

교류전기철도 급전시스템의 전차선 전압해석

Analysis for Catenary Voltage of The ATs-Fed AC Electric Railroad System

이승혁*
Lee, Seung-Hyuk

정현수**
Jung, Hyun-Soo

김진오***
Kim, Jin-O

Abstract

This paper presents exact Autotransformers(ATs)-fed AC electric Railroad system modeling using constant current mode for locomotives. An AC electric railroad system is rapidly changing single-phase load, and at a feeding substation, 3-phase electric power is transferred to paired directional single-phase electric power. As the train moves along a section of line between two adjacent ATs. The proposed AC electric railroad system modeling method considers the line self-impedances and mutual-impedances. The constant current mode model objectives are to calculate the catenary and rail voltages with the loop equation. When there are more than one train in the AC electric railroad system, the principle of superposition applies and the only difference between the system analyses for one train.

Finally, this paper shows the general equation of an AC electric railroad system, and that equation has no relation with trains number, trains position, and feeding distance.

1. 서론

일반적으로 송·배전 계통은 3상 평행부하인 반면에 교류전기철도 부하는 단상 대용량 집중부하로 이 통과 정지가 빈번하고 부하변동이 극심한 전기적 특성을 갖고 있기 때문에 급전계통에 필연적으로 전압강하로 인한 전압변동 및 불평형 그리고 전력변환장치나 제어장치에 전력용 반도체 소자로 인한 고조파 등 많은 문제가 발생되고 있다. 또한 교류전기철도 부하는 일반적인 부하특성과는 상이하게 물리적으로 부하 위치가 빈번하게 변화하는 등 급전계통의 전기적 특성이 열차의 물리적 환경에 따라 변하기 때문에 특성을 고려하여야 하며 전철변전소 사고에 의한 연장급전이나 향후 교통량 증가에 의한 중대부하 운행 등에도 대처하지 않으면 안 된다. 그러나 이러한 교류전기철도 급전시스템의 물리적이고 전기적인 특성을 충분히 고려하여 가장 문제가 되는 전압강하의 상세 분석 및 해석이 가능한 일반적인 수리모델이 없어 전압강하의 해석이 부족하였다. 따라서 본 논문에서는 이와 같은 현실적인 교류전기철도 급전시스템의 전차선 전압강하 해석 필요성과 향후 교류전기철도 확장에 대비하여 급전시스템을 정확하게 해석함으로써 열차의 어떠한 환경에서도 전압강하 해석이 가능한 수리모델을 개발하는데 중점을 두었으며 이를 일반화시켰다. 또한 전기철도 차량은 정전류 부하모델을 사용하였는데 이는 열차 부하는 동적인 부하이지만 역률이 1에 가깝고 열차 부하의 구동 전동기는 전기적 출력을 일정하게 유지하려는 특성이 있기 때문이다.

* 한양대학교 석사과정, 학생회원

** 한양대학교 박사과정, 정회원

*** 한양대학교 부교수, 정회원

교류전기철도 급전시스템의 전차선 전압강하 해석은 회로망 해석법(Mesh Analysis Method)과 마디 해석법(Node Analysis Method)을 이용하여 주로 해석하고 있으나 마디 해석법은 주로 정임피던스 부하모델을 이용한 간략 해석방법에 사용하므로 본 논문에서는 회로망 해석법을 이용한 해석을 하여 이를 수학적으로 일반화하였다. 또한 일반화한 수식의 검증을 위하여 PSCAD/EMTDC 시뮬레이션을 행하였다.

2. 교류전기철도 급전시스템의 모델링 및 전차선 전압강하 해석

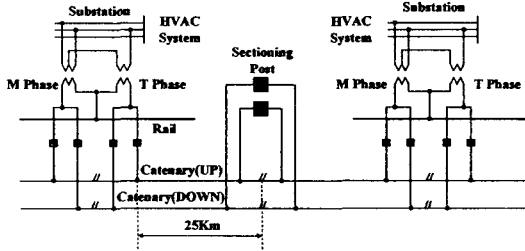


Fig. 1 전형적인 교류전기철도 급전시스템

Table. 1 AT 급전시스템의 해석을 위한 입력변수

V_S	전철변전소 전원 전압 25 [kV]	Z_{ff}	급전선 자기임피던스 0.2036+j0.8847 [Ω /km]
Z_S	전철변전소 전원 임피던스 2.36+j19.5 [Ω /km]	Z_{cf}	전차선-레일간 상호임피던스 0.058+j0.369 [Ω /km]
Z_c	전차선 자기임피던스 0.1192+j0.7522 [Ω /km]	Z_{cr}	전차선-급전선간 상호임피던스 0.051+j0.361 [Ω /km]
Z_r	레일 자기임피던스 0.1618+j0.6709 [Ω /km]	Z_{rf}	레일-급전선간 상호임피던스 0.053+j0.373 [Ω /km]

기존의 교류전기철도 급전시스템 해석방법들은 해석의 어려움 때문에 주로 전차선로에 1 대의 열차가 존재하는 경우를 가정하여 간략 해석방법에 의하여 해석해 왔기 때문에 단권변압기(AT) 급전시스템의 전기적 특성이 충분히 반영되었다고 볼 수 없다. 이것은 열차가 여러 대 운행될 때 열차 상호간의 영향으로 인해 생기는 전기적인 특성을 무시하고 해석한 것이라 할 수 있다.

전차선 전압강하 해석은 열차가 동작인 부하이기 때문에 대단히 복잡하여 열차의 위치, 대수, AT 등에 따라 전차선로의 전압, 전류에 따른 무수한 전압 방정식이 필요하다. 하지만 이러한 방정식을 자세히 해석해 보면 유사점을 발견할 수 있으며 본 논문에서는 이와 같은 전차선 전압을 범용적으로 해석하기 위하여 우선 다음과 같은 몇 가지의 경우를 모델링하였다. 또한 전차선 전압을 계산함에 있어서 입력변수는 표 1과 같다.

2.1 열차를 중심으로 한 전압식의 유도

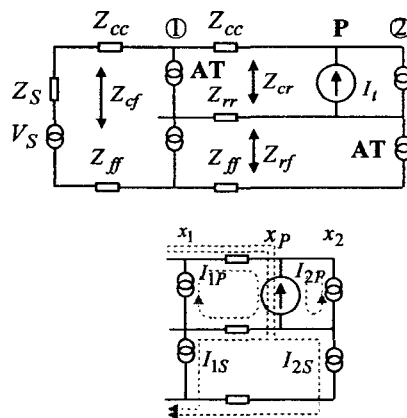


Fig. 2 단일 AT 구간만의 AT 급전시스템

AT 급전시스템의 전압식을 유도하기 위하여 그림 2와 같이 전철변전소 전원과 2 대의 단권변

압기(AT: ①,②) 사이에 열차(P)가 운행되고 있는 간단한 경우를 고찰하였다. 일반적으로 교류전 기철도 AT 급전시스템은 열차를 중심으로 오른쪽, 왼쪽에 각각의 순환전류가 정전류원인 열차전 류의 1/2 씩 흐르게 된다. 또한 이렇게 흐른 전류는 AT에 강제 흡상 순환되어 다시 열차에 공급 되게 된다. 결국 열차를 중심으로 방향이 반대인 전류가 흐르므로 열차의 오른쪽, 왼쪽에 대해 전 차선 전압강하를 고려해야 한다. 따라서, 각 반대 방향으로 전류를 고려하기 위하여 전철변전소의 전압, 열차를 중심으로 왼쪽(전철변전소 방향)의 전압, 그리고 오른쪽(급전구분소 방향)의 전압으 로 나누어 전차선 전압을 구할 수 있다.

1) 전철변전소 구간에서의 전차선 전압

전철변전소에서부터 첫 번째 AT 구간(x_1)에서는 레일이 존재하지 않으므로 레일의 자기임피던스에 의한 전압강하가 발생하지 않는다. 급전선을 통해 전철변전소의 전원으로 유입되는 전류는 $I_t/2$ 이므로 전철변전소에서부터 첫 번째 AT 사이의 전차선 전압 $V_{01}(x)$ 는 식 (1)과 같다.

$$V_{01}(x) = V_S - Z_S \cdot \frac{I_t}{2} - (Z_{cc} - Z_{cf}) \frac{I_t}{2} \quad (1)$$

2) 열차를 중심으로 전철변전소 방향의 전압

AT에 의해 강제 흡상된 전류는 급전선을 통해 전철변전소 전원으로 유입된 전류와 다시 합해져 열차에 공급되고 이는 항상 정전류원인 열차전류(I_t)와 동일하게 된다. 따라서 이때의 전차선에 공급되는 전류는 강제 흡상된 전류(I_{1P})와 전원에서 공급되는 전류(I_{1S})의 합으로 $2 \cdot I_{1P}$ ($I_{1P} = I_{1S}$)가 된다. 마찬가지로 레일에 흐르는 전류도 이와 같이 $2 \cdot I_{1P}$ 가 되고 급전선을 통해 전원으로 유입되어 다시 열차에 공급되는 전류 I_{2P} 에 의해 발생하는 전압강하 부분도 함께 고려해야 한다.

결국 열차를 중심으로 전철변전소 방향인 왼쪽에 대해 첫 번째 AT(AT_1)와 열차 사이의 임의의 위치에 대한 전차선의 전압은 식 (2)와 같이 표현된다.

$$V_{1P}(x) = V_{01}(x_1) - 2(Z_{cc} - Z_{cf})I_{1P}(x - x_1) - (Z_{cc} - Z_{cf})I_{2P}(x - x_1) \quad (x_1 \leq x < x_P) \quad (2)$$

3) 열차를 중심으로 급전구분소 방향의 전압

전철변전소 방향인 왼쪽의 수식과 마찬가지로 열차를 중심으로 급전구분소 방향인 오른쪽에 대해 전차선 전압은 식 (3)과 같다.

$$V_{2P}(x) = V_{1P}(P) + (Z_{cc} - 2Z_{cf} + Z_{cf})I_{2P}(x - x_P) \quad (x_P \leq x < x_2) \quad (3)$$

2.2 AT 급전시스템의 전차선 전압의 일반화된 수식

앞의 임의의 간단한 경우 및 여러 가지 경우에 대한 전차선 전압 해석을 종합적으로 분석하여 보면 각 구간별, 즉 전철변전소와 첫 번째 AT, 운행되고 있는 열차를 중심으로 좌·우측의 형태로 일정한 규칙성을 지니고 있음을 알 수 있다. 전철변전소와 첫 번째 AT 사이 구간에서는 항상 식 (4)와 같은 전압식이 성립한다.

$$V_{01}(x) = V_S - Z_S \cdot \frac{I_t}{2} - A \cdot \frac{I_t}{2} \quad (4)$$

열차의 좌·우측 전압식은 다음과 같이 일반화된다.

$$V_{ij}^L = V_{prev} - (B \sum_{k=1}^i I_{kP} + A \sum_{k=i+1}^n I_{kP}) \cdot (x - x_i) \quad (5)$$

압기(AT: ①,②) 사이에 열차(P)가 운행되고 있는 간단한 경우를 고찰하였다. 일반적으로 교류전 기철도 AT 급전시스템은 열차를 중심으로 오른쪽, 왼쪽에 각각의 순환전류가 정전류원인 열차전 류의 1/2 씩 흐르게 된다. 또한 이렇게 흐른 전류는 AT에 강제 흡상 순환되어 다시 열차에 공급 되게 된다. 결국 열차를 중심으로 방향이 반대인 전류가 흐르므로 열차의 오른쪽, 왼쪽에 대해 전 차선 전압강하를 고려해야 한다. 따라서, 각 반대 방향으로 전류를 고려하기 위하여 전철변전소의 전압, 열차를 중심으로 왼쪽(전철변전소 방향)의 전압, 그리고 오른쪽(급전구분소 방향)의 전압으 로 나누어 전차선 전압을 구할 수 있다.

1) 전철변전소 구간에서의 전차선 전압

전철변전소에서부터 첫 번째 AT 구간(x_1)에서는 레일이 존재하지 않으므로 레일의 자기임피던 스에 의한 전압강하가 발생하지 않는다. 급전선을 통해 전철변전소의 전원으로 유입되는 전류는 $I_t/2$ 이므로 전철변전소에서부터 첫 번째 AT 사이의 전차선 전압 $V_{01}(x)$ 는 식 (1)과 같다.

$$V_{01}(x) = V_S - Z_S \cdot \frac{I_t}{2} - (Z_{cc} - Z_{cf}) \frac{I_t}{2} \quad (1)$$

2) 열차를 중심으로 전철변전소 방향의 전압

AT에 의해 강제 흡상된 전류는 급전선을 통해 전철변전소 전원으로 유입된 전류와 다시 합해 져 열차에 공급되고 이는 항상 정전류원인 열차전류(I_t)와 동일하게 된다. 따라서 이때의 전차선 에 공급되는 전류는 강제 흡상된 전류(I_{1P})와 전원에서 공급되는 전류(I_{1S})의 합으로 $2 \cdot I_{1P}$ ($I_{1P} = I_{1S}$)가 된다. 마찬가지로 레일에 흐르는 전류도 이와 같이 $2 \cdot I_{1P}$ 가 되고 급전선을 통 해 전원으로 유입되어 다시 열차에 공급되는 전류 I_{2P} 에 의해 발생하는 전압강하 부분도 함께 고 려해야 한다.

결국 열차를 중심으로 전철변전소 방향인 왼쪽에 대해 첫 번째 AT(AT_1)와 열차 사이의 임의 의 위치에 대한 전차선의 전압은 식 (2)와 같이 표현된다.

$$V_{1P}(x) = V_{01}(x_1) - 2(Z_{cc} - Z_{cf})I_{1P}(x - x_1) - (Z_{cc} - Z_{cf})I_{2P}(x - x_1) \quad (x_1 \leq x < x_P) \quad (2)$$

3) 열차를 중심으로 급전구분소 방향의 전압

전철변전소 방향인 왼쪽의 수직과 마찬가지로 열차를 중심으로 급전구분소 방향인 오른쪽에 대 해 전차선 전압은 식 (3)과 같다.

$$V_{P2}(x) = V_{1P}(P) + (Z_{cc} - 2Z_{cf} + Z_{cf})I_{2P}(x - x_P) \quad (x_P \leq x < x_2) \quad (3)$$

2.2 AT 급전시스템의 전차선 전압의 일반화된 수식

앞의 임의의 간단한 경우 및 여러 가지 경우에 대한 전차선 전압 해석을 종합적으로 분석하여 보 면 각 구간별, 즉 전철변전소와 첫 번째 AT, 운행되고 있는 열차를 중심으로 좌·우측의 형태로 일 정한 규칙성을 지니고 있음을 알 수 있다. 전철변전소와 첫 번째 AT 사이 구간에서는 항상 식 (4)와 같은 전압식이 성립한다.

$$V_{01}(x) = V_S - Z_S \cdot \frac{I_t}{2} - A \cdot \frac{I_t}{2} \quad (4)$$

열차의 좌·우측 전압식은 다음과 같이 일반화된다.

$$V_{ij}^L = V_{prev} - (B \sum_{k=1}^i I_{kP} + A \sum_{k=i+1}^n I_{kP}) \cdot (x - x_i) \quad (5)$$

$$V_{ij}^R = V_{prev} + (B \sum_{k=j}^n I_{kP} - A \sum_{k=j}^n I_{kP}) \cdot (x - x_i) \quad (6)$$

여기서, $A=(Z_{cc}-Z_{cf})$, $B=2(Z_{cc}-Z_{cf})$ 이며, V_{ij} 는 구하고자 하는 구간에서의 전차선 전압이고, V_{prev} 는 구하고자 하는 전차선 전압 V_{ij} 의 바로 전의 전차선 전압이다. 또한 ij 는 전차선 전압을 구하려는 구간이며 n 은 전체 AT의 대수이다. 이렇게 물리적인 현상으로부터 유도된 교류전기철도 AT 급전시스템 전차선 전압을 위한 일반화된 수식으로 계산하면 간단하게 교류전기철도 AT 급전시스템의 전차선 전압을 구할 수 있다.

2.3 일반화된 수식으로 정상급전시 AT 급전시스템의 전차선 전압 계산

앞 절에서 유도된 일반화 수식으로 AT 4 대, 25 [km]의 급전구간의 AT 급전시스템을 계산해 보면 다음과 같이 유도된다. 그림 3은 정상급전하는 경우의 급전시스템 모델이다.

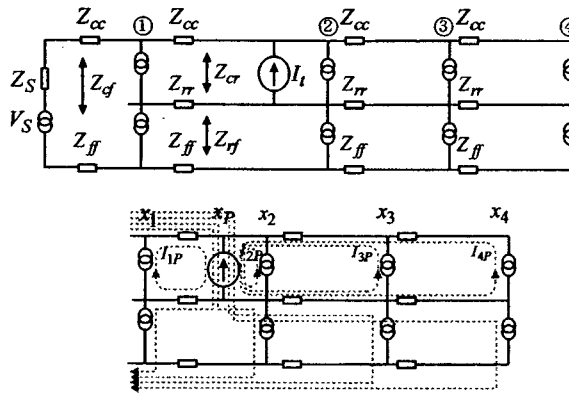


Fig. 3 정상급전시의 AT 급전시스템 전류분포도

그림 3과 같이 $I_{1P}+I_{2P}+I_{3P}+I_{4P}=\frac{I_1+I_2}{2}=\frac{I_t}{2}$ 이므로 전철변전소에서 첫 번째 AT 구간까지의 전차선에 걸리는 전압 V_{01} 은 식 (7)과 같다.

$$V_{01}(x) = V_S - Z_S(I_{1P}+I_{2P}+I_{3P}+I_{4P}) - (Z_{cc}-Z_{cf})(I_{1P}+I_{2P}+I_{3P}+I_{4P}) \cdot x \quad (0 \leq x < x_1) \quad (7)$$

첫 번째 AT에서 열차(P) 사이의 구간에서 전차선에 걸리는 전압은 열차의 왼편의 전압을 구하는 식 (5)에 의해 구할 수 있다. 여기서 V_{prev} 는 바로 전의 전차선 전압이므로 V_{01} 이고 $i=1, j=P, n=4$ 가 된다.

$$V_{1P}(x) = V_{01}(x_1) - 2(Z_{cc}-Z_{cf})I_{1P}(x-x_1) - (Z_{cc}-Z_{cf})(I_{2P}+I_{3P}+I_{4P})(x-x_1) \quad (x_1 \leq x < x_P) \quad (8)$$

열차(P)에서 두 번째 AT 사이의 구간에서 전차선에 걸리는 전압은 열차의 왼편에 전압을 구하는 식 (6)에 의하여 계산된다. 일반화 식에 의해 계산한 V_{P2} 는 식 (9)와 같다. 여기서 $i=P, j=P, n=4$ 이다.

$$V_{P2}(x) = V_{1P}(P) + (Z_{cc}-2Z_{cf}+Z_{cf})(I_{2P}+I_{3P}+I_{4P})(x-x_P) \quad (x_P \leq x < x_2) \quad (9)$$

위와 마찬가지로 두 번째 AT에서 세 번째 AT 사이의 구간 ($x_2 \leq x < x_3$)과 세 번째 AT에서 네 번째 AT 사이의 구간 ($x_3 \leq x < x_4$)의 전차선의 전압은 각각 열차의 우측의 관한 식 (6)을 이용하면 식 (10), 식 (11)처럼 표현된다.

$$V_{23}(x) = V_{P2}(x_2) + (Z_{oc} - 2Z_{cr} + Z_{cf})(I_{3P} + I_{4P})(x - x_2) \quad (10)$$

$$V_{34}(x) = V_{23}(x_3) + (Z_{oc} - 2Z_{cr} + Z_{cf})I_{4P}(x - x_3) \quad (11)$$

3. PSCAD/EMTDC 시뮬레이션

본 논문에서 제안한 일반화 수식의 검증을 위하여 급전구간 25 [km], AT 4 대로 구성된 정상 급전시에 전압강하에 대하여 PSCAD/EMTDC 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션을 행한 경우는 급전거리가 25 [km] 구간에 열차가 첫 번째 AT와 두 번째 AT에 한 대 운행되고 있는 경우이다. 또한 임의의 열차의 위치는 9 [km] 지점이다. 그림 4는 일반화된 수식에 의해 위의 경우를 계산한 전차선 전압 그래프이다.

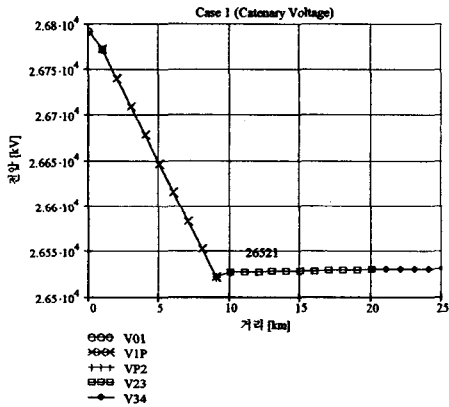


Fig. 4 열차 한 대 운행되는 경우에 대한 전차선 전압 계산결과

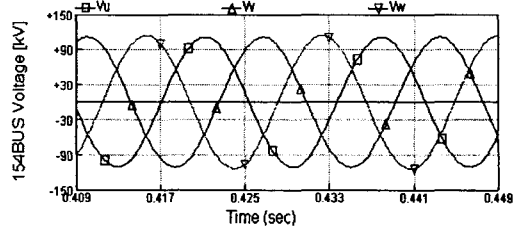


Fig. 5 Scott 결선변압기 1 차측 상전압 순시치

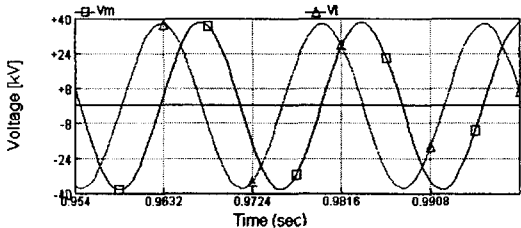


Fig. 6 Scott 결선변압기 2 차측 선간전압

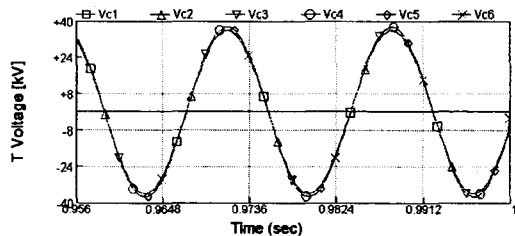


Fig. 7 Scott 결선변압기 2 차측 T상의 각 위치별 측정된 순시전압

그림 5부터 그림 7은 PSCAD/EMTDC 시뮬레이션 결과를 보여준다. 그림 5는 Scott 결선 변압기의 1 차측 상전압을 측정된 것이다. 즉, 154 [kV] 급 변전소의 상전압을 나타낸다. 그림 6은 PSCAD/EMTDC 시뮬레이션 결과에서 Scott 결선 변압기 2 차측의 M, T상의 선간전압을 측정된

것이다. 여기서 M상과 T상의 전압을 비교하기 위하여 T상에만 열차부하가 존재하고 M상은 무부하 상태로 시뮬레이션 하였다. 그림 6에서 보는 바와 같이 무부하인 M상보다 열차가 1 대 운행되고 있는 T상의 전압이 조금 강하되었음을 알 수 있다. 자세한 데이터 분석은 표 2에 나타내었다. 그림 7은 PSCAD/EMTDC는 측정되는 그래프의 가로축이 시간에 대한 함수이므로 급전거리별로 측정된 Scott 결선변압기 2 차측의 순시전압을 보여준다.

Table. 2 일반화 수식의 계산결과와 PSCAD/EMTDC 시뮬레이션 결과 비교

측정위치	전압 [V]			측정위치	전압 [V]		
	일반식에 의한 계산 결과	PSCAD/EMTDC 시뮬레이션결과	오차 [%]		일반식에 의한 계산 결과	PSCAD/EMTDC 시뮬레이션결과	오차 [%]
1 [km]	26772	26531	0.90	15 [km]	26528	26244	1.07
5 [km]	26646	26221.8	1.59	20 [km]	26530	26263.2	1.00
9 [km]	26521	25931	2.22	25 [km]	26531	26265.5	1.00

표 2의 시뮬레이션 결과가 보여주는 것과 같이 본 논문에서 제안한 일반식이 교류전기철도 AT 급전시스템을 해석함에 있어 매우 정확함을 알 수 있다. 표 2에서 PSCAD/EMTDC 시뮬레이션 결과가 일반화된 수식의 전차선 전압 계산결과보다 낮게 나온 것은 PSCAD/EMTDC에서 일반화된 수식의 계산과정에서는 고려하지 않은 단권변압기의 내부 임피던스를 고려하였기 때문이다. 또한 급전구간의 말미인 25 [km] 지점에서 전압이 상승한 것은 AT의 특성상 흡상되는 전류 때문이다.

4. 결론

본 논문에서는 현실적인 교류전기철도 급전시스템의 전차선 전압강하 해석 필요성과 향후 교류 전기철도 확장에 대비하여 급전시스템을 정확하게 해석함으로써 열차의 어떠한 환경에서도 전압 강하 해석이 가능한 수리모델을 개발하는데 중점을 두었으며 이를 일반화시켰다. 또한 이를 동적 시뮬레이션 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 통해 입증하였다. 향후 전차선 전압이 기준치 이하로 강하되는 것에 대한 연구가 지속적으로 이루어져야 할 것이다.

REFERENCES

1. Roland John Hill and Ibrahim H.Cevik, On-line Simulation of Autotransformer-Fed AC Electric Railroad Traction Networks , *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, Vol. 42, No. 3, pp. 365-372, 1993.
2. Chih-Ju Chou, Ying-Tung Hsiao, and Jhane-Li Wang, Distribution of Earth Leakage Currents in Railway System with Drain Auto-Transformers , *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 16, No. 2, pp. 271-275, 2001.
3. R. Natarajan, T. A. Kneschke, W. Naqvi, and M. A. Lopez-Lopez, Short Circuit Currents of SEPTA Traction Power Distribution System , *IEEE Industry Applications Magazine*, pp. 52-59, 1997.
4. K. S. Bahra and P. G. Batty, Earthing and Bonding of Electrified Railways , *International Conference on Developments in Mass Transit System*, 20-23 April 1998, Conference Publication No. 543, pp. 296-302, 1998.
5. Pao-Hsiang Hsi, Shi-Lin Chen, and Ray-Jong Li, Simulating On-Line Dynamic Voltages of Multiple Trains under Real Operating Conditions for AC Railways , *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 14, No. 2, pp. 452-459, 1999.
6. G. Celli, F. Pilo, and S. B. Tennakoon, Voltage Regulation on 25 kV AC Railway Systems by Using Thyristor Switched Capacitor , *2000/IEEE*, pp. 633-638, 2000