

AT 급전방식의 유도전압계산 알고리즘에 관한 연구

김 한 성 , 손 필 영  
 건국대학교 전기공학과

A Study on the Induced Voltage Calculation  
 Algorithm in the Electric Train

Kim Han Sung , Son Phil Yeong  
 Kun Kuk University

ABSTRACT

Induced voltage causing disturbances on the communication lines of electric train is dealt with when the AT power supply system is employed. In the paper we obtain an algorithm to calculate the induced voltages on the communication lines in the AT system and an algorithm for the induced current in case of the accident that the line falls to the ground. These algorithms are developed to a package of computer programs and their validity was checked on a simulated system.

2.2 AT 급전방식의 등가회로화

원회로정수와 등가회로정수와의 관계

- $Z_{aa}, Z_{bb}, Z_{cc}$  : (T), (R), (F)의 자기임피던스 [ $\Omega/\text{km}$ ]
- $Z_{ab}, Z_{bc}, Z_{ca}$  : (T-R), (R-F), (F-T)간의 상호임피던스 [ $\Omega/\text{km}$ ]
- $n_1, n_2$  : (T-R)간, (F-R)간 AT의 권선수
- $Z_M$  : AT의 누설임피던스 [ $\Omega/\text{km}$ ]
- $Z_{TT}=Z_{aa}, Z_{RR}=Z_{bb}, Z_{FF}=(Z_{cc}+2Z_{ca}+Z_{aa})/4$
- $Z_{TR}=Z_{ab}, Z_{FR}=(Z_{bc}+Z_{ab})/2, Z_{TF}=(Z_{ca}+Z_{aa})/2$
- $i_c=2I_c$

1. 서 론

최근 새로 개발되어 채택되고 있는 전기철도의 AT (Auto-Transformer) 급전방식은 많은 장점이 있는 대신 통신선 유도장해에 대한 예측계산이 대단히 복잡하여 이를 파악하기 위해 새로운 유도전압 계산 알고리즘을 도출하고 이것을 이용하여 컴퓨터 프로그램 패키지를 새로 개발하였다. 입력의 기초가 되는 기유도전류의 분포의 변화를 파악하는 수식해석의 새로운 기법의 도출로 AT 급전설비에서 잡음유도전압 및 상시유도전압 계산을 단순화하여 새로 개발된 컴퓨터 프로그램에 적용하였고, 모의시스템에서 시뮬레이션 수행결과 상당히 정확한 예측값을 얻을 수 있었다.

2. AT 방식과 전자유도

2.1 AT 방식에서 Amp.km

기도전류  $I(x)$ 가  $\ell_1$ - $\ell_2$ 구간길이 사이에 분포지와 길이와의 곱이 Amp.km로서

$$\begin{aligned} \text{Amp.km} &= \int_{\ell_1}^{\ell_2} I(x) dx \\ &= \int_{\ell_1}^{\ell_2} (I_T - I_P - I_R(x)) dx \quad (2-1) \\ &= \int_{\ell_1}^{\ell_2} (I_T - I_P) (\ell_2 - \ell_1) - \int_{\ell_1}^{\ell_2} I_R(x) dx \end{aligned}$$

여기서  $I_T$  : Trolley 선전류  
 $I_P$  : Feeder 선전류  
 $I_R(x)$  : Rail의 전류중 대지 누설전류  $I(x)$ 를 제한것

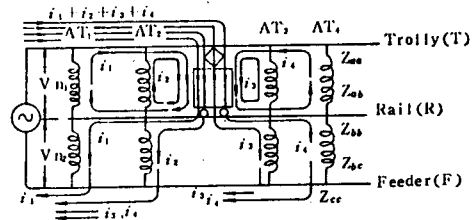


그림 2-1 AT 회로의 전류분포  
 Fig.2-1 Current distribution on AT circuit

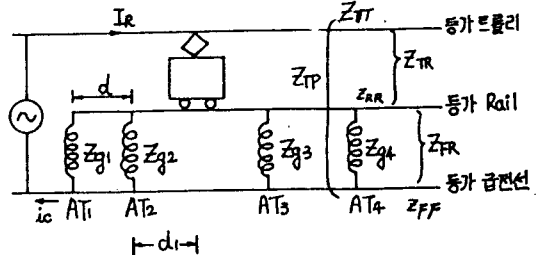


그림 2-2 AT 회로의 등가회로  
 Fig.2-2 Equivalent circuit of the AT system

2.3 AT 권선의 전류계산 알고리즘

AT 권선의 전류계산을 위하여 그림 2.3과 같은 경우를 고찰한다. 여기서  $Z_{g1}, Z_{g2}, Z_{g3}, Z_{g4}$ 에 흐르는 전류를 구하기 위하여 Rail의 누설분터던스  $G=0$ 으로 가정하고 (T)와 (F)의 높이가 거의 같다고 가정하면 그림 2-1에서  $Z_{ab}=Z_{bc}$  따라서  $Z_{TR}=Z_{FR}$ 이고,  $I_1, I_2, I_3$ 는 다음과 같다.

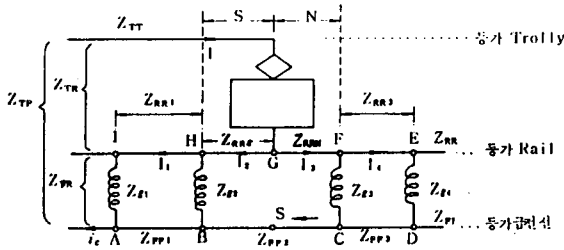


그림 2-3 AT 전류분포  
Fig.2-3 Current distribution in the AT winding

1) FC 점  
 $(I_3 - I_4)Z_{G3} = I_4(Z_{RR3} + Z_{G4} + Z_{FF3} - 2Z_{FR3})$  (2-2)

2) GB 점  
 $I_2 Z_{RR5} + (I_2 - I_1)Z_{G2} + I_3 Z_{FR5} - I Z_{TR5}$   
 $= I_3(Z_{RRN} + Z_{FF2}) + (I_3 - I_4)Z_{G3} - 2I_3 Z_{FRN}$   
 $- I Z_{TR5} + I_2 Z_{FR5}$  (2-3)

3) HA 점  
 $I_1 Z_{RR1} - I Z_{TR1} + (I - I_1)Z_{FR1} + I_1 Z_{G1}$   
 $= (I_2 - I_1)Z_{G2} + (I - I_1)Z_{FF1} - I Z_{FF1} + I_1 Z_{FR1}$  (2-4)

4) I = I<sub>2</sub> + I<sub>3</sub> (2-5)

식 (2-2) - 식 (2-5) 를 정리하여 행렬식으로 표시하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & Z_{G3} & -Z_{G3} - Z_{RR3} - Z_{G4} - Z_{FF3} + 2Z_{FR3} \\ -Z_{G2} & Z_{RR5} + Z_{G2} - Z_{FR5} & Z_{FR5} - Z_{RRN} - Z_{FF2} - Z_{G3} + 2Z_{FRN} & Z_{FR5} \\ Z_{RR1} - 2Z_{FR1} + Z_{G1} + Z_{G2} + Z_{FF1} & -Z_{G2} & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} 0 \\ (Z_{TR5} - Z_{FF5}) I \\ (Z_{TR1} - Z_{FR1} + Z_{FF1} - Z_{FR1}) I \\ I \end{bmatrix} \quad (2-6)$$

즉

$$[Z] \cdot [I_i] = [E] \quad (2-7)$$

따라서  $[I_i] = [Z]^{-1} \cdot [E]$  가 된다.

그리고 AT<sub>1</sub>, AT<sub>2</sub>, AT<sub>3</sub>, AT<sub>4</sub>에 흐르는 전류는

$$\begin{aligned} i_{r1} &= I_1 \\ i_{r2} &= I_2 - I_1 \\ i_{r3} &= I_3 - I_4 \\ i_{r4} &= I_4 \end{aligned} \quad (2-8)$$

의 값이 된다. 여기서 S 와 N의 접자는 2번 AT와 3번 AT 사이의 거리 관계를 표시하고 있다. 여기서 AT에 흐르는 각 전류는 전차위치에 따른 함수이므로 위치에 따라 (2-7)식을 이용하여 매번 계산을 반복수행한다.

2.4 교류 AT 방식에서 Rail의 전류분포

등가회로 그림 2-3에서 i번째 AT<sub>i</sub>에 J<sub>i</sub>의 전류가 흐를 때, Rail의 전류분포를 구하면 그림 2-4와 같다.

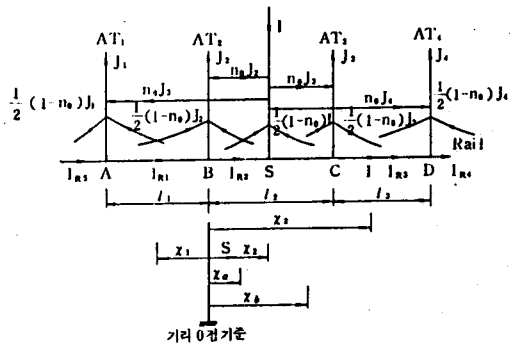


그림 2-4 Rail의 전류분포  
Fig. 2-4 Current distribution on rail road

x<sub>a</sub> 점에서 미분방정식을 세우면

$$-\frac{dV_x}{dx} = Z_{PR} \cdot I_x + Z_{TR} \cdot J_2 + J_{TR} \cdot J_1 \quad (2-9)$$

$$-\frac{dI_x}{dx} = V_x \cdot Y_b$$

x<sub>b</sub> 점에서의 미방은

$$-\frac{dV_x}{dx} = Z_{PR} \cdot I_x + Z_{TR} \cdot J_3 + J_{TR} \cdot J_4 \quad (2-10)$$

$$-\frac{dI_x}{dx} = V_x \cdot Y_x$$

3. 유도전압 예측 알고리즘 3)

3.1 상시유도전압 예측 알고리즘

상시유도전압 계산식은 BT방식의 경우 아래와 같다.

$$V = (1-n) \cdot I \cdot k_5 \cdot \omega \cdot M \cdot \delta \cdot k_1 \cdot k_3 \cdot k_4 \cdot 10^{-6} \quad [V]$$

이것을 A.T방식과 비교하여 보면 Amp.km 정의에 의하여 (1-n)·k<sub>5</sub>·I·D = Amp.km, (D = δ<sub>2</sub>-δ<sub>1</sub>의 소구간) 여기서 (1-n)·k<sub>5</sub>·D는 데지의 귀로전류

이식을 예측식에 대입하면

$$V = \frac{\text{Amp. km}}{D} \omega \cdot M \cdot \ell \cdot k_1 \cdot k_3 \cdot k_4 \cdot 10^{-6} \quad [V] \quad (3-1)$$

여기에 고가의 차폐계수  $k_6$ 를 고려하면

$$V_f = \omega_f \frac{(\text{Amp. km})_f}{D} I \cdot k_4 \cdot k_6 \cdot M_f \cdot \ell \cdot k_1 \cdot k_3 \cdot 10^{-6} \quad [V]$$

$$= A_f \cdot M_f \cdot \ell \cdot k_f \cdot 10^{-3} \quad [V] \quad (3-2)$$

$$\text{단 } A_f = \omega_f \cdot \frac{(\text{Amp. km})_f}{D} I \cdot k_4 \cdot k_6 \cdot 10^{-3} \quad [\text{mV} / \mu\text{H}]$$

$k_f$ :  $k_1 \cdot k_3$

$V_f$ : 상시유도전압

$A_f$ : 부하전류에 의한 기본주파수에 있어서 유도지

$M_f$ : 기본주파수에 있어서 전자선과 통신선간의 상호인덕턴스

$\ell$ : 전자선과 통신선간의 평행길이 [km]

$k_f$ : 기본주파수에서의 통신선의 차폐계수 및 다른 궤도의 차폐계수의 곱

$\omega_f$ : 기본주파수의 각 주파수

이와같이 예측계산에는 Amp.km을 직접 사용하지 않고 그것에 대신하는 유도지  $A_f$ 를 미리 계산해놓고  $M \cdot \ell \cdot k_1 \cdot k_3$ 를 곱하여 유도전압을 계산한다.

### 3-2 유도잡음전압 예측 알고리즘

기유도전류 성분중 고주파부분을 분석하여 통신선에 영향을 주는 고조파 자수별 크기와 그 위상각을 찾아내야 한다. 그러나 이렇게 분석하는 방법이 정확한 방법이나 그 고조파 전류는 부하의 상황과 운전조건에 따라 매우 상이하므로 일일이 분석하여 고려하는 것이 약간의 번거롭다. 그래서 전기철도에서는 기본파 60 [Hz] 100 [A]를 흘린 경우를 가상해서 발생하는 고조파전류의 800 [Hz]성분을 등가방해전류  $J_p$ 라 하여 이 값을 기준으로 하여 적용하고있다.

$$V_n = \omega_n \cdot \frac{(\text{Amp. km})_n}{D} k_2 \cdot k_4 \cdot k_6 \frac{I}{100} J_p \cdot 10^{-3}$$

$$\times M_n \cdot \ell \cdot k_1 \cdot k_3 \quad [\text{mV}] \quad (3-3)$$

이다. 여기서

$$A_n = \omega_n \cdot \frac{(\text{Amp. km})_n}{D} k_2 \cdot k_4 \cdot k_6 \frac{I}{100} J_p \cdot 10^{-3} \quad [\text{mV} / \mu\text{H}]$$

$k_n = k_1 k_3$

로 놓으면 (3-3)식은 다음과같이 간단하게 정리된다.

$$V_n = A_n \cdot M_n \cdot \ell \cdot k_n \quad [\text{mV}] \quad (3-4)$$

여기서

$V_n$ : 유도잡음전압

$A_n$ : 부하전류에 의한 800 [Hz]에서 계산된 값

$M_n$ : 800 [Hz]에 있어서 전자선과 통신선간의

상호 인덕턴스

$\ell$ : 전자선과 평행거리

$k_n$ : 800 [Hz]에서 통신선의 차폐계수  $k_{1n}$ 과

다른궤도 차폐계수  $k_3$ 의 곱

$\lambda$ : 통신선의 평행도

$J_p$ : 부하전류 100[A]당의 등가 방해전류 [A]

$I$ : 부하전류 [A]

$\omega_n$ : 800 [Hz]에 있어서 각 주파수

$k_2$ : 가음지선 차폐계수

## 4. 프로그램구성

### 4-1 유도전압 해석프로그램

여기서 연구개발한 유도해석프로그램 패키지는 크게 나누어 1개의 주프로그램과 7개의 부프로그램으로 나누어 구성되어 있다. 한편 유도전압해석 프로그램의 패키지의 개략적인 흐름도는 그림 4-1 과 같다.

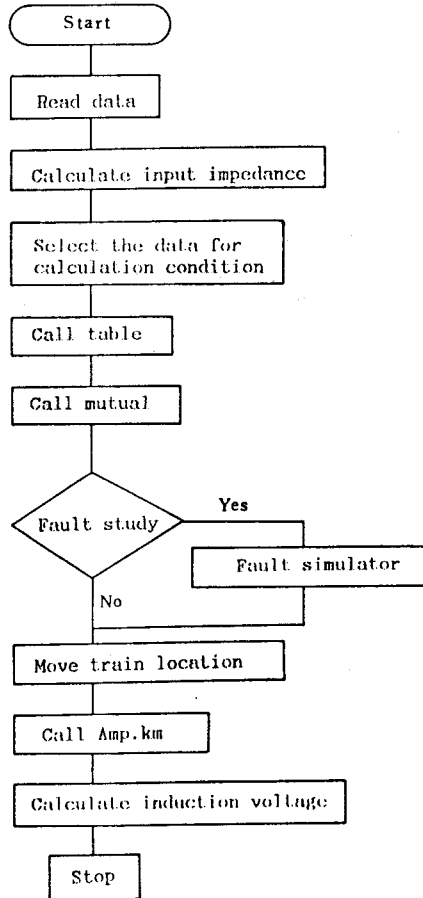


그림 4-1 주요 프로그램의 흐름도  
Fig 4-1 Flow chart of main program

## 5. 결론

본 연구에서는 대부분의 전기철도의 급전방식인 A T 급전방식에서 통신선에 미치는 유도현상을 다루었다. 이 A T 급전방식에서는 전차의 위치에 따라 각 통신선에 유도되는 유도전압의 크기가 다르고 또 전기철도 주위에 상당히 많은 통신선이 존재하기 때문에 막대한 계산량이 요구된다.

따라서 본 논문은 유도전압 계산에 필요한 알고리즘 도출 및 유도전압 계산 프로그램 패키지 개발에 주력하였다. 개발된 프로그램은 모의계통을 적용하여 그 타당성을 입증하였으며 통신선에 대한 적절한 유도대책을 제시할 수 있게 되었다. 그러나 프로그램의 신뢰도를 높이기 위하여 시뮬레이션 결과물 실측시험을 통하여 비교검토가 수반되어야 하며 보안수정이 계속되어야 한다고 생각된다. 이상 본 논문 연구결과와 결론은 다음과 같다.

1. AT 급전방식서 통신선에 유도되는 유도전압 계산알고리즘을 도출하였다.
2. 주로 수계산에 의존하여 부정확했던 유도전압계산을 컴퓨터 프로그램 짝키지화 하였다.
3. 급전선 지락시 지락전류 계산알고리즘을 제시하였다.
4. 통신선에 대하여 적절한 유도대책을 제시할 수 있었다.
5. 입력자료의 단순화와 퍼스널컴퓨터(IBM-PC/AT)로 프로그램을 개발함으로써 현장 및 엔지니어링에 이용하기 쉽게 하였다.

참고문헌

1. G.T.Hayat " Computer Analysis Methods for po- per System." Macmillan Publing Compony 1986
2. Sharaf.A.M. "Harmonic Interference in communi- cation Circuits due to Distribution Systems" IEEE, PAS Aug, 1982, 2975-2981.
3. 石川, "AT급전방식의 軌道回路への影響" 鐵道技術研 究所 連絡 NO. 73-54. 1973. 4.
4. OLLI, ELGERD, " Electric Energy System Theory, An Introduction." McGRAW-HILL Book Company, 1971.