

전기철도 AT급전계통 전력해석을 통한 실제통의 단락전류 분석

The Analysis of Short Current on Actual System through Power Analysis of AT Feeder System for Electric Railway

정 노 건* · 정 호 성** · 구 경 완*** · 김 재 문†

(No-Geon Jung · Ho-Sung Jung · Kyung-Wan Koo · Jae-Moon Kim)

Abstract - In this paper, we perform a modeling for the AT Feeder system in AC electric railway and we utilize the power EMTDC program to implement about AT feeder system modeling. In addition, we study the impedance characteristics of the AT feeder system and calculated fault current and impedance according to the distance due to fault accident.

Based on it's result, fault current are compared between calculating the value and simulation value in EMTDC modeling. Impedance of power system is Largest at the middle point of the system and is smallest near autotransformer, and then showed that the fault current is inversely proportional to impedance characteristics.

Key Words : AT power system, EMTDC program, Fault current, Autotransformer, Impedance characteristic

1. 서 론

국내 고속철도 개통을 계기로 전철화가 지속적으로 이루어지고 있으며, 교통수요 변화에 대비하여 보다 고급화된 철도 교통수단에 대한 요구가 증대하고 있다. 이와 더불어 철도산업분야가 전기에너지에 대한 의존도가 점진적으로 상승하고 있다. 따라서 전기철도 차량에 인가하는 전력에 대한 안정적 공급과 전력 품질 향상에 대한 요구가 급증하고 있으며, 계통의 안정도 유지에 중대한 역할을 하는 보호계전기(Protective relay)의 중요성은 날로 증대되고 있다[1].

교류 전기철도 급전시스템에서 고장의 원인은 크게 변전소 내부 및 급전회로상 단락 및 지락이 있으며, 고장전류가 크기 때문에 실시간 전류를 검출하여 고장을 제거할 필요가 있다. 또한 최근에는 전기에너지로 운행하는 철도차량의 고속화와 더불어 부하전력의 증가와 전력회생을 하는 전차량을 사용하고 있기 때문에 고장전류와 부하전류 간의 큰 차이가 없어 부하전류에 의한 보호계전기의 오동작을 방지하기 위한 고성능 보호시스템이 필요하다. 이러한 고도의

보호시스템을 구현하기 위해서는 급전계통을 구성하고 있는 요소에 대한 상세한 모델링이 선행되어야 한다. 국내에서 적용되고 있는 교류 급전시스템의 구성 요소인 교류 급전용 보호계전기는 대부분 해외 제품이 적용되고 있다. 이러한 보호계전기의 독자적인 기술 부재로 보호계전기 구축 및 유지보수 비용이 발생하고 있으며, 해외 제품마다 독자적인 보호 기능을 가지고 있어 시스템에 대한 표준화된 보호가 어려운 실정이다.

본 논문에서는 국내에서 적용되고 있는 교류 AT급전계통 시스템에 대해 EMTDC를 이용하여 구성요소들에 대한 모델링을 하였다. 또한 사고전류에 대한 수치적인 계산과 시뮬레이션 결과와의 비교를 통해 모델링의 타당성을 확인하였다.

2. 본 론

2.1 교류 AT급전계통 구성

일반적으로 전기를 에너지원으로 주행하는 철도차량에 교류전력을 공급하기 위한 급전회로는 그림 1과 같이 구성된다[2-3].

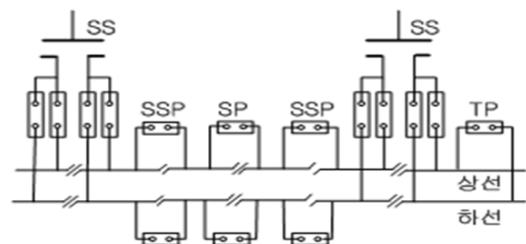


그림 1 일반적인 교류 급전회로 구성도
Fig. 1 Configuration Diagram of AC Feeder circuit

* Master's Course, Dept. of Transportation System Engineering, Korea National University of Transportation, Korea

** Korea Railroad Research Institute, Korea

*** Dept. of Defence Science and Technology, Hoseo University, Korea

† Corresponding Author : Dept. of Transportation System Engineering, Graduate School of Transportation, Korea National University of Transportation, Professor/Ph.D, Korea

E-mail: goldmoon@ut.ac.kr

Received : October 13, 2014; Accepted : October 20, 2014

급전용 전철변전소 (SubStation, 이하 SS), 급전구간의 구분과 연장을 위하여 개폐장치를 설치한 급전구분소 (Sectioning Post, 이하 SP), 작업 또는 사고시에 단전·정전구간을 한정하거나 연장급전을 위한 목적으로 보조 급전구분소 (SubSectioning Post, 이하 SSP), 전차선로의 말단에 가공전차선의 전압강하 보상과 유도장해의 경감을 위한 단말 급전구분소 (Auto Transformer Post, 이하 ATP) 등으로 구성되어 있다. 그리고 전차선로의 말단 거리가 짧은 경우 건넌선 섹션의 아크대책으로 TP (TiePost, 이하 TP)를 설치 운용하고 있다.

그림 2는 국내에 대부분 적용되고 있는 급전방식은 AT 방식으로 단권변압기 (Auto Transformer, 이하 AT)는 전차선과 급전선에 설치가 되며, 중성점은 레일에 연결이 되고 양단을 전차선과 급전선에 각각 연결되는 급전회로 방식이다. 따라서 전차선은 레일보다 전위가 높으며, 가공 급전선은 레일 및 대지보다 전위가 낮다. AT는 변압기 2차측을 기준으로 전차선과 급전선 사이에 55[kV]를 인가하게 되며, 중성점이 전차선과 레일 사이에 연결되어 있어 27.5[kV] 전압을 인가한다.

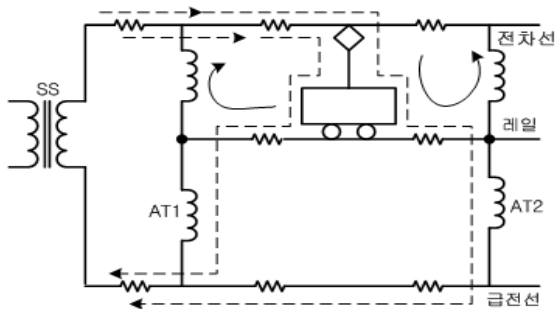


그림 2 AT 급전방식의 교류 전기철도
Fig. 2 AC Electric Railway of AT Feeder method

2.1.1 고장 임피던스

교류급전회로에서 발생하는 사고 원인으로는 차량 사고, 가선 사고, 애자섬락 등이 있으며, 사고 현상으로 급전회로를 구성하는 도체간의 단락고장과 도체가 대지에 접촉하는 지락사고로 분류할 수 있다. 따라서 급전회로의 사고전류를 구하기 위해서는 3상 전원 임피던스, 급전용 변압기의 임피던스, 회로 임피던스 및 고장점 저항 등이 요구된다.

일반적으로 3상 전원의 용량은 단락 용량으로 주어지며, 전원단락 용량은 식 (1)에 의해 3상 임피던스로 환산된다.

$$Z_s = V^2/P_s = \%Z_0 \frac{10V^2}{P} [\Omega] \tag{1}$$

여기서, V 는 급전 전압(기준전압)[kV], P_s 는 수전점 3상 단락용량[MVA], $\%Z_0$ 는 수전점(3상측) %임피던스 [%], P 는 %Z의 기준용량[MVA]

급전용 스코트 변압기는 3상을 2상으로 변환하고 급전측 단상용량을 기준으로 각 상마다 %Z가 표현되며, 임피던스는 식 (2)와 같이 구한다.

$$Z_{TR} = \%Z_{TR} \frac{10 \cdot V^2}{P_{TR1}} [\Omega] \tag{2}$$

여기서, Z_{TR} 는 M상 또는 T상 임피던스 [Ω], $\%Z_{TR}$ 는 편좌마다의 %Z [%], V 는 기준전압(급전전압) [kV], P_{TR1} 는 Scott 변압기의 한 상 용량 [MVA]

2.1.2 급전계통 임피던스 특성

전기철도 교류 AT급전방식은 전차선, 급전선, 레일 및 보호선이 있어 구성이 복잡하지만, 그림 3에서 보듯이 T (Trolley), R(Rail), F(Feeder)에 대해 급전회로 임피던스를 고찰하면 급전회로의 T-R단락, F-R단락, T-F단락이 있다. 전철변전소(SS)에서 멀어질수록 임피던스가 커지다가 SSP, SP 등 AT가 설치된 지점으로 갈수록 다시 작아지는 임피던스 특성을 보인다[3-5].

도체의 자기임피던스를 Z_{jj} , 도체 j, k 간의 상호 임피던스를 Z_{jk} 로 하고 각 도체에 흐르는 전류의 합이 0이 될 때 T, R, F의 등가임피던스는 식 (3)과 같다.

$$\begin{aligned} Z_T &= Z_{TT} + Z_{FR} - Z_{TF} + Z_{TR} \\ Z_F &= Z_{FF} + Z_{TR} - Z_{FR} + Z_{TF} \\ Z_R &= Z_{RR} + Z_{TF} - Z_{TR} + Z_{FR} \end{aligned} \tag{3}$$

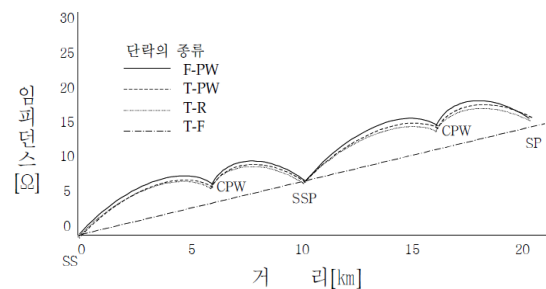


그림 3 AT급전방식의 임피던스 특성
Fig. 3 Impedance Characteristics of AT Feeder method

한편 그림 4의 제 1 구간에서 AT간격을 D_1 , 변전소에서 T-R단락점까지의 거리를 x 로 하여 임피던스를 구하면 식 (4)와 같다.

$$Z_{1x} = Z_{AT} + 4[Bx - A^2x^2/(D_1G)] [\Omega] \tag{4}$$

여기서, A 는 $Z_T + 2Z_R$, B 는 $Z_T + Z_R$, G 는 $Z_T + Z_F + 4Z_R$, Z_{AT} 는 AT 중성점 환산 누설임피던스[Ω]

제 2 AT점의 임피던스는 식 (4)에 $x = D_1$ 을 대입하여 $Z_{1D_1} = 4Z_{AT} + 4D_1(B - A^2/G)$ 가 된다. 제 2 구간은 식 (4)에 $4D_1(B - A^2/G)$ 를 더하면 식 (5)와 같이 된다.

$$Z_{2x} = 4Z_{AT} + 4[Bx - A^2x^2/(D_1G)] + 4D_2H/G [\Omega] \tag{5}$$

여기서, D_1 은 제 1구간 길이[km], D_2 는 제 2구간 길이[km], $H = (B - A^2/G) = Z_T Z_F + Z_T Z_R + Z_F Z_R$

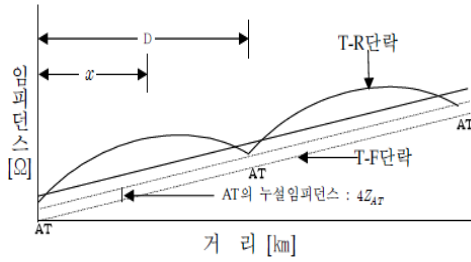


그림 4 AT급전방식의 선로 임피던스
Fig. 4 Catenary Impedance of AT Feeder method

한편 T-F 단락임피던스는 단위 거리당 식 (6)과 같다.

$$Z_{T-F} = Z_{TT} + Z_{FF} - 2Z_{TF} \quad [\Omega/\text{km}] \quad (6)$$

F-R 단락에 대해서도 T-R 단락과 같으며, 전압강하와 고장전류는 T-R 임피던스를 적용한다. 일반적으로 거리 x 까지의 임피던스는 식 (7)로 근사화 된다.

$$Z_x = 2Z_{AT} + Z_{T-F} x \quad [\Omega] \quad (7)$$

이상과 같이 변전소에서 고장점까지의 선로 임피던스, 고장점 저항은 급전회로의 단락, 지락시의 고장전류[kA]는 식 (8)과 같다.

$$I_s = V / (2Z_o + Z_{TR} + Z_L + r_g) \quad [\text{kA}] \quad (8)$$

여기서, I_s 는 단락전류[A], V 는 급전전압[kV], Z_o 는 고장점까지의 임피던스[Ω], Z_{TR} 는 M상 또는 T상 임피던스[Ω], Z_L 는 선로 임피던스[Ω], r_g 는 고장점 저항[Ω]

2.2 고장전류 계산을 위한 임피던스 및 모델링

실계통에서 고장전류를 계산하기 위한 고장점 임피던스를 구하기 위해 적용된 전차선로 임피던스는 원주~강릉간 데이터로 표 1과 같다[6].

표 1 고장 임피던스 계산을 위한 전차선로 데이터
Table 1 Catenary Data for fault impedance calculation

구분		선로정수[Ω]
단권변압기(Z_{AT})/10[MVA]		0.0320+j0.4488
자기 임피던스 [Ω/km]	전차선(Z_{FT})	0.1960+j0.7353
	레일(Z_{RR})	0.1851+j0.6219
	급전선(Z_{FF})	0.1782+j0.8672
상호 임피던스 [Ω/km]	전차선~레일간(Z_{TR})	0.0589+j0.4042
	전차선~급전선간(Z_{TF})	0.0557+j0.4317
	레일~급전선간(Z_{RF})	0.0558+j0.4659

그림 4의 제 1구간(0[km]~10[km])에서 AT간격을 D_1 , 변전소 AT에서 T-R단락점까지의 거리를 x 로 하여 고장 임피던스를 구하기 위한 식 (4)의 임피던스는 $Z_{AT}=0.45[\Omega]$, $A=3.48[\Omega]$, $B=2.34 [\Omega]$, $G=7.02[\Omega]$, $D_1=10[\text{km}]$ 이다.

그림 3에서 AT급전방식의 임피던스 특징은 거리 x 에 따라 변하므로 식 (4)를 적용하여 거리에 따른 임피던스를 구하면 표 2와 같다.

표 2 거리에 따른 임피던스값
Table 2 Impedance value according to length

거리 [km]	임피던스 [Ω]
1	2.62
2	4.44
3	5.92
4	7.05
5	7.84
6	8.28
7	8.38
8	8.13
9	7.54
10	6.60

그림 4의 제 2구간(10[km]~20[km])에서의 임피던스는 식 (5)와 같다. 따라서 $Z_{AT} + (B - A^2 D_1 / G) = 6.599[\Omega]$ 이므로 0 ~ 10[km] 구간에서 구한 임피던스에 6.60[Ω] 더하면 10 ~ 20[km] 구간의 임피던스가 된다.

2.2.1 AT급전계통 모델링

전철변전소(SS)는 한전 변전소에서 공급된 154[kV]전압을 스코트변압기를 통해 55[kV]로 변압하여 M상, T상으로 전압을 공급하도록 모델링하였다 또한 전철변전소(SS), 보조급전구분소(SSP), 급전구분소(SP)의 단권변압기를 모델링하여 상선과 하선에 27.5[kV]를 공급할 수 있도록 하였으며, 전차선로도 상세 모델링하였다.

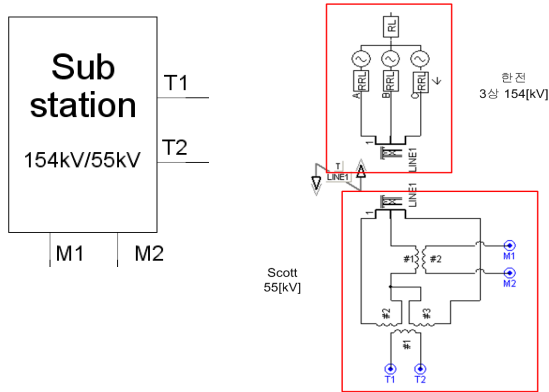
급전계통방식은 단독급전방식으로 그림 5와 같이 한전변전소의 3상 100[MVA] 용량의 154[kV] 전압을 수전받아 스코트 변압기를 거쳐 SS-SSP-SP순으로 PSCAD/EMTDC를 이용하여 구성하였다.

그림 5 교류 AT급전계통 모델링
Fig. 5 AT feeder system modeling of AC electric railway

최근 부하 전류의 급증으로 대전력, 장거리 급전 및 유도장해 측면에서 유리한 AT급전방식이 가장 많이 사용되고

있으며, 선로를 따라 약 10[km]간격으로 AT를 병렬로 설치하여 변압기 권선의 중성점을 레일에 접속하는 방식이며 모델링에도 AT급전방식이 적용되었다. EMTDC에 적용하여 구성요소별 세부적인 모델링을 하였다.

전원 측은 그림 6과 같이 한전 변전소와 전철변전소의 스코트 변압기 및 한전 변전소와 전철변전소를 연결시켜주는 송전선로라 정의하여 모델링을 하였다. 전철변압기는 3상 전원에 평형부하가 걸리도록 단상 변압기 2대를 사용하여 3상→2상 변환하는 스코트 결선방식이 주로 사용된다.



(a) 전원측 (b) 스코트 변압기

그림 6 전원측 및 스코트 변압기 모델링

Fig. 6 Power source and scott transformer modeling

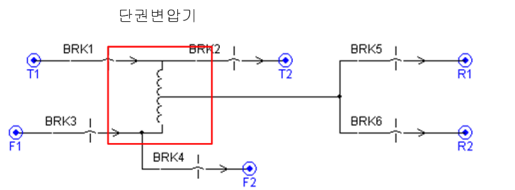


그림 7 단권변압기 모델링

Fig. 7 Auto Transformer modeling

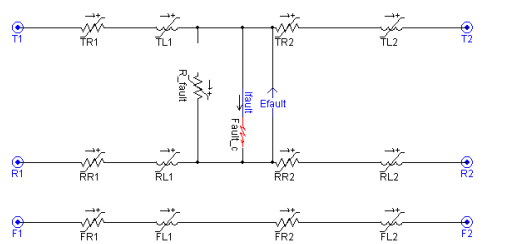


그림 8 전차선로 모델링

Fig. 8 Catenary modeling

한편 단권변압기(AT)는 공통 철심을 이용하여 코일 2개를 감고 이를 직렬로 접속해서 1차와 2차의 단자를 인출하여 2권선 변압기로 그림 7은 단권변압기(AT) 모델링을 보여준다. 단권변압기는 1차측 권수가 2차측의 2배가 되며, 직

렬 권선과 분로 권선이 n의 권수비를 가지고 있다. 1차측 전압은 55[kV]이고 2차측 전압은 27.5[kV]가 되며 두 권선을 접속하는 지점에 전차선로의 레일과 연결한다. 그림 8은 전차선로 모델링으로 전차선과 급전선, 레일로 이루어져 있으며 선로별 저항과 리액턴스 성분을 포함한다.

2.2.2 급전계통 상세 모델링 파라미터

한전변전소 전압은 154[kV]이며 주파수는 60[Hz]이다. 전력은 3상 100[MVA]로 시뮬레이션에 적용하였다. 그림 9는 모델링 파라미터이며, 그림 10은 결과파형을 보여준다.

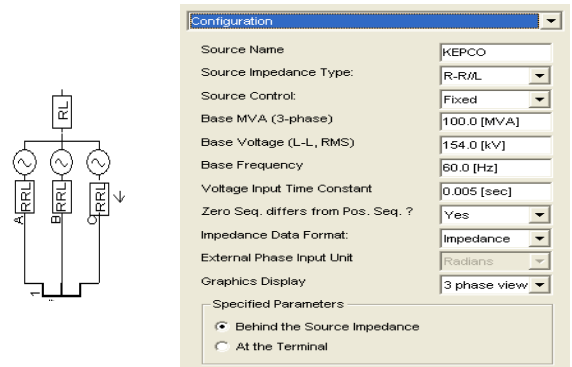


그림 9 한전변전소 모델링 파라미터

Fig. 9 Modeling parameter of KEPCO substation

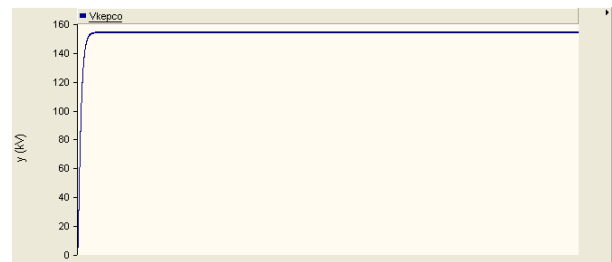
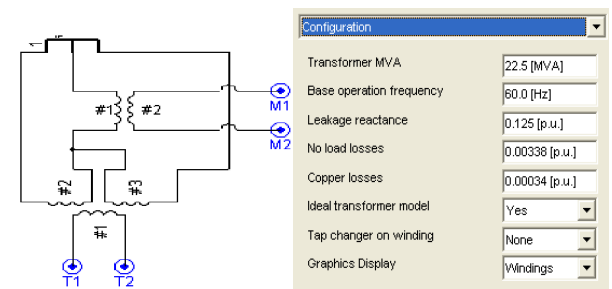


그림 10 한전변전소 전압파형

Fig. 10 Voltage waveform of KEPCO substation

한편 한전에서 수전받은 3상 전력은 스코트 변압기를 통해 2상으로 출력되는데, 그림 11(a)와 같이 모델링하였으며 M상과 T상은 90°의 차이가 난다. 스코트 변압기의 M상과



(a) 스코트 변압기 모델링 (b) M상 파라미터

그림 11 스코트 변압기 모델링 및 파라미터

Fig. 11 Modeling and parameter of scott transformer

T상의 전력은 각각 45[MVA]이며, 60[Hz]이며 M상의 누설 리액턴스는 0.1[pu], T상의 리액턴스는 0.2[pu]로 그림 11(b)는 적용된 파라미터값을 보여준다.

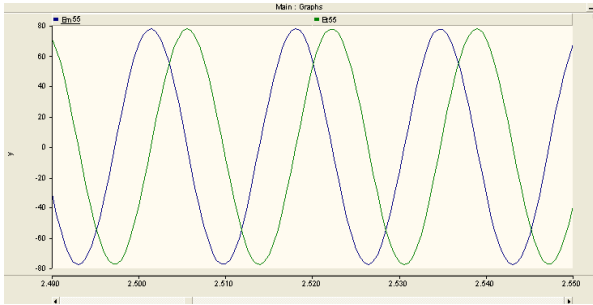


그림 12 스코트 변압기의 M상과 T상 전압파형
Fig. 12 M phase and T phase voltage waveform of scott Tr

그림 12는 스코트 변압기 모델링에 따른 M상과 T상 전압파형으로 90도 위상차가 있음을 확인할 수 있다. 단권변압기(AT)는 전차선과 레일 사이의 전압과 급전선과 레일 사이의 전압은 27.5[kV]이며 전차선과 급전선 전압은 55[kV]이다. 그림 13은 단권변압기를 포함한 급전계통의 일

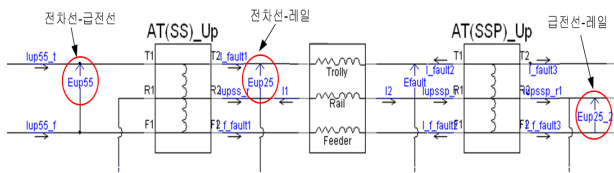
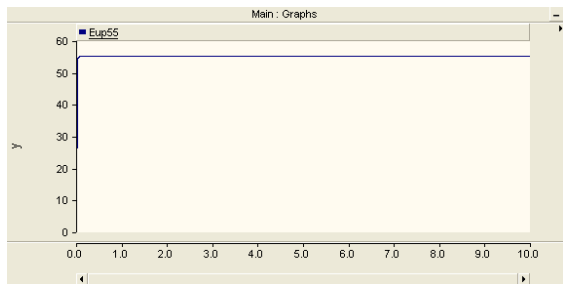
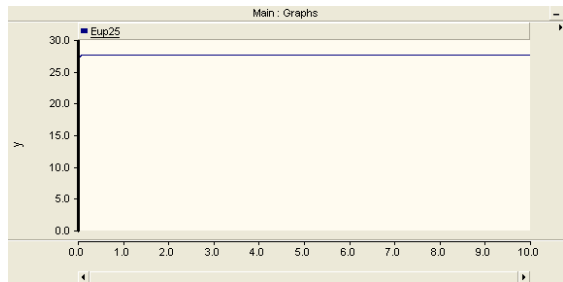


그림 13 급전계통도 모델링의 일부분
Fig. 13 A part of catenary modeling for AC electric railway



(a) 전차선(T)과 급전선(F)의 전압



(b) 전차선(T)과 레일(R) 사이의 전압

그림 14 T-F, T-R 사이의 전압
Fig. 14 Voltage of T-F, T-R

부 모델링을 보여주고 있으며, 그림 14는 전차선과 급전선 전압, 전차선과 레일사이의 전압, 급전선과 레일 사이의 전압을 보여준다.

2.3 모델링에 따른 사고 시뮬레이션

단락, 지락 등 사고가 발생했을 때 사고전류를 분석하기 위해 EMTDC를 사용하였으며, 표 1과 표 3은 시뮬레이션 입력에 사용된 데이터를 보여준다.

표 3 시뮬레이션 입력데이터

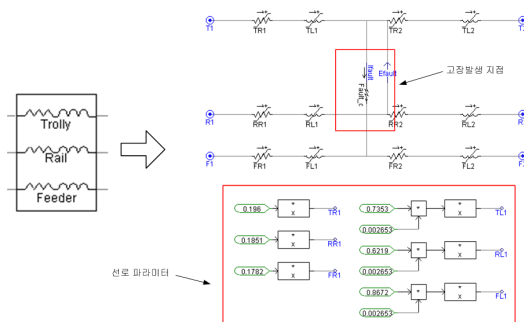
Table 3 Input data for simulation

구분	선로정수[Ω]
한전 154[kV] 전력계통	0.0132+j0.2073
154[kV] 송전선로	0.0233+j0.0358
급전용 스코트변압기	0.2517+j5.0353

그림 15와 같이 단권 변압기(SS)와 보조급전구분소(SSP) 사이에 단락사고를 가정하였다. 그림 16은 EMTDC를 통해 거리에 따른 전류변화로 0.01초에 고장을 발생시켜 10초 동



(a) 사고지점 (27.5[kV])



(b) 단락사고 모델링

그림 15 전차선과 레일사이의 단락사고 모델링
Fig. 15 Short fault modeling between Trolley and Rail

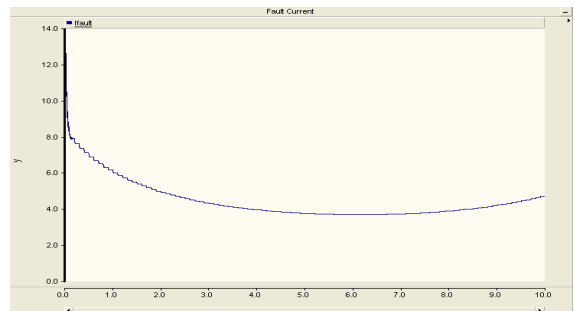


그림 16 거리에 따른 전류변화 (27.5[kV])
Fig. 16 Short fault current variation according to length

안 고장을 지속시켰으며, 1초에 1[km] 간격만큼 임피던스가 증가하게 하도록 모델링하였다. 고장이 발생하는 시점에서 돌입전류로 인하여 전류가 크게 증가하고 이후에 임피던스 증가에 따라 전류는 점차 감소하다가 AT에 가까워질수록 임피던스가 감소함에 따라 다시 증가하게 된다.

표 4 사고 전류 계산값과 시뮬레이션의 비교

Table 4 Comparison of calculation and simulation value for short fault current

거리 [km]	사고 전류 계산 [kA]	시뮬레이션 전류 [kA]	오차
3	4.647	4.329	+0.318
4	3.900	3.901	-0.001
5	3.508	3.737	-0.229
6	3.321	3.671	-0.35
7	3.283	3.707	-0.424
8	3.383	3.860	-0.477
9	3.649	4.163	-0.514

단락사고에 대한 계산된 전류값과 시뮬레이션을 통해 얻은 전류값을 표 4에 비교하였다. AT 설치간격을 10[km]로 하였을 때 중간지점에서는 오차가 작았으나 중간지점에서 멀어질수록 오차가 어느 정도 존재하였다. 이는 단락 임피던스가 비선형 특성이기 때문에 계산값에서 어느 정도 오차가 발생함을 알 수 있었다.

3. 결 론

본 논문에서는 전기철도 교류 AT급전계통에 대한 모델링을 수행하였으며, 이를 위해 전력해석 전용프로그램인 EMTDC를 활용하였다. 또한 AT 급전계통에 대한 임피던스 특성을 고찰하여 고장사고에 따른 거리별 임피던스와 사고 전류를 계산하였다. 실제계에 EMTDC로 전기철도 급전계통을 모델링한 시스템이 사고 전류값과 계산에 의한 사고 전류값을 비교 분석하였다. 단권 변압기가 설치된 중간 지점에서 계통 임피던스가 가장 크게 되고, 단권 변압기 근처일수록 계통 임피던스가 가장 작아져 사고전류는 이에 반비례하는 특성을 보였으며 시뮬레이션과 계산된 사고전류 오차는 전류값이 클수록 커지는 경향을 보였다. 이는 비선형 임피던스 특성에 기인한 것으로 보인다.

References

[1] Sung IL Kwon et al, "Development of Integrated Protection Relay for AC Railway System with Time Synchronization Function", R&D Plan Report, 2014.7
 [2] Park, Byoung Bae, A Comparative Study on Feeder Protective Relay Systems for AC Electrified Railway, Master's thesis, Seoultech, 2010.2

[3] Korail, A Study of the Catenary Circuit Constant Measurement and Protection Circuit Optimization, 1998
 [4] Lee, Hee Yong, A study on Railway Electric Traction Protection System, Master's thesis, Seoultech, 2005.2
 [5] Hanmin Lee et al, "Fault Analysis of AC Electric Railway System Mode by EMTDC", 2003
 [6] Yang Su Kim et al, "Wonju~gangneung AC Feeder Simulation Report", 2014

저 자 소 개



정 노 건 (No-Geon Jung)

2012년 한국철도대 철도차량전기과 졸업.
 2013년~현재 한국교통대 교통대학원 교통시스템공학과 재학



정 호 성 (Ho-Sung Jung)

1998년 성균관대 전기공학과 졸업(공학 석사). 2002년 성균관대 전기전자 및 컴퓨터공학부 졸업(공학박). 2002년 ~ 현재 한국철도기술연구원 기술전략실장 책임연구원



구 경 완 (Kyung-Wan Koo)

1983년 충남대학교 전자공학과 졸업. 1992년 동 대학원 졸업(공학박). 1987년 현대전자 반도체연구소 선임연구원 1994년~2005년 영동대학교전자·정보공학부 부교수. 2005년~현재 호서대 국방과학기술학과 교수



김 재 문 (Jae-Moon Kim)

1994년 성균관대 전기공학과 졸업. 2000년 2월 동 대학원 졸업(공학박). 2000년~2004년 현대모비스(주) 기술연구소 선임연구원. 2006년 ~현재 국토교통부 철도 기술 전문위원, 2004년 3월~현재 한국교통대학교 교통대학원 교통시스템공학과/철도전기전자공학과 부교수
 E-mail : goldmoon@ut.ac.kr