

철도차량기지용 단권변압기의 전압강하에 대한 이론적 고찰

A Theoretical Study on Voltage Drop of Auto-Transformer for Railway Vehicle Base

유기성* · 김재문†
 (Ki-Seong Yu · Jae-Moon Kim)

Abstract - In order to investigate the voltage drop compensation effect of AT for domestic railway vehicle base, the parameters of AT voltage drop of railroad car base are Z3 (Impedance of feeder line), Xn (Distance from railroad vehicle to AT to SS), and Dn (distance between both ATs of railway vehicle). In addition, when installed in a SSP for a railway vehicle base, there is no AT and feeder line in the railway vehicle base except for the SSP for the main line and the SSP for the railway vehicle base, so that if zero or ignored, the AC single-phase two- It can be confirmed that it becomes a form.

Key Words : Swiss cheese model, Unsafe acts, Human errors, Electric shock accidents

1. 서론

전철변전소로부터 공급된 급전전압은 급전거리와 부하용량에 비례하여 강하되므로 국내에 적용되는 AT 급전방식은 8~10km마다 전차선과 급전선 사이에 병렬로 단권변압기(Auto Transformer, 이하 AT)를 연결하여 AT 권선의 중성점을 Rail에 접속하는 방식이다. Rail에 흐르는 전차선 귀선전류는 전기철도차량을 중심으로 양쪽 AT 각각 반대방향으로 흐르기 때문에 근접 통신선에 대한 유도장해가 적게 되는 장점이 있다.

또한 AT 급전방식은 전철변전소에서 급전하는 전차선~급전선 간 표준전압(AC 50kV)은 전차선~레일간의 전기차 표준전압(AC 25kV)의 2배이므로 전압강하가 작기 때문에 대용량 열차부하에도 전압변동, 전압불평형이 적어 안정된 전력공급이 가능하여 대전력인 고속철도와 고빈도인 전기동차 등 열차운행구간에 적합하다[1][2].

한편 본 논문에서 다루고자 하는 국내 철도차량기지용AT(이하 기지용AT)는 철도차량기지 검수고 등 말단측에는 없고 SS, SSP, 기지SSP 등 입구측에만 설치되어 있는 기지용AT의 설치장소별 형태를 AT 급전회로 임피던스 계산식을 해석하여 기지용AT의 전압강하에 대한 이론적 고찰을 하였다.

2. AT 급전회로 전압강하 고찰

전기철도 AT 급전회로의 전압강하를 계산하기 위해서는 먼저

† Corresponding Author : Dept. of Transportation System Engineering, Graduate School of Transportation, Korea National University of Transportation, Korea
 E-mail : goldmoon@ut.ac.kr

* Dept. of Transportation System Engineering, Korea National University of Transportation, Korea

Received : October 7, 2018; Accepted : November 29, 2018

회로의 임피던스를 계산하여야 하는데 AT 급전회로는 일반 송배전선로와는 달리 전차선(T)/조가선(M), 레일(R)/보호선(PW), 급전선(F)으로 구성된 망상회로로 전류분포가 매우 복잡하여 회로 계산이 용이하지 않다.

따라서 일반적으로 일본에서 널리 적용하고 있는 등가회로계산법에 의하여 임피던스를 계산하고 칼슨-폴라첵(Carson-Pollaczek)식에 의해 급전회로 각 요소(T, R, F)의 자기 및 상호 임피던스를 구하고 이들을 합성하여 구한 AT 급전회로의 임피던스와 부하전류를 곱하면 전기철도차량 위치에서의 전압강하가 된다[1][3].

2.1 AT 급전계통 등가회로 및 임피던스 계산[1][3-6]

일반적인 AT 급전방식의 급전계통은 그림 1과 같고, 이를 등

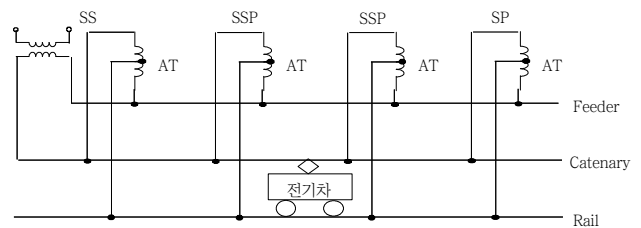


그림 1 AT 급전방식의 급전계통도

Fig. 1 Feeding scheme of AT feeding method

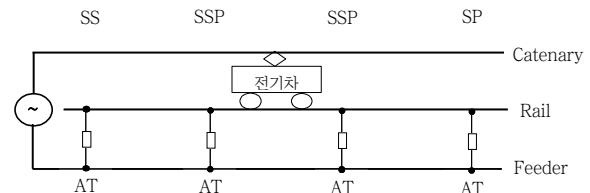


그림 2 AT 급전계통의 등가회로

Fig. 2 Equivalent circuit of AT feed system

가회로 계산법에 의하여 임피던스를 계산하기 위한 등가회로는 그림 2와 같다.

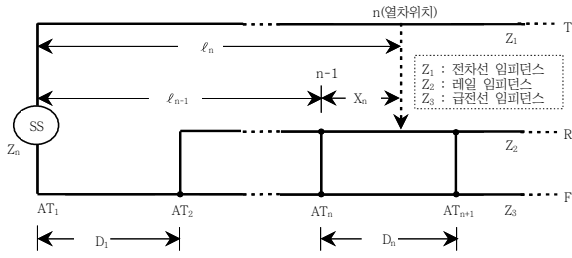


그림 3 AT 급전회로의 임피던스 등가회로
Fig. 3 Impedance equivalent circuit of AT feeding circuit

그림 3과 같이 AT 급전회로의 상호임피던스를 소거하여 증가회로 전차선 T, 레일 R, 급전선 F의 km당 임피던스를 각각 Z1, Z2, Z3이라 할 때 AT1에서 바라본 거리 ln[km]인 점 n까지의 T-R 단락 임피던스 Zn을 계산하면 다음과 같다[2].

AT1에서 ln점까지의 전차선 임피던스는 Z1ln가 되고 AT1에서 ln-1점까지의 레일과 급전선은 병렬연결이므로 합성임피던스는 식 (1)과 같다.

$$\frac{Z_2 \times Z_3}{Z_2 + Z_3} \times (\ell_n - X_n) \tag{1}$$

ln-1점에서 ln점까지의 레일과 급전선의 합성임피던스는 레일의 길이 Xn에서의 레일의 임피던스(Z2)의 곱이므로 XnZ2이고, ln점에서 반대방향으로 ln-1점과의 레일과 급전선은 ATn+1을 통해 직렬연결이므로 [(Dn - Xn)Z2 + DnZ3]이 된다. 그리고 ln점과 ln-1점 사이의 임피던스는 이 2개의 임피던스가 병렬로 연결되어 있으므로 식 (2)와 같이 된다.

$$\frac{X_n Z_2 \times [(D_n - X_n) Z_2 + D_n Z_3]}{X_n Z_2 + [(D_n - X_n) Z_2 + D_n Z_3]} \tag{2}$$

따라서 Zn은 식 (1)과 식 (2)에 의해 식 (3)과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} Z_n &= Z_1 \ell_n + \frac{Z_2 \times Z_3}{Z_2 + Z_3} (\ell_n - X_n) + \frac{X_n Z_2 \times [(D_n - X_n) Z_2 + D_n Z_3]}{X_n Z_2 + [(D_n - X_n) Z_2 + D_n Z_3]} \\ &= (Z_1 + \frac{Z_2 \times Z_3}{Z_2 + Z_3}) \ell_n + \frac{Z_2^2}{Z_2 + Z_3} (1 - \frac{X_n}{D_n}) X_n \\ &= Z_L \ell_n + Z_L' (1 - \frac{X_n}{D_n}) X_n \end{aligned} \tag{3}$$

여기서, ZL, ZL' : 전압강하 선로정수[ohm/km]
ZL = Z1 + (Z2 × Z3)/(Z2 + Z3), ZL' = Z2²/(Z2 + Z3)

2.2 AT 급전회로 전압강하 계산[1][3][6]

AT 급전방식 급전회로의 전압강하를 계산하는데 있어 일반적

으로 AT와 Rail의 누설 임피던스와 전원 및 급전용 스크트변압기의 임피던스에 의한 전압강하는 무시하고 계산된다.

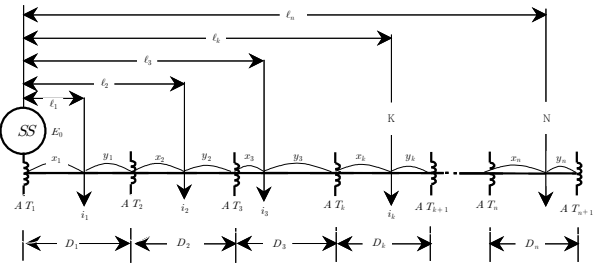


그림 4 AT 급전회로의 전기철도차량의 부하분포
Fig. 4 Load distribution of electric railway vehicle in AT feeding circuit

그림 4는 AT 급전방식에서 전기철도차량의 부하분포로서 전기차 양쪽에 단권변압기가 설치되어 있을 경우에 임의의 전기차 부하 K점과 최원단 전기차 부하 N점의 전압강하를 계산하면, 다음과 같다. 우선, 임의의 전기차 부하 K점의 전압강하 ek는 식 (4)와 같이 표현된다.

$$e_k = Z_L (\sum_{j=1}^k i_j \ell_j + \ell_k \sum_{j=k+1}^n i_j) + Z_L' (1 - \frac{x_k}{D_k}) i_k x_k [V] \tag{4}$$

여기서, ij : 각 점의 전기차 부하전류[A],
lj : 변전소에서 각 전기차까지의 거리[km],
Dk : AT, 설치간격[km]
ZL, ZL' : km당 전압강하 임피던스[OMEGA /km]

$$Z_L = R_L \cos\theta + X_L \sin\theta, \quad Z_L' = R_L' \cos\theta + X_L' \sin\theta$$

한편 최원단 전기차 부하 N점의 전압강하 en이라 하면 식 (5)와 같다.

$$e_n = Z_L \sum_{j=1}^n i_j \ell_j + Z_L' (1 - \frac{x_n}{D_n}) i_n x_n [V] \tag{5}$$

3. 국내 기지용AT의 설치장소별 형태

국내 전기철도 AT 급전방식에서 기지용AT의 설치장소별 형태는 그림 5~그림 7과 같이 3가지로 구분하면 다음과 같다. ① 급전회로 전원공급점인 전철변전소(SS) 기지급전반에 설치하는 경우, ② 본선 보조급전구분소(SSP)와 같은 장소에 설치하는 경우, ③ 본선의 보조급전구분소(SSP)에서 분기하여 별도의 기지SS에 설치하는 경우이다.

2018년 기준으로 국내 기지용AT는 15개소로 본선용AT과 같은 장소에 10개소(SS에 3개소, 본선SSP에 7개소), 다른 장소에 5개소를 설치하여 운영하고 있다.

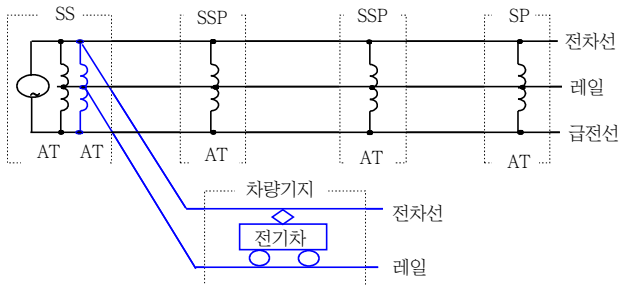


그림 5 SS에 설치된 기지용AT 결선도
 Fig. 5 AT wiring diagram for vehicle base installed in SS

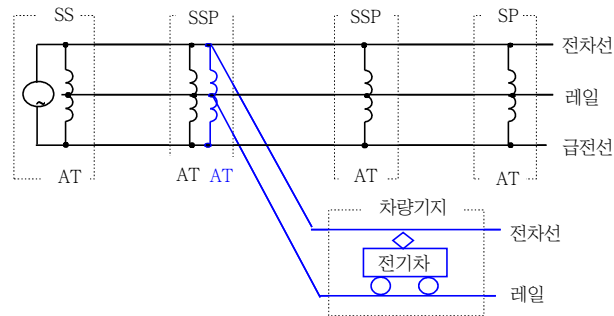


그림 6 본선SSP에 설치된 기지용AT 결선도
 Fig. 6 AT wiring diagram for vehicle base installed in mainline SSP

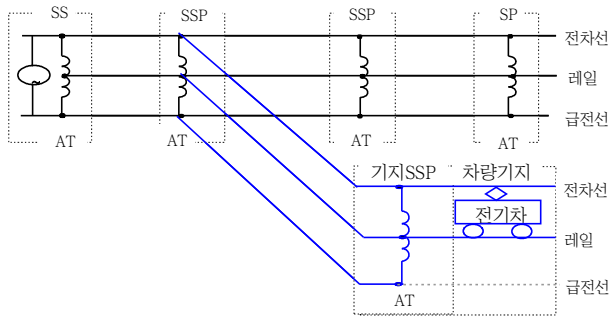


그림 7 기지SSP에 설치된 기지용AT 결선도
 Fig. 7 Wiring diagram for vehicle base installed in vehicle base SSP

4. 기지용AT의 전압강하 이론적 고찰

국내 기지용AT는 기지 입구측 SS나 본선SSP 또는 기지SSP에 3가지 형태로 설치되어 있고, 말단측에는 설치되어 있지 않다. 이렇게 설치되어 있는 기지용AT의 전차선로 전압강하 보상효과를 알아보기 위하여 AT 급전회로 임피던스 계산법을 준용하여 전압강하에 대한 이론적 고찰을 하였다.

4.1 기지용AT 급전계통 등가회로 유도

2.1절과 같은 방법으로 기지용AT 급전계통을 3가지 설치장소별 형태로 구분하여 등가회로로 표현하면 그림 8~그림 10과 같이 된다.

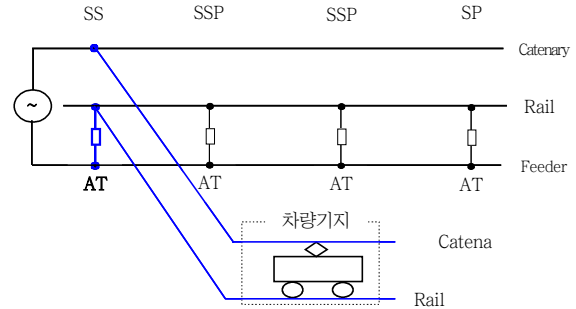


그림 8 SS에 설치된 기지용AT의 급전계통의 등가회로
 Fig. 8 Equivalent circuit of feed system of vehicle base AT installed in SS

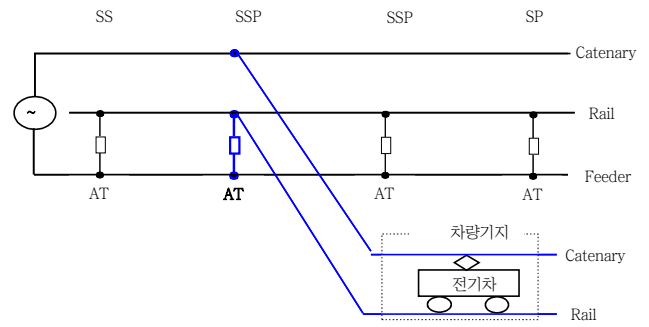


그림 9 본선SSP에 설치된 기지용AT의 급전계통의 등가회로
 Fig. 9 Equivalent circuit of the feed system of vehicle base AT installed in the main line SSP

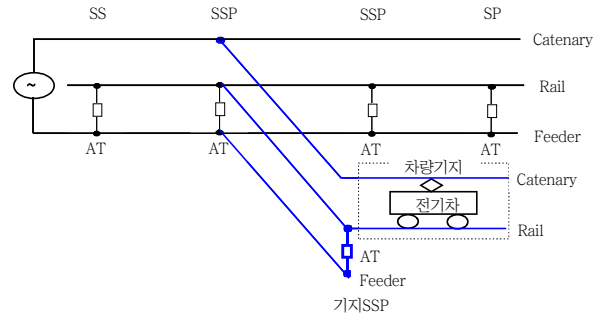


그림 10 기지SSP에 설치된 기지용AT의 급전계통의 등가회로
 Fig. 10 Equivalent circuit of feed system of vehicle base AT installed in vehicle base SSP

4.2 기지용AT 급전회로 임피던스 계산

2.1의 급전회로 임피던스 계산방법과 같이 기지용AT가 SS에 설치된 경우, 본선SSP에 설치된 경우, 기지SSP에 설치된 경우의 임피던스는 다음과 같이 계산할 수 있다.

1) SS에 설치된 기지용AT에서 n(열차위치)까지의 임피던스

그림 11과 같이 SS에서 타 본선용AT와 병렬로 연결되어 있는 기지용AT에서 바라본 n점(차량기지구내 열차위치)까지의 T-R 단락임피던스 Z_n 를 2.1절의 급전회로 임피던스 계산법에 따라 계산하면, 전철변전소에서 차량기지까지의 전차선로는 AT와 급전선(F)이 없으므로 Z_3 (급전선 임피던스), D_n (열차위치의 양쪽 AT 간격), X_n (열차위치에서 SS방면 AT까지의 거리)는 0 또는 무시하면, AT 급전회로 전압강하 선로정수

$$Z_L = Z_1 + (Z_2 \times Z_3) / (Z_2 + Z_3) [\Omega/km], \quad Z_L' = Z_2^2 / (Z_2 + Z_3) [\Omega/km]$$

에서 $Z_L = Z_1$, $Z_L' = Z_2$ 가 되고, AT 급전회로 임피던스 계산식 $Z_n = Z_L \ell_n + Z_L' (1 - \frac{X_n}{D_n}) X_n$ 에서 $(1 - \frac{X_n}{D_n}) X_n = 0$ 이 되므로 $Z_n = Z_1 \ell_n$ 이 된다.

또한 $Z_L = R_L \cos\theta + X_L \sin\theta [\Omega/km]$, $Z_L' = R_L' \cos\theta + X_L' \sin\theta [\Omega/km]$ 이므로 SS의 기지용AT에서 바라본 차량기지구내 열차위치인 n점까지의 T-R 단락임피던스 Z_n 은 $Z_n = Z_1 \ell_n = (R_1 \cos\theta + X_1 \sin\theta) \ell_n [\Omega]$ 가 된다.

이는 SS의 기지용AT의 단상 3선식(T, R, F) 결선에서 차량기지에 교류 단상 2선식(T, R)으로 임의의 한 지점에서 전력을 공급하는 일반 배전선로의 임피던스 계산과 같다.

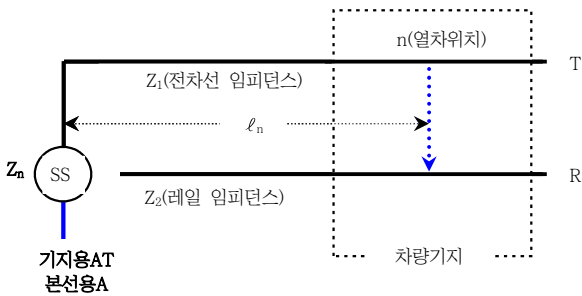


그림 11 SS에 설치된 기지용AT의 임피던스의 등가회로
 Fig. 11 Equivalent circuit of the impedance of vehicle base AT installed in the SS

2) 본선SSP에 설치된 기지용AT에서 n(열차위치)까지의 임피던스

그림 12와 같이 본선SSP에서 타 본선용AT와 병렬로 연결되어 있는 기지용AT에서 바라본 n점(차량기지구내 열차위치)까지의 T-R 단락임피던스 Z_n 를 2.1절의 AT 급전회로 임피던스 계산법에 따라 계산하면, 기지용AT에서 차량기지까지의 전차선로는 AT와 급전선(F)이 없으므로 Z_3 , X_n , D_n 은 0 또는 무시하면 전차선(T)과 레일(R)로만 구성되어 있으므로 본선SSP의 기지용AT에서 바라본 차량기지구내 열차위치인 n점까지의 T-R 단락임피던스 Z_n 은 $Z_n = Z_1 \ell_n = (R_1 \cos\theta + X_1 \sin\theta) \ell_n [\Omega]$ 가 된다.

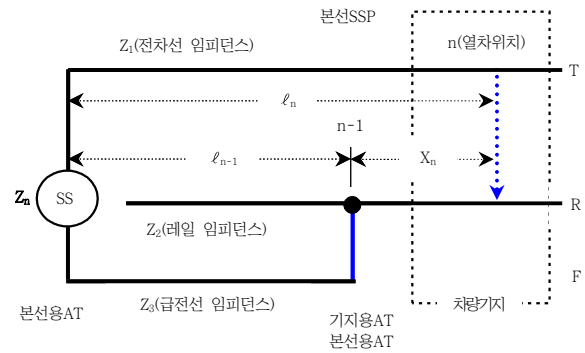


그림 12 본선SSP에 설치된 기지용AT의 임피던스 등가회로
 Fig. 12 Equivalent circuit of the impedance of vehicle base AT installed in the main line SSP

와 급전선(F)이 없으므로 Z_3 , X_n , D_n 은 0 또는 무시하면 전차선(T)과 레일(R)로만 구성되어 있으므로 본선SSP의 기지용AT에서 바라본 차량기지구내 열차위치인 n점까지의 T-R 단락임피던스 Z_n 은 $Z_n = Z_1 \ell_n = (R_1 \cos\theta + X_1 \sin\theta) \ell_n [\Omega]$ 가 된다.

이는 본선SSP의 기지용AT의 단상 3선식(T, R, F) 결선에서 차량기지에 교류 단상 2선식(T, R)으로 임의의 한 지점에서 전력을 공급하는 일반 배전선로의 임피던스 계산과 같다.

3) 기지SSP에 설치된 기지용AT에서 n(열차위치)까지의 임피던스

그림 13과 같이 기지SSP의 기지용AT에서 바라본 n점(차량기지구내 열차위치)까지의 T-R 단락임피던스 Z_n 를 2.1절의 AT 급전회로 임피던스 계산법에 따라 계산하면, 기지용AT에서 차량기지까지의 전차선로는 AT와 급전선(F)이 없으므로 Z_3 , X_n , D_n 은 0 또는 무시하면 전차선(T)과 레일(R)로만 구성되어 있으므로 기지SSP의 기지용AT에서 바라본 차량기지구내 열차위치인 n점까지의 T-R 단락임피던스 Z_n 은 $Z_n = Z_1 \ell_n = (R_1 \cos\theta + X_1 \sin\theta) \ell_n [\Omega]$ 가 된다.

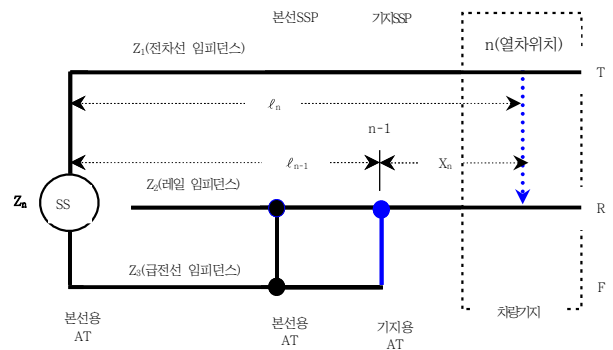


그림 13 기지SSP에 설치된 기지용AT의 임피던스의 등가회로
 Fig. 13 Equivalent circuit of the impedance of vehicle base AT installed in vehicle base SSP

이는 기지SSP의 기지용AT의 단상 3선식(T, R, F) 결선에서 차량기지에 교류 단상 2선식(T, R)으로 임의의 한 지점에서 전력을 공급하는 일반 배전선로의 임피던스 계산과 같다.

다만, 본 논문은 기지용AT의 전압강하 보상효과를 알아보는 것이므로, 본선SSP의 본선용AT에서 바라본 기지SSP의 기지용AT까지의 T-R 단락임피던스 Z_n 을 2.1절의 AT 급전회로 임피던스 계산법에 따라 계산하면

$$Z_n = Z_L \ell_n + Z_L' \left(1 - \frac{X_n}{D_n}\right) X_n$$

이 된다.

4.3 기지용AT의 급전회로 전압강하 계산

철도차량기지 내의 전기차량 위치는 전철변전소로부터 급전회로의 최원단 부하이므로 2.2절에서 최원단 전기차 부하 N점의 전압강하 계산식을 적용하여야 하나, 철도차량기지내 전차선로는 AT와 급전선(F)이 없어 전차선(T)과 레일(R)로만 구성된 단상 2선식 회로이므로 임의의 한 지점에서 전력을 공급하는 임피던스법에 의한 교류 단상 2선식 배전선로와 같이 전압강하를 계산하면 식 (6)과 같다.

$$\Delta V = \Delta E = K \cdot I (R \cos\theta + X \sin\theta) \tag{6}$$

여기서, ΔV : 상전압 강하, ΔE : 선간전압 강하, K : 정수, I : 부하전류, R : 선로저항, X : 선로 리액턴스

1) 기지용AT가 SS 또는 본선SSP에 설치된 경우

기지용AT가 SS나 본선SSP에 설치된 경우에 기지용AT~차량지간은 전차선(T)과 레일(R)로만 구성된 단상 2선식 회로이므로 식 (6)과 같이

$$\Delta V = \Delta E = K \cdot I (R \cos\theta + X \sin\theta)$$

이 된다.

2) 기지용AT가 기지SSP에 설치된 경우

기지용AT가 본선에서 분기되어 별도의 기지SSP에 설치된 경우에도 기지용AT가 SS나 본선SSP에 설치된 경우와 마찬가지로 기지용AT~차량지간은 전차선(T)과 레일(R)로만 구성된 단상 2선식 회로이므로 식 (6)과 같이 $\Delta V = \Delta E = K \cdot I (R \cos\theta + X \sin\theta)$ 이 된다.

단, 본선SSP~기지SSP간은 전차선(T)과 레일(R) 그리고 급전선(F)으로 정상적으로 구성되어 있으므로 2.2절의 AT 급전회로 전압강하 계산식에서 최원단 전기차부하 전압강하 e_n 은

$$e_n = Z_L \sum_{j=1}^n i_j \ell_j + Z_L' \left(1 - \frac{x_n}{D_n}\right) i_n x_n [V]$$

이 된다.

4.4 기지용AT의 급전회로 전압강하 시뮬레이션

1) 기지용AT가 SS에 설치된 경우

그림 14와 같이 전차선-레일로만 구성된 단상 2선식 차량기지 급전회로의 기지용AT가 본선SSP에 설치된 경우 차량기지 전차선로 전압강하 보상여부를 시뮬레이션한 결과, 설치되어 있지 않은 경우와 전압강하가 동일하게 나타났다. 또한 기지용 AT가 본선SSP에 설치된 경우에도 동일하게 나타났다.

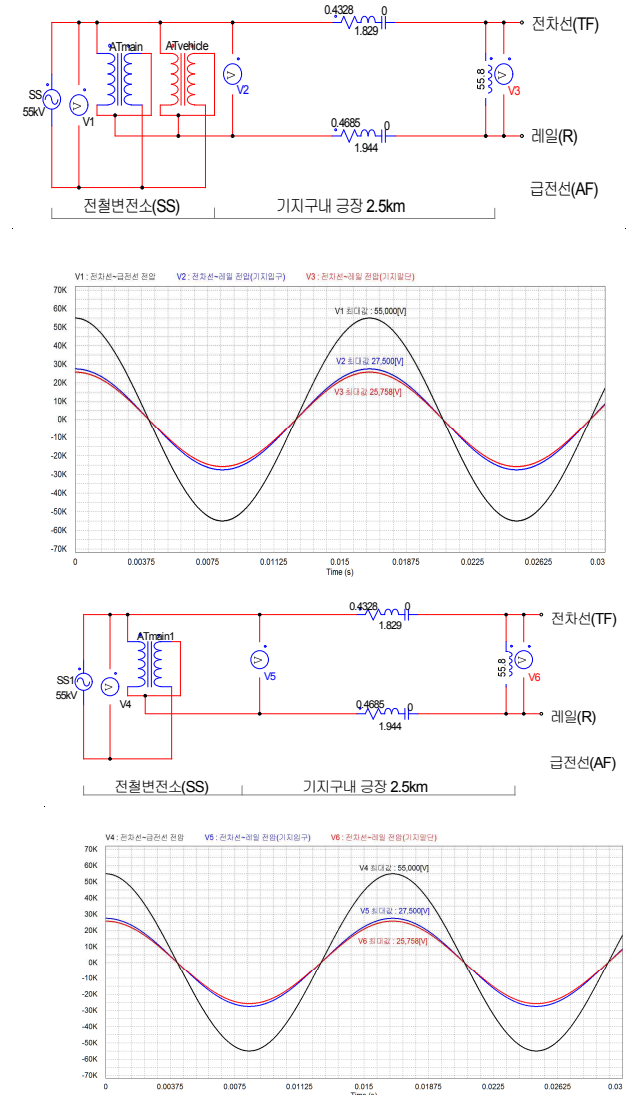


그림 14 SS의 기지용AT 설치유무에 따른 전압강하 보상여부
Fig. 14 Whether or not voltage drop compensation according to presence or absence of Auto-Transformer for railway vehicle base of SubStation

2) 기지용AT가 기지SSP에 설치된 경우

그림 15와 같이 기지용AT가 기지SSP에 설치된 경우 차량기지 전차선로 전압강하 보상여부를 시뮬레이션 한 결과 설치되어 있지 않은 경우와 비교하면, 전차선-레일-급전선으로 구성된 본선 SSP~기지SSP간은 전압강하 보상효과가 있었고, 전차선-레일로만 구성된 기지SSP~차량기지간은 전압강하 보상효과가 없었다.

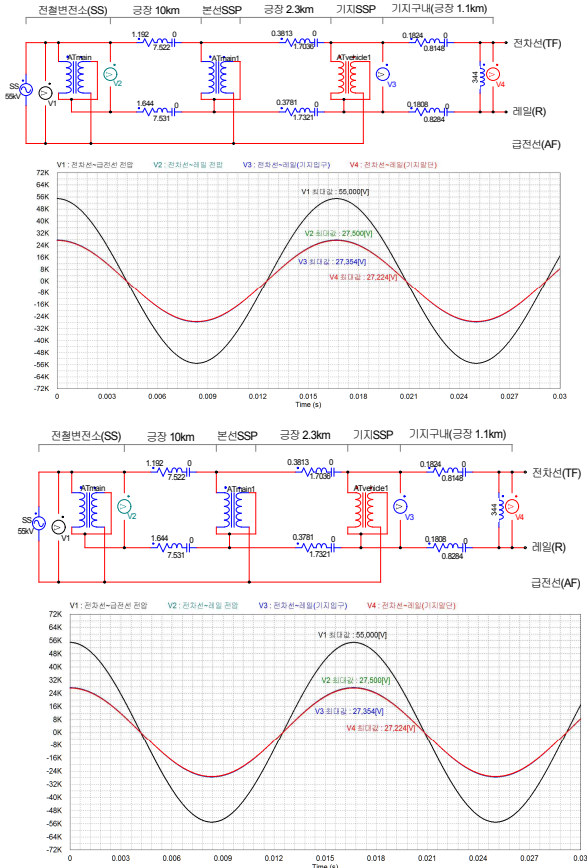


그림 15 기지SSP의 기지용AT 설치유무에 따른 전압강하 보상여부
Fig. 15 Whether SSP of a railway vehicle base compensates for voltage drop with or without Auto-Transformer installed for a railway vehicle base

5. 결 론

본 논문은 국내에서 운용되고 있는 AT 급전방식에서 기지용 AT의 설치장소별 형태에 따른 기지용AT의 전압강하 보상효과를 고찰하였다. 이를 위해 급전회로 임피던스 등가회로계산법을 해석하여 기지용AT가 전압강하 보상에 영향 미치는 변수(요인)는 Z_g (급전선 임피던스), X_n (전기차에서 SS방면의 AT까지의 거리), D_n (전기차 양쪽의 AT간격)임을 확인하였고, 기지용AT는 기지 SSP에 설치된 경우의 본선SSP~기지SSP 구간을 제외하고는 기지 말단측에는 없고 기지입구측에만 설치되어 있어 기지구내에는

AT와 급전선(F)이 없으므로 변수를 0 또는 무시하면 전차선(T)과 레일(R)로만 구성된 한 점에서 전원을 공급하는 교류 단상 2선식 배전선로와 같은 형태가 된다.

References

- [1] Yang-Su Kim, Hae-Chul Yu, "Electric Railway Engineering", *DONGIL publisher*, pp. 225-244, 2008.
- [2] Mun-Seob Han, Jang-Mu Lee, "Optimization of installation position of auto-transformer in AC AT feeding system", *Korean Institute of Electrical Engineers Conference Proceedings*, pp. 1248-1250, 2002.
- [3] Jeong-Cheol Kim, "Interpretation of feeding system and understanding of Korean railway electricity", Book publisher GIDALI, pp. 311-348, 2008.
- [4] Korea Railway Authority, "Railway design manuals and guidelines(Electric Power manual : KR E-02040 Spacing and location of substation Rev.5)", 2014.
- [5] Baeg Kim, "Electric Power Engineering", Book publisher GIDALI, pp. 116-123, 2006.
- [6] Seung-Hyeog Choe, "A Study on the Effect of the Auto Transformer for the Terminal Supplementary Feeding Class in the Electric Railway Feeding System", Seoul National University of Science and Technology Graduate School of Railway Master Thesis, 2011.

저 자 소 개



유 기 성 (Ki-seong Yu)

2014년 한양대학교 공학대학원 철도시스템 공학과 졸업(석사), 2015년~현재 한국교통대학교 교통대학원 교통정책교통시스템공학과 박사과정, 현재 한국철도공사 인재개발원 교수



김 재 문 (Jae-Moon Kim)

1994년 성균관대 전기공학과 졸업, 2000년 2월 동 대학원 졸업(공학박), 2000년~2004년 현대모비스(주) 기술연구소 선임연구원, 2006년~현재 국토교통부 철도기술 전문위원, 2004년 3월~현재 한국교통대학교 교통대학원 교통시스템공학과/철도전자전공학과 교수
 E-mail : goldmoon@ut.ac.kr