

## EMTDC 및 수 계산에 의한 교류 전철급전시스템 사고 해석

이한민\*, 오광해, 한문섭, 이장우, 창상훈, 장동욱  
한국철도기술연구원

### Comparison of AC Electric Railway System Model using the EMTDC

Hanmin Lee\*, Kwanghae Oh, Moonsub Han, Changmu Lee, Sanghoon Chang, Donguk Jang  
Korea Railroad Research Institute

**Abstract** - This study presents wrong hand calculations for fault analysis at field on the real AC railway system. Hence, we correctly revised the hand calculations. We propose AC railway system model by using EMTDC. Fault studies are performed. We also compare revised hand calculations with EMTDC simulation to verify the proposed model made by EMTDC. So, we can confirm that the model made by using EMTDC is correctly designed.

#### 1. 서론

전기 철도시스템은 다른 교통시스템과 비교해서 수송능력, 에너지 효율, 운영비, 환경친화적인 면에서 수많은 이점들을 갖고 있다. 그럼에도 불구하고 단락사고, 지락사고, 차단기 동작시 서지전압 등의 여러 가지 문제들이 승객과 지상설비등에 피해를 줄 수 있다[1].

사실, 교류 전철급전시스템에 사고가 발생한 경우 승객과 차량, 지상설비의 안전을 확보하기 위해 신속히 감지되어야 하며 사고지점에 전력공급을 차단해야 한다.

전철변전소에서는 급전회로의 전압, 전류, 임피던스의 크기 또는 변화량 등으로 부하와 고장을 판별하고 있다. 따라서 고장발생시 사고의 파급을 최소화하기 위해 보호계전기의 동작을 위해서 급전계통의 계통 조건과 사고에 의한 사고전류를 판별하여 계통을 보호할 필요가 있다.

이러한 사고전류는 사고의 종류와 사고 위치에 따라 다양하게 나타나는데 사고 전류를 판단하여 전력공급을 중단하기 위해 일반적으로 전철시스템을 설계하는 단계에서 미리 사고 전류를 계산하게 된다.

본 논문에서는 사고전류를 해석하기 위해 잘못된 계산을 올바르게 하였으며 또한 보다 정밀하게 해석하기 위해서는 EMTDC 프로그램을 이용하여 교류 급전시스템을 정밀 모델링 하였다. 모델링에 관한 내용은 기존의 논문과 보고서에서 자세하게 다루었다 [2][3]. 따라서 본 논문은 기존 수 계산의 잘못된 점과 그 잘못된 점을 고친 수 계산을 보여주고 EMTDC로 모델링한 전기철도시스템 모델이 철도 시스템 실시보고서 등 실제 계통에 적용시키는데 얼마나 적절한가를 보여주었다.

#### 2. 교류 전철급전시스템

교류 전기철도는 통상 단상 27.5kV/55kV 급전방식에 기초를 두고 있으며 단상의 대용량 전력을 공급 받기 위해서는 3상 전력계통과 연계되어야 한다. 이를 위해 철도 교류급전회로는 그림 1과 같이 전철변전소의 스코트변압기에 의해 단상으로 변환된 전력을 급전선, 전차선, 레일에 통해 공급한다. 단권변압기는 대략 10km 정도의 간격으로 설치되며 이곳에 상하행선을 연결하는 개폐기가 함께 설치되기도 한다. 변전소와 변전소의 거리는 약 50km이고 중간지점은

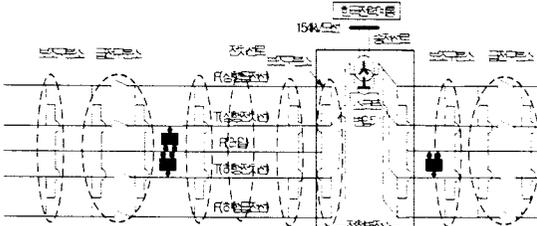


그림 1. 교류 급전시스템 구성

양쪽 변전소의 전압위상이 다르기 때문에 개폐설비로써 전기적으로 구분하여(급전구분소: SP) 운전하고 있는데 이것은 변전소 고장시 인근 변전소에서 연장급전을 하기 위해 연결해 주는 역할도 한다.

시뮬레이션을 위해 그림 1의 계통회로를 EMTDC로 정밀 모델링하였다. 전체적인 급전시스템을 각각의 모듈로서 구현하였다. 즉, 전철변전소는 한전 변전소에서 공급된 154kV 전압을 스코트 변압기를 통해 55kV로 변압하여 M상, T상으로 전압을 공급하도록 모델링하였다. 또한 전철변전소, 보조구분소, 급전구분소의 단권변압기를 모델링하여 상선과 하선에 27.5kV를 공급할 수 있도록 하였으며, 전차선로도 정밀 모델링하였다.

#### 3. 설계 조건

##### 3.1 임피던스 계산

###### 3.1.1 전원

o 한전변전소 154[kV] 모선 임피던스

$$\%Z_{S1} = 0.0875 + j 1.3708 \quad (100[MVA] \text{ 기준})$$

$$\%Z_{S2} = 0.0875 + j 1.3708 \quad (100[MVA] \text{ 기준})$$

$$\%Z_{S3} = 0.2450 + j 1.9267 \quad (100[MVA] \text{ 기준})$$

$$Z_{S1} = 0.2075 + j 3.2510[\Omega] \quad (154[kV], 3[\phi] \text{ 기준})$$

$$Z_{S2} = 0.2075 + j 3.2510[\Omega] \quad (154[kV], 3[\phi] \text{ 기준})$$

$$Z_{S3} = 0.5810 + j 4.5694[\Omega] \quad (154[kV], 3[\phi] \text{ 기준})$$

$$Z_{S1} = 0.0132 + j 0.2073[\Omega] \quad (27.5[kV] \text{ 기준})$$

$$Z_{S2} = 0.0132 + j 0.2073[\Omega] \quad (27.5[kV] \text{ 기준})$$

$$Z_{S3} = 0.0371 + j 0.2990[\Omega] \quad (27.5[kV] \text{ 기준})$$

###### 3.1.2 송전선로

o 지중선로 : XLPE 400[mm], 4.0[km]

$$Z_{T1} = (0.09127 + j0.14005) \times 4.0 = 0.3651 + j 0.562[\Omega]$$

$$Z_{T0} = (0.11025 + j0.11857) \times 4.0 = 0.441 + j 0.4743[\Omega]$$

$$\%Z_{T1} = \%Z_{T0} = 0.1539 + j0.237[\%] \quad (100[MVA] \text{ 기준})$$

$$\%Z_{T0} = 0.186 + j0.2[\%] \quad (100[MVA] \text{ 기준})$$

$$Z_{T1} = 0.0233 + j0.0358[\Omega] \quad (27.5[kV] \text{ 기준})$$

$$Z_{T0} = 0.0281 + j0.0303[\Omega] \quad (27.5[kV] \text{ 기준})$$

###### 3.1.3 급전용 변압기

40/50[MVA], 154[kV]/55[kV]×2, %Z=10, X/R=20  
(IEEE STD 141-1976 PAGE 201.FIG77)

$$\%Z_{T1} = 0.4993 + j9.9875[\%] \quad (15[MVA] \text{ 기준})$$

$$\%Z_{T2} = 3.3286 + j66.5833[\%] \quad (100[MVA] \text{ 기준})$$

$$Z_{TR} = 0.2517 + j 5.0353[\Omega] \quad (27.5[kV] \text{ 기준})$$

$$Z_{TR} = 7.8942 + j 157.9090[\Omega] \quad (154[kV], 3[\phi] \text{ 기준})$$

### 3.1.4 단권 변압기

$$1,000[kVA], Z_{AT} = 0.45[\Omega] \quad (27.5[kV] \text{ 기준}), X/R = 14$$

(IEEE STD 141-1976 PAGE 201, FIG 77)

$$Z_{AT} = 0.0320 + j 0.4488 [\Omega]$$

## 4. 수 계산 비교

우선 사고 위치가 송전선로와 급전용 변압기(스코트 변압기) 사이에서 발생한 경우를 생각해 보면 일반적으로 사고 해석을 하기 위해서는 한전 154[kV] 변전소 임피던스 ( $Z_s$ )와 154[kV] 송전선로 임피던스 ( $Z_l$ )와 사고저항 ( $Z_f$ ) 임피던스를 직렬로 계산하여 전체 임피던스를 계산하게 된다.

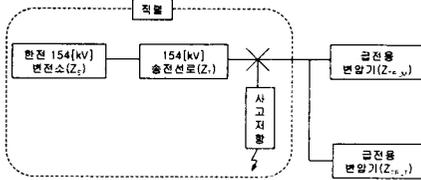


그림 2 일반적인 사고 계산

그러나 실제 현장에서는 이렇게 계산하고 있지 않다. 즉, 다음 그림과 같이  $Z_s$ 와  $Z_l$ ,  $Z_f$ 를 직렬로 계산하고  $Z_{TR-M}$ 와  $Z_{TR-T}$ 를 병렬로 계산하여 전체 임피던스를 계산하게 된다.

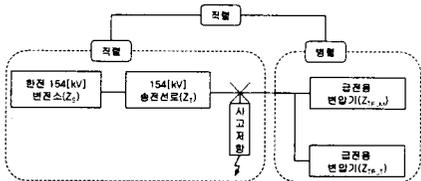


그림 3 실제 현장에서의 계산방법

그러나 이 방법은 잘 못된 방법이므로 전자에서 언급한 방법으로 계산해야 한다. 즉, 사고저항과 그 뒤에 있는 임피던스는 병렬로 봐야한다는 것이다.

이 뿐만 아니라 임피던스 병렬 계산도 잘못 되었다. 그림 2와 같은 경우에 대해서 실제 현장에서 계산되고 있는 것을 예를 들어 설명하면 다음과 같다.

고 장 원	R	X
한전 154[kV] 전력계통	Rs1	Xs1
154[kV] 송전선로	Rl1	Xl1
소 계	R1	X1
사고 저항	R2	X2
급전용 변압기(M상)	R3	X3
급전용 변압기(T상)	R4	X4
합 계	R5	X5

$$R_5 = R_1 + \frac{1}{\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4}}, \quad X_5 = X_1 + \frac{1}{\frac{1}{X_2} + \frac{1}{X_3} + \frac{1}{X_4}}$$

실제 현장에서는 위와 같이 계산이 되어 있다. 따라서 이러한 점 들을 수정하여 올바르게 수 계산을 하고자 한다.

## 5. 수 계산

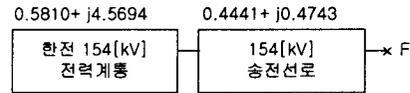
### 5.1 154[kV] 1선 지락전류

o 계통도

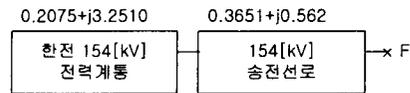


o 임피던스도

영상회로 [단위 : Ω]



정상, 역상 회로



o 계산

영상 임피던스

고 장 원	R	X
한전 154[kV] 전력계통	0.5810	4.5694
154[kV] 송전선로	0.4410	0.4743
소 계	1.0220	5.0437

$$Z_0 = 1.0296 + j5.2232 [\Omega]$$

정상 임피던스

고 장 원	R	X
한전 154[kV] 전력계통	0.2075	3.2510
154[kV] 송전선로	0.3651	0.5620
사고 저항	0.0100	0.0000
합 계	0.5826	3.8130

역상 임피던스

고 장 원	R	X
한전 154[kV] 전력계통	0.2075	3.2510
154[kV] 송전선로	0.3651	0.5620
사고 저항	0.0100	0.0000
합 계	0.5826	3.8130

$$Z_1 = 0.5826 + j 3.8130[\Omega]$$

$$Z_2 = 0.5826 + j 3.8130[\Omega]$$

$$Z_0 + Z_1 + Z_2 = 2.1872 + j 12.6697[\Omega]$$

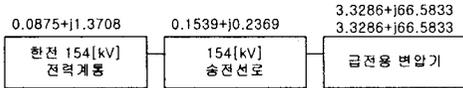
$$Z_{SF} = \sqrt{2.1872^2 + 12.6697^2} = 12.8571[\Omega]$$

o FAULT CURRENT

$$I_g = \frac{3E}{Z_0 + Z_1 + Z_2} = \frac{3}{12.8571} \times \frac{154,000}{\sqrt{3}} = 20.746[kA]$$

## 5.2 154[kV] 3상 단락전류

o 임피던스도



고 장 원	R	X
한전 154[kV] 전력계통	0.0875	1.3708
154[kV] 송전선로	0.1539	0.2369
사고 저항	0.0100	0.0000
합 계	0.2514	1.6077

$$\%Z_{SF} = \sqrt{0.2514^2 + 1.6077^2} = 1.6270[\%]$$

o FAULT CURRENT

$$P_s = \frac{100P_n}{\%Z_{SF}} = \frac{100 \times 100}{1.6270} = 6.146[MVA]$$

$$I_{SF} = \frac{P_s}{\sqrt{3}V} = \frac{6.146}{\sqrt{3} \times 154} = 23.04[kA]$$

## 5.3 55[kV] 단락전류 (변압기 2차 단락)

고 장 원	R	X
한전 154[kV] 전력계통	0.0132	0.2073
154[kV] 송전선로	0.0233	0.0358
급전용 변압기	0.2517	5.0353
사고 저항	0.0100	0.0000
합 계	0.2982	5.2784

$$Z_{SF} = \sqrt{0.2982^2 + 5.2784^2} = 5.2868[\Omega]$$

o FAULT CURRENT

$$I_{SF} = \frac{E}{Z_{SF}} = \frac{27,500}{5.2868} = 5.201[kA] \quad (27.5[kV] \text{ 기준})$$

$$I_{SF} = \frac{5.201}{2} = 2.6[kA] \quad (55[kV] \text{ 기준})$$

## 5.4 27.5[kV] 단락전류(변전소 AT외선 T-R단락)

고 장 원	R	X
한전 154[kV] 전력계통	0.0132	0.2073
154[kV] 송전선로	0.0233	0.0358
급전용 변압기	0.2517	5.0353
단권 변압기	0.0320	0.4488
사고 저항	0.0100	0.0000
합 계	0.3302	5.7272

$$Z_{SF} = \sqrt{0.3302^2 + 5.7272^2} = 5.7367[\Omega]$$

o FAULT CURRENT

$$I_{SF} = \frac{E}{Z_{SF}} = \frac{27,500}{5.7367} = 4.794[kA] \quad (27.5[kV] \text{ 기준})$$

## 6. EMTDC 시뮬레이션 결과의 수계산 비교

2절의 설계 조건과 같이 EMTDC로 구성하였다. 이 모델링에 대한 내용은 참고문헌 [2~5]에 자세히 나와있으므로 간략히 언급만 하고자 한다. 다음은 EMTDC로 구성한 AC 급전시스템 모델이다.

### 6.1 교류 전철급전시스템 모델링

철도 송변전설비는 전기차에 전력을 공급하기 위한 설비로 크게 송전선로, 변전소, 급전구분소 및 병렬급전소로 나눌 수 있고, 변전소는 한국전력공사로부터 수전한 3상 154kV를 단상 55kV의 전력으로 변환하여 전기차에 전기를 공급하는 장소이며, 급전구분소는 변전소와 변전소간 동상의 전기를 구분하며, 병렬급전소는 전압강화 보상 및 회생제동을 최대한 사용하기 위하여 상하선을 연결하여 주는 장소로 모든 장소에 단권변압기를 설치하고 있다. 이 구성 성비별로 다단계망 이론을 적용하여 모델링 하고, 이를 그림 4와 같이 EMTDC에 적용하여 정밀한 모델링을 하였다.

### 6.2 결과 비교

5절 수 계산에서 가정된 사고 위치에 대해 EMTDC도 같은 위치에 대해서 시뮬레이션을 하였다. 위 EMTDC 시뮬레이션 결과와 5절 수 계산의 결과를 표 1과 그림 5로 나타내었다.

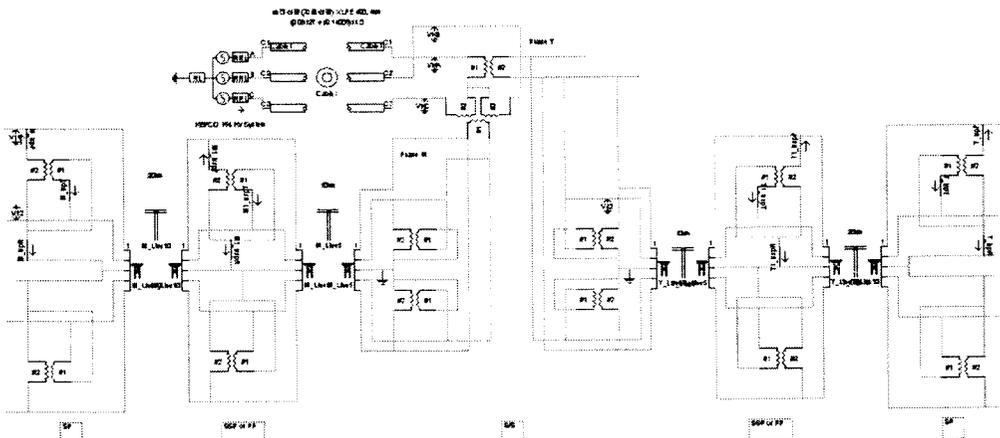


그림 4 AC 급전시스템 모델

표 1 Case 별 사고전류 비교

	FAULT CURRENT	
	EMTDC	수계산
154[kV] 1선 지락전류	22.00	20.33
154[kV] 3상 단락전류	23.56	23.04
55[kV] 단락전류	3.12	2.60
27.5[kV] 단락전류	5.36	4.79

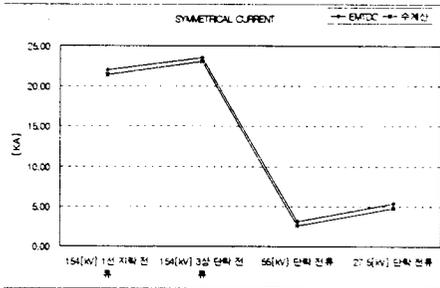


그림 5 수 계산과 시뮬레이션 결과비교-사고전류

EMTDC와 수 계산 결과 값이 일치함을 알 수 있다. 앞에서 보인 결과로 본 EMTDC 모델링은 교류 전철급전시스템을 정확히 표현하였다. 그러므로 EMTDC 모델링을 사용해도 무방함을 알 수 있다. EMTDC는 약간의 계통 변화에 대해서 간단한 수정작업으로 다시 나타낼 수 있으며 반복 계산도 가능하고, 전차선로의 자기 및 상호 임피던스까지 고려함으로써 계통이 복잡해져도 쉽게 계산할 수 있다. 그리고 동적 부하인 차량 모델을 수 계산으로는 표현할 수 없지만 EMTDC로는 표현이 가능하여 사고 해석을 할 수 있다. 따라서 향후에는 수 계산보다 EMTDC 모델링을 사용해야 하겠다.

### 7. 결론

전기철도 시스템의 사고전류 해석은 컴퓨터 발전과는 관계없는 것처럼 현재까지도 수(手) 계산으로 사고전류를 예측하는 실정이었다. 때때로 실제 실시설계보고서를 살펴보면 수 계산 또한 잘못되어 있는 경우를 종종 볼 수 있다. 따라서 본 논문은 기존의 수 계산의 잘못된 점과 그 잘못된 점을 수정한 수 계산을 보여주고 EMTDC 모델이 철도 시스템에 관련된 실시보고서 등 실제 계통에 적용시키는데 얼마나 적절한가를 보여주기 위한 것이었다.

모델의 적절성을 검증하기 위해서 주어진 실제계에 EMTDC를 적용하여 해석한 사고 전류값과 수 계산에 의한 사고 전류값을 비교 분석하였다.

설계조건에 따라 EMTDC로 정밀하게 계통을 구성하여 시뮬레이션한 값과 수 계산 값을 비교한 결과 두 계산 값이 동일함을 알 수 있었다.

또한 수 계산 보다 EMTDC 모델링을 사용해야 하는 이유는 약간의 계통 변화에 대해서 간단한 수정작업으로 다시 나타낼 수 있으며 반복 계산도 가능하고, 전차선로의 자기 및 상호 임피던스까지 고려함으로써 계통이 복잡해져도 쉽게 계산할 수 있다. 그리고 동적 부하인 차량 모델을 수 계산으로는 표현할 수 없지만 EMTDC로는 표현이 가능하여 사고 해석을 할 수 있다는 점이다.

EMTDC에 의한 전철 급전시스템 모델은 사고 종류 및 사고 위치에 따른 정밀한 해석과 사고의 판별이라든지 사고 위치 표정과 같은 예측 분야에 적용 될 것이다.

따라서 EMTDC를 이용한 본 모델은 향후 기본계획 및 실시설계보고서에 적용될 수 있을 것이라는 결론을 도출할 수 있었다.

### (참고문헌)

- [1] Sanghoon Chang, Kwanghae Oh, Junghoon Kim, "Analysis of Voltage Unbalance in the Electric Railway Depot Using Two-port Network Model", International Conference on Electrical Engineering, pp852~858, 2001
- [2] 한국철도기술연구원, 도시철도 표준화 연구개발사업, 2002년
- [3] 이한민, 창상훈, 한문섭, 김주락, 오광해, 이장무, "PSCAD/EMTDC를 이용한 교류 전철급전시스템 모델링", 2002년 대한 전기학회 춘계학술대회 발표논문
- [4] 이한민, 한문섭, 창상훈, 오광해, 이장무, 김주락, "PSCAD/EMTDC를 이용한 교류 전철급전 시스템 해석", 대한 전기학회 하계학술대회, 2002년
- [5] Hanmin Lee, Sae-hyuk Kwon, Gilsoo Jang, Byongjun Lee and Byunghun Chang, "Dynamic Equivalents of the KEPCO System for the Stability Analysis", KIEE International Transactions on PE, 12A-1, 20-25 (2002)
- [6] 철도청, 호남선 서대전-천원간 송·변전설비 및 변전기술 실시설계 보고서, 2001.8
- [7] 철도청, 경부선 동대구-부산간 전철, 전력설비 실시설계 보고서(별권), 1998년
- [8] PSCAD/EMTDC User's manual.