

A Reduced Equivalent Line Constant of the Catenary System

李 翰 旻* · 吳 廣 海 ** · 李 章 茂*** · 朴 懷 濬 § · 張 吉 洙 §§ · 權 世 燻 §§§

(Hanmin Lee · Kwanghae Oh · Changmu Lee · Hyunjune Park · Gilsoo Jang · Saehyuk Kwon)

Abstract - Line constants are composed by impedances and susceptances. A paper which was published estimated only impedances of line constants. Therefore, this paper estimates susceptances as well as impedances of equivalent five-conductors model using the reduced equivalent method. In order to verify estimated line constants, we measured line constants of real railway system. And we compared calculated results with measured data on 60Hz~3000Hz. For the other verification, the calculation results from the proposed model and the measurement data from the test are compared focused on the amplification of harmonic current in the paper.

Key Words : Line constants, Equivalent five-conductors model, The amplification of harmonic current

1. 서 론

철도 전차선로 시스템에 나타나는 여러 가지 현상들을 파악, 해석 및 예측하기 위해서는 반드시 전차선로의 선로정수 값들이 주어져야 한다. 이 값들을 얻기 위해서는 우선 철도 전차선로 시스템의 선로정수 값들에 대한 예측 계산이 선행되어야 한다. 철도 전차선로 시스템은 여러 도체들로 구성되어 있는 복잡한 시스템이다. 그러나 이 전차선로 시스템을 자세히 살펴보면 선로의 수가 많아 복잡하지만 몇몇 도체들은 서로 단락되어 있어서 전기적으로는 하나의 도체와 같게 취급할 수 있다. 그러므로 결국 5개의 도체로 구성되어 있다고 볼 수 있다. 보다 구체적으로 살펴보면 전차선과 조가선이 균압선이나 드로퍼에 의해 연결되어 있고 상하행 레일, 상하행 가공보호선, 상하행 접지선이 서로 공동 접지되어 있어 하나의 전기적인 도체군으로 볼 수 있다. 실제 현장에서는 앞에서 설명한 바와 같이 도체들이 단락되어 있으므로 5도체의 선로정수를 측정할 수 밖에 없다. 따라서 예측 계산에서는 5도체군에 대한 선로정수를 구하게 되는 것이다. 그러므로 이 시스템을 해석하기 위해서는 상·하행 급전선, 상·하행 각각의 전차선 도체군(전차선+조가선), 레일 도체군(상·

하행 레일, 가공보호선, 접지선)의 5개 도체군에 대한 선로정수를 예측하여야 한다.[1] 이 선로정수는 임피던스와 서셉턴스로 구성되어 있다. 기존에 발표된 논문은 5개 도체군의 등가 선로정수를 예측하는 방법에 의해 선로정수 중 임피던스만을 예측하였다. 따라서 본 논문은 도체 축약 방법을 이용하여 5개 도체군 등가 임피던스 뿐만 아니라 서셉턴스까지 예측하게 된다. 예측된 선로정수를 검증하기 위해서, 실제 철도 시스템의 선로정수를 측정하였다. 그리고 주파수를 60Hz~3000Hz까지 변화시켜 계산된 선로정수와 측정된 선로정수를 비교하였다. 또다른 검증을 위해 예측된 선로정수를 적용하여 계산된 고조파 전류 확대율과 측정된 고조파 전류 확대율을 비교 분석하였다.

2. 전차선로 시스템 구조

그림 1은 전차선로 시스템의 기하학적인 구조를 나타낸다. 전차선로 시스템은 14개의 도체로 구성되어 있으나 전차선과 조가선은 드로퍼로 연결되어있고 상·하행 레일과 가공보호선, 접지선이 공통으로 연결되어 있으므로 결국, 도체들을 5개의 도체군으로 나타내게 된다. 첫 번째 도체군은 상행 급전선(1), 두 번째 도체군은 하행 급전선(2), 셋째 도체군은 상행 전차선(4)과 상행 조가선(3), 넷째 도체군은 하행 전차선(6)과 하행 조가선(5)으로 구성되고 다섯째 도체군은 레일(7,8,9,10), 가공보호선(11,12), 접지선(13,14)으로 공동접지 되어있다.

* 正 會 員: 韓國鐵道技術研究院 輕量電鐵研究팀 主任研究員

** 正 會 員: 産業資源部 技術標準院 工業研究官

*** 正 會 員: 韓國鐵道技術研究院 電力研究그룹 先任研究員

§ 正 會 員: 韓國鐵道技術研究院 電氣研究本部 責任研究員

§§ 正 會 員: 高麗大學校 工大 電氣工學科 副教授 · 工博

§§§ 正 會 員: 高麗大學校 工大 電氣工學科 教授 · 工博

接受日字: 2004年 4月 14日

最終完了: 2004年 6月 7日

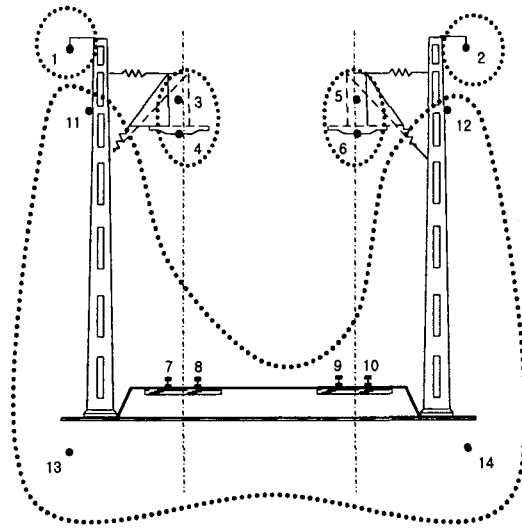


그림 1 전차선로의 기하학적 구조
Fig. 1 Configuration of catenary system

3. 5도체 선로정수 예측과정

선로정수 예측과정의 흐름도를 그림 3에 보인다. 도체 데이터 정보 입력에서는 각 도체에 대한 높이, 도체 간 거리, 반지름, 투자율 등이 입력자료로 들어간다. 그리고 서로 연결된 도체들을 분류하고 그룹핑한다. 그룹핑된 도체들은 등가모델링 방법에 의해 5도체로 등가화 되고 이렇게 5도체로 등가화된 모델에 대해 최종적으로 등가 임피던스를 계산한다.

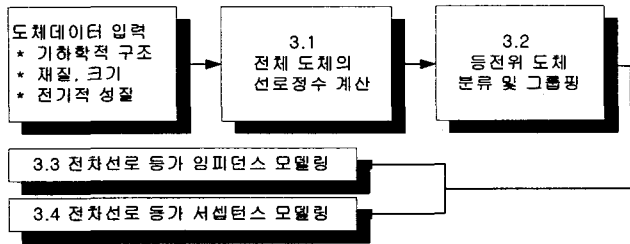


그림 2 선로정수 계산 과정
Fig. 2 The process of calculating line constants

3.1 모든 도체 선로정수 계산

단위 길이 당 자기 임피던스는 내부 자기임피던스와 외부 자기임피던스의 합이다.

$$Z'_{ii} = Z_{Aii} + Z_{Eii} \quad (1)$$

여기서

Z_{Aii} 도체의 단위 길이 당 내부 임피던스

Z_{Eii} 대지 귀환(earth return)을 고려한 도체의 단위길이 당 외부임피던스

직렬 임피던스 행렬의 대각 성분인 자기 임피던스는 식(2)와 같다.

$$Z'_{ii} = (R'_{i-IN} + \Delta R'_{ii}) + j\left(\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{2h_i}{r_i} + X'_{i-IN} + \Delta X'_{ii}\right) \quad (2)$$

비대각 성분인 상호 임피던스는 식 (3)과 같다.

$$Z'_{ij} = (R'_{i-IN} + \Delta R'_{ij}) + j\left(\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{2h_i}{r_i} + X'_{i-IN} + \Delta X'_{ij}\right) \quad (3)$$

또한 식에 포함된 $\Delta R'$ 과 $\Delta X'$ 은 대지 귀환효과를

고려한 항으로 각도 ϕ 와 정수 a의 함수이다. 각 4개의 연속된 항들이 반복되는 형태이고, 전력 주파수에 대해서는 몇 개의 항만 필요하지만, 고주파수와 선간 공간이 넓어질수록 더 많은 항을 필요로 하게 된다.

각도 ϕ 는 자기 임피던스 경우 $\phi=0$ 이 되고 상호 임피던스인 경우에는 $\phi=\phi_{ik}$ 가 된다.

정수 a는 다음과 같다.

$$a = 4\pi\sqrt{5} \cdot 10^{-4} D \sqrt{\frac{f}{\rho}}$$

여기서, D = 두 도체사이의 거리(m)

ρ = 대지 저항 (Ωm)

3.2 등전위 도체 분류 및 그룹핑

등전위 도체라는 개념은 두 개 이상의 도체가 서로 단락이 된 상태라 정의한다. 따라서 전차선과 조가선이 드로퍼로 연결되어 있으므로 등전위 도체로 분류되고 그룹핑 된다. 그리고 레일, 가공 보호선, 접지선도 또한 공통으로 연결되어 있으므로 하나의 등전위 도체로 고려한다.

복선의 경우 도체 그룹은 상행 급전선, 하행 급전선, 상행 전차선 도체군, 하행 전차선 도체군, 레일 도체군으로 그룹 수는 5개가 된다.

3.3 전차선로 등가 임피던스 모델링

일반적인 세 가지 등가 임피던스 모델링에 대해 살펴본다. 첫 번째로 등가 도체 모델의 자기 임피던스를 살펴보고, 두 번째는 도체그룹과 도체 사이의 상호 임피던스, 세 번째는 도체그룹과 도체그룹 사이의 상호 임피던스를 살펴본다.

3.3.1 등가 도체 모델의 자기 임피던스

두 개의 도체가 하나의 가상 도체로 대체된다. 즉, 다음 그림 3과 같이 두 도체의 자기 임피던스와 상호 임피던스가 하나의 자기 임피던스로 대체된다.

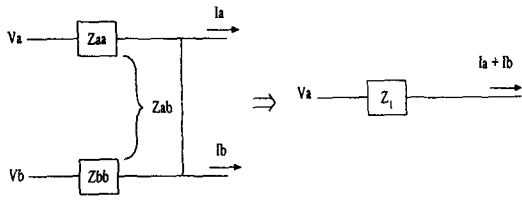


그림 3 도체군의 자기 임피던스
Fig. 3 Self impedance of conductor group

이 가상 도체 (Z_1)의 자기 임피던스는 다음과 같다.
- 만약 $Z_{aa} \neq Z_{bb}$ 이면 (예를 들어 전차선과 조가선으로 구성된 전차선로 시스템)

$$Z_1 = \frac{Z_{aa} \cdot Z_{bb} - Z_{ab}^2}{Z_{aa} + Z_{bb} - 2Z_{ab}} \quad (4)$$

여기서

- Z_{aa} 도체(a)의 자기 임피던스
- Z_{bb} 도체(b)의 자기 임피던스
- Z_{ab} 도체(a, b) 사이의 상호 임피던스

- 만약 $Z_{aa} = Z_{bb}$ 이면 (예를 들어 두 개의 레일 도체)

$$Z_1 = \frac{Z_{aa} + Z_{ab}}{2} \quad (5)$$

3.3.2 도체군과 도체 사이의 상호 임피던스

다음 그림 4는 도체군과 도체와의 상호 임피던스를 계산하는 방법을 나타낸다.

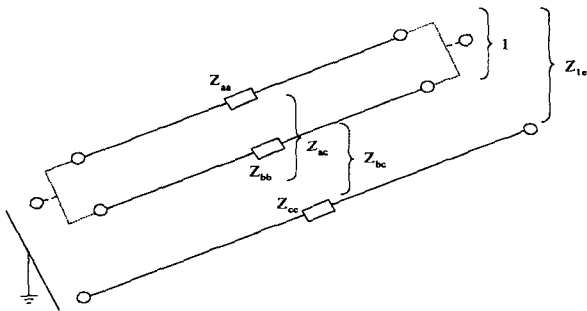


그림 4 도체군과 도체 사이의 상호 임피던스
Fig. 4 Mutual impedance between conductor group and conductor

- 만약 $Z_{aa} \neq Z_{bb}$ (예를 들면, 전차선과 조가선으로 구성된 전차선 도체군)와 Z_{cc} (예를 들면, 급전선)가 자기 임피던스를 나타내면 다음과 같다.

$$Z_{12} = \frac{Z_{2a}(Z_{bb} - Z_{ab}) + Z_{2b}(Z_{aa} - Z_{ab})}{Z_{aa} + Z_{bb} - 2Z_{ab}} \quad (6)$$

여기서,

- Z_{2a} 도체(a)와 도체(c)로 구성된 상호 임피던스
- Z_{2b} 도체(b)와 도체(c)로 구성된 상호 임피던스

- 만약 $Z_{aa} = Z_{bb}$ (예를 들면, 두 레일)와 Z_{cc} (예를 들면,

급전선)가 자기 임피던스를 나타내면

$$Z_{1c} = \frac{Z_{ac} + Z_{bc}}{2} \quad (7)$$

3.3.3 도체군과 도체군 사이의 상호 임피던스

본 절에서는 두 도체군 사이의 상호 임피던스를 구하는 방법을 나타낸다.

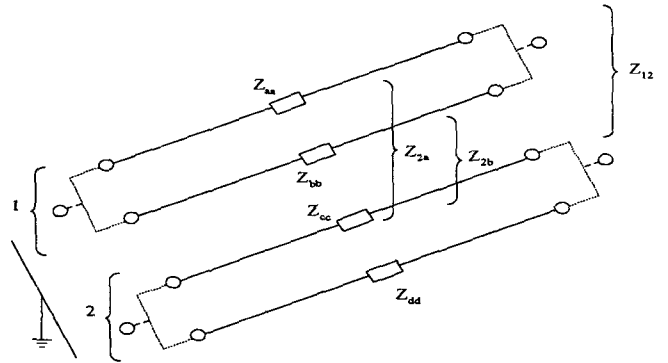


그림 5 도체군과 도체 사이의 상호 임피던스
Fig. 5 Mutual impedance between conductor groups

- 만약 $Z_{aa} \neq Z_{bb}$ 와 $Z_{cc} = Z_{dd}$ (예를 들면, 전차선 도체군과 두 개의 레일)이면 위 상호 임피던스의 표현은 다음과 같다.

$$Z_{12} = \frac{Z_{2a}(Z_{bb} - Z_{ab}) + Z_{2b}(Z_{aa} - Z_{ab})}{Z_{aa} + Z_{bb} - 2Z_{ab}} \quad (8)$$

여기서

- Z_{2a} 도체(c,d)로 구성된 그룹(2)와 도체(a)사이의 상호 임피던스
- Z_{2b} 도체(c,d)로 구성된 그룹(2)와 도체(b)사이의 상호 임피던스

- 만약 $Z_{aa} = Z_{bb}$ 와 $Z_{cc} = Z_{dd}$ (예를 들면, 상행선 레일과 하행선 레일)이면

$$Z_{12} = \frac{Z_{2a} + Z_{2b}}{2} = \frac{Z_{ac} + Z_{ad} + Z_{bc} + Z_{bd}}{4} \quad (9)$$

여러 도체들 중에서 등전위 도체로 분류되어 그룹핑된 도체들을 하나의 도체로 등가화한다. 그림 6은 n개의 도체들 중에서 그중 n도체와 n-1도체가 전기적으로 등전위 도체로 분류되어 하나의 도체로 등가화되는 그림이다.

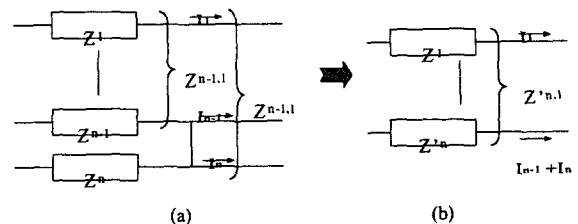


그림 6 전차선로 임피던스의 등가화
Fig. 6 Equivalent impedance of catenary system

식 (16)와 그림 7를 대비해서 생각하면 각 정전용량은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} C_1 &= k_{12} = k_{11} \\ C_2 &= k_{21} = k_{22} \\ C_{12} &= -k_{12} = -k_{21} \end{aligned} \quad (17)$$

도체의 수가 많은 경우에도 이에 대한 경우에도 이에 대한 식을 식 (16)를 변형하여 식 (17)과 같이 정전용량을 k의 함수로서 나타낼 수가 있다. 또한 k는 p의 함수로서 나타내며 p는 도체의 형태와 관계 위치를 알면 산출할 수 있다. 즉, 전위계수를 계산하면 정전용량은 전술한 순서에 따라 수학적으로 산출할 수 있게 된다.

등가 커패시턴스 모델링은 등가 임피던스 모델링과 마찬가지로 서로 연결된 도체들이 단락되어 있으므로 등전위라는 개념을 적용한다.

커패시턴스는 전위계수(P)로부터 수학적으로 산출(역행렬 계산)할 수 있는 계수이다. 이 전위계수는 도체들의 기하학적 구조로부터 영상법을 적용하여 대지로부터 도체의 높이, 평균등가반경, 도체간의 거리 및 도체와 영상도체와의 거리에 의해 구해진다. 이때 단락된 도체는 등전위이므로 전위(V)가 같다는 가정으로 임피던스 등가화와 동일 과정으로 등가 커패시턴스를 구할 수 있다.

그림 8은 도체의 대지위로 영상 및 사이 거리를 나타낸다.

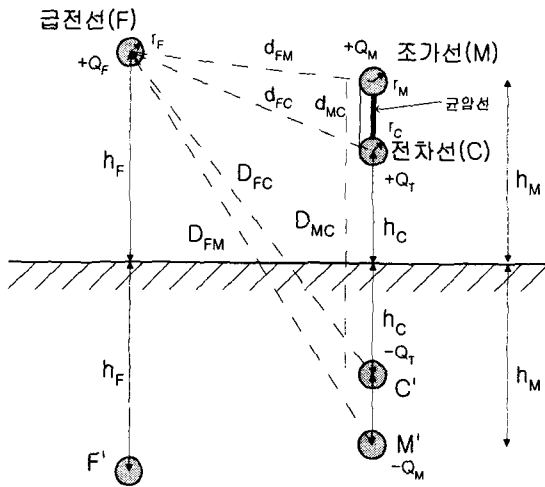


그림 8 전하 및 전위계산 구조
Fig. 8 Index for charge and potential calculation

그림 8에서 전위(V)와 전하(Q)와의 사이에는 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$\begin{bmatrix} V_F \\ V_C \\ V_M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{FF} & P_{FC} & P_{FM} \\ P_{CF} & P_{CC} & P_{CM} \\ P_{MF} & P_{MC} & P_{MM} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_F \\ Q_C \\ Q_M \end{bmatrix} \quad (18)$$

여기서 $P_{ii} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{2h_i}{r_i}$, $P_{ij} = P_{ji} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{D_{ij}}{d_{ij}}$

식 (18)의 관계를 얻은 다음 등가화 과정은 다음과 같다. 식 (18)에서 전차선과 조가선은 등전위이므로 다음 식 (19)와

같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} V_F \\ V_C \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{FF} & Z_{FC} & Z_{FM} \\ Z_{CF} & Z_{CC} & Z_{CM} \\ Z_{CF} - Z_{MF} & Z_{CC} - Z_{MC} & Z_{CM} - Z_{MM} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_F \\ I_C \\ I_M \end{bmatrix} \quad (19)$$

등가 도체의 전하는 전차선 전하와 조가선 전하의 합이 된다. 이들을 행렬 관계로 나타내면 식 (20)과 같다.

$$\begin{bmatrix} V_F \\ V_C \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{FF} & Z_{FC} & Z_{FC} - Z_{FM} \\ Z_{CF} & Z_{CC} & Z_{CC} - Z_{CM} \\ Z_{CF} - Z_{MF} & Z_{CC} - Z_{MC} & Z_{CC} + Z_{MM} - 2*Z_{MC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_F \\ I_C + I_M \\ -I_M \end{bmatrix} \quad (20)$$

식 (20)에서 3행 열의 요소들을 소거하면 식 (21)과 같은 등가 전위계수를 구한다.

$$\begin{bmatrix} V_F \\ V_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{FF}' & P_{FC}' \\ P_{CF}' & P_{CC}' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_F \\ Q_C + Q_M \end{bmatrix} \quad (21)$$

여기서, $P_{FF}' = P_{FF} - \frac{(P_{CF} - P_{MF})(P_{FC} - P_{FM})}{P_{CC} + P_{MM} - 2*P_{MC}}$

$P_{CC}' = P_{CC} - \frac{(P_{CC} - P_{MC})(P_{CC} - P_{CM})}{P_{CC} + P_{MM} - 2*P_{MC}}$

$P_{FC}' = P_{FC} - \frac{(P_{CC} - P_{MC})(P_{FC} - P_{FM})}{P_{CC} + P_{MM} - 2*P_{MC}}$

$P_{CF}' = P_{FC}'$

결국, 등가 커패시턴스는 전위계수의 역행렬에 의해 구할 수 있다.

$$Q = CV, \quad C = P^{-1} \quad (22)$$

4. 실 계통 5도체 선로정수 측정

4.1 선로정수 도출 방법

본 절에서는 전차선로 도체들간의 전압, 전류를 측정하여 임피던스, 어드미턴스를 도출하는 방법을 다룬다. 이들 구체적인 과정은 다음과 같다.

4.1.1 자기 및 상호 임피던스

그림 9는 전철변전소와 병렬급전소 구간의 전차선로 회로 구성도를 나타낸 것이다. 병렬급전소에서 모든 도체군을 단락시킴으로서 폐회로를 구성하였다.

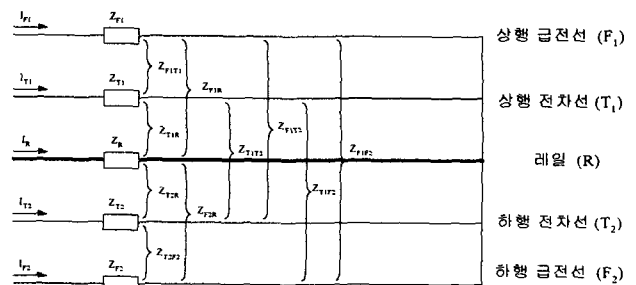


그림 9 전차선로 회로도
Fig. 9 Diagram of catenary system

전차선로 회로도의 전류, 전압강하 관계를 나타내면 식 (23)과 같은 25개의 임피던스 행렬 요소로 표현된다.

$$\begin{bmatrix} \Delta V_{F1} \\ \Delta V_{T1} \\ \Delta V_R \\ \Delta V_{T2} \\ \Delta V_{F2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{F1F1} & Z_{F1T1} & Z_{F1R} & Z_{F1T2} & Z_{F1F2} \\ Z_{T1F1} & Z_{T1T1} & Z_{T1R} & Z_{T1T2} & Z_{T1F2} \\ Z_{RF1} & Z_{RT1} & Z_{RR} & Z_{RT2} & Z_{RF2} \\ Z_{T2F1} & Z_{T2T1} & Z_{T2R} & Z_{T2T2} & Z_{T2F2} \\ Z_{F2F1} & Z_{F2T1} & Z_{F2R} & Z_{F2T2} & Z_{F2F2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{F1} \\ I_{T1} \\ I_R \\ I_{T2} \\ I_{F2} \end{bmatrix} \quad (23)$$

전차선로의 대칭구조에 의해 식 (23)에서 상호 임피던스는 대칭성을 나타내므로 필요한 행렬 요소는 9개가 된다. 이들 9개의 행렬 요소에 의해 식 (23)은 식 (24)과 같이 표현된다.

$$\begin{bmatrix} \Delta V_{F1} \\ \Delta V_{T1} \\ \Delta V_R \\ \Delta V_{T2} \\ \Delta V_{F2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \psi Z_F & \psi Z_{T1F1} & \psi Z_{FR} & \psi Z_{T1F2} & \psi Z_{FF} \\ & \psi Z_T & \psi Z_{TR} & \psi Z_{TT} & \psi Z_{T1F2} \\ & & \psi Z_R & \psi Z_{TR} & \psi Z_{FR} \\ & & & \psi Z_T & \psi Z_{T1F1} \\ & & & & \psi Z_F \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{F1} \\ I_{T1} \\ I_R \\ I_{T2} \\ I_{F2} \end{bmatrix} \quad (24)$$

가. 전차선로의 전압-전류 측정

각각의 임피던스 행렬 요소를 도출하기 위해 그림 9의 변전소단에서 도체 단자들의 서로 다른 총 6가지 조합에 대해 전압-전류를 측정하였다.

1) T1-T2단자에 전류(I)를 인가해서, 전압측정(V)

$$\begin{bmatrix} \Delta V_{F1} \\ \Delta V_R \\ \Delta V_{T2} \\ \Delta V_{F2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_F & Z_{T1F1} & Z_{FR} & Z_{T1F2} & Z_{FF} \\ Z_{T1F1} & Z_T & Z_{TR} & Z_{TT} & Z_{T1F2} \\ Z_{FR} & Z_{TR} & Z_R & Z_{TR} & Z_{FR} \\ Z_{T1F2} & Z_{TT} & Z_{TR} & Z_T & Z_{T1F1} \\ Z_{FF} & Z_{T1F2} & Z_{FR} & Z_{T1F1} & Z_F \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I \\ -I \\ -I \\ -I \end{bmatrix} \quad (25)$$

$$V = \Delta V_{T1} - \Delta V_{T2} = I*(2Z_T - 2Z_{TT})$$

2) T1-R단자에 전류(I)를 인가해서, 전압측정(V)

$$\begin{bmatrix} \Delta V_{F1} \\ \Delta V_{T2} \\ \Delta V_{F2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_F & Z_{T1F1} & Z_{FR} & Z_{T1F2} & Z_{FF} \\ Z_{T1F1} & Z_T & Z_{TR} & Z_{TT} & Z_{T1F2} \\ Z_{FR} & Z_{TR} & Z_R & Z_{TR} & Z_{FR} \\ Z_{T1F2} & Z_{TT} & Z_{TR} & Z_T & Z_{T1F1} \\ Z_{FF} & Z_{T1F2} & Z_{FR} & Z_{T1F1} & Z_F \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I \\ -I \\ -I \end{bmatrix} \quad (26)$$

$$V = \Delta V_{T1} - \Delta V_R = I*(Z_T - 2Z_{TR} + Z_R)$$

3) T1-F1단자에 전류(I)를 인가해서, 전압측정(V)

$$\begin{bmatrix} \Delta V_{T1} \\ \Delta V_R \\ \Delta V_{T2} \\ \Delta V_{F2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_F & Z_{T1F1} & Z_{FR} & Z_{T1F2} & Z_{FF} \\ Z_{T1F1} & Z_T & Z_{TR} & Z_{TT} & Z_{T1F2} \\ Z_{FR} & Z_{TR} & Z_R & Z_{TR} & Z_{FR} \\ Z_{T1F2} & Z_{TT} & Z_{TR} & Z_T & Z_{T1F1} \\ Z_{FF} & Z_{T1F2} & Z_{FR} & Z_{T1F1} & Z_F \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -I \\ I \\ -I \\ -I \end{bmatrix} \quad (27)$$

$$V = \Delta V_{T1} - \Delta V_{F1} = I*(Z_T - 2Z_{T1F1} + Z_F)$$

4) T1-F2단자에 전류(I)를 인가해서, 전압측정(V)

$$\begin{bmatrix} \Delta V_{F1} \\ \Delta V_{T1} \\ \Delta V_R \\ \Delta V_{T2} \\ \Delta V_{F2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_F & Z_{T1F1} & Z_{FR} & Z_{T1F2} & Z_{FF} \\ Z_{T1F1} & Z_T & Z_{TR} & Z_{TT} & Z_{T1F2} \\ Z_{FR} & Z_{TR} & Z_R & Z_{TR} & Z_{FR} \\ Z_{T1F2} & Z_{TT} & Z_{TR} & Z_T & Z_{T1F1} \\ Z_{FF} & Z_{T1F2} & Z_{FR} & Z_{T1F1} & Z_F \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I \\ -I \\ -I \\ -I \\ -I \end{bmatrix} \quad (28)$$

$$V = \Delta V_{T1} - \Delta V_{F2} = I*(Z_T - 2Z_{T1F2} + Z_F)$$

(참고) T2-R, T2-F1, T2-F2단자에서의 수식은 앞의 수식과 선형종속관계

5) R-F1단자에 전류(I)를 인가해서, 전압측정(V)

$$\begin{bmatrix} \Delta V_{F1} \\ \Delta V_{T1} \\ \Delta V_{T2} \\ \Delta V_{F2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_F & Z_{T1F1} & Z_{FR} & Z_{T1F2} & Z_{FF} \\ Z_{T1F1} & Z_T & Z_{TR} & Z_{TT} & Z_{T1F2} \\ Z_{FR} & Z_{TR} & Z_R & Z_{TR} & Z_{FR} \\ Z_{T1F2} & Z_{TT} & Z_{TR} & Z_T & Z_{T1F1} \\ Z_{FF} & Z_{T1F2} & Z_{FR} & Z_{T1F1} & Z_F \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -I \\ I \\ -I \\ -I \end{bmatrix} \quad (29)$$

$$V = \Delta V_R - \Delta V_{F1} = I*(Z_R - 2Z_{FR} + Z_F)$$

(참고) R-F2단자에서의 수식은 위의 수식과 선형종속관계

6) F1-F2단자에 전류(I)를 인가해서, 전압측정(V)

$$\begin{bmatrix} \Delta V_{F1} \\ \Delta V_{T1} \\ \Delta V_R \\ \Delta V_{T2} \\ \Delta V_{F2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_F & Z_{T1F1} & Z_{FR} & Z_{T1F2} & Z_{FF} \\ Z_{T1F1} & Z_T & Z_{TR} & Z_{TT} & Z_{T1F2} \\ Z_{FR} & Z_{TR} & Z_R & Z_{TR} & Z_{FR} \\ Z_{T1F2} & Z_{TT} & Z_{TR} & Z_T & Z_{T1F1} \\ Z_{FF} & Z_{T1F2} & Z_{FR} & Z_{T1F1} & Z_F \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I \\ -I \\ -I \\ -I \\ -I \end{bmatrix} \quad (30)$$

$$V = \Delta V_{F1} - \Delta V_{F2} = I*(2Z_F - 2Z_{FF})$$

(참고) COMMON(T1,T2)-R, R-COMMON(F1,F2), COMMON(T1,T2) - COMMON(F1,F2)단자에서의 수식은 위의 수식과 선형종속관계가 된다. 각 측정된 전압-전류 관계에 의해 임피던스를 도출한다.

각 측정된 전압-전류 관계에 의해 임피던스를 도출한다.

4.1.2 선간 어드미턴스

그림 10은 전철변전소와 급전구분소의 전차선로 회로 구성도를 나타낸 것이다. 모든 도체군을 개방시킴으로서 각 도체군의 자기 임피던스와 상호 임피던스, 선간 어드미턴스를 T형 등가회로로 나타내었다.

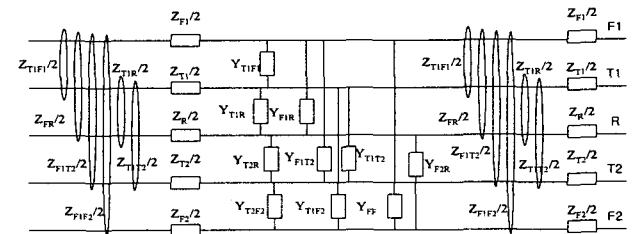


그림 10 T형 등가회로 Δ결선

Fig. 10 Δ connection of T type equivalent circuit

선간 어드미턴스는 Δ결선으로 되어있으므로 구하기가 매우 복잡하다. 따라서 위 회로도로부터 Δ결선을 Y결선으로

변환하여 자기 어드미턴스를 구한 후, 역으로 Y-Δ 변환 관계를 통해 선간 어드미턴스를 구한다. 선간 어드미턴스 Y결선과 Δ결선의 관계는 다음 그림 3.2.3과 같다.

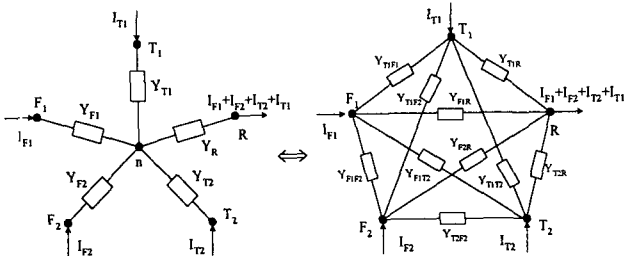


그림 11 Y-Δ 변환
Fig. 11 Y-Δ conversion

Y 결선의 회로 방정식:

그림 11의 Y결선 그림에 KCL을 적용하였을 때 전류관계를 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} Y_{F1}V_{F1} - Y_{F1}V_n &= I_{F1} \\ Y_{T1}V_{T1} - Y_{T1}V_n &= I_{T1} \\ Y_{F2}V_{F2} - Y_{F2}V_n &= I_{F2} \\ Y_{T2}V_{T2} - Y_{T2}V_n &= I_{T2} \\ -Y_{F1}V_{F1} - Y_{T1}V_{T1} - Y_{F2}V_{F2} - Y_{T2}V_{T2} \\ + (Y_{F1} + Y_{T1} + Y_{F2} + Y_{T2} + Y_R)V_n &= 0 \end{aligned} \quad (31)$$

식 (31)의 마지막 식을 V_n 으로 정리하고 위 나머지 식에 대입하면 다음 식들과 같다.

$$\begin{aligned} ① & \frac{Y_{F1}Y_{T1} + Y_{F1}Y_{F2} + Y_{F1}Y_{T2} + Y_{F1}Y_R}{Y_{F1} + Y_{T1} + Y_{F2} + Y_{T2} + Y_R} V_n - \frac{Y_{F1}Y_{T1}}{Y_{F1} + Y_{T1} + Y_{F2} + Y_{T2} + Y_R} V_{T1} \\ & - \frac{Y_{F1}Y_{F2}}{Y_{F1} + Y_{T1} + Y_{F2} + Y_{T2} + Y_R} V_{F2} - \frac{Y_{F1}Y_{T2}}{Y_{F1} + Y_{T1} + Y_{F2} + Y_{T2} + Y_R} V_{T2} = I_{F1} \\ ② & -\frac{Y_{T1}Y_{F1}}{Y_{F1} + Y_{T1} + Y_{F2} + Y_{T2} + Y_R} V_{F1} + \frac{Y_{T1}Y_{F1} + Y_{T1}Y_{F2} + Y_{T1}Y_{T2} + Y_{T1}Y_R}{Y_{F1} + Y_{T1} + Y_{F2} + Y_{T2} + Y_R} V_n \\ & - \frac{Y_{T1}Y_{F2}}{Y_{F1} + Y_{T1} + Y_{F2} + Y_{T2} + Y_R} V_{F2} - \frac{Y_{T1}Y_{T2}}{Y_{F1} + Y_{T1} + Y_{F2} + Y_{T2} + Y_R} V_{T2} = I_{T1} \\ ③ & -\frac{Y_{F2}Y_{F1}}{Y_{F1} + Y_{T1} + Y_{F2} + Y_{T2} + Y_R} V_{F1} - \frac{Y_{F2}Y_{T1}}{Y_{F1} + Y_{T1} + Y_{F2} + Y_{T2} + Y_R} V_{T1} \\ & + \frac{Y_{F2}Y_{F2} + Y_{F2}Y_{T2} + Y_{F2}Y_R}{Y_{F1} + Y_{T1} + Y_{F2} + Y_{T2} + Y_R} V_n - \frac{Y_{F2}Y_{T2}}{Y_{F1} + Y_{T1} + Y_{F2} + Y_{T2} + Y_R} V_{T2} = I_{F2} \\ ④ & -\frac{Y_{T2}Y_{F1}}{Y_{F1} + Y_{T1} + Y_{F2} + Y_{T2} + Y_R} V_{F1} - \frac{Y_{T2}Y_{T1}}{Y_{F1} + Y_{T1} + Y_{F2} + Y_{T2} + Y_R} V_{T1} \\ & - \frac{Y_{T2}Y_{F2}}{Y_{F1} + Y_{T1} + Y_{F2} + Y_{T2} + Y_R} V_{F2} + \frac{Y_{T2}Y_{F2} + Y_{T2}Y_{T2} + Y_{T2}Y_R}{Y_{F1} + Y_{T1} + Y_{F2} + Y_{T2} + Y_R} V_n \\ & - \frac{Y_{T2}Y_{T2}}{Y_{F1} + Y_{T1} + Y_{F2} + Y_{T2} + Y_R} V_{T2} = I_{T2} \end{aligned} \quad (32)$$

Δ결선의 회로 방정식:

그림 11의 Δ결선 그림에 대해서도 회로 방정식을 세우면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} ① & (Y_{T1F1} + Y_{F1R} + Y_{F1T2} + Y_{F1T2})V_{F1} - Y_{T1F1}V_{T1} - Y_{F1F2}V_{F2} - Y_{F1T2}V_{T2} = I_{F1} \\ ② & -Y_{T1F1}V_{F1} + (Y_{T1F1} + Y_{T1R} + Y_{T1T2} + Y_{T1R})V_{T1} - Y_{T1F2}V_{F2} - Y_{T1T2}V_{T2} = I_{T1} \\ ③ & -Y_{F1F2}V_{F1} - Y_{T1F2}V_{T1} + (Y_{F1F2} + Y_{F1R} + Y_{F2R} + Y_{T2F2})V_{F2} - Y_{T2F2}V_{T2} = I_{F2} \\ ④ & -Y_{F1T2}V_{F1} - Y_{T1T2}V_{T1} - Y_{T2F2}V_{F2} + (Y_{T2F2} + Y_{F1T2} + Y_{T1T2} + Y_{T2R})V_{T2} = I_{T2} \end{aligned} \quad (33)$$

Y 결선의 회로 방정식과 Δ결선의 회로 방정식을 비교하여 Δ결선의 선간 어드미턴스를 유도하였다.

$$\begin{aligned} Y_{T1F1} &= \frac{Y_{T1}Y_{F1}}{Y_{F1} + Y_{T1} + Y_{F2} + Y_{T2} + Y_R} & Y_{T2F1} &= \frac{Y_{T2}Y_{F1}}{Y_{F1} + Y_{T1} + Y_{F2} + Y_{T2} + Y_R} \\ Y_{F1F2} &= \frac{Y_{F1}Y_{F2}}{Y_{F1} + Y_{T1} + Y_{F2} + Y_{T2} + Y_R} & Y_{F1R} &= \frac{Y_{F1}Y_R}{Y_{F1} + Y_{T1} + Y_{F2} + Y_{T2} + Y_R} \\ Y_{T1F2} &= \frac{Y_{T1}Y_{F2}}{Y_{F1} + Y_{T1} + Y_{F2} + Y_{T2} + Y_R} & Y_{T1R} &= \frac{Y_{T1}Y_R}{Y_{F1} + Y_{T1} + Y_{F2} + Y_{T2} + Y_R} \\ Y_{T1T2} &= \frac{Y_{T1}Y_{T2}}{Y_{F1} + Y_{T1} + Y_{F2} + Y_{T2} + Y_R} & Y_{F2R} &= \frac{Y_{F2}Y_R}{Y_{F1} + Y_{T1} + Y_{F2} + Y_{T2} + Y_R} \\ Y_{T2F2} &= \frac{Y_{T2}Y_{F2}}{Y_{F1} + Y_{T1} + Y_{F2} + Y_{T2} + Y_R} & Y_{T2R} &= \frac{Y_{T2}Y_R}{Y_{F1} + Y_{T1} + Y_{F2} + Y_{T2} + Y_R} \end{aligned} \quad (34)$$

Δ결선을 Y결선으로 변환시켜 자기 어드미턴스를 구하기 위해 T형 등가회로로 Δ결선을 Y결선으로 변환시키면 그림 12와 같다.

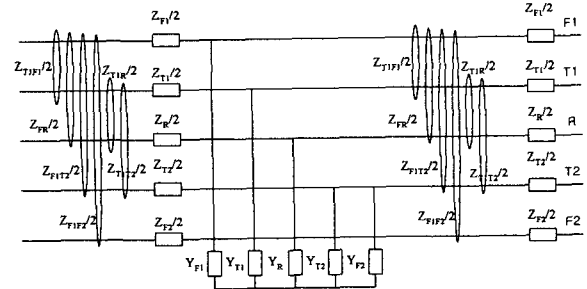


그림 12 T형 등가회로로 Y결선
Fig. 12 Y connection of T type equivalent circuit

위 T형 등가회로로 Y결선을 행렬관계로 나타내면 식 (35)와 같다.

$$\begin{bmatrix} \Delta V_{F1} \\ \Delta V_{T1} \\ \Delta V_R \\ \Delta V_{T2} \\ \Delta V_{F2} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} Z_F & Z_{T1F1} & Z_{FR} & Z_{T2F1} & Z_{FR} \\ Z_{T1F1} & Z_T & Z_{TR} & Z_{T2T1} & Z_{TR} \\ Z_{FR} & Z_{TR} & Z_R & Z_{RT2} & Z_R \\ Z_{T2F1} & Z_{T2T1} & Z_{RT2} & Z_{T2} & Z_{T2} \\ Z_{FR} & Z_{TR} & Z_{RT2} & Z_{T2} & Z_F \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{F1} \\ I_{T1} \\ I_R \\ I_{T2} \\ I_{F2} \end{bmatrix} \quad (35)$$

전압, 전류 관계식으로부터 선간 어드미턴스를 도출하기 위한 과정은 다음과 같다.

가. 전차선로의 전압-전류 측정

1) T1-T2단자에 전압(V)을 인가해서, 전류측정(I)

$$\begin{bmatrix} \Delta V_{F1} \\ \Delta V_{T1} \\ \Delta V_R \\ \Delta V_{T2} \\ \Delta V_{F2} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} Z_F & Z_{T1F1} & Z_{FR} & Z_{T2F1} & Z_{FR} \\ Z_{T1F1} & Z_T & Z_{TR} & Z_{T2T1} & Z_{TR} \\ Z_{FR} & Z_{TR} & Z_R & Z_{RT2} & Z_R \\ Z_{T2F1} & Z_{T2T1} & Z_{RT2} & Z_{T2} & Z_{T2} \\ Z_{FR} & Z_{TR} & Z_{RT2} & Z_{T2} & Z_F \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{F1} \\ I_{T1} \\ I_R \\ I_{T2} \\ I_{F2} \end{bmatrix} \quad (36)$$

$$V_{TT} = \Delta V_{T1} - \Delta V_{T2} = I_{TT} * \left(Z_T - Z_{TT} + \left(\frac{1}{Y_{T1}} + \frac{1}{Y_{T2}} \right) \right)$$

2) T1-R단자에 전압(V)을 인가해서, 전류측정(I)

$$\begin{bmatrix} \Delta V_{F1} \\ \Delta V_{T1} \\ \Delta V_R \\ \Delta V_{T2} \\ \Delta V_{F2} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} Z_F & Z_{T1F1} & Z_{FR} & Z_{T2F1} & Z_{FR} \\ Z_{T1F1} & Z_T & Z_{TR} & Z_{T2T1} & Z_{TR} \\ Z_{FR} & Z_{TR} & Z_R & Z_{RT2} & Z_R \\ Z_{T2F1} & Z_{T2T1} & Z_{RT2} & Z_{T2} & Z_{T2} \\ Z_{FR} & Z_{TR} & Z_{RT2} & Z_{T2} & Z_F \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{F1} \\ I_{T1} \\ I_R \\ I_{T2} \\ I_{F2} \end{bmatrix} \quad (37)$$

$$V_{TR} = \Delta V_{T1} - \Delta V_R = I_{TR} * \left(\frac{Z_T}{2} - Z_{TR} + \frac{Z_R}{2} + \left(\frac{1}{Y_{T1}} + \frac{1}{Y_R} \right) \right)$$

3) T1-F1단자에 전압(V)을 인가해서, 전류측정(I)

$$\begin{bmatrix} \Delta V_R \\ \Delta V_{T2} \\ \Delta V_{F2} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} * \begin{bmatrix} Z_{T1F1} - (2/Y_{T1}) & Z_{TR} - (2/Y_R) & Z_{FR} - (2/Y_R) \\ Z_{T1F1} - (2/Y_{T1}) & Z_{TR} - (2/Y_R) & Z_{FR} - (2/Y_R) \\ Z_{TR} - (2/Y_R) & Z_{FR} - (2/Y_R) & Z_R \\ Z_{T1F1} - (2/Y_{T1}) & Z_{TR} - (2/Y_R) & Z_{FR} - (2/Y_R) \\ Z_{TR} - (2/Y_R) & Z_{FR} - (2/Y_R) & Z_R \\ Z_{T1F1} - (2/Y_{T1}) & Z_{TR} - (2/Y_R) & Z_{FR} - (2/Y_R) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -I \\ I \\ -I \end{bmatrix} \quad (38)$$

$$V_{T1F1} = \Delta V_{T1} - \Delta V_{F1} = I_{T1F1} * \left(\frac{Z_T}{2} - Z_{T1F1} + \frac{Z_F}{2} + \left(\frac{1}{Y_{F1}} + \frac{1}{Y_{T1}} \right) \right)$$

4) T1-F2단자에 전압(V)을 인가해서, 전류측정(I)

$$\begin{bmatrix} \Delta V_{F1} \\ \Delta V_R \\ \Delta V_{T2} \\ \Delta V_{F2} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} * \begin{bmatrix} Z_R & Z_{T1F1} - (2/Y_{T1}) & Z_{TR} - (2/Y_R) & Z_{FR} - (2/Y_R) \\ Z_{T1F1} - (2/Y_{T1}) & Z_R & Z_{TR} - (2/Y_R) & Z_{FR} - (2/Y_R) \\ Z_{TR} - (2/Y_R) & Z_{FR} - (2/Y_R) & Z_R & Z_{T1F1} - (2/Y_{T1}) \\ Z_{T1F1} - (2/Y_{T1}) & Z_{TR} - (2/Y_R) & Z_{FR} - (2/Y_R) & Z_R \\ Z_{TR} - (2/Y_R) & Z_{FR} - (2/Y_R) & Z_R & Z_{T1F1} - (2/Y_{T1}) \\ Z_{T1F1} - (2/Y_{T1}) & Z_{TR} - (2/Y_R) & Z_{FR} - (2/Y_R) & Z_R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -I \\ I \\ -I \\ I \end{bmatrix} \quad (39)$$

$$V_{T1F2} = \Delta V_{T1} - \Delta V_{F2} = I_{T1F2} * \left(\frac{Z_T}{2} - Z_{T1F2} + \frac{Z_F}{2} + \left(\frac{1}{Y_{T1}} + \frac{1}{Y_{F2}} \right) \right)$$

5) R-F1단자에 전압(V)을 인가해서, 전류측정(I)

$$\begin{bmatrix} \Delta V_{T1} \\ \Delta V_R \\ \Delta V_{T2} \\ \Delta V_{F2} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} * \begin{bmatrix} Z_{T1F1} - (2/Y_{T1}) & Z_{TR} - (2/Y_R) & Z_{FR} - (2/Y_R) \\ Z_{T1F1} - (2/Y_{T1}) & Z_{TR} - (2/Y_R) & Z_{FR} - (2/Y_R) \\ Z_{TR} - (2/Y_R) & Z_{FR} - (2/Y_R) & Z_R \\ Z_{T1F1} - (2/Y_{T1}) & Z_{TR} - (2/Y_R) & Z_{FR} - (2/Y_R) \\ Z_{TR} - (2/Y_R) & Z_{FR} - (2/Y_R) & Z_R \\ Z_{T1F1} - (2/Y_{T1}) & Z_{TR} - (2/Y_R) & Z_{FR} - (2/Y_R) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -I \\ I \\ -I \\ I \end{bmatrix} \quad (40)$$

$$V_{FR} = \Delta V_R - \Delta V_{F1} = I_{FR} * \left(\frac{Z_R}{2} - Z_{FR} + \frac{Z_F}{2} + \left(\frac{1}{Y_{F1}} + \frac{1}{Y_R} \right) \right)$$

6) F1-F2단자에 전압(V)을 인가해서, 전류측정(I)

$$\begin{bmatrix} \Delta V_{T1} \\ \Delta V_R \\ \Delta V_{T2} \\ \Delta V_{F2} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} * \begin{bmatrix} Z_{T1F1} - (2/Y_{T1}) & Z_{TR} - (2/Y_R) & Z_{FR} - (2/Y_R) \\ Z_{T1F1} - (2/Y_{T1}) & Z_{TR} - (2/Y_R) & Z_{FR} - (2/Y_R) \\ Z_{TR} - (2/Y_R) & Z_{FR} - (2/Y_R) & Z_R \\ Z_{T1F1} - (2/Y_{T1}) & Z_{TR} - (2/Y_R) & Z_{FR} - (2/Y_R) \\ Z_{TR} - (2/Y_R) & Z_{FR} - (2/Y_R) & Z_R \\ Z_{T1F1} - (2/Y_{T1}) & Z_{TR} - (2/Y_R) & Z_{FR} - (2/Y_R) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I \\ I \\ -I \\ -I \end{bmatrix} \quad (41)$$

$$V_{FF} = \Delta V_{F1} - \Delta V_{F2} = I_{FF} * \left(Z_F - Z_{FF} + \left(\frac{1}{Y_{F1}} + \frac{1}{Y_{F2}} \right) \right)$$

각 측정된 전압-전류 관계에 의해 어드미턴스를 도출한다.

4.2 5도체 실측 및 예측계산 선로정수 비교

실 계통 구간을 대상으로 전차선로 시스템의 5도체군 선로정수를 간략하게 검증하였다. 주파수를 60Hz~3000Hz까지 변화시켜 계산된 선로정수와 측정된 선로정수를 비교하였다. 3000Hz까지 해야만 하는 정해진 이유는 없다. 더 높은 차수까지 채택하여 연구하여도 된다. 그러나 초기 연구에서는 20

조파까지 즉 12000Hz까지 채택하여 연구를 진행하였다. 하지만 연구 수행 중 전기철도시스템에서 고조파 공진이 40조파 후반에서도 일어날 수 있음을 예측하였다[3]. 그리고 고조파 전류원인 차량에서는 40조파 이상에서 고조파 전류를 거의 발생하지 않기 때문에 3000Hz까지 채택하여 연구하였습니다. 따라서 3000Hz까지 예측 및 실측을 하였다. 철도 전차선로 시스템의 실 계통에 대해서 측정된 임피던스 크기와 예측 계산한 임피던스 크기를 그림 13, 14에 나타내었다.

레일 도체군은 상하행선 레일과 보호선, 접지선이 하나의 도체로 구성되었으므로 실제 임피던스는 다른 도체군에 비해 작은 값을 가지게 된다. 예측 계산된 임피던스도 또한 다른 도체군들 보다 상대적으로 작은 값을 가졌다. 그리고 실측된 전차선 도체군의 임피던스는 전차선과 조가선으로 구성되었으므로 그 결과 급전선 보다는 작고 레일 도체군보다는 크게 나타났다. 물론 예측 계산도 실측과 같은 경향으로 나타났다.

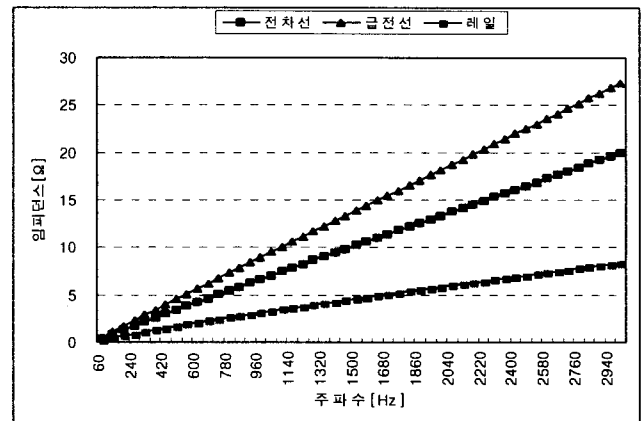


그림 13 5도체 등가모델의 예측 임피던스
Fig. 13 Estimated impedance of 5 conductors equivalent model

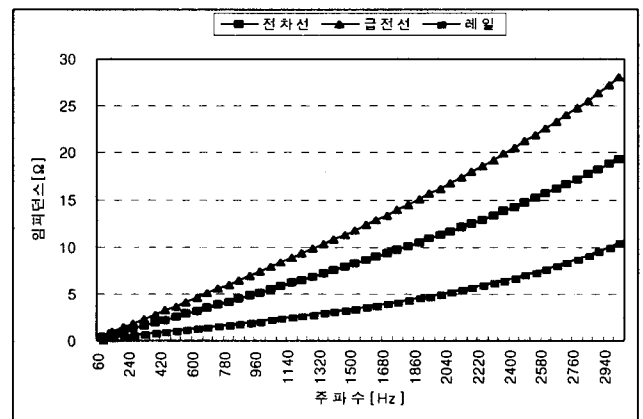


그림 14 5도체 등가모델의 실측 임피던스
Fig. 14 Measured impedance of 5 conductors equivalent model

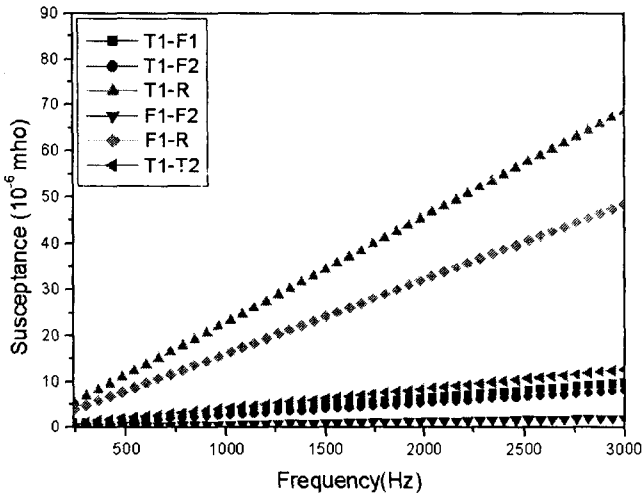


그림 15 5도체 등가모델의 예측 서셉턴스
 Fig. 15 Estimated susceptance of 5 conductors equivalent model

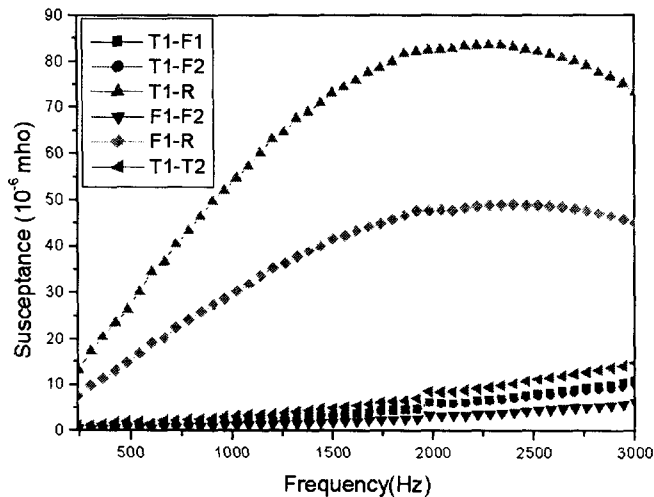


그림 16 5도체 등가모델의 실측 서셉턴스
 Fig. 16 Measured susceptance of 5 conductors equivalent model

그러나 주파수에 따른 실측과 예측 임피던스 크기 값의 변화는 같지만 그 값에서는 약간의 차이가 있었다. 그림 15, 16에서는 레일과 관련된 서셉턴스 값이 다른 도체간의 서셉턴스 값보다 상당히 큰 값을 나타내고 있다. 하지만 실측과 예측의 주파수에 따른 값의 변화는 같으나 그 값에서는 차이가 있다. 이것은 주파수가 높아질수록 선로의 리액턴스 값이 영향을 미치게되어 예측 계산에서처럼 주파수에 비례하는 직선 그래프가 아닌 곡선 그래프로 나타난 것이다. 따라서 본 논문에서는 임피던스와 서셉턴스를 각각 별개로 하여 계산하였으나 향후에는 하나의 수식으로 전개하여 계산함으로써 보다 정확한 예측 계산이 필요할 것이라 사료된다.

4.3 고조파 전류 확대율 비교

고조파 공진특성을 분석하기 위한 가장 특징적인 현상인 고조파 확대율을 경부고속철도 시험선구 급전시스템에 대해서 비교 검토하였다. 경부고속철도에서는 차량의 컨버터에서 발생된 고조파전류가 전차선로를 따라 전철변전소를 통하여 전원계통쪽으로 유입되는데, 고조파 확대율은 고속철도차량의 고조파 발생전류에 대한 변전소 유입고조파 전류로 정의된다. 즉, 고속철도차량에서 발생된 고조파전류 1[PU]에 대해서 변전소로 유입되는 고조파전류의 확대값을 [PU]로 나타내는 것을 의미한다. 전체 급전계통의 선로정수는 주파수의 함수이므로 고조파 확대율은 각 조파(1,3,5...)에서 서로 다른 값을 갖는다. 따라서 고조파 확대율은 조파별로 계산된다.

교류 전철급전시스템은 EMTDC 프로그램으로 모델링 되었다[2]. 계산은 EMTDC 프로그램을 사용하여 시뮬레이션 되었다. 전원계통의 내부전압을 순수한 기본파 성분으로 가정할 수 있으므로 각 고조파별 계산시에 E_M 은 0으로 둘 수 있고 차량의 고조파 전류원으로 1[PU] 값으로 하였다. 결국 예측된 선로정수를 적용하여 모델링된 교류급전 시스템에 대해서 고조파 전류의 확대율을 구할 수 있었다. 경부고속철도 시험선구간의 고조파 전류 확대율 측정결과와 예측결과를 표 3과 그림 17~20에 보인다.

다음은 신청주SS-용정SP구간과 평택SS-마하SP구간에 대해서 측정된 확대율을 나타내었다. 신청주SS-용정SP구간은 급전거리가 28.59km이고 평택SS-마하SP구간은 급전거리가 21.32km이다. 예측계산에서는 급전거리가 21.32km일 때 공진점이 30조파이고 28.59km일 때 공진점이 25조파로 나타났다. 실측에서는 평택SS-마하SP구간(21.32km)일 때 공진점이 30조파로 나타나고, 신청주SS-용정SP구간(28.59km)일 때 공진점이 24조파로 나타났다. 이는 예측된 선로정수가 거의 정확하게 계산되었음을 나타내는 것이다. 그러나 이 오차는 실측 어드미턴스에서 계산할 때 고려된 임피던스 부분이 예측 계산에서는 고려가 안 되었으므로 이 점 때문에 오차가 발생하였다. 따라서 현재와 같이 시뮬레이션하는 경우에는 신청주SS-용정SP구간 시뮬레이션에서 나타난바와 같이 약간의 오차가 발생할 것이다. 본 결과에 대해서 역으로 고려해보면 서셉턴스 예측시 한 단면에서의 서셉턴스 뿐만아니라 시뮬레이션 하고자 하는 전체 길이에 대한 임피던스도 고려하는 예측계산도 필요할 것이다. 따라서 이렇게 예측한다면 보다 정확한 모델링이 될 것이라 사료된다.

표 1 선로거리에 따른 공진점의 예측 및 실측 결과
 Table 1 Results of estimation and measurement of harmonic resonance according to catenary length

거리	구분	공진점
21.32km	예측	30조파
	실측	30조파
28.59km	예측	25조파
	실측	24조파

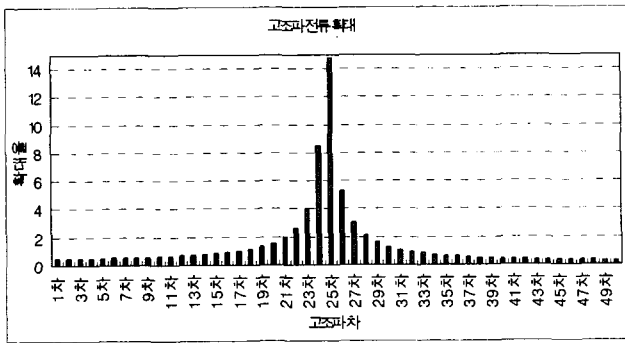


그림 17 신청주-용전(28.59km) 고조파 전류 확대율 (예측)
 Fig. 17 Amplification of harmonic current (Estimation)-(Shin-chungju-Yongjung) 28.59km

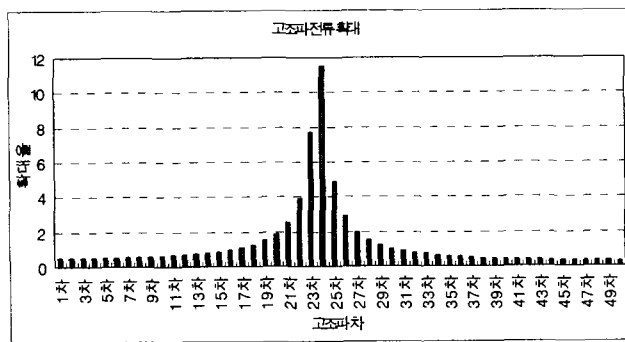


그림 18 신청주-용전(28.59km) 고조파 전류 확대율 (실측)
 Fig. 18 Amplification of harmonic current (Measurement)-(Shinchungju-Yongjung) 28.59km

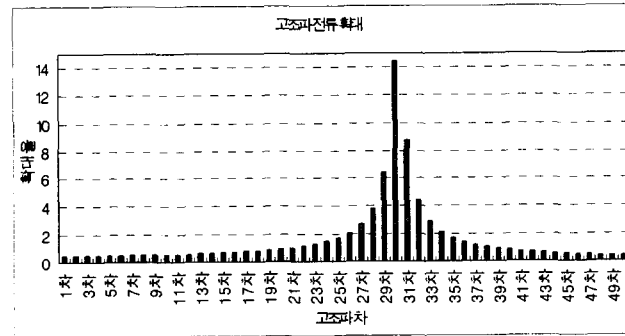


그림 19 평택-마하(21.32km) 고조파 전류 확대율 (예측)
 Fig. 19 Amplification of harmonic current (Estimation)-(Pyongtaek-Maha) 21.32km

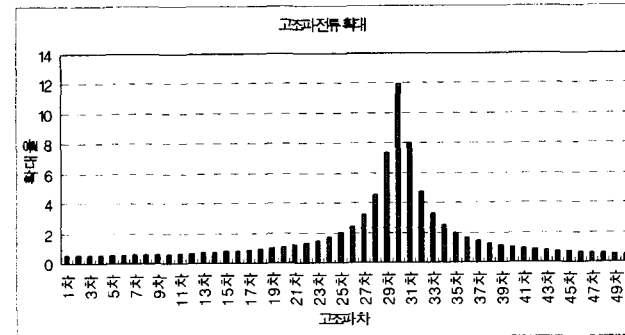


그림 20 평택-마하(21.32km) 고조파 전류 확대율 (실측)
 Fig. 20 Amplification of harmonic current (Measurement)-(Pyongtaek-Maha) 21.32km

5. 결 론

본 논문에서는 예측 계산된 선로정수와 실측 선로정수를 비교함으로써 예측 계산 방법의 적절성을 검증하였다. 주파수에 따른 실측과 예측 선로정수 값에서 약간의 차이가 있었다. 즉, 주파수에 따른 임피던스 값이 거의 일치하였으며 그 변화 추세도 같은 반면, 서셉턴스 면에서는 주파수가 높아질수록 차이가 많았다. 도체들 값의 상대적인 변화 추세는 실측과 예측이 거의 같았다. 이것은 주파수가 높아질수록 선로의 리액턴스 값이 영향을 미치게되어 예측 계산에서처럼 주파수에 비례하는 직선 그래프가 아닌 곡선 그래프로 나타난 것이다.

또 다른 검증을 위해 예측된 선로정수를 적용하여 계산된 고조파 전류 확대율과 측정된 고조파 전류 확대율을 비교 분석하였다.

예측된 결과와 측정된 결과를 비교하였을 때 그 공진점이 거의 정확히 일치하였다. 이는 예측된 선로정수가 정확하게 계산되었음을 나타내는 것이다.

선로정수는 전철화가 완공된 이후에 매번 측정한다는 것이 그리 쉽지는 않은 것이 현실이다. 그러므로 이 예측 계산 값이 완공된 이후 일어날 문제점 등을 예측하는데 있어서 나름대로 의미 있는 값이라 할 수 있겠다.

본 연구의 결과는 교류 전철급전 시스템의 전압강하 해석 및 전차선로 전류분포, 고조파 해석, 교류 전철급전 시스템 보호 등에 적용될 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

- [1] 이한민, 오광해, 이장무, 창상훈, 장길수, 권세혁 “전차선로 시스템의 5 도체 등가 축약 모델링”, 대한전기학회 논문지 52A권 제12호, pp. 684~690, 2003
- [2] 이한민, 오광해, 장길수, 권세혁 “EMTDC에 의한 교류 전철급전시스템 사고 해석”, 대한전기학회 논문지 52A권 제9호, pp. 521~527, 2003
- [3] 한국철도기술연구원, “고속전철 서울-대전구간 고조파, 전압불평형, 역률 예측계산 및 대책설계”, 2000. 12.
- [4] 이한민, 오광해, 김길상, 창상훈 “선로정수 예측을 위한 전차선로 등가 회로 모델에 대한 연구”, 2000년 한국철도학회 추계학술대회 발표논문, pp. 613~619.
- [5] 이한민, 오광해, 이장무, 창상훈, “5도체군 등가모델을 이용한 선로정수 예측에 관한 연구”, 2001년 대한전기학회 춘계학술대회 발표논문, pp. 443~445.
- [6] 오광해, 이한민, 장동욱, 김주락 “공동접지방식 급전시스템의 고조파 해석”, 한국철도학회 추계학술대회 논문집, pp. 668~695, 2000.
- [7] 오광해, 이한민, 창상훈 “경부고속철도 시험선로의 고조파 해석을 위한 10단자 회로망 모델”, 대한전기학회 춘계학술대회 논문집, pp. 429~432, 2001.
- [8] EMTP theory book
- [9] 한국철도기술연구원, “고속전철 서울-대전구간 고조파 전압불평형 역률 예측계산 및 대책설계”, pp. 199~302, 2000. 12.

- [10] 한국철도기술연구원, “고속철도연구기술팀, 고속철도 연구보고서(전기분야)”, pp. 99~176, 1997. 12.
- [11] 철도청, “전철구간에서 발생하는 고조파 현황 및 대책”, pp. 169~226, 1998. 12.

저 자 소 개



이한민 (李翰旻)

1973년 3월 27일생. 2004년 고려대 대학원 전기공학과 박사 수료. 2000.8~2004.2 한국철도기술연구원 전력계통연구그룹. 현재 도시철도기술개발사업단 경량전철연구팀 주임 연구원.

Tel : (031) 460-5423

E-mail : hanmin@krii.re.kr



박현준 (朴煥濬)

1957년 6월24일생. 1981년 홍익대 전기공학과 졸업. 1983년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2003년 동 대학원 전기정보제어 공학과졸업(박사).1996년장영실상 수상. 현재 한국철도기술연구원 전기신호연구본부장

Tel : (031)460-5400

E-mail : hjpark@krii.re.kr



오광해 (吳廣海)

1968년 4월 10일 생. 1990년 고려대 전기공학과 졸업. 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 1997.1~2003.11 한국철도기술연구원 선임연구원(전력계통그룹리더). 현재 산업자원부 기술표준원 공업연구관

Tel : (02) 509-7258

E-mail : khoh@ats.go.kr

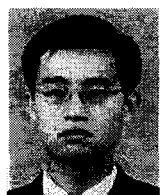


장길수 (張吉洙)

1967년 10월 26일 생. 1991년 고려대 공대 전기공학과 졸업. 1994년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1997년 Iowa주립대 전기 및 컴퓨터공학과 졸업(공학). 2000년 3월-현재 고려대학교 전기공학과 부교수

Tel : (02) 3290-3246

E-mail : gjang@elec.korea.ac.kr



이장무 (李章茂)

1969년 10월 04일생. 1991년 한양대 공대 전자통신공학과 졸업. 1994년 한양대 대학원 전자통신공학과 졸업(석사). 현재 한국철도기술연구원 전력계통연구그룹 선임연구원.

Tel : (031) 460-5421

E-mail : cmlee@krii.re.kr



권세혁 (權世熾)

1949년 5월 14일 생. 1974년 서울대 공대 공업교육과(전기전공) 졸업. 1976년 서울대 교육대학원 공업교육과 졸업(석사). 1980년 미국 Iowa State Univ. 졸업(석사), 1984년 미국 Iowa State Univ. 졸업(공학).현재 고려대학교 전기공학과 교수.

Tel : (02) 3290-3220

E-mail: SHKWON@elec.korea.ac.kr