

A Reduced Equivalent 5 conductors Modeling of the Catenary System

李翰旻* · 吳廣海** · 李章茂*** · 倉相勳§ · 張吉洙§§ · 權世嫻§§§

(Hanmin Lee · Kwanghae Oh · Changmu Lee · Sanghoon Chang · Gilsoo Jang · Saehyuk Kwon)

Abstract - This paper estimates line constants of equivalent five-conductors model using the reduced equivalent method. Actually, the catenary system is considered by the equivalent five-conductors model in the electrical aspect. Therefore, we should compose the catenary system of the equivalent five-conductors model, then the line constants of this equivalent five-conductors model are calculated.

This paper shows the reducing process about the real system of the field by using the proposed theory. Also the line constants of reduced system are provided in this paper.

Key Words : reduced equivalent method, equivalent five-conductors model, line constants

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. 예측 계산을 위한 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 있으므로 결국 5개의 도체로 구성되어 있다고 볼 수 있다. 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 현장에서 모든 도체의 선로정수를 구할 수가 없고 단지 5개의 도체군에 대한 선로정수로서 구할 수밖에 없다. 그러므로 이 시스템을 해석하기 위해서는 상·하행 급전선, 상·하행 각각의 전차선 도체군(전차선+조가선), 레일 도체군(상·하행 레일, 가공보호선, 접지선)의 5개 도체군으로서 모델링해야 한다.

여러 도체를 하나의 등가 도체로 모델링하는 고전적인 방법으로는 기하학적 평균반경(GMR)을 이용하는 것이다. GMR이란 수많은 작은 요소로 구성된 도체 단면의 모든 요소들 간의 기하학적 평균 거리로 정의할 수가 있다. 그런데 전차선로 시스템에서 특히 레일 도체군(상하행 레일, 가공보호선, 접지선)인 경우 도체들이 수 m나 멀리 떨어져 있는 경우가 발생하게 된다. 이때 수 m나 멀리 떨어져 있는 도체를 등가 도체군으로 구성하기 위해 GMR을 적용한다면 무리가 따르게 된다. 따라서 본 논문에서는 전체 전차선로 시스템을 행렬로 구성하고 이들을 행렬 축약이라는 도체 등가화 방법을 적용함으로써 5도체군 등가 선로정수를 계산하게 된다.

이를 토대로 실 계통 구간인 인천국제공항 구간에 대해서 보다 세부적으로 정밀하게 선로정수를 계산한다. 즉 구간을 토공구간, 터널구간 및 교량구간으로 세분화하여 각각의 5도체군 선로정수를 계산하는 것이다.

2. 전차선로 시스템 구조

그림 1은 전차선로 시스템의 기하학적인 구조를 나타낸다. 전차선로 시스템은 14개의 도체로 구성되어 있으나 전차선과 조가선은 드로퍼로 연결되어 있고 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 하행 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 되어 있다.

* 正會員 : 韓國鐵道技術研究院 電氣研究팀 主任研究員
 ** 正會員 : 韓國鐵道技術研究院 電氣研究팀 先任研究員
 *** 正會員 : 韓國鐵道技術研究院 電氣研究팀 主任研究員
 § 正會員 : 韓國鐵道技術研究院 電氣研究팀 責任研究員
 §§ 正會員 : 高麗大 工大 電氣工學科 副教授 · 工博
 §§§ 正會員 : 高麗大 工大 電氣工學科 教授 · 工博
 接受日字 : 2003年 5月 2日
 最終完了 : 2003年 10月 6日

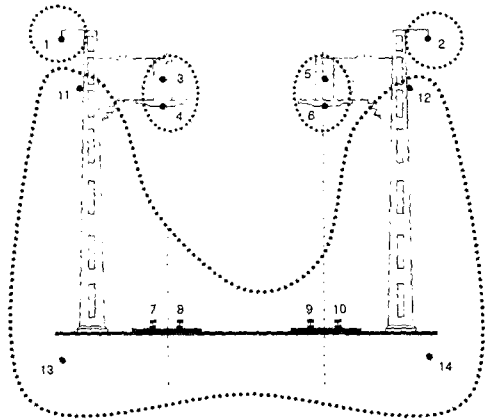


그림 1 전차선로의 기하학적 구조
Fig. 1 Configuration of catenary system

쉽게 이해를 돕기 위해 복선보다는 간단한 단선으로 현실감 있도록 도체군으로 구성된 전차선로를 나타내었다.

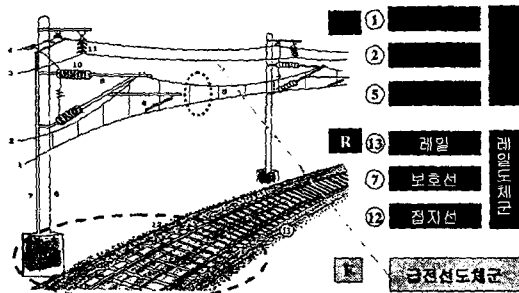


그림 2 전차선로 시스템(단선)
Fig. 2 Catenary system(single line)

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 등가화되고 이렇게 5도체로 등가화된 모델에 대해 최종적으로 등가 임피던스를 계산한다.

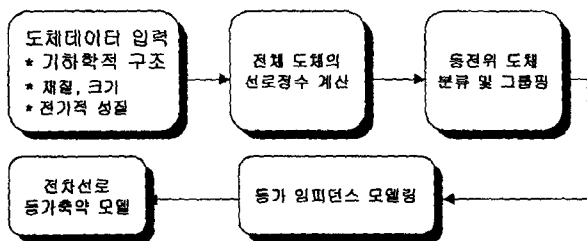


그림 3 선로정수 계산 과정
Fig. 3 The process of calculating line constants

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.

$$Z'_{ik} = Z'_{ki} = \Delta R'_{ik} + j\left(\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D_{ik}}{d_{ik}} + \Delta X'_{ik}\right) \quad (3)$$

또한 식에 포함된 $\Delta R'$ 과 $\Delta X'$ 은 대지 귀환효과를 고려한 항으로 각도 ϕ 와 정수 a 의 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 a 는 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 상태라고 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 축약 모델

일반적인 세 가지 등가 임피던스 모델링에 관해 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 4와 같이 두 도체의 자기 임피던스와 상호 임피던스가 하나의 자기 임피던스로 대체된다.

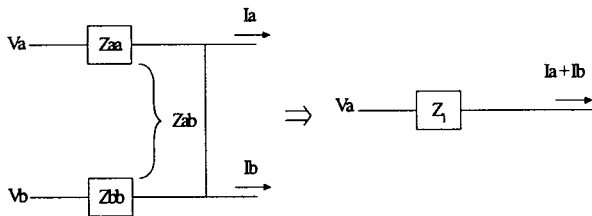


그림 4 도체 그룹의 자기 임피던스
Fig. 4 Self impedance of conductor group

이 가상 도체 (Z_1)의 자기 임피던스는 다음과 같다.

- 만약 $Z_{aa} \neq Z_{bb}$ 이면 (예를 들어 전차선과 조가선으로 구성된 전차선로 시스템)

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

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 도체군(a,b)와 도체(c) 사이의 상호 임피던스

다음 그림 5는 도체군과 도체와의 상호 임피던스를 계산하는 방법을 나타낸다.

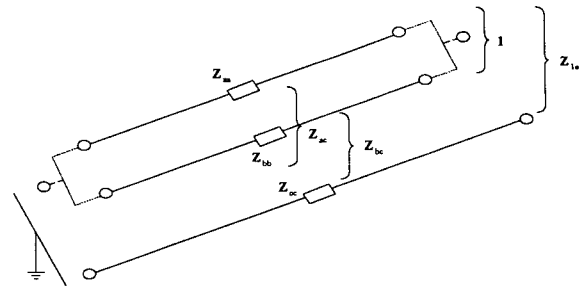


그림 5 도체 그룹과 도체 사이의 상호 임피던스
Fig. 5 Mutual impedance between conductor group and conductor

- 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.

$$Z_{1c} = \frac{Z_{ac}(Z_{bb} - Z_{ab}) + Z_{bc}(Z_{aa} - Z_{ab})}{Z_{aa} + Z_{bb} - 2Z_{ab}} \quad (6)$$

여기서,

- Z_{ac} 도체(a)와 도체(c)로 구성된 상호 임피던스
- Z_{bc} 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 도체군(a,b)와 도체군(c,d) 사이의 상호 임피던스

본 절에서는 두 도체군 사이의 상호 임피던스를 구하는 방법을 나타낸다.

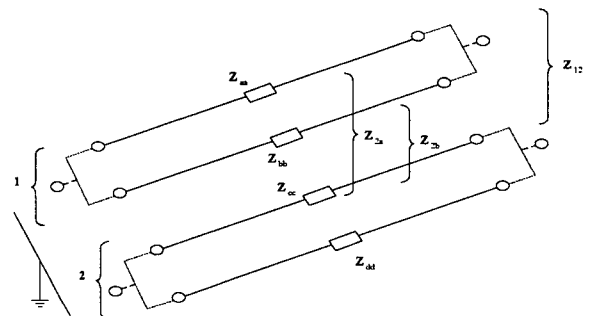


그림 6 도체 그룹 사이의 상호 임피던스
Fig. 6 Mutual impedance between conductor groups

- 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.

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

여기서

Z_{2a} 도체c,d로 구성된 그룹(2)와 도체(a)사이의 상호임피던스
 Z_{2b} 도체c,d로 구성된 그룹(2)와 도체(b)사이의 상호임피던스

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

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

다음은 세 가지 등가 임피던스 모델링에 대해 실제 전차선로 시스템의 등가 임피던스를 급전선, 전차선, 조가선으로서 예를 들어 수식을 일반화하여 설명한다. 급전선(F), 전차선(C), 조가선(M)의 자기 임피던스와 상호 임피던스를 그림 7에 보인다. 여기서 전차선과 조가선은 드로퍼로 연결되어 있으므로 등전위가 된다. 이 등전위의 개념이 등가 임피던스를 구하는데 기초가 된다.

전차선로 시스템 등가화 방법의 물리적 개념은 다음과 같다. 전차선과 조가선의 자기 임피던스와 상호 임피던스가 등가 전차선 도체의 자기 임피던스로 되고 급전선과 전차선, 급전선과 조가선 각각의 상호 임피던스는 급전선과 등가 전차선 도체의 등가 상호 임피던스가 된다. 그리고 등가 전차선 도체의 전류는 전차선과 조가선에 흐르는 전류의 합이 된다.

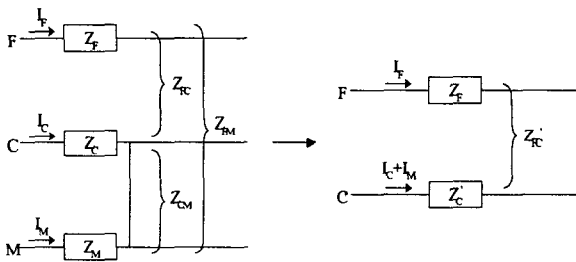


그림 7 전차선로 임피던스의 등가화
 Fig. 7 Equivalent impedance of catenary system

그림 7의 왼쪽 그림을 행렬 관계로 표현하면 식 (10)과 같다.

$$\begin{bmatrix} V_F \\ V_C \\ V_M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{FF} & Z_{FC} & Z_{FM} \\ Z_{CF} & Z_{CC} & Z_{CM} \\ Z_{MF} & Z_{MC} & Z_{MM} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_F \\ I_C \\ I_M \end{bmatrix} \quad (10)$$

식 (10)에서 전차선과 조가선은 드로퍼로 연결되어 있으므로 등전위 ($V_C = V_M$) 가 된다. 식 (10)의 세 번째 식 대신에 V_C 에서 V_M 을 뺀 식으로 대체하면 식 (11)과 같다.

$$\begin{bmatrix} V_F \\ V_C \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{FF} & Z_{FC} & Z_{FM} \\ Z_{CF} & Z_{CC} & Z_{CM} \\ Z_{CF} - Z_{MF} & Z_{CC} - Z_{MC} & Z_{CM} - Z_{MM} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_F \\ I_C \\ I_M \end{bmatrix} \quad (11)$$

전차선과 조가선의 두 도체가 하나의 등가 도체가 되면 각각에 흐르는 전류는 하나의 전류로 합쳐져야 한다. 따라서

이러한 물리적 개념을 행렬 관계로 나타내면 식 (12)이 된다.

$$\begin{bmatrix} V_F \\ V_C \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{FF} & Z_{FC} & Z_{FC} - Z_{FM} \\ Z_{CF} & Z_{CC} & Z_{CC} - Z_{CM} \\ Z_{CF} - Z_{MF} & Z_{CC} - Z_{MC} & Z_{CC} + Z_{MM} - 2*Z_{MC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_F \\ I_C + I_M \\ -I_M \end{bmatrix} \quad (12)$$

여기서 3행 3열의 요소들을 소거하기 위해 kron의 행렬 축약 공식을 적용한다. 그리고 등가 전차선의 자기 임피던스와 전차선과 급전선의 상호임피던스에 조가선의 관련 정보가 들어가게 된다. 결국 등가 도체의 자기 임피던스와 상호 임피던스는 식 (13)과 같이 표현된다.

$$\begin{bmatrix} V_F \\ V_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{FF}' & Z_{FC}' \\ Z_{CF}' & Z_{CC}' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_F \\ I_C + I_M \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \text{여기서, } Z_{FF}' &= Z_{FF} - \frac{(Z_{CF} - Z_{MF})(Z_{FC} - Z_{FM})}{Z_{CC} + Z_{MM} - 2*Z_{MC}} \\ Z_{CC}' &= Z_{CC} - \frac{(Z_{CC} - Z_{MC})(Z_{CC} - Z_{CM})}{Z_{CC} + Z_{MM} - 2*Z_{MC}} \\ Z_{FC}' &= Z_{FC} - \frac{(Z_{CC} - Z_{MC})(Z_{FC} - Z_{FM})}{Z_{CC} + Z_{MM} - 2*Z_{MC}} \\ Z_{CF}' &= Z_{CF} \end{aligned}$$

4. 실 계통 5도체 선로정수 계산

3절에서 설명한 것과 같은 방법으로 인천국제공항 구간의 등가 선로정수를 토공구간, 터널구간, 교량구간으로 종류를 다양하게 하여 계산하였다. 즉, 본 절에서는 3절의 선로정수 예측과정의 순서에 따라 전차선로 등가축약 모델을 구성하는 방법을 보여주게 된다. 이 구간에는 세 가지 형태(토공, 터널, 교량)의 전차선로로 구성되어 있다. 따라서 각각에 해당하는 입력 데이터를 구성하여 전체 선로정수를 계산하고 축약하여 5도체 등가 선로정수를 구하게 된다.

우선 선로정수 예측과정에 따라 도체의 기하학적 구조, 재질, 크기 및 전기적 특성들을 입력하게 된다.

다음 표 1은 각 전차선로의 기하학적 구조를 나타낸다.

표 1 각 전차선로의 기하학적 구조
 Table 1 Configuration of catenary system

상선 conductors	토공구간		터널		교량	
	X[m]	Y[m]	X[m]	Y[m]	X[m]	Y[m]
Rail1	-2.87	0.6	-2.97	0.6	-2.72	0.4
Rail2	-1.43	0.6	-1.53	0.6	-1.28	0.4
contact wire	-2.15	5.8	-2.25	5.16	-2.0	5.4
Messenger wire	-2.15	6.76	-	-	-2.0	6.11
Feeder	-3.75	8.06	-0.95	5.0	-2.5	6.4
Protect wire	-5.28	6.1	-3.58	5.6	-5.0	5.3
Ground conductor	-	-	-4.2	0.6	-4.6	0
Buried earth cable	-6.15	-0.75	-	-	-	-
하선 conductors	토공구간		터널		교량	
	X[m]	Y[m]	X[m]	Y[m]	X[m]	Y[m]
Rail1	1.43	0.6	1.53	0.6	1.28	0.4
Rail2	2.87	0.6	2.97	0.6	2.72	0.4
Contact wire	2.15	5.8	2.25	5.16	2.0	5.4
Messenger wire	2.15	6.76	-	-	2.0	6.11
Feeder	3.75	8.06	0.95	5.0	2.5	6.4
Protect wire	5.28	6.1	3.58	5.6	5.0	5.3
Ground conductor	6.15	0	4.2	0.6	4.6	0

이 표에 의해서 단면도를 그리면 다음 그림 8~10과 같다. 구간의 형태에 따라 조금씩 각 도체들의 위치가 변경되었다.

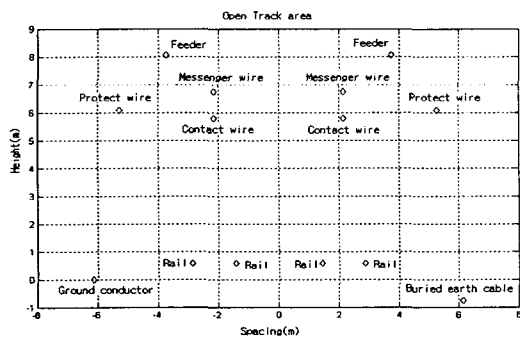


그림 8 토공구간의 전차선로 단면도
Fig. 8 Diagram of catenary system - (Open)

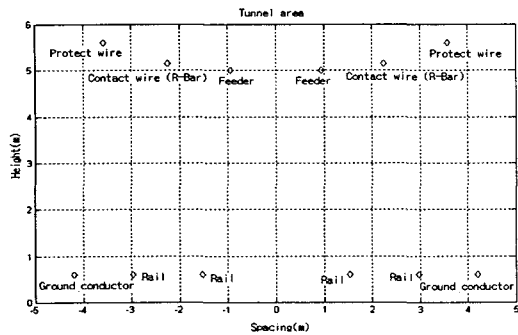


그림 9 터널구간의 전차선로 단면도
Fig. 9 Diagram of catenary system - (Tunnel)

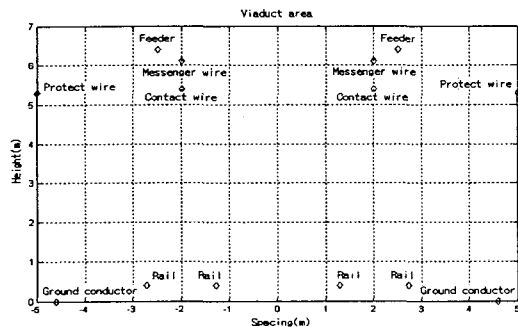


그림 10 터널구간의 전차선로 단면도
Fig. 10 Diagram of catenary system - (Viaduct)

다음 표 2~4는 도체들의 재질, 크기 및 전기적 성질을 나타낸다.

표 2 토공구간에서 도체 특성
Table 2 Characteristic of conductors - (Open)

파라미터	직류저항 [Ω/km]	재질	단면적 [mm ²]	지름 [cm]	투자율
급전선	0.1173	Cu150mm ²	150.0	1.36	1
조가선	0.4474	Bz65mm ²	65.49	1.05	1
전차선	0.1173	Cu150mm ²	150.0	1.36	1
레일	0.0126	60kg/m	76.9	7.7	100
가공보호선	0.239	Cu75mm ²	75.25	1.11	1
접지선	0.484	Cu38mm ²	37.16	0.78	1

표 3 터널구간에서 도체 특성
Table 3 Characteristic of conductors - (Tunnel)

파라미터	직류저항 [Ω/km]	재질	단면적 [mm ²]	지름 [cm]	투자율
급전선	0.088	Cu-OC200mm ²	200	1.85	1
R-Bar	0.0152	Al 2200mm ²	2214	2.65	1
전차선	0.1592	Cu110mm ²	111.1	1.234	1
레일	0.0126	60kg/m	76.9	7.7	100
가공보호선	0.239/2	Cu75mm ² ×2	75.25×2	1.11×2	1
접지선	0.229	GV80mm ²	80	1.01	1

표 4 교량구간에서 도체 특성
Table 4 Characteristic of conductors - (Viaduct)

파라미터	직류저항 [Ω/km]	재질	단면적 [mm ²]	지름 [cm]	투자율
급전선	0.0915	CV200mm ²	200	1.70	1
조가선	0.4474	Bz65mm ²	65.49	1.05	1
전차선	0.1173	Cu150mm ²	150	1.36	1
레일	0.0126	60kg/m	76.9	7.7	100
가공보호선	0.239	Cu 75mm ²	75.25	1.11	1
접지선	0.229	GV80mm ²	80	1.01	1

앞서 제시된 모든 입력 값들에 의해 전체 도체의 임피던스 값을 구할 수가 있다. 이 값은 표 5에 나타나 있다. 이렇게 구한 전체 임피던스를 등전위 도체로 분류 및 그룹핑하고 등가 축약함으로서 5도체 등가 전차선로 임피던스를 구하게 된다.

대지 저항율은 100Ω·m로 하였으며 주파수는 60Hz로 적용하였다.

결국 본 논문에서 제시한 이론을 통해 선로정수 계산 과정 중 마지막 과정인 각 구간별 등가 축약 임피던스를 나타내면 다음 표 6~8과 같다.

표 5 전체 도체 임피던스

Table 5 Impedance of total conductors

Table with 15 columns (Feeder, Feeder, Messenger wire, Contact wire, Messenger wire, Contact wire, Rail, Rail, Rail, Rail, Protect wire, Protect wire, Ground conductor, Barbed earth cable) and multiple rows of impedance data (Re, Im).

표 6 토공구간에서 등가 축약 임피던스

Table 6 Reduced equivalent impedance - (Open)

Table with 6 columns (전차선 그룹, 급전선 그룹, 레일 그룹, 전차선 그룹, 급전선 그룹) and rows of reduced equivalent impedance data (Re, Im).

표 8 교량구간에서 등가 축약 임피던스

Table 8 Reduced equivalent impedance - (Viaduct)

Table with 6 columns (전차선 그룹, 급전선 그룹, 레일 그룹, 전차선 그룹, 급전선 그룹) and rows of reduced equivalent impedance data (Re, Im).

5. 결론

표 7 터널구간에서 등가 축약 임피던스

Table 7 Reduced equivalent impedance - (Tunnel)

Table with 6 columns (전차선 그룹, 급전선 그룹, 레일 그룹, 전차선 그룹, 급전선 그룹) and rows of reduced equivalent impedance data (Re, Im).

예측 계산 방법을 통해 본 논문은 도체 등가 축약 이론을 적용하여 인천국제공항 구간에 대해 5도체군으로 모델링하였다. 즉, 이렇게 등가 선로정수를 계산하기 위해 무리한 도체 등가화 방법인 GMR을 적용하지 않고 행렬에 의한 수식으로 표현하여 도체 등가화 하였다. 결국 다수 도체들로 구성된 철도 시스템을 5도체군으로 등가 축약하여 선로정수를 계산하였다.

본 연구의 결과는 전차선로 시스템의 선로정수 예측 계산 뿐만 아니라 급전계통의 전압강하 해석 및 전차선로 전류분포, 고조파 해석, 보호계전기 세팅 등에 이용될 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

- [1] 이한민, 오광해, 김길상, 창상훈 “선로정수 예측을 위한 전차선로 등가 회로 모델에 대한 연구”, 2000년 한국철도학회 추계학술대회 발표논문, pp. 613-619
- [2] 이한민, 오광해, 이장무, 창상훈, “5도체군 등가모델을 이용한 선로정수 예측에 관한 연구”, 2001년 대한전기학회 춘계학술대회 발표논문, pp. 443-445
- [3] EMTP theory book
- [4] 한국철도기술연구원, 고속철도 서울-대전구간 고조파, 전압불평형, 역률 예측계산 및 대책설계, pp.88-110, 2000년
- [5] 한국철도기술연구원, 도시철도 표준화 연구개발사업 2002년도 연구결과보고서, pp.274-531, 2002년

저 자 소 개



이 한 민 (李 翰 旼)

1973년 3월 27일생. 1997년 중앙대 공대 전기공학과 졸업. 2000년 고려대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 한국철도기술연구원 전력계통연구그룹 주임연구원.
Tel: (031) 460-5423
E-mail: hanmin@krri.re.kr



창 상 훈 (倉 相 勳)

1961년 3월 28일 생. 1982년 한국철도대학 철도전기과 졸업. 1992년 연세대 공과대학원 전기공학과 졸업(석사). 2002년 홍익대학원 전기제어공학과 졸업(공학). 현재 한국철도기술연구원 국책연구센터 센터장
Tel: (031) 460-5108
E-mail: shchang@krri.re.kr



오 광 해 (吳 廣 海)

1968년 4월 10일 생. 1990년 고려대 전기공학과 졸업. 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 한국철도기술연구원 철도 전력연구그룹 그룹리더(선임연구원).
Tel: (031) 460-5402
E-mail: khoh@krri.re.kr



장 길 수 (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



이 장 무 (李 章 茂)

1969년 10월 04일생. 1991년 한양대 공대 전자통신공학과 졸업. 1994년 한양대 대학원 전자통신공학과 졸업(석사). 현재 한국철도기술원 전력계통연구그룹 선임연구원.
Tel: (031) 460-5421



권 세 혁 (權 世 爜)

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