

## PSCAD/EMTDC를 이용한 교류 전철급전시스템 해석

이한민\*, 한문섭, 창상훈, 오광해, 이장무, 김주락  
한국철도기술연구원

### Analysis of AC Electric Railway System using the PSCAD/EMTDC

Hanmin Lee, Moonseob Han, Sanghoon Chang, Kwanghae Oh, Changmu Lee, Joorak Kim)  
Korea Railroad Research Institute

**Abstract** - This study presents a AC electric railway system analysis using PSCAD/EMTDC for circuit analysis and fault studies. This PSCAD/EMTDC model includes feeder, contact line, rails, Scott-transformer, Auto-transformer and so on. This model is based on four-port network which is an extension of two-port network theory.

In order to verify the proposed model, fault studies of a test system are performed.

#### 1. 서론

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

사실, 교류 전철급전시스템에 사고가 발생한 경우 승객과 차량, 시설비의 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 위해서 보호계전기의 동작을 위해 급전계통의 계통 조건과 사고지점에서 전압, 각 단권 변압기로 흘러 들어가는 사고전류 값을 예측할 필요가 있다. 그러나 현재 사고전류나 AT단권변압기에 유입되는 전류를 수계산으로 구하여 현장에 적용하고 있어서 상당한 오차가 내포되어 있을 것이 분명하다. 따라서 본 연구에서는 사고 해석을 위해 전력시스템에 대하여 전자기적 과도상태 해석을 수행하는 프로그램으로서 현재 상용화되어 전계계적으로 사용되고 있는 PSCAD/EMTDC를 이용하여 사고시 AT단권변압기에 유입되는 전류, 레일 전압상승 등을 모의 사고해석을 하여 교류 전철급전시스템의 특성을 분석하였다.

#### 2. 교류 전철급전시스템

보통 교류 전철급전시스템은 단상 27.5kV/55kV로 구성되어 있다. 3상 전력공급시스템으로부터 전력을 공급받는 전철급전시스템은 3상을 단상으로 변환시키는 스코트변압기를 통해서 대용량 단상 차량부하에 전력을 공급하고 있다. 단권변압기는 전철변전소와 급전구분소, 보조급전구분소에 각각 설치되어

있다. 급전구분소에는 차단기가 설치되어 있어 두 전철변전소의 전력공급을 전기적으로 구분하고 있다. 만약 하나의 전철변전소가 고장이 나면 차단기가 단락이 되어 연장급전을 할 수 있다[2].

그림 1은 교류 전철급전시스템을 보여준다. 앞에서 언급한 것처럼 차량부하, 스코트 변압기, 단권 변압기들로 구성되어 있다.

#### 3. 6단자망 이론

이 시스템은 4단자망 이론을 확장시킨 6단자망 이론에 근거를 둔다. 그림 2는 4단자망 모델을 나타낸다.

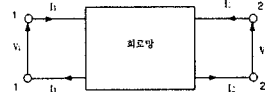


그림 2. 4단자망 모델

그림 2와 같이 입력단자 1-1'에 입력전압  $V_1$ , 입력전류  $I_1$ 이고 출력단자 2-2'에 출력전압  $V_2$ , 출력전류  $I_2$ 라 하면 다음과 같이 전압, 전류 관계식으로 표시할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_2 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

그림 3은 6단자망 모델을 나타낸다.

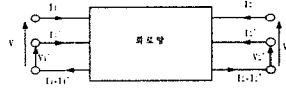


그림 3. 6단자망 모델

전압, 전류 관계식으로 표시하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_1' \\ I_1 \\ I_1' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_2 \\ V_2' \\ I_2 \\ I_2' \end{bmatrix} \quad (2)$$

실제 교류 전철급전시스템 그림 1을 살펴보면 6단자망으로 구성되어 있다. 따라서 6단자망 모델을 적용하여 쉽게 모델링 할 수 있다.

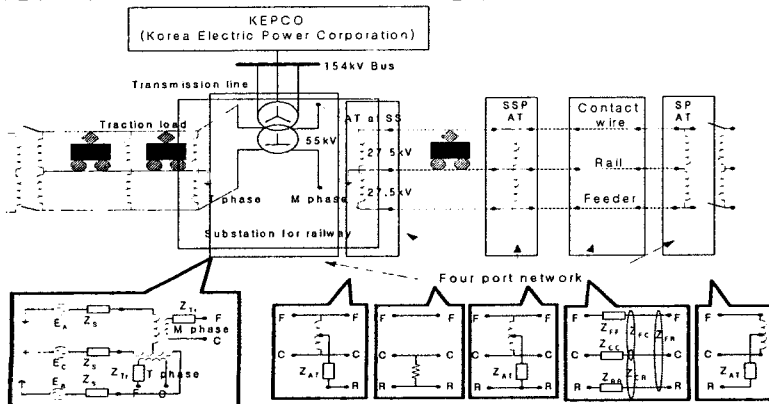


그림 1. 6단자망 이론에 의한 교류 전철급전시스템

#### 4. 교류 전철급전시스템 모델링

PSCAD/EMTDC에 의한 교류 전철급전시스템 모델은 그림 4에 보여진다.

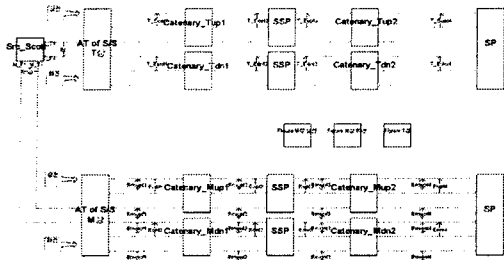


그림 4. 교류 전철급전시스템 등가모델

위 그림은 각 세부모델을 포함한 모듈로서 구성된 시스템이다. 6단자망 이론을 근거로 구성되었으며 상세한 구성 모델에 대해서는 다음과 같다.

##### 4.1 전철변전소 모델링

그림 5는 3상 전력공급 계통과 스코트변압기 등가회로를 보여준다.

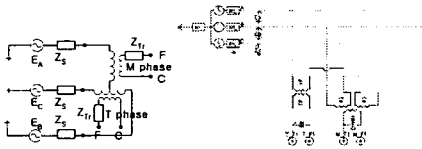


그림 5. 전력계통과 스코트 변압기 등가모델

3상 전력 계통은 선간전압 154kV를 전철급전계통에 공급한다. 일반적인 스코트 변압기를 나타내며 3상 전력계통에 연결된다. 스코트 변압기의 T상과 M상의 권선비는 각각  $\sqrt{3}/2N_1/N_2$ 와  $N_1/N_2$ 이다.

##### 4.2 단권변압기 모델링

전철변전소, 보조구분소, 급전구분소의 단권변압기 등가모델은 다음 그림과 같다.

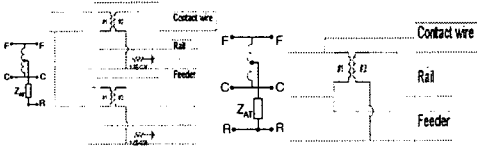


그림 6. 전철변전소의 단권변압기

그림 7. 보조구분소의 단권변압기

그림 8. 급전구분소의 단권변압기

##### 4.3 부하 모델

부하의 등가모델을 저항으로 나타내었다. 차량의 종류는 EL8100으로 하였고 그 최대출력은 5200kW로 가정하였다.

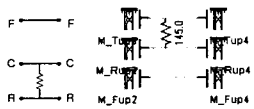


그림 9. 차량 부하 등가모델

##### 4.4 전차선로 모델링

전차선로는 3 도체로 구성된다. 3 도체는 전차선 도체, 급

전선 도체, 레일 도체로 이루어져 있다.

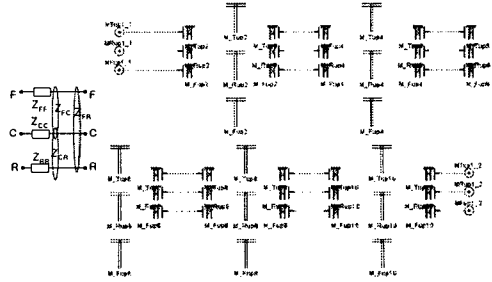


그림 10. 전차선로 등가모델

#### 5. 사례 연구

##### 5.1 입력 데이터

표 1은 3상 전력계통과 교류 전철급전시스템의 입력데이터를 나타낸다.

표 1. 교류 전철급전시스템 입력 데이터

	Category	Values
3 phase power system	3-phase voltage(kV)	154
	Positive(negative) sequence impedance(%)	0.272+j1.535
	Zero sequence impedance(%)	0.842+j4.227
Scott-transformer	Rating MVA	22.5
	Rating kV	154/55
	leakage reactance(pu)	0.1
Auto-transformer	Rating MVA	10
	Rating kV	55/27.5
	leakage reactance(pu)	0.1
Impedance	Contact wire ( $\Omega$ /km)	0.194+j0.731
	Rail ( $\Omega$ /km)	0.009+j0.467
	Feeder ( $\Omega$ /km)	0.122+j0.587
Train	Resistor( $\Omega$ )	145

##### 5.2 결과

###### 5.2.1 정상상태에서 전압

3상 전력계통에서 공급된 전력은 스코트 변압기를 통해서 단상으로 전차선로에 공급된다. 차량이 없는 상태에서 스코트 변압기의 2차측 전압, 즉 M상(또는 T상)전압은 그림 11과 같이 55kV이다.

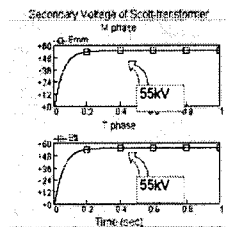


그림 11. 스코트 변압기의 2차측 전압

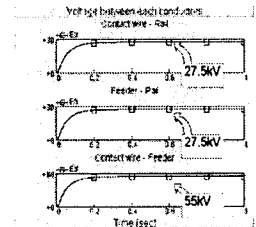


그림 12. 각 도체간 전압

그림 12는 전철변전소 단권변압기의 2차측 전압을 측정하였다. 전차선-레일간 전압(또는 급전선-레일 전압)은 27.5kV였고, 전차선-급전선간 전압은 55kV였다.

그림 13은 차량이 운행되는 상태에서 여러 지점의 전차선 전압을 시뮬레이션 하였다. 전압강하가 있지만 단권변압기가 있는 곳에서는 전압이 상승하는 특성을 보여주고 있다.

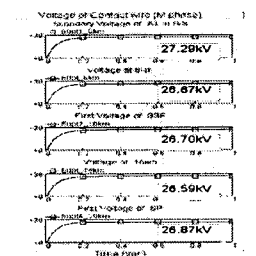


그림 13. 각 지점에서 측정된 전차선 전압

### 5.2.2 거리별 사고지점 사고전류

그림 14는 사고발생 시 그 지점에서 사고전류를 측정하였다. 사고전류는 단권변압기가 설치된 지점에서 사고전류가 가장 컸고, 두 단권변압기 중간 지점의 사고전류가 상대적으로 작았다. 이것은 단권변압기 근처 사고 시 계통 임피던스가 가장 작게 되고 두 단권변압기의 중간 지점에서 사고 시는 계통 임피던스가 가장 크게 되기 때문이다. 그리고 전차선-급전선 사고의 경우 전차선-레일(또는 급전선-레일) 사고보다 전압레벨이 높기 때문에 사고전류는 상대적으로 작게 나왔다.

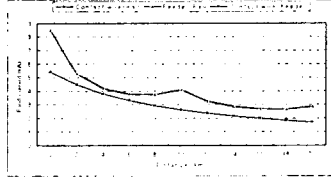


그림 14. 거리별 사고지점 사고전류

### 5.2.3 단권변압기로 흘러들어가는 사고전류

각각의 사고별 전철변전소, 급전구분소, 보조구분소에 흘러 들어가는 사고전류를 시뮬레이션 하였다. 그림 15~17은 각 사고별 단권변압기에 흘러 들어가는 사고전류를 나타낸다.

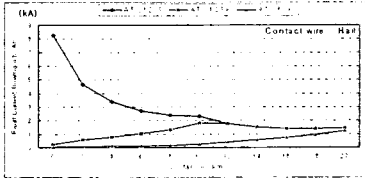


그림 15. 사고전류(전차선-레일사고)

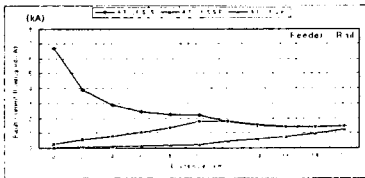


그림 16. 사고전류(급전선-레일사고)

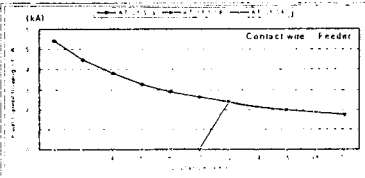


그림 17. 사고전류(급전선-전차선사고)

X축은 사고가 일어난 지점, Y축은 단권변압기로 흘러 들어가는 사고전류 크기를 나타낸다.

각 단권변압기 근처 사고 시 단권변압기로 흘러들어가는 사고전류가 가장 컸다. 그리고 그 이외에서 사고 발생시 사고 전류는 감소하는 특성을 나타내었다.

전차선-급전선 사고인 경우 10km 이전에 사고가 난 경우에는 사고전류가 변전소의 단권변압기에서만 대부분 측정되었고, 10km 이후 사고 시에는 변전소와 보조구분소 단권변압기에서 사고전류가 측정되었다.

### 5.2.4 사고시 레일 전압

사고전류 모의와 마찬가지로, 사고 발생시 사고지점에서 레일 전압상승을 시뮬레이션 하였다. 상승한 레일 전압을 그림 18에 보인다.

전차선-레일 사고인 경우, 레일전압이 3.6kV까지 상승하였다. 이것은 승객과 지상설비의 안전에 영향을 줄 것으로 판단된다. 따라서 이 시스템은 레일 전압상승을 막기 위해 일정한 거리마다 접지를 하는 매설접지 방식을 고려해야 할 것으로 보여진다.

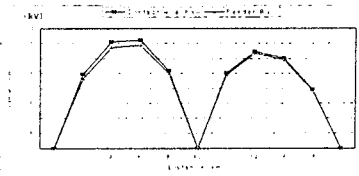


그림 18. 사고시 레일전압

### 5.2.5 차단기 동작시 서지전압

사고 발생 후 0.2초후 차단기가 동작하는 것으로 시뮬레이션 하였다. 그림 18은 차단기 동작시 서지전압을 나타낸다. 전차선-레일 전압이 27.5kV이고 전차선-급전선 전압은 55.0kV이다. 전차선-레일 사고인 경우 서지전압은 374kV인 반면에 전차선-급전선 사고인 경우는 55.0kV만 사고여서 서지전압이 689kV로 나타났다.

이 전압은 전철변전소의 제어기 등에 영향을 미칠 것으로 보인다.

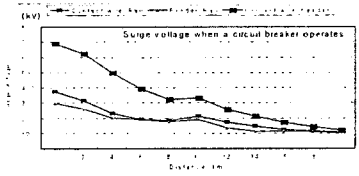


그림 19. 차단기 동작시 서지 전압

## 6. Conclusion

본 논문은 PSCAD/EMTDC를 이용하여 교류 전철급전시스템을 나타냈으며 각 구성요소들은 6단자망 이론을 바탕으로 현 시스템과 동일한 시스템으로 구성되었다.

다양한 시뮬레이션을 통해 교류 전철급전시스템에 대한 특성을 확인할 수 있었다. 먼저, 시스템의 직정성을 확인하기 위해 각 도체간의 전압을 살펴보았다. M상(또는 T상) 전압은 55kV, 전철변전소 단권변압기 2차측 전압은 전차선-레일(또는 급전선-레일)인 경우 27.5kV, 전차선-급전선인 경우 55kV로 시뮬레이션 되었다. 이것은 실제 교류 전철급전시스템과 같았다.

사고 사례연구도 수행되었다. 사고 발생시 사고점에서 측정 한 사고전류는 단권변압기가 설치된 지점에서 사고전류가 가장 컸고, 두 단권변압기의 중간 지점이 사고전류가 상대적으로 작았다. 단권변압기로 흘러들어가는 사고전류 특성은 각 단권변압기 근처 사고시 단권변압기로 흘러들어가는 사고전류가 가장 컸다. 그리고 그 이외에서 사고 발생시 사고 전류는 감소하는 특성을 나타내었다. 사고지점에서 레일 전압상승을 시뮬레이션한 경우 약 3.6kV까지 상승하였다. 따라서 레일 전압상승을 막기 위해 일정한 거리마다 접지를 하는 매설접지 방식을 고려해야 할 것으로 사료된다.

사고전류를 제거하기 위해 차단기 동작 시 서지전압이 발생하였는데, 이 전압 또한 상당한 영향을 미칠 것으로 사료된다.

본 연구에서는 차량 부하를 저항부하로 나타내었다. 향후에는 동특성을 나타내는 부하모델을 구성하여 전철 급전시스템을 해석해야 하겠다.

#### (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] Kwanghae Oh, Hanmin Lee, Sanghoon Chang, "Harmonic Analysis Model Based on 8-port Representation for Korean High Speed Railway", 2001
- [3] Tohmyy Bustad, Anders Bulund, Gyorgy Varju, "Auto-Transformers-Design Basis and Criteria", 2nd annual railway electrification and power supply, 1998
- [4] Korea Railroad Research Institute, "Evaluation of Power Quality and Its Countermeasure In Seoul-Daejeon High-speed Railway", 2000, 12.