

단권변압기 교류전기철도 급전시스템의 전차선 전압해석

論 文

52A-9-2

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

鄭 鉉 洙* · 李 丞 赫** · 金 鎮 吾***

(Hyun-Soo Jung · Seung-Hyuk Lee · Jin-O Kim)

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.

Key Words : 교류전기철도, 단권변압기(Autotransformer), 전차선 전압해석(Catenary Voltage Analysis), PSCAD/EMTDC

1. 서 론

지금까지 전철 급전시스템의 해석방법에 대한 연구결과를 간략하게 살펴보면 1983년 J. D. Glover [1]가 전차선의 임피던스를 계산할 때 마다 해석법을 이용하여 열차전압을 계산하였다. 전차선로의 모델링 방법은 전철용 변전소를 정전압원과 전원 임피던스로 표현하였으며 정상상태의 전차선로를 T형 등가회로로 변환하여 레일과 급전선을 하나의 도체군으로 표현하는 등 간이계산에 의한 전차선로 모델링 방법을 제시하였다. 그 후 R. J. Hill [2]은 단독 및 병렬 급전방식에서 정전류 모델과 정전력 부하모델의 전차 한 대 운행을 기준으로 전압을 해석하는 시뮬레이터를 개발하였는데 이 시뮬레이터는 시간변화에 따른 전차선, 레일의 전압과 열차전압을 회로망 해석법에 의해 계산하였다. 그러나 전차선로 단권변압기(AT) 한 구간에서 열차 한 대 운행 시간 고려하였기 때문에 전체 급전시스템과 열차 상호간의 영향 등 실제 시스템의 전기적 특성이 거의 반영되지 못하였다. 그러나 교류 전기철도 AT 급전시스템의 전반적인 해석방법을 정립하는데 많은 기여를 하였다. 최근 들어 Pao-Hsing [3] 등에 의해 전류 흐름을 주·보조 전류로 구분하여 다수방정식에 기초한 다수 열차의 운행에 대한 교류 전기철도 AT 급전시스템의 열차전압을 해석할 수 있는 프로그램을 제안

하였으나 상호임피던스와 흡상전류 특성을 간과하였다. 또한, 국내에서도 교류전기철도 급전시스템에 대해 정전류와 정전력 부하 모델을 이용한 해석을 이미 하였으나 수리모델에 대한 수학적 접근이 범용적이지 않았던 것이 사실이다 [7][8].

따라서 본 논문에서는 AT의 흡상 전류비 이론과 증첩의 원리를 이용하여 열차의 대수나 위치의 변동에 관계없이 어느 경우에도 전차선 전압강하를 실제와 가깝게 계산할 수 있는 범용적인 수리모델을 개발하였다. 위에 논의한 바와 같이 교류전기철도 AT 급전시스템의 전차선 전압강하 해석은 회로망 해석법(Mesh Analysis Method)과 마다 해석법(Node Analysis Method)을 이용하여 주로 해석하고 있으나 마다 해석법은 주로 정임피던스 부하모델을 이용한 간략 해석방법에 사용하므로 본 논문에서는 회로망 해석법을 이용한 해석을 하여 이를 수학적으로 일반화하였다. 또한 일반화한 수리모델의 검증을 위한 시뮬레이션, 실제 교류전기철도 AT 급전시스템을 모델링 및 사례연구를 실시하였다.

2. 교류전기철도 AT 급전시스템

교류전기철도는 그림 1과 같이 일반 전력계통의 3상 전력으로부터 전철 급전계통을 통하여 차량의 구동에 필요한 전력을 공급받는다.

이러한 전철 급전계통에는 변압기, 전차선, 급전선, 레일 및 보호선 등의 수송설비와 이들을 목적에 맞게 제어하고 감시하기 위한 운용설비가 있다. 그러나 이러한 전철 급전계통은 일반 송·배전 전력계통에 비해 부하의 특성이나 계통구성이 달라 그 일반 송·배전 계통과는 상이한 특성을 가지고 있다.

* 正 會 員 : 漢陽大 工大 電氣工學科 工學博士

** 準 會 員 : 漢陽大 工大 電氣工學科 博士課程

*** 正 會 員 : 漢陽大 工大 電氣工學科 副教授 · 工博

接受日字 : 2002年 12月 11日

最終完了 : 2003年 6月 20日

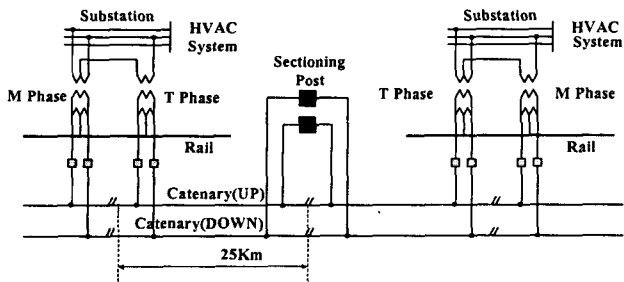


그림 1 전형적인 교류전기철도 급전시스템
Fig. 1 Typical feeding arrangement of an AC railroad system

기존의 교류전기철도 급전시스템 해석방법들은 해석의 어려움 때문에 주로 전차선에 1 대의 열차가 존재하는 경우를 가정하여 간략 해석방법에 의하여 해석해 왔기 때문에 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. 따라서 본 논문에서는 실제 계통에 가깝게 여러 경우를 모델링하여 지금까지 전형적으로 연구해 온 정상상태 급전뿐만 아니라 사고로 인한 연장급전과 부하 증가에 따른 중대 부하급전의 경우까지 고려하였다.

그림 1과 같이 교류 전기철도 AT 급전시스템은 일반 전력계통으로부터 154 [kV] 3 상 전력을 공급받아 전철변전소의 Scott 결선변압기에 의해 3 상을 2 상으로 변환한 후 M, T상 방면별로 급전한다. 여기서 전철변전소간 거리는 약 50 [km]이며 변전소간에는 급전구분소(Sectioning Post)를 두어 평상시에는 전기적으로 개방하고 인근 전철변전소 사고시에 폐로하여 연장급전을 가능하게 하는 구조로 되어있다. AT 급전시스템은 전차선(Catenary)와 급전선(Feeder) 사이에 50 [kV] 전압을 공급한다. AT는 1:1의 권수비로 열차의 필요한 전압인 25 [kV]를 전차선과 레일에 공급하게 된다. 우리나라의 경우는 AT 사이의 전압강하를 고려하여 전철변전소에서 전차선과 급전선 사이의 전압을 55 [kV]로 공급하고, 따라서 전차선과 레일에서 공급되는 전압은 27.5 [kV]가 된다 [1][4][5][6].

3. 교류전기철도 AT 급전시스템의 전차선 전압해석

교류전기철도의 AT 급전시스템에서 전압강하는 전압변동 및 전압불평형과 기기 성능에 영향을 미치므로 본 논문에서는 전압강하 해석을 위해 기존의 단순한 전차선 전압강하 해석방법 대신에 실제의 제약조건이 고려된 정전류 부하 모델과 회로망 해석법을 이용하여 AT 급전시스템의 실제 계통에 근접한 수리모델을 수립하였다.

이 전차선 전압강하 해석은 열차가 동적 부하이기 때문에 대단히 복잡하여 열차의 위치, 대수, AT 등에 따라 전차선로의 전압, 전류를 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 다음 표 1과 같은 몇 가지의 경우를 모델링하였다. 또한 전차선 전압을 계산함에 있어 변수는 표 2와 같다 [7][8].

표 1 열차의 위치에 따른 가정된 각 경우
Table 1 Train number and position of optional cases

경우	급전구간 [km]	급전구간내의 AT대수	열차 운행위치	열차 운행대수
Single-train	25	4	첫 번째 AT~두 번째 AT	-
Multi-train	25	4	첫 번째 AT~두 번째 AT	2

표 2 AT 급전시스템의 해석을 위한 입력변수
Table 2 Input parameters for modeling

V_s	전철변전소 전원 전압 55 [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_{cc}	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]

3.1. 열차가 한 대 운행되는 경우의 수리모델 (Single-train)

그림 2와 같이 급전구간 25 [km]의 정상급전에서 열차가 첫 번째 AT(node ①, AT_1)과 두 번째 AT(node ②, AT_2) 사이에 한 대 운행되고 있는 경우의 수학적 모델링은 다음과 같다. 열차부하모델을 정전류 부하모델로 나타내었으므로 열차를 통하여 흐르는 전류를 I_t 라 하면 열차의 좌측으로 흐르는 전류(I_1)와 우측으로 흐르는 전류(I_2)로 분류된다. 따라서 열차의 흐르는 전류 I_t 는 식 (1)과 같다.

$$I_t = I_1 + I_2 \tag{1}$$

여기서 선로의 임피던스는 거리에 비례하고 전류는 임피던스에 반비례하므로 각 AT의 위치를 x_1, x_2, x_3, x_4 , 그리고 열차의 현 위치를 x_p 라 하면 I_1, I_2 는 식 (2)와 같이 표현된다 [2].

$$I_1 = \frac{x_4 - x_p}{x_4 - x_1} \cdot I_t$$

$$I_2 = \frac{x_p - x_1}{x_4 - x_1} \cdot I_t \tag{2}$$

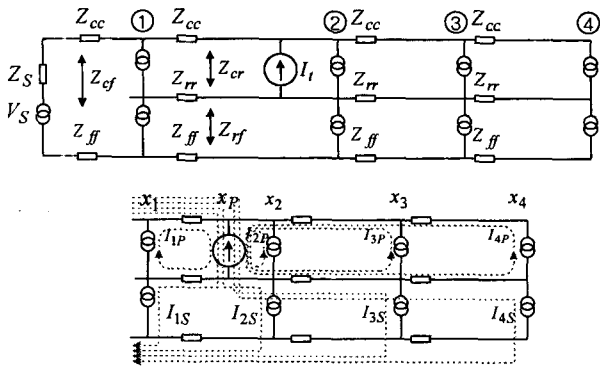


그림 2 열차 한 대 운행시의 급전시스템 전류분포도
Fig. 2 Current sharing among the ATs in single-train

또한 AT를 통해 전류는 반분되므로 I_1, I_2 는 각 지점 x_1, x_2, x_3, x_4 에 위치하는 전차선과 레일 간 AT를 통해 다시 열차로 귀환되는 전류와 레일과 급전선 간의 AT를 통해 전차선으로 귀환되는 전류로 나뉜다. AT의 권수비가 1:1이므로 이 두 전류는 같은 크기를 갖는다.

$$\begin{aligned}
 I_{1P} &= \frac{I_t}{2} \\
 I_{2P} &= \frac{x_4 - x_2}{x_4 - x_P} \left(\frac{I_t}{2} \right) \\
 I_{3P} &= \frac{x_4 - x_3}{x_4 - x_2} \left(\frac{I_t - 2 \cdot I_{2P}}{2} \right) \\
 I_{4P} &= \frac{x_3 - x_2}{x_4 - x_2} \left(\frac{I_t - 2 \cdot I_{2P}}{2} \right)
 \end{aligned} \tag{3}$$

결국 열차에 공급되는 전류 I_t 는 식 (4)와 같이 AT에 의해 반분됨을 알 수 있다. 즉, 위쪽 AT로 유입되는 전류인 I_{1P} 와 아래쪽 AT로 흘러나가는 전류인 I_{1S} 의 크기는 187.5 [A]로 서로 정확히 같으며, 두 전류의 합은 375 [A]로 이는 I_t 와 같게 된다. 또한, 우측으로 흘러가는 전류인 I_2 는 225 [A]로 이 역시 정확히 권수비 1:1을 갖는 AT의 위, 아래에 반분된다. 결과적으로 정전류 부하인 열차에는 두 전류의 합($I_1 + I_2$)인 600 [A]가 흐른다.

$$I_{1P} + I_{2P} + I_{3P} + I_{4P} = I_{1S} + I_{2S} + I_{3S} + I_{4S} = \frac{I_t + I_t}{2} = \frac{I_t}{2} \tag{4}$$

전철변전소에서 첫 번째 AT 구간까지의 전차선의 전압 V_{01} 은 식 (5)와 같다.

$$\begin{aligned}
 V_{01}(x) &= V_S - Z_S(I_{1P} + I_{2P} + I_{3P} + I_{4P}) \\
 &\quad - (Z_{cc} - Z_{cf})(I_{1P} + I_{2P} + I_{3P} + I_{4P}) x \\
 &\quad (0 \leq x < x_1)
 \end{aligned} \tag{5}$$

첫 번째 AT에서 열차(P) 사이의 구간에서 전차선에 걸리는 전압 V_{1P} 는 식 (6)처럼 표현된다.

$$\begin{aligned}
 V_{1P}(x) &= V_{01}(x_1) - 2(Z_{cc} - Z_{cr})I_{1P}(x - x_1) \\
 &\quad - (Z_{cc} - Z_{cf})(I_{2P} + I_{3P} + I_{4P})(x - x_1) \\
 &\quad (x_1 \leq x < x_P)
 \end{aligned} \tag{6}$$

열차(P)에서 두 번째 AT 사이의 구간에서 전차선에 걸리는 전압 V_{P2} 는 식 (7)과 같다.

$$\begin{aligned}
 V_{P2}(x) &= V_{1P}(x_P) + (Z_{cc} - 2Z_{cr} + Z_{cf})(I_{2P} + I_{3P} + I_{4P}) \\
 &\quad (x - x_P)(x_P \leq x < x_2)
 \end{aligned} \tag{7}$$

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 식 (8), 식 (9)처럼 표현된다.

$$V_{23}(x) = V_{P2}(x_2) + (Z_{cc} - 2Z_{cr} + Z_{cf})(I_{3P} + I_{4P})(x - x_2) \tag{8}$$

$$V_{34}(x) = V_{23}(x_3) + (Z_{cc} - 2Z_{cr} + Z_{cf})I_{4P}(x - x_3) \tag{9}$$

앞의 열차가 한 대 운행되는 경우의 전차선 전압 해석을 열차의 위치를 변화시켜 종합적으로 분석하면 각 구간별, 즉 전철변전소와 첫 번째 AT, 운행되고 있는 열차를 중심으로 좌·우측의 형태로 공통점을 지니고 있음을 알 수 있다. 전철변전소와 첫 번째 AT 사이 구간에서는 항상 식 (10)과 같은 전압식이 성립한다.

$$V_{01}(x) = V_S - Z_S \frac{I_t}{2} - A \frac{I_t}{2} \tag{10}$$

또한 열차의 좌·우측 전압식은 다음과 같이 일반화된다.

$$V_{ij}^L = V_{prev} - (B \sum_{k=1}^i I_{kP} + A \sum_{k=i+1}^n I_{kP})(x - x_i) \tag{11}$$

$$V_{ij}^R = V_{prev} + (B \sum_{k=j}^n I_{kP} - A \sum_{k=j}^n I_{kP})(x - x_i) \tag{12}$$

여기서, $A = (Z_{cc} - Z_{cf})$, $B = 2(Z_{cc} - Z_{cr})$ 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 열차 한 대가 운행되는 위치와 관계없이 전차선 전압을 계산하여 결과를 얻을 수 있다.

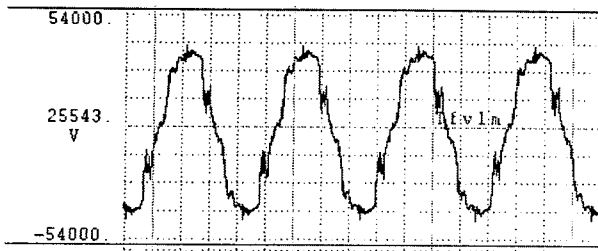


그림 3 열차 한 대 운영시의 급전시스템 전차선 전압의 실측치

Fig. 3 The measured catenary voltage among the ATs in single-train

그림 3은 한국고속철도(KTX) 시험탑에서 열차 한 대가 운행된 경우의 실측한 전차선 전압이다. 실효치로 환산하면 열차 한 대가 운행된 경우의 전차선 전압은 열차의 위치마다 약간 오차가 있지만 약 26.5 [kV]이며, 식 (10)~(12)의 범용적 수식을 이용하여 위와 같은 경우를 계산한 결과는 26.496 [kV]이다. 이러한 결과로부터 교류전기철도 수리모델에 대한 범용적 수식이 정확함을 알 수 있다.

3.2. 여러 대의 열차가 운행되는 경우의 수리모델 (Multi-train)

그림 4와 같이 정상급전 구간에서 열차가 첫 번째 AT와 두 번째 AT 사이에 한 대, 세 번째 AT와 네 번째 AT 사이에 한 대 운행되는 경우의 열차가 두 대 운행되는 경우는 각각 한 대에 대한 전차선의 전압강하를 구한 후 열차의 부하모델을 정전류 부하모델로 모델링하였으므로 중첩의 원리를 이용하여 계산하면 쉽게 전차선 전압을 구할 수 있다. 각 열차가 한 대씩 운행되는 경우들의 전차선 전압은 일반화된 수식을 이용하여 구하면 된다.

우선, 전철변전소와 첫 번째 AT 구간은 열차를 정전류원으로 보면 항상 I_t 로 일정하므로 중첩의 원리 적용은 첫 번째 AT 다음구간부터 적용된다. 따라서 전철변전소와 첫 번째 AT 사이 구간에서의 전압 V_{01} 는 식 (13)과 같다.

$$V_{01}(x) = V_S - Z_S \cdot \frac{I_t}{2} - A \frac{I_t}{2} x \quad (0 \leq x < x_1) \quad (13)$$

첫 번째 AT와 첫 번째 열차(P) 사이의 전압 V_{1P} 는 식 (14)와 같다.

$$\begin{aligned} V_{1P}(x) &= V_{01} + V^{L1}_{12} + V^{L2}_{12} \\ &= V_{01}(x_1) - B \sum_{k=1}^4 I_{kP}(x-x_1) - A \sum_{k=2}^4 I_{kP}(x-x_1) \\ &\quad - B \sum_{k=1}^2 I_{kQ}(x-x_1) - A \sum_{k=2}^4 I_{kQ}(x-x_1) \end{aligned} \quad (14)$$

$(x_1 \leq x < x_P)$

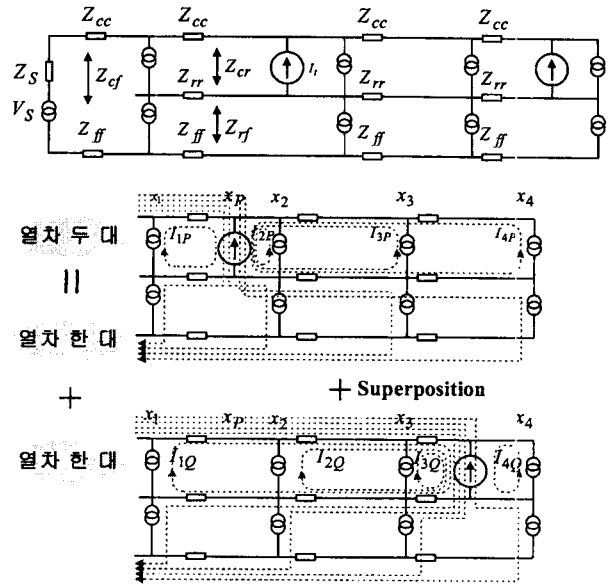


그림 4 중첩의 원리를 이용한 열차가 여러 대 운행하는 경우의 급전시스템 전류분포도

Fig. 4 Current sharing among the ATs in multi-train

여기서 V^{L1}_{12} 은 첫 번째 AT와 두 번째 AT 사이의 구간에서 첫 번째 열차(P) 왼쪽 전압식을 의미한다. 첫 번째 열차(P)와 두 번째 AT 사이의 전압 V_{P2} 는 식 (15)와 같다.

$$\begin{aligned} V_{P2}(x) &= V_{1P} + V^{R1}_{12} + V^{L2}_{12} \\ &= V_{1P}(x_P) + B \sum_{k=1}^4 I_{kP}(x-x_P) - A \sum_{k=2}^4 I_{kP}(x-x_P) \\ &\quad - B \sum_{k=1}^2 I_{kQ}(x-x_P) - A \sum_{k=2}^4 I_{kQ}(x-x_P) \end{aligned} \quad (15)$$

$(x_P \leq x < x_2)$

두 번째 AT와 세 번째 AT 사이의 전압 V_{23} 는 식 (16)과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} V_{23}(x) &= V_{P2} + V^{R1}_{23} + V^{L2}_{23} \\ &= V_{P2}(x_2) + B \sum_{k=3}^4 I_{kP}(x-x_2) - A \sum_{k=3}^4 I_{kP}(x-x_2) \\ &\quad - B \sum_{k=1}^2 I_{kQ}(x-x_2) - A \sum_{k=3}^4 I_{kQ}(x-x_2) \end{aligned} \quad (16)$$

$(x_2 \leq x < x_3)$

세 번째 AT와 두 번째 열차(Q) 사이의 전압 V_{3Q} 는 식 (17)과 같다.

$$\begin{aligned}
 V_{3Q}(x) &= V_{23} + V^{R1}_{34} + V^{L2}_{34} \\
 &= V_{23}(x_3) + B \sum_{k=4}^4 I_{kP}(x-x_3) - A \sum_{k=4}^4 I_{kP}(x-x_3) \\
 &\quad - B \sum_{k=1}^3 I_{kQ}(x-x_3) - A \sum_{k=4}^4 I_{kQ}(x-x_3) \\
 &\quad (x_3 \leq x < x_Q)
 \end{aligned}
 \tag{17}$$

두 번째 열차(Q)와 네 번째 AT 사이의 전압 V_{Q4} 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 V_{Q4}(x) &= V_{3Q} + V^{R1}_{34} + V^{R2}_{34} \\
 &= V_{3Q}(x_Q) + B \sum_{k=4}^4 I_{kP}(x-x_Q) - A \sum_{k=4}^4 I_{kP}(x-x_Q) \\
 &\quad - B \sum_{k=4}^4 I_{kQ}(x-x_Q) - A \sum_{k=4}^4 I_{kQ}(x-x_Q) \\
 &\quad (x_Q \leq x < x_4)
 \end{aligned}
 \tag{18}$$

따라서 열차의 위치와 대수에 관계없이 중첩의 원리를 이용하여 모든 경우의 전차선의 전압을 구할 수 있다.

3.3. 교류전기철도 AT 급전시스템의 일반화된 수리모델

임의의 AT 대수, 임의의 열차운행 대수에 대한 전 전차선 구간에서의 전압식은 중첩의 원리와 열차를 중심으로 좌·우측의 전압식을 이용하여 결국 다음 식 (19)와 같이 일반화된다.

$$\begin{aligned}
 V_{01} &= V_S - Z_S \frac{I_1}{2} - A \frac{I_1}{2} x \\
 &\quad (\text{변전소에서부터 첫 번째 AT까지의 전압식}) \\
 V_{ij} &= V_{prev} + \sum_k V^{Rk}_{ij} + \sum_k V^{Lk}_{ij} \\
 &\quad (\text{열차를 중심으로 좌·우측 전압식})
 \end{aligned}
 \tag{19}$$

여기서 ij 는 AT 구간, R, L 은 열차의 우측 혹은 좌측, 그리고 k 는 열차의 대수를 의미한다. 위에서 구한 AT 급전시스템의 일반화된 수식은 열차운행 대수에 관계없이 어느 경우에도 적용할 수 있는 범용적인 형태라서 실제 정상급전과 임의의 전철변전소가 고장나 연장급전 되는 경우 및 부하가 증대된 증대부하의 경우 모두 만족한다.

표 3과 같이 여러 경우 중 임의의 다섯 경우를 선정하여 표 2의 실제 AT 급전시스템의 데이터를 바탕으로 계산한 결과 그래프는 그림 5와 그림 6에 각각 나타내었다. 여기서 그림 5는 Case 1부터 Case 3의 경우로써 전철변전소로부터 25 [km]까지 급전하는 정상급전의 경우이며, 이때 전철변전소를 기준으로 양쪽 25 [km]이므로 전체거리는 50 [km]이다. 결과적으로 열차의 운행 대수가 증가함에 따라 전차선 전압이 강해되고 있음을 알 수 있다.

표 3 전차선 전압계산을 위한 각 경우

Table 3 Each case for calculation of the catenary voltage

경우	급전구간	AT 대수	열차운행지점	운행대수
Case 1	25 [km]	4	$AT_3 \sim AT_4(SP)$	1
Case 2	25 [km]	4	$AT_2 \sim AT_3$ $AT_3 \sim AT_4(SP)$	2
Case 3	25 [km]	4	$AT_1 \sim AT_2$ $AT_2 \sim AT_3$ $AT_3 \sim AT_4(SP)$	3
Case 4	50 [km]	7	$AT_1 \sim AT_2$ $AT_2 \sim AT_3$ $AT_3 \sim AT_4(SP)$	3
Case 5	50 [km]	7	$AT_1 \sim AT_2$ $AT_2 \sim AT_3$ $AT_3 \sim AT_4(SP)$ $AT_5 \sim AT_6$	4

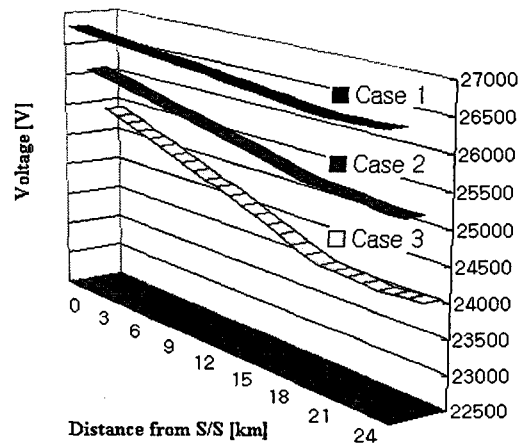


그림 5 일반화 수식에 의한 정상급전의 Case 1, Case 2, Case 3의 전차선 전압계산결과

Fig. 5 The catenary voltages in Case 1~Case 3

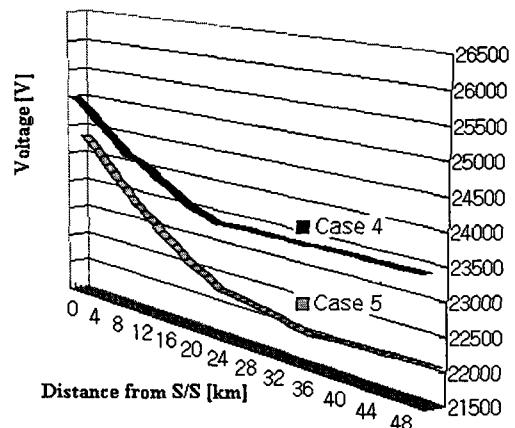


그림 6 일반화 수식에 의한 연장급전의 Case 4, Case 5의 전차선 전압계산결과

Fig. 6 The catenary voltage in Case 4, 5

그림 6은 Case 4와 Case 5의 경우로써 연계된 다른 변전소의 고장으로 인한 연장급전시의 경우이다. 이때의 급전거리는 전체 75 [km]이며 그중 한쪽의 전철변전소 고장구간을 담당하므로 정산급전시의 급전구간 25 [km]와 고장난 전철변전소에서 담당하던 25 [km]의 합으로 연장급전 구간은 50 [km]가 된다. 그림 6의 Case 5는 전차선 전압이 고속철도 전차선 급전전압의 하한치인 22.5 [kV] 이하로 강하되었음을 알 수 있다.

4. 사례연구

본 논문에서 제안한 일반화 수리모델의 검증을 위하여 3.3 절의 Case 중 연장급전시에 가장 전압강하가 심한 Case 5에 대하여 PSCAD/EMTDC 시뮬레이션을 수행하였다. PSCAD/EMTDC 모델링은 크게 각 선로와 열차부하로 모델링되며 각 선로는 실제 입력자료를 사용하였고 열차부하의 모델링은 유도전동기를 사용하여 모델링하였으며 토크와 속도를 변화시켜 동적인 시뮬레이션을 행하였다. Case 5의 경우는 임의의 인근 전철변전소 사고로 인해 연장급전 되면 급전거리가 50 [km]로 확대되어 정상급전시보다 현저한 전압강하가 예상되는 경우이다 [9][10].

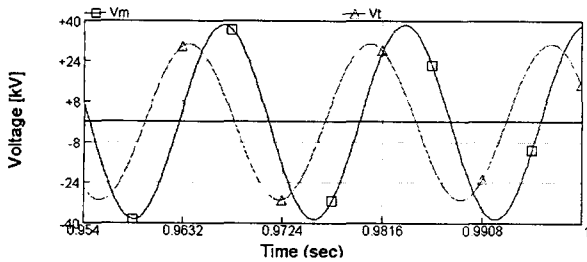


그림 7 Scott 결선변압기 2 차측 선간전압
Fig. 7 The M & T-phase catenary voltages of Scott connecting transformer's secondary in Case 5

그림 7은 Scott 결선 변압기 2 차측의 M/T상의 선간전압을 측정된 것이다. 여기서 M상과 T상의 전압을 비교하기 위하여 T상에만 열차부하가 존재하고 M상은 무부하 상태인 경우로 하였다.

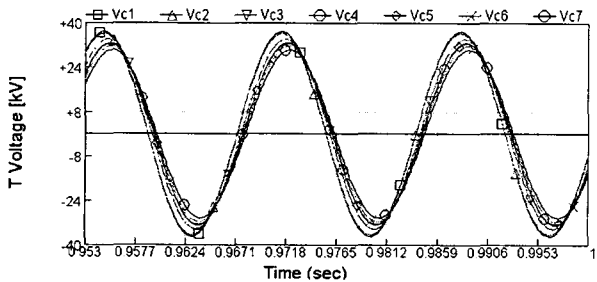


그림 8 Scott 결선변압기 2 차측 측정위치별 순시전압
Fig. 8 The T-phase catenary voltages of Scott connecting transformer's secondary by measuring position

그림 7에서와 같이 무부하인 M상보다 열차가 4 대 운행되고 있는 T상의 전압이 많이 강하되었음을 알 수 있다. 자세한 데이터들은 표 4에 나타내었다. 그림 8은 그래프의 가로축이 시간이므로 급전거리별로 측정된 Scott 결선변압기 2 차측의 각 순시전압을 측정된 것이다. 표 4의 시뮬레이션 결과가 보여주는 것과 같이 본 논문에서 제안한 일반식이 열차의 대수 및 위치와 급전거리에 관계없이 교류전기철도 AT 급전시스템을 해석함에 있어 매우 정확함을 알 수 있다.

표 4 일반화 수식의 계산결과와 PSCAD/EMTDC 시뮬레이션 결과 비교

Table 4 Comparison between calculation results by general equation and simulation results

측정위치	전압 [V]		오차 [%]
	일반식에 의한 계산 결과	PSCAD/EMTDC 시뮬레이션결과	
1 [km]	24212	24640.6	1.74
5 [km]	23748	24271.4	2.20
15 [km]	22747	23052.3	1.34
25 [km]	22185	22182.7	0.004
30 [km]	22083	22021.3	0.23
35 [km]	21956	21541.5	1.89
50 [km]	22052	21932.4	0.54

5. 결론

전기철도 급전시스템에서 전철 급전선로의 비선형성과 열차부하의 동적 특성으로 인해 열차의 대수, 위치 및 상호관계에 따라 급전시스템의 전기적 특성이 수시로 변한다. 그렇기 때문에 전차선 전압강하 해석이 매우 어렵고 복잡하여 그 동안 정밀한 전압강하 해석이 제대로 이루어지지 않았다.

따라서 본 논문에서는 이러한 실제 급전시스템의 조건들을 충분히 고려하여 여러 경우를 해석해 보았으며, 그 결과 물리적인 규칙성을 비교 분석하여 일반화 전압식을 수립하였고, 이 전압식과 중첩의 원리를 이용하여 열차의 위치와 대수에 관계없이 모든 경우의 전차선 전압강하를 정확하게 구할 수 있는 전압강하 수리모델 및 일반화된 수식을 수립하였다. 또한 이를 동적 시뮬레이션 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 일반화된 수식의 정확성을 검증했다.

참고 문헌

[1] J. D. Glover, "Train Voltage Analysis for AC Railroad Electrification", IEEE Transactions on Industry Application, Vol. 1A-20, No. 4, pp. 925~934, August, 1984.
[2] 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.
- [3] 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.
 - [4] 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.
 - [5] 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.
 - [6] 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.
 - [7] 한국전기연구소, "급전시스템의 해석기술개발", pp. 166, 1998.
 - [8] 창상훈 외, "철도급전시스템 체계화 구축연구", 한국철도 기술연구원, pp.7~78, 2000.
 - [9] H. S. Jung, S. H. Lee and J. O. Kim, "Analysis for Auto-transformer Fed AC Electric Railroad System Using Constant Current Mode with Distribution-STATCOM", MEPS '02, Vol. 1, pp. 268~273, Wroclaw Poland, 2002.
 - [10] 정현수, 이승혁, 김진오, "STATCOM을 이용한 교류 전기철도 급전시스템의 전압강하 보상", 조명전기설비학회 논문지, Vol. 16, pp. 53~60, 2002.

저 자 소 개



정 현 수 (鄭 鉉 洙)

1950년 8월 13일생. 1974년 전남대 전기공학과 졸업. 1988년 한양대 대학원 전기공학과 공학석사. 2003년 동 대학원 공학박사.
Tel : 02-2290-0347, Fax : 02-2297-1569
E-mail : hsjung50@hanmail.net



이 승 혁 (李 丞 熾)

1974년 8월 3일생. 2001년 세명대 전기공학과 졸업. 2003년 한양대 대학원 전기공학과 공학석사. 2003년~현재 동 대학원 박사과정.
E-mail : leesh93@ihanyang.ac.kr



김 진 오 (金 鎭 吾)

1956년 1월 17일 생. 1980년 서울대 전기공학과 졸업. 1983년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1991년 Texas A&M Univ. 전기공학과 졸업(공학박). 현재 한양대 공과대학 전자전기컴퓨터공학부 부교수
Tel : 02-2290-0347, Fax : 02-2297-1569
E-mail : jokim@hanyang.ac.kr