로 양단에 설치된 50F가 감지하는 고장전류를 분석한 결과, 고장발생 시점인 0.3[초]에서 0.01[초] 이후에는 50F 동작 고장전류 ΔI가 3,029[A]이상 됨을 확인할 수 있어 50F의 동작 설정치를 3,000[A]라 가정하면 50F는 동작하게 된다.

표14 고장저항 0.08[Ω] 시뮬레이션 결과

계전기	동작 설정치	고장발생 전	고장발생 후	동작 여부
V(80A)	900[V]	1.887kV	1049 V	X
Ia1(50F)	3[kA]	0[A]	3.029 kA	0

2.5.2.4. 선로 길이 5[km], 단락점 아크 전압강하 300[V], 고장저항 0.1[Ω]

선로길이 5[km], 고장발생 시간이 0.3[초], 고장저항 0.1[Ω]이라 가정하고 모의하여 다음 표15와 같은 시뮬레이션 결과를 얻을 수 있었다.

선로 중앙에서 고장 발생 시 고장 전류는 8.302[kA]이다. 고장발생 시점인 0.3초에서 80A가 감지하는 전압(V)을 분석한 결과 0.3[초]에 전압이 1.887[kV]에서 1.125[kV]까지 전압강하가 발생됨을 확인할 수 있으며 이 경우 80A의 동작전압의 설정치가 900[V]이라면 80A는 동작 하지 않을 것이다.

그러나 선로 양단에 설치된 50F 시뮬레이션을 분석한 결과 고장발생 시점인 0.3[초]에서 0.01[초] 이후에는 50F 동작 고장전류 ΔI가 3,009[A]이상 됨을 확인할 수 있어 50F의 동작설정치를 3,000[A]라 가정하면 50F는 동작하게 된다.

표15 고장저항 0.1[Ω] 시뮬레이션 결과

계전기	동작 설정치	고장발생 전	고장발생 후	동작 여부
V(80A)	900[V]	1.887kV	1125 V	X
Ia1(50F)	3[kA]	0[A]	3.009 kA	0

3. 결 론

본 연구에서는 DC 급전계통인 전차선로 양단 50F와 Midpoint Relay 80A의 동작 특성을 비교하기 위해 단락전류 계산식 검증과 PSCAD/EMTDC를 사용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 각각의 사례를 연구 분석한 결과, 80A는 고장저항이 적을 경우에는 동작하나, 고장저항이 0.05[Ω]이상에서는 동작이 되지 않는 것을 확인하였다. 그런 반면에 50F는 고장저항의 크기나 선로의 길이가 변화더라도 고장발생 시점에서 약 0.02[초] 지나면 고장전류의 크기가 50F 동작 설정치 보다 커 동작하게 된다.

따라서 위 시뮬레이션 결과를 종합해 보면 50F가 80A보다 고장검출 특성이 우수하다고 판단된다. 이상의 연구결과로 현재 운영되고 있는 서울메트로 34호선의 보호시스템 뿐만 아니라 향후 시설되는 직류 전기철도와 관련 보호시스템의 개선을 위한 동작특성 비교 연구가 지속적으로 이루어져야 할 것으로 사료된다.

[참 고 문 헌]

1. 대한전기학회(2005년), “DC 급전시스템의 지락보호계전시스템 개발”
2. 한국철도기술연구원(2004년), “전기철도 직류급전계통 보호 및 협조에 관한 연구”
3. 인텍전기전자주식회사(2002년), “직류전철계통을 위한 고장검출기법의 개발”
4. JR교본연구회(2003년), “급전회로 보호시스템”

* 서울메트로, 제2전기사무소 소장, 정희원
E-mail : hyunki@seoulmetro.co.kr
TEL : (02)6110-4400 FAX : (02)6110-4419

* * 서울메트로, 제2전기사무소 차장, 정희원
E-mail : j3jinn@seoulmetro.co.kr
TEL : (02)6110-4430 FAX : (02)6110-4419

* * * 인텍전기전자(주), 기술연구소 이사
E-mail : tpan@entecene.co.kr
TEL : (031)227-1161(600) FAX : (031)227-1164