

순시치 해석용 전철급전계통 모델개발

Model development of electrified railroad supply system
for Electromagnetic Transient Analysis윤재영¹⁾ · 최홍관²⁾ · 김종율³⁾ · 위상봉⁴⁾

Jae-Young Yoon · Heung-Kwan Choi · Jong-Yeul Kim · Sang-Bong Wee

Keywords : electrified railroad system, EMTDC Model, power flow analysis**Abstract**

This paper presents the first simulation model using EMTDC program to analyze the electrified train voltage distribution characteristics in ac auto-transformer fed railroads. In general, all of the electrified train supply system has the characteristics that the train supply line is a naturally non-symmetrical and unbalanced system. Also, it is needed to model the Scott transformer which invert the balanced 3-phase quantity into 2-phase. Therefore, the general simulation methodology using previous simplified equivalent circuit or RMS based program can't obtain the accurate results to reflect the real-time operation because these methodology is basically assumed on completely 3-phase balanced system. To overcome these defects, in this paper, the EMTDC simulation model to analysis the completely electrified railroad system with Scott transformer and AC auto-transformer is presented. Also, the correctness of EMTDC modeling is confirmed by the old basic concepts and we think that this EMTDC model has the future powerful capability for application of railroad system analysis.

1. 서론

통상적으로 우리나라에서 적용하고 있는 3상 22.9[kV] 중성선 다중접지 방식 배전계통은 해당 시스템을 평형상태로 가정할 경우 정상분만을 고려한 단상계통으로 해석할 수 있다. 하지만, 전철급전 계통은 한전 변전소에서 Scott 변압기에 의하여 3상을 단상으로 변환하며, 단상 2×25[kV] AT(단권변압기: Auto Transformer) 급전방식이라는 특이한 형태로 구성되

어 있기[1~2] 때문에 기존의 송배전 계통에서 적용하는 방법으로는 정확한 해석결과를 얻을 수 없다.

이와 같은 특성을 가진 급전계통의 정태해석 방법은 간략 계산식을 활용하거나[4], 혹은 전차선, 급전선 및 레일이 평형을 이룬다는 가정 하에서 유도한 식을 사용하여 왔다[5]. 또한, 이러한 간략 계산식에 따른 오차를 줄이기 위하여 급전계통을 등가화된 회로망으로 상정하여 수식화한 급전계통 회로망 모델을 개발하여 사용하였다[6]. 하지만, 실제적인 급전계통은 3상이 아닌 2상 시스템이며, 선로 또한 비대칭 형태를 띄고 있기 때문에 평형시스템이라는 가정은 모순을 지니고 있다. 즉, 지금까지 개발된 모든 급전계통 해

1) 정희원, 한국전기연구원 신전력시스템연구그룹장 책임연구원

2) 정희원, 한국전기연구원 신전력시스템연구그룹 선임연구원

3) 정희원, 한국전기연구원 신전력시스템연구그룹 연구원

3) 정희원, 한국기술교육대학교 교수

석방법은 기본적으로 급전계통을 평형시스템으로 가정한 실효치를 근간으로 하는 방법이므로 정확한 해석을 위해서는 불평형 시스템을 고려하는 것이 바람직하다. 따라서, 보다 정확한 해석 및 장래 과도해석에 적용하기 위해서는 순시치를 기반으로 하는 불평형 모델을 개발하고 이에 따라서 해석해야 한다.

이러한 목적을 위하여 본 논문에서는 EMTDC 프로그램을 활용하여 급전계통의 순시치 베이스 전압강하 해석을 할 수 있는 해석모델을 개발하였다. 즉, 본 연구를 통하여 급전계통 해석용으로 EMTDC를 활용하기 위하여 기존 EMTDC 모델에는 없는 Scott 변압기 모델과 불평형 급전선로에 대한 사용자 정의모델 및 정전력 부하모델(User Defined Library)을 개발하였다. 그리고, 상기한 바와 같이 본 연구에서 개발된 모델과 기존 EMTDC 제공모델을 조합하여 급전계통 해석용 EMTDC 모델을 고안하였으며, 이러한 급전계통 해석용 EMTDC 모델에 대하여 표준적인 전철 운전사례 연구를 통하여 순시치 베이스 전압강하 해석과 개발된 모델링의 정확성을 검증하였다.

2. 급전계통 구성방식

일반적인 전기철도의 급전계통은 직접급전방식, BT 급전방식 및 AT급전방식의 세 가지로 분류된다[2]. 각각의 방식은 나름대로의 장단점을 가지고 있는데, 현재 세계 각국의 고속철도는 전압강하와 통신선 유도장해 경감을 위하여 대부분 AT급전방식을 사용하고 있으며, 우리나라 역시 직류를 사용하고 있는 대도시 내부의 지하철을 제외한 대부분의 도시 간 전철과 고속철도용 급전계통은 Fig 2.1과 같은 2×25[kV] AT급전방식을 채용하고 있다[1]. 이와 같이 2×25[kV] AT급전방식을 사용하는 근본적인 이유는 전철변전소의 송출전압이 전철부하의 사용전압인 25[kV]의 2배인 50[kV]가 되어 전압강하가 감소하며, 단권변압기를 사용하므로 양방향성 전원형태가 되어 급전구간을 증가시키는 것이 가능하기 때문이다. Fig 2.2는 AT급전방식에서 급전선로의 구성방식을 나타낸 것으로서 한 전 변전소에서 수전 받은 전력을 전철변전소에서 Scott 변압기를 통하여 3상을 2상(M상 및 T상)으로 변환하여 전철 급전선로에 전력을 공급하는 계통도를

표현한 것이다[7].

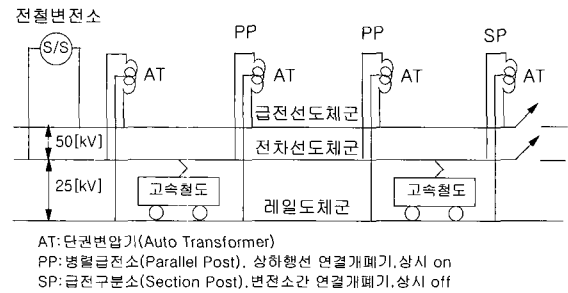


Fig 2.1 2×25[kV] AT 급전방식

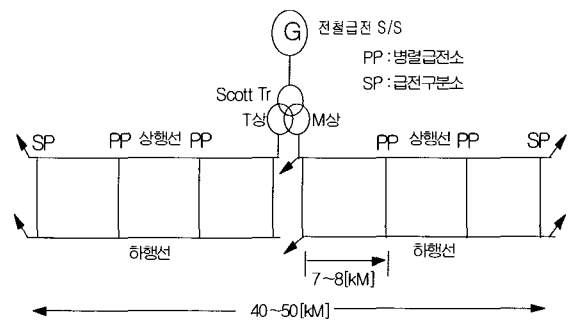


Fig 2.2 급전계통 수전 방식

Fig 2.1~2.2의 급전계통에서 일반적인 급전선로 형태의 예를 나타내면 Fig 2.3과 같은데, 전형적인 송전선로와는 달리 상하행선 각각 전차선(Catenary), 급전선(Feeder) 및 레일(Rail) 도체군으로 구성되어 있으며 완전한 선로 불평형 상태임을 알 수 있다.

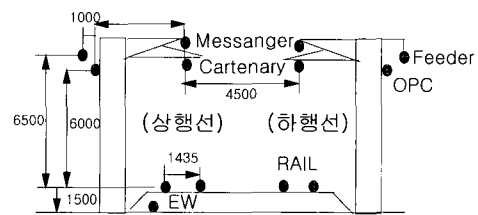


Fig 2.3 급전선로 구성방식 (단위:[mm])

그리고, 인근 한전 변전소를 포함한 전체 급전계통의 구성형태는 Fig 2.4와 같은데, 상하행선 각각을 연결하는 병렬급전소(PP), 급전구분소(SP) 혹은 보조 급전구분소로 구성되어 있다.

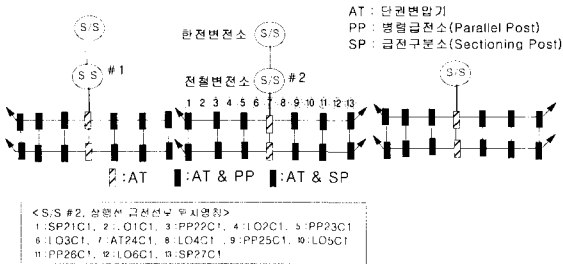


Fig 2.4 급전계통 구성형태

결과적으로, 상기한 바와 같이 전형적인 송배전 계통과는 완벽히 상이하게 구성되어 있는 전철 급전계통에 대한 해석에 있어서, 지금까지의 실효치를 근간으로 하는 간략 해석방법과 달리 정확하게 해석하기 위해서는 EMTDC와 같은 순치치 해석방법이 유효하며, Scott 변압기, 불평형 전철 급전선로 및 전철부하 자체에 대한 별도의 정확한 모의방법이 요구된다고 할 수 있다.

3. 전철 급전계통 기기모델 개발

3.1 Scott 변압기모델 개발

Scott 변압기는 3상 전력을 두 개의 단상 전력(M상 및 T상)으로 변환시키는 3상-2상 변환장치로서 전철 급전변전소에서 전철부하 공급용으로 사용된다. Fig 3.1은 Scott 변압기의 결선도 및 전압 페이지를 도시한 것인데, 1차 측 3상 전압(Va Vb Vc)을 90°위상차를 갖는 두 개의 단상전압(V_M, V_T)으로 변환하고 있다.

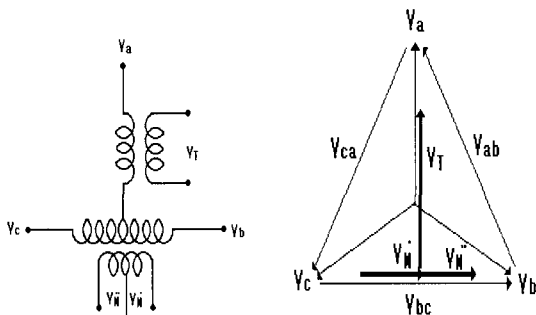


Fig 3.1 Scott 변압기의 결선도 및 페이지도

Fig 3.1에서 T좌 전압 V_T와 M좌 전압 V_M 및 V_{M'}를 1차 측 선간 전압으로 표현하면 식 (3.1)과 같으며, Scott 변압기의 T상과 M상의 권선 비는 각각 $\sqrt{3}/2 N_1:N_2$, $N_1:N_2$ 이다. 마찬가지로 M상과 T상의 전류관계는 식 (3.2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{pmatrix} V_T \\ V_{M'} \\ V_{M''} \end{pmatrix} = \frac{N_2}{N_1} \begin{pmatrix} \frac{2}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{3}} & 0 \\ 0 & \frac{1}{2} & 0 \\ -\frac{1}{2} & 0 & -\frac{1}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_{ab} \\ V_{bc} \\ V_{ca} \end{pmatrix} \quad (3.1)$$

$$\begin{pmatrix} I_T \\ I_{M'} \\ I_{M''} \end{pmatrix} = \frac{N_1}{N_2} \begin{pmatrix} \frac{\sqrt{3}}{2} & 0 & 0 \\ \frac{1}{2} & 1 & 0 \\ \frac{1}{2} & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{pmatrix} \quad (3.2)$$

본 연구에서는 식 (3.1)과 같은 Scott 변압기 1차측/2차측 변환식과 EMTDC 내의 단상 변압기 모델을 활용하여 Fig 3.2와 같이 Scott 변압기를 EMTDC로 모의하였다. 그리고, 3상 등가 전압원을 Scott 변압기 1차측에 인가하여 2차측 M상 및 T상 전압을 해석하여 정확성을 검증하였다. Fig 3.3은 M상/T상 전압과 3상 전압원의 파형을 예로써 나타낸 것인데, M상과 T상의 위상차가 90°를 유지하며, 전압크기도 동일함을 알 수 있다.

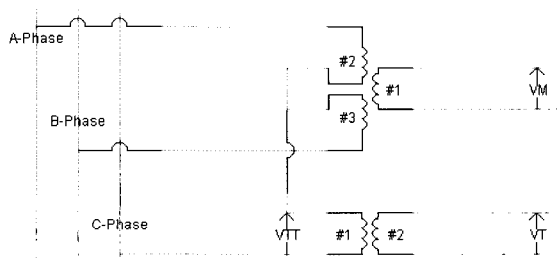


Fig 3.2 Scott 변압기 EMTDC 모델

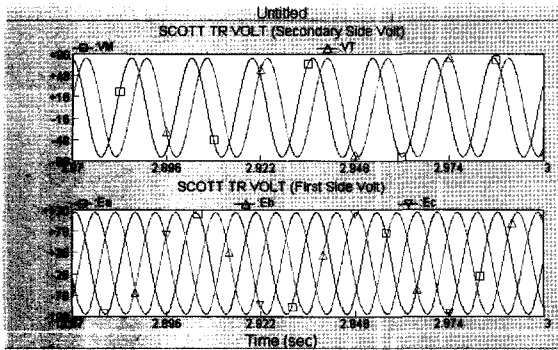


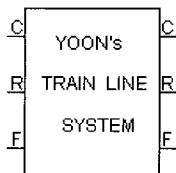
Fig 3.3 Scott 변압기 1차/2차 측 전압 파형 예

3.2 급전선로 모델개발

Fig 2.3에 나타난 것처럼 전철 급전선로는 전차선(Catenary), 급전선(Feeder) 및 레일(Rail) 3개 도체군으로 구성되어 상호 결합되어 있는 전형적인 불평형 선로로서 식 (3.3)과 같이 표현할 수 있다.

$$[Z_{CRF}] = \begin{bmatrix} Z_{CC} & Z_{CR} & Z_{CF} \\ Z_{RC} & Z_{RR} & Z_{RF} \\ Z_{FC} & Z_{FR} & Z_{FF} \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

현재 EMTDC 선로모델에서는 3상 송전선로에서 사용할 수 있는 분포정수 선로 모델 및 PI 회로 모델이 있지만, 급전계통에서 적용할 수 있는 단상 3상 도체군 2개로 구성된 상하행선 6상 선로모의 방법은 없다. 물론 대안으로 분포정수 선로를 사용할 수는 있지만 단위 구간당 선로길이가 짧고 배전전압 계급이므로 부적합한 측면이 있기 때문에 본 연구에서는 Fig 2.3와 같은 기하학적 배치를 가진 급전선로를 모의하기 위하여 Fig 3.4와 같은 사용자 정의모델을 개발하여 적용하였다. 이러한 급전선로용 모델은 각 도체군간에 직렬임피던스와 도체군 상호간의 결합임피던스를 모의할 수 있으며, 이에 대한 정확성은 단상 등가전압원을 인가하여 산술계산과 비교하면서 검증하였다.



IMPEDANCE OF TRAIN SUPPLY LINE	
Catenary Resistance	1.0
Catenary Reactance	1.0
Rail Resistance	1.0
Rail Reactance	1.0
Feeder Resistance	1.0
Feeder Reactance	1.0
Catenary-Rail Resistance	1.0
Catenary-Rail Reactance	1.0
Catenary-Feeder Resistance	1.0
Catenary-Feeder Reactance	1.0
Rail-Feeder Resistance	1.0
Rail-Feeder Reactance	1.0

Fig 3.4 전철 급전선로 사용자 정의모델

3.3 전철부하 모델개발

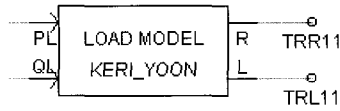
전철부하는 전형적으로 Inverter로 구동하는 정전력 부하의 특성을 나타내며, 역률 역시 0.98 이상으로서 매우 높은 편이다. 그러나, 현재 EMTDC에서는 부하를 임피던스로 표현을 하는데, 임피던스 부하는 전압의 상승에 비례하여 소비전력이 변동하므로 전철부하의 특성을 모의하는 데는 곤란한 측면이 있다. 따라서, 전철부하를 모의하기 위하여 식 (3.4)와 같이 전압특성에 따라서 소비전력이 달라지는 사용자정의 모델을 개발하여 적용하였다. Fig 3.5는 이러한 다항식 부하정의 모델을 개발하여 예시한 것이며, 기본적인 등가회로를 통하여 모델의 정확성을 검증하였다.

$$P_{TR} = P_0 (K_{P0} + K_{P1} V_{PU} + K_{P2} V_{PU}^2)$$

$$Q_{TR} = Q_0 (K_{Q0} + K_{Q1} V_{PU} + K_{Q2} V_{PU}^2) \quad (3.4)$$

여기서,

P_{TR}, Q_{TR} : 전철 소비전력 (MW/MVar)
 P_0, Q_0 : 전철기준(V=1.0pu) 소비전력 (MW/MVar)
 $K_{P0} \dots K_{P2}, K_{Q0} \dots K_{Q2}$: 소비유효/무효전력의 전압의존성 계수



Polynomial Load Model	
Number of Polynomial Order	2
P-V*0 coefficient	1.000
P-V*1 coefficient	0.000
P-V*2 coefficient	0.000
Q-V*0 coefficient	1.000
Q-V*1 coefficient	0.000
Q-V*2 coefficient	0.000

Fig 3.5 전철부하 사용자 정의모델

4. 전철 급전계통 해석 예 및 결과고찰

제 2장에서 기술한 실 급전계통 구성방식과 제 3장에서 개발한 급전계통 내의 EMTDC 기기 모델링 기법을 사용하여 대표적인 급전계통 운전조건에서의 해석결과 예를 나타내면 다음과 같다.

4.1 해석대상 계통

위에서 모의한 Scott 변압기, 급전선로 모델링 및 정전력 특성을 가지는 전철부하 모델링을 포함한 급전선로 해석대상 계통을 나타내면 Fig 4.1과 같다.

Fig 4.1의 해석대상 계통에서 주요 구성요소들의 정격 및 파라미터는 대표적인 고속전철 시스템의 값을 적용하였으며 다음과 같다.

가. 한전 전원특성 (EMTDC 내부모델 활용)

154kV 등가전압원 (전원임피던스 $5.0 \angle 85^\circ(\Omega)$, 3상 고장전류 18kA)

나. Scott 변압기 (사용자정의 개발모델 활용)

154/55(kV) M상 및 T상, $90(=45 \times 2)$ MVA, $\%Z=0.125$ pu

다. 단권 변압기 (EMTDC 내부모델 활용)

27.5/25.7(kV) 10MVA, $\%Z=0.06$ pu

라. 급전선로 구간별 길이

(사용자정의 개발모델 활용)

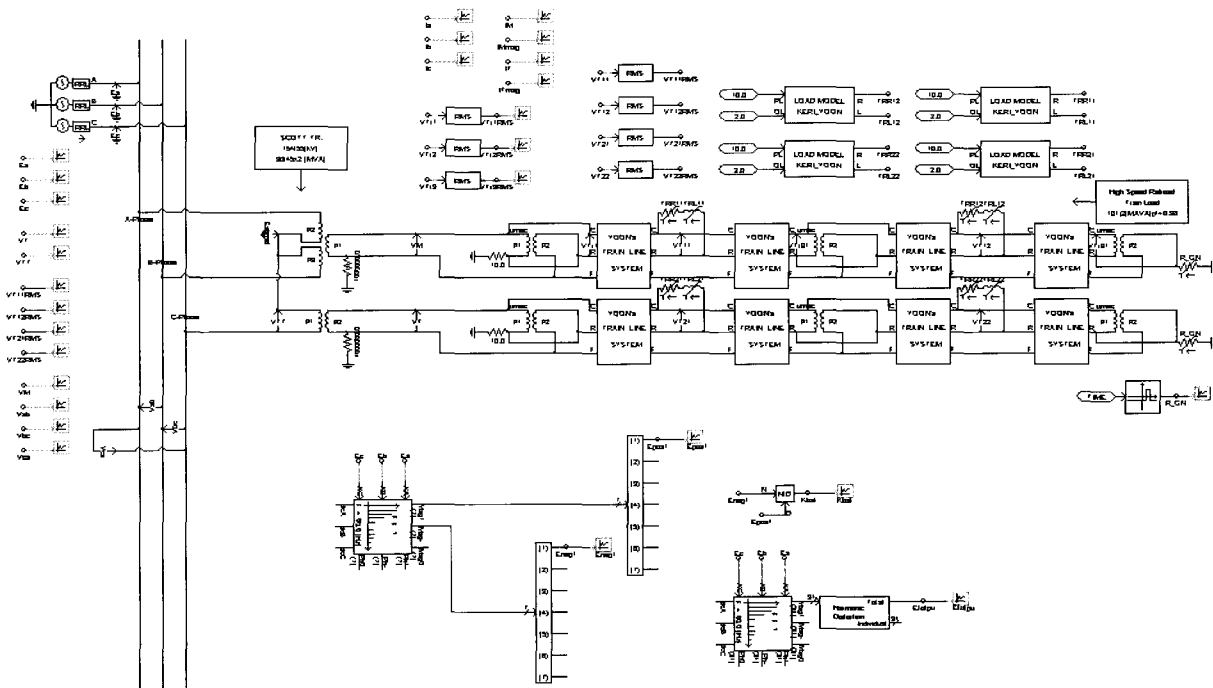


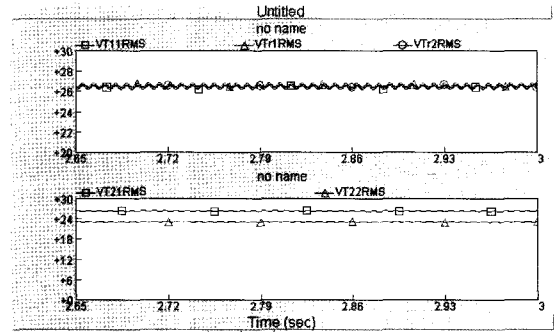
Fig 4.1 급전계통 해석대상계통

- 급전선로 길이 : 3.0(km)
- (구간길이 변경하면서 case study 가능)
- 급전선로 임피던스 (Ω /km)

$$[Z_{CRF}] = \begin{bmatrix} Z_{CC} & Z_{CR} & Z_{CF} \\ Z_{RC} & Z_{RR} & Z_{RF} \\ Z_{FC} & Z_{FR} & Z_{FF} \end{bmatrix}$$

마. 부하모델 (사용자정의 개발모델 활용)

- 10+j2 (MVA), pf=0.98 적용
- M상 및 T상 3km 및 9km 위치에 열차부하 존재 (총 4개 열차 모의)
- (열차위치 변경 모의 batch case study 가능)

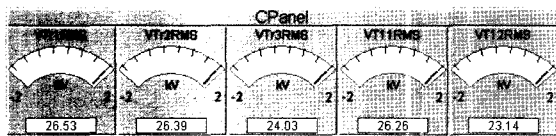


(c) M상 열차, 양단 단권변압기 및 T상 열차전압 실효치(kV)

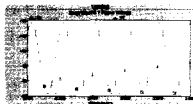
Fig 4.2 급전계통 해석대상계통

4.2 기본 사례 해석결과 고찰

앞 절에서 기술한 급전계통 구성형태와 기본 파라미터에 대하여 해석한 각 지점의 전압 파형과 해석결과를 나타내면 아래 Fig 4.2와 같다. Fig 4.2-(a)는 Scott변압기 M상에서 단권변압기 및 열차위치에 따른 전압 실효치(kV)를 나타낸 것인데, 해당 열차전압보다 양단 단권변압기 전압실효치가 더 높음을 알 수 있다. 이는 단권변압기가 전원특성을 가지는 전형적인 예를 보여주는 것이다. 또한, Fig 4.2-(b)는 Scott변압기 M상 및 T상의 전압 순시치 파형인데, 전압크기가 일치하며 위상차이가 90°를 나타내는 등 Scott변압기의 특성을 그대로 반영하고 있음을 알 수 있다. 그리고, Fig 4.2-(c)는 M상 열차, 양단 단권변압기 및 T상 열차전압 실효치(kV)를 나타낸 것인데, 위에서 언급한 바와 같이 기본적인 급전선로의 전압특성과 정확히 일치하고 있다.



(a) Scott변압기 M상 단권변압기 및 열차위치의 전압 실효치(kV)



(b) Scott 변압기 M상 및 T상 전압파형(kV)

4.2 사례 연구 해석결과 고찰

본 논문에서 개발한 여러 가지 EMTDC 전철급전계통 기기 모델링의 정확성을 검증하기 위하여 기본적인 몇 가지 경우에 대하여 기본해석 케이스에서 각각의 파라미터를 변경하면서 사례 연구를 시행하였다. 사례 연구 종류는 다음과 같이 나눌 수 있으며 각각의 경우에 단권 변압기와 열차 전압을 고찰하였다.

- 급전선로 길이변경 : 기본 사례에서 3.0(km)인 급전선로 길이 변경
- 열차대수 변경 : 기본 케이스에서 M상, T상 각 2대인 열차대수를 변경
- 열차부하 변경 : 열차 1편성당 10+j2(MVA)인, 열차부하를 변경

Table 4.1의 사례 연구 해석결과에서 모든 경우 단권변압기와 열차 전압간의 상호 분포 관계는 전형적인 급전선로의 특성을 정확하게 반영하고 있다. 우선, 급전선로 길이를 변경한 [사례-1]을 살펴보면 급전선로 구간길이가 기본 케이스보다 짧은 3.0km 일 때는 단권변압기와 열차전압이 상승하였으나, 7.0km로서 기본 케이스보다 길어지면 전압이 저하되었음을 알 수 있다. 또한, [사례-2]에서 M상에만 2개 열차가 있는 경우는 기본 케이스보다 약간 전압이 상승하는데 불과하다. 하지만, M상에는 열차가 없고 T상에만 2개 열차가 있으면 M상의 전압은 급전선로의 선로충원용량 때문에 전원전압 27.0(kV)보다 오히려 더 높아짐을 알 수 있다. 마지막으로 [사례-3]에서 열차 1

편성당 부하를 10+j2(MVA)에서 각각 50% 감소 혹은 증가시킨 경우, 단권변압기와 열차전압은 부하증가에 반비례하는 당연한 결과를 나타내었다.

Table 4.1 사례 연구 해석결과 (M상 단권변압기 및 열차 전압 실효치)

해석 CASE		VTr1 (kV)	VTr2 (kV)	VTr3 (kV)	VT11 (kV)	VT11 (kV)	비 고
기본 사례	5.0km	26.53	26.39	24.03	26.26	23.14	
사례-1 (급전선로 구간길이 변경)	3.0km	26.57	26.45	24.69	26.38	24.12	길이 감소
	7.0km	26.43	26.28	22.53	26.02	20.92	길이 증가
사례-2 (열차대수 변경)	M상만 2대	26.57	26.45	24.69	26.38	24.12	T상 열차 없음
	T상만 2대	27.31	27.31	27.29	27.31	27.29	M상 열차 없음
사례-3 (열차부하 MVA 변경)	5+j1	26.99	26.93	26.15	26.89	25.89	부하 감소
	15+j3	26.00	25.80	22.63	25.70	21.68	부하 증가

5. 결론

본 논문에서는 고속전철 급전계통의 순시치 전압강하 해석을 위한 EMTDC 모델을 개발하여 사례연구 해석결과 고찰을 통하여 급전계통 구성방식과 기기 모델링의 정확성을 고찰하였다. 본 논문의 연구결과에 따른 결론을 기술하면 다음과 같다.

- (1) 과거 급전계통의 전압강하를 계산한 방법은 급전선로의 비대칭 및 불평형성을 무시하였거나, 이를 고려하였더라도 실효치 정태해석 방법을 기준으로 한 것이었다. 이에 대하여 본 논문에서는 순시치 해석도구인 EMTDC 사용자 정의 모델을 활용한 전기철도 전압강하 해석방법론을 최초로 적용하였다. 이는 기존의 급전선로 정태전압 해석은 물론이고 향후 급전계통에 대한 다양한 과도해석의 기초를 구축하였다고 말할 수 있다.
- (2) EMTDC에서 전기철도 급전계통을 정확하게 모의하기 위해서는 기존의 EMTDC 모델 외에 Scott 변압기, 불평형 급전선로 및 정전력 일정역

률 열차부하를 모의할 수 있어야 한다. 이를 위하여 본 논문에서는 위의 급전계통용 전력기기를 사용자정의 모델을 최초로 개발하여 적용하였으며, 개별 기기에 대하여 모델링의 정확성을 검증하였다.

- (3) 일반적인 급전계통 구성방식과 본 논문에서 개발된 기기 모델링 방법 및 표준 파라미터를 적용하여 급전계통에 대한 기본 해석을 시행하였으며, 급전선로 구간길이 등 몇 가지 파라미터를 변경한 사례 연구를 시행하였다. 각각의 해석 경우에 대하여 기본 해석결과와 상호간의 연관성을 고찰하였으며, 그 결과 본 논문에서 제안한 기기 모델링 및 해석방법은 급전계통의 특성을 그대로 반영한 정확한 결과로서 판단되었다.
- (4) 본 논문에서 적용한 급전계통 구성방식과 형태는 전형적인 예이며, 적용한 파라미터 역시 일반적인 것이다. 따라서, 향후 이에 대하여 실 급전계통의 특성을 반영한 보다 세밀한 자료의 취사선택이 요구된다. 또한, 본 논문에서 고안한 급전계통의 해석 방법론을 동태해석 및 기타 급전계통에서 발생하는 고조파 및 불평형 해석 등에 적용할 수 있도록 지속적인 연구가 필요하다고 사료된다.

참고문헌

1. 한국고속철도 건설공단, “고속철도 연구보고서(전기분야)”, 1996. 2.
2. 한국전기연구소, “경부 고속전철용 전력공급의 비용절감 방안 연구”, 1992. 10.
3. Charles A. Gross, "Power System Analysis", 1979.
4. 일본전기학회, “직류전기철도의 보호 및 보호협조 연구”, 1995. 5.
5. J.D.Glover, A.Kusko, S.M.Peeran, "Train Voltage Analysis for AC Railroad, 1985
6. Electrification", IEEE ISAA2:ISA, 1982
7. 윤재영, 대한전기학회 논문지, “급전회로망 해석기법을 활용한 고속전철 조류해석 기법”, 2000. 12, pp 624~629
8. 한국전기연구소, “급전시스템 해석기술 개발”, 1999. 10
9. Manitoba HVDC Center, "EMTDC Manual", 2001
10. 건설교통부, 통상산업부, 과학기술처, “고속전철 시스템 엔지니어링 기술개발”, 1997. 11.
11. 건설교통부, 산업자원부, 과학기술부, “전기신호시스템 엔지니어링 기술개발”, 1999. 10.