

4단자 회로망 모델을 이용한 전기철도 차량기지의 전압불평형 해석

論 文

50A-5-6

Analysis of Voltage Unbalance in the Electric Railway Depot Using Two-port Network Model

倉相勳* · 吳廣海** · 金正勳***

(Sang-Hoon Chang · Kwang-Hae Oh · Jung-Hoon Kim)

Abstract - The traction power demand highly varies with time and train positions and the traction load is a large-capacity current at single phase converted from 3-phase power system. Subsequently, each phase current converted from 3-phase power system cannot be maintained in balance any longer and thus the traction load can bring about imbalance in three-phase voltage. Therefore, the exact assessment of voltage unbalance must be carried out preferentially as well as load forecast at stages of designing and planning for electric railway system. The evaluation of unbalance voltage in areas, such as electric railway depots should be a prerequisite with more accuracy.

The conventional researches on voltage unbalance have dealt with connection schemes of the transformers used in ac AT-fed electric railroads system and induced formulas to briefly evaluate voltage unbalance in the system(3). These formulas are still being used widely due to their easy applicabilities on voltage unbalance evaluation. Meanwhile, they don't take into account detailed characteristics of ac AT-fed electric railroads system, being founded on some assumptions. Accordingly, accuracy still remains in question.

This paper proposes a new method to more effectively estimate voltage unbalance index. In this method, numerous diverted circuits in electric railway depots are categorized in three components and each component is defined as a two-port network model. The equivalent circuit for the entire power supply system is also described into a two-port network model by making parallel and/or series connections of these components. Efficiency and accuracy in voltage unbalance calculation as well can be promoted by simplifying the circuits into two-port network models.

Key Words : Voltage Unbalance, Two-port Network Model, Electric Railway Depot

1. 서 론

전기철도 시스템은 수송능력 증강, 에너지 이용효율 증대, 수송원가 절감 및 환경문제에의 대비 등의 측면에서 큰 잇점을 갖고 있다. 그러나 전기철도의 부하는 시공간적으로 급변하는 대용량의 단상부하이고 주로 3상 전력계통으로부터 단상의 전력으로 변환하여 급전받고 있으므로, 3상 전원계통의 각 상전류는 더 이상 평형을 유지하지 않고 3상 전압의 불평형을 초래할 수 있다. 이러한 전압불평형은 결과적으로 계통의 전력품질을 저해하여 관련된 다른 설비의 운전에도 영향을 끼친다. 즉, 전력용설비의 중성점 전위상승의 원인이 되고 국부적인 가열현상을 초래하며 절연열화를 촉진시킨다[1, 2]. 특히 동기기의 불평형 전류에 포함된 역상분 전류는 회전자 표면, 슬롯 웨지, 계자권선에 정격의 2배 주파수인 전류를 발생시켜 회전자의 과열과 진동을 유발시킨다. 따라서 철도

시스템과 같은 대규모 수용가의 계획 및 설계 단계에서는 부하 예측과 함께 전압불평형 평가가 선행되어야 한다. 특히 철도차량기지과 같이 차량부하가 한쪽 방향에 밀집되어 부하의 불평형의 가능성이 큰 개소에서는 보다 정밀하게 검토되어야 할 중요한 과제라 할 수 있다. 본 논문에서는 이러한 철도차량기지에서의 전압불평형 문제에 주안점을 두어 그 발생 원인을 규명하고 이를 정밀하게 평가하기 위한 방법을 다룬다.

전압불평형에 관한 종래의 연구에서는 철도급전시스템에 사용되는 변압기 결선방법들을 논하고 전압불평형을 개략적으로 평가할 수 있는 공식을 유도하였다[3]. 이 공식은 간단하며 불평형 평가에 쉽게 적용할 수 있다는 장점을 갖고 있어 널리 사용되고 있으나, 몇가지 가정하에 수립된 것이므로 급전시스템의 특성을 정밀하게 반영할 수 없고 그 정확성에 대해서도 보장하기 어렵다.

따라서 본 논문에서는 철도부하에 의한 전압불평형을 보다 정밀하게 평가하기 위해 새로운 불평형지수 산정기법을 제안하였다. 제안한 방법에서는 철도차량기지의 수많은 분기회로의 각 회로요소를 4단자 등가회로망 모델로 정의하고 이들을 직렬 결합함으로써 전체급전시스템에 대한 등가회로를 4단자 등가회로망 모델로 표현하였다. 결국 전압불평형을 산정을 위한 회로해석은 간단한 4단자망 해석문제로 단순화되어

* 正 會 員 : 韓國鐵道技術研究院 鐵道電力研究팀 責任研究員

** 正 會 員 : 韓國鐵道技術研究院 鐵道電力研究팀 先任研究員

*** 正 會 員 : 弘益大學校 電子電氣工學部 教授 · 工博

接受日字 : 2001年 2月 22日

最終完了 : 2001年 4月 23日

계산의 정밀성을 유지하면서 동시에 계산의 효율성을 도모할 수 있다.

제안한 알고리즘의 유용성을 검증하기 위해 실제 전철 급전 시스템의 차량기지에 대하여 사례연구를 실시하여 그 결과를 다각적으로 검토분석 하였다.

2. 종래의 전압불평형 평가 기법[3]

철도차량부하에 기인된 전압불평형을 평가하기 위한 방법으로는 Chen [3]에 의해 유도된 평가식이 가장 널리 이용되어 왔다. 이 방법에서는 전기철도에서의 전압불평형 평가식 유도를 단순화 하기 위해서, 전철용 스코트 변압기와 급전회로는 이상적이라고 가정하였다. 이러한 가정에 의해, 변압기와 급전선로에서 전압강하와 손실은 일어나지 않기 때문에 변전소에서의 철도부하와 변압기는 등가부하로써 간단히 표현되고, 변압기의 일차측인 인출점(PCC ; Point of Common Coupling)에 철도부하에 기인된 전압불평형 평가식이 도출되었다. 철도부하에 기인된 전압불평형의 유도과정은 다음과 같다.

철도변전소의 주변압기가 가장 일반적인 스코트 결선인 경우에, 이 변압기는 3상 회로망의 상간에 Fig. 1과 같이 접속된다.

Fig. 1에서 스코트 변압기의 T상과 M상의 권선비는 각각 $\sqrt{3}/2 N_1:N_2$, $N_1:N_2$ 이므로 1, 2차측 권선의 전류와 전압은 식 (1) 및 (2)로 둘 수 있다.

$$i_L^a = -\frac{2N_2}{\sqrt{3}N_1} i_{L1}$$

$$i_L^b = -\frac{i_L^a}{2} - \frac{N_2}{N_1} i_{L2} = \frac{N_2}{N_1} \left(\frac{1}{\sqrt{3}} i_{L1} - i_{L2} \right) \quad (1)$$

$$i_L^c = -\frac{i_L^a}{2} + \frac{N_2}{N_1} i_{L2} = \frac{N_2}{N_1} \left(\frac{1}{\sqrt{3}} i_{L1} + i_{L2} \right)$$

$$V_{L1} = -\frac{N_2}{N_1} V_{Pcc}^a \angle -30^\circ \quad (2)$$

$$V_{L2} = j\frac{N_2}{N_1} V_{Pcc}^a \angle -30^\circ$$

또한 인출점에서의 상전압은 선간전압에 비해 크기는 $1/\sqrt{3}$ 배 위상은 30도 뒤지므로 스코트변압기 2차측 전압은 식 (3)과 같다.

$$V_{L1} = -\sqrt{3} \frac{N_2}{N_1} V_{Pcc}^a \quad (3)$$

$$V_{L2} = j\sqrt{3} \frac{N_2}{N_1} V_{Pcc}^a$$

이때 2차측의 복소전력, 전류, 전압은 식 (4)의 관계에 있으므로 식 (4)를 식 (1)에 대입하면 1차측 선전류는 식 (5)로 다시 쓸 수 있다.

$$i_{L1}^* = \frac{S_{L1}}{V_{L1}} = \frac{-S_{L1}}{\sqrt{3} \frac{N_2}{N_1} V_{Pcc}^a} \quad (4)$$

$$i_{L2}^* = \frac{S_{L2}}{V_{L2}} = \frac{-jS_{L2}}{\sqrt{3} \frac{N_2}{N_1} V_{Pcc}^a}$$

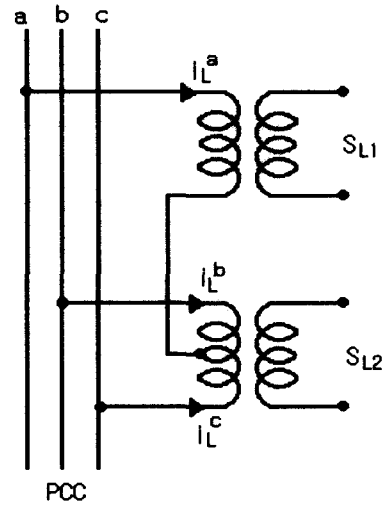


그림 1 스코트 결선방식
Fig. 1 Scott-connection scheme

$$i_L^{a'} = \frac{2}{3} \frac{S_{L1}}{V_{Pcc}^a}$$

$$i_L^{b'} = -\frac{1}{3} \frac{S_{L1}}{V_{Pcc}^a} + j\frac{1}{\sqrt{3}} \frac{S_{L2}}{V_{Pcc}^a} \quad (5)$$

$$i_L^{c'} = -\frac{1}{3} \frac{S_{L1}}{V_{Pcc}^a} - j\frac{1}{\sqrt{3}} \frac{S_{L2}}{V_{Pcc}^a}$$

그러므로 두 개의 단상 철도부하 S_{L1} , S_{L2} 에 대한 등가 3상부하는 식 (6)이 되고 이에 해당되는 등가 임피던스는 식 (7)과 같다.

$$S_L^a = V_{Pcc}^a i_L^{a'} = \frac{2}{3} S_{L1}$$

$$S_L^b = V_{Pcc}^b i_L^{b'} = -\frac{a^2}{3} S_{L1} + j\frac{a^2}{\sqrt{3}} S_{L2} \quad (6)$$

$$S_L^c = V_{Pcc}^c i_L^{c'} = -\frac{a}{3} S_{L1} - j\frac{a}{\sqrt{3}} S_{L2}$$

$$Z_L^a = \frac{1}{3} \left(\frac{3}{2} Z_{L1} \right) = \frac{1}{2} Z_{L1}$$

$$Z_L^b = \frac{1}{3} \left(\frac{1}{-\frac{a}{3Z_{L1}} - j\frac{a}{\sqrt{3}Z_{L2}}} \right) = \frac{a^2 Z_{L1} Z_{L2}}{-Z_{L2} - j\sqrt{3}Z_{L1}} \quad (7)$$

$$Z_L^c = \frac{1}{3} \left(\frac{1}{-\frac{a^2}{3Z_{L1}} + j\frac{a^2}{\sqrt{3}Z_{L2}}} \right) = \frac{aZ_{L1}Z_{L2}}{-Z_{L2} + j\sqrt{3}Z_{L1}}$$

식 (7)로부터 스코트결선의 간략화된 등가임피던스 다이어그램은 Fig. 2와 같이 나타낼 수 있다.

그림 2의 인출점과 부하에 대하여 전압 전류관계는 식(8)과 같고, 식(8)을 대칭성분으로 변환시키면 식(9)가 된다.

$$\begin{bmatrix} V_{Pcc}^a \\ V_{Pcc}^b \\ V_{Pcc}^c \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_L^a & 0 & 0 \\ 0 & Z_L^b & 0 \\ 0 & 0 & Z_L^c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L^a \\ i_L^b \\ i_L^c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{Pcc}^a \\ V_{Pcc}^b \\ V_{Pcc}^c \end{bmatrix} \quad (8)$$

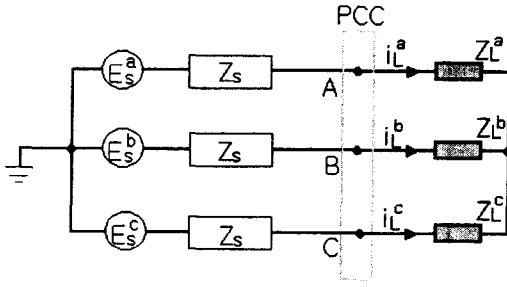


그림 2 스코트 결선방식에 대한 등가임피던스 다이어그램
Fig. 2 Equivalent impedance diagram for the Scott-connection

$$\begin{bmatrix} V_{Pcc}^{(0)} \\ V_{Pcc}^{(1)} \\ V_{Pcc}^{(2)} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_X & Z_Y & Z_Z \\ Z_Z & Z_X & Z_Y \\ Z_Y & Z_Z & Z_X \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L^{(0)} \\ i_L^{(1)} \\ i_L^{(2)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V^m \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

여기서,

$$\begin{aligned} Z_X &= \frac{1}{3}(Z_L^a + Z_L^b + Z_L^c) \\ Z_Y &= \frac{1}{3}(Z_L^a + \alpha^2 Z_L^b + \alpha Z_L^c) \\ Z_Z &= \frac{1}{3}(Z_L^a + \alpha Z_L^b + \alpha^2 Z_L^c) \end{aligned}$$

식(9)로부터 인출점 전압의 정상성분 및 역상성분에 대하여 정리하면 식(10)을 얻는다.

$$\begin{aligned} V_{Pcc}^{(1)} &= Z_X i_L^{(1)} + Z_Y i_L^{(2)} \\ V_{Pcc}^{(2)} &= Z_Z i_L^{(1)} + Z_X i_L^{(2)} \end{aligned} \quad (10)$$

또한 그림 2.에서 인출점의 전원쪽에 대하여 대칭성분 전압과 전류는 식(11)의 관계에 있다.

$$\begin{aligned} V_{Pcc}^{(0)} &= -Z_s i_L^{(0)} \\ V_{Pcc}^{(1)} &= E_s^{(1)} - Z_s i_L^{(1)} \\ V_{Pcc}^{(2)} &= -Z_s i_L^{(2)} \end{aligned} \quad (11)$$

식(11)의 세 번째 식을 (10)의 두 번째 식에 대입하면 $i_L^{(1)}$ 은 식(12)와 같이 정리되고 식(12)를 식(10)의 첫 번째 식에 대입하면 $V_{Pcc}^{(1)}$ 은 식(13)으로 정리된다.

$$i_L^{(1)} = -\frac{Z_X + Z_s}{Z_Z} i_L^{(2)} \quad (12)$$

$$V_{Pcc}^{(1)} = \frac{-Z_X(Z_X + Z_s) + Z_Y Z_Z}{Z_Z} i_L^{(2)} \quad (13)$$

전압불평형의 정의에 따라, 정상성분 전압에 대한 역상성분 전압의 값을 계산하기 위해 식(11)의 세 번째식을 식(13)으로 나누면 전압불평형지수는 식 (14)가 된다.

$$\begin{aligned} \frac{V_{Pcc}^{(2)}}{V_{Pcc}^{(1)}} &= \frac{Z_Y Z_Z}{Z_X^2 + Z_X Z_s - Z_Y Z_Z} \\ &= \frac{(Z_L^a + \alpha Z_L^b + \alpha^2 Z_L^c) Z_s}{(Z_L^a Z_L^b + Z_L^b Z_L^c + Z_L^c Z_L^a) + (Z_L^a + Z_L^b + Z_L^c) Z_s} \end{aligned} \quad (14)$$

식 (14)의 각 항은,

$$\begin{aligned} Z_L^a Z_L^b + Z_L^b Z_L^c + Z_L^c Z_L^a &= \frac{3}{2} \frac{Z_L^2 Z_{L2} (Z_{L1} + Z_{L2})}{3Z_{L1}^2 + Z_{L2}^2} \\ Z_L^a + \alpha Z_L^b + \alpha^2 Z_L^c &= \frac{3}{2} \frac{(Z_{L1}^2 - Z_{L2}^2) Z_{L1}}{3Z_{L1}^2 + Z_{L2}^2} \\ Z_L^a + Z_L^b + Z_L^c &= \frac{3}{2} \frac{(Z_{L1} - Z_{L2})^2 Z_{L1}}{3Z_{L1}^2 + Z_{L2}^2} \end{aligned}$$

이므로 이들 대입하여 식(15)와 같이 정리할 수 있다.

$$\frac{V_{Pcc}^{(2)}}{V_{Pcc}^{(1)}} = \frac{Z_s(Z_{L1} - Z_{L2})}{Z_s(Z_{L1} + Z_{L2}) + Z_{L1} Z_{L2}} \quad (15)$$

여기서 철도부하 분배계수 k 를 다음과 같이 정의한다.

$$\begin{aligned} S_{L1} &= k S_L \\ S_{L2} &= S_L - S_{L1} = (1 - k) S_L \end{aligned} \quad (16)$$

동일한 기준을 갖는 단위법에 있어서는

$$Z_L \propto \frac{1}{S_L}; \text{ and } Z_s \propto \frac{1}{S_s} \text{의 관계가 성립하므로 두 철}$$

도부하 임피던스는 식(17)을 만족한다.

$$\frac{1}{Z_{L1}} = \frac{k}{Z_L}; \text{ and } \frac{1}{Z_{L2}} = \frac{1-k}{Z_L} \quad (17)$$

식(16)-(17)에 보인 부하배분 계수의 정의를 사용하면 식 (15)는 다음 식으로 정리된다.

$$\frac{V_{Pcc}^{(2)}}{V_{Pcc}^{(1)}} = \frac{-Z_s(2k-1)}{Z_s + Z_L}$$

$$\frac{V_{Pcc}^{(2)}}{V_{Pcc}^{(1)}} = \frac{-S_L(2k-1)}{S_s + S_L}$$

따라서 인출점에 대한 전압불평형지수 d_2 는 결국 식(18)로 계산되며, 만약 $S_L \ll S_s$ 이면 식(18)은 식(19)로 근사화시킬 수 있다.

$$d_2 = \left| \frac{V_{Pcc}^{(2)}}{V_{Pcc}^{(1)}} \right| = \frac{S_L |2k-1|}{S_L + S_s} \quad (18)$$

$$d_2 = \left| \frac{V_{Pcc}^{(2)}}{V_{Pcc}^{(1)}} \right| \cong \frac{S_L}{S_s} \sqrt{(2k-1)^2} = d_2' \quad (19)$$

3. 회로망 모델에 의한 전압불평형 평가기법

앞서 2절에서 다룬 종래의 전압불평형 공식은 간단하며 불평형 평가에 쉽게 적용할 수 있어 널리 사용되고 있으나, 몇 가지 가정하에 수립된 것이므로 정확성에 대해서는 보장하기 어렵다. 예를들면, 변압기의 1, 2차측 전압관계식 (3)은 변압기 1차측 3상전압이 평형일 경우에 성립된다. 즉, 변압기 1차측의 전압이 평형이라는 전제하에서 수식을 전개하고 바로 그 전압에 대한 불평형을 평가하는 모순을 안고 있다. 더구나 종래의 방법으로는 철도 급전시스템의 독특한 전차선로의 특성이나 주 변압기임피던스 및 차량 부하역률과의 관계등을 상세히 고려할 수가 없다.

따라서 본 연구에서는 철도부하에 의한 전압불평형을 보다 정밀하게 평가하기 위한 불평형지수 산정기법을 개발하였다. 특히, 철도차량까지의 수많은 분기회로의 각 회로요소를 4단자 등가회로망 모델로 정의하고 이들을 직병렬 결합함으로써 전체급전시스템에 대한 등가회로를 간단히 모델링하고 효과

적으로 계산할 수 있도록 하였다.

3.1 회로요소에 대한 4단자 회로망 모델

3.1.1 전원계통 등가모델

철도차량 기지의 27.5kV 모선에서 전원계통을 바라본 등가임피던스 Z_S 를 구하기 위해서는 ① 차량기지 변전소에 전력을 공급하는 한전변전모선의 임피던스(X_0) ② 변전소까지의 송전선로 임피던스(X_L) ③ 변전소의 스코트 변압기 임피던스(X_T) ④ T상의 AT변압기 임피던스(X_{AT})를 모두 기준전압 27.5kV로 환산하여 집계하면 된다. 즉, 차량기지로부터 전원계통을 들여다본 등가임피던스는 다음 식 (20)과 같다.

$$Z_S = X_0 + X_L + X_T + X_{AT} \quad (20)$$

차량기지에 급전하는 전력은 전철변전소의 T상(또는 M상)의 단권변압기로부터 전차선과 레일을 통해서 기지내의 차량에 전력이 공급된다. 이러한 차량기지의 전원계통의 구성은 Fig. 3과 같이 나타낼 수 있고 전원계통 등가임피던스를 포함한 회로망모델은 식 (21)로의 표현된다.

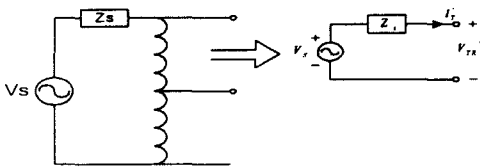


그림 3 변전소에 대한 등가회로 모델
Fig. 3 Equivalent circuit model for substation

$$V_S = [1 \quad Z_S] \cdot \begin{bmatrix} V_1' \\ I_1' \end{bmatrix} = M_{ZS} \cdot \begin{bmatrix} V_1' \\ I_1' \end{bmatrix} \quad (21)$$

3.1.2 전차선로 등가모델

차량 기지내의 전차선로는 차량에 전력을 직접 공급하는 전차선과 레일의 2가지 도체군으로 구성되어 있다. 전차선 도체군은 전차선과 조가선으로 이루어지고, 레일도체군은 레일, 접지케이블, 가공보호선, 대지회로 등으로 이루어진다. 이들 각 도체들은 자체의 임피던스뿐만 아니라 도체 상호간에 정전용량을 포함하고 있어 전차선로에 대한 T형 등가모델은 Fig. 4와 같이 표현된다. Fig. 4의 T형 등가 모델에서 구간 A, C의 직렬 임피던스 Z_{TT} 와 Z_{RR} 에 대한 전압, 전류 사이의 관계식은 식 (22)로, 구간 B의 병렬어드미턴스 Y_{TR} 에 대한 전압, 전류 사이의 관계식은 식 (23)으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} V_{TR}' \\ I_T' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & Z_{TT} + Z_{RR} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{TR}'' \\ I_T'' \end{bmatrix} = M_Z \begin{bmatrix} V_{TR}'' \\ I_T'' \end{bmatrix} \quad (22)$$

$$\begin{bmatrix} V_{TR}' \\ I_T' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ Y_{TR} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{TR}'' \\ I_T'' \end{bmatrix} = M_Y \begin{bmatrix} V_{TR}'' \\ I_T'' \end{bmatrix} \quad (23)$$

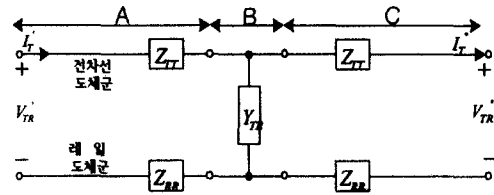


그림 4 전차선로 단위길이에 대한 회로모델
Fig. 4. Equivalent lumped circuit model for Overhead Catenary line section

그러므로 전차선로에 대한 4단자회로 정수는 이들 각 구간의 관계행렬을 곱하여 식 (24)와 같이 구할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} V_{TR}' \\ I_T' \end{bmatrix} = M_Z \cdot M_Y \cdot M_Z \begin{bmatrix} V_{TR}'' \\ I_T'' \end{bmatrix} = M_{LINE} \begin{bmatrix} V_{TR}'' \\ I_T'' \end{bmatrix} \quad (24)$$

3.1.3 차량부하 등가모델

기지내의 전차선로를 따라 차량이 보조전력과 견인전력 (P_{Train})을 소비하고 있는 경우, 차량의 등가 임피던스 (Z_{Train})는 다음식 (25)와 같이 구할 수 있다.

$$\frac{1}{Z_{Train}} = \frac{P_{Train}^*}{V \cdot V^*} \quad (25)$$

이와 같이 일정한 전력을 소모하고 있는 차량에 대한 등가 모델은 Fig. 5와 같이 표현되고, 차량부하에 대한 4단자 회로 정수는 식 (26)으로 구할 수 있다.

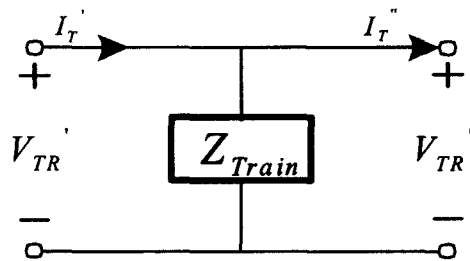


그림 5 차량부하에 대한 등가회로모델
Fig. 5 Equivalent circuit model for traction load

$$\begin{bmatrix} V_{TR}' \\ I_T' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1/Z_{Train} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{TR}'' \\ I_T'' \end{bmatrix} = M_{Train} \begin{bmatrix} V_{TR}'' \\ I_T'' \end{bmatrix} \quad (26)$$

3.2 회로요소의 직병렬 계산

차량기지의 전철전력 시스템은 이를 구성하고 있는 회로요소들의 결합이므로, 앞서 3.1절에서 도출한 회로요소의 4단자 회로정수의 직병렬 결합을 통하여 철도차량기지의 전력공급

회로망을 표현할 수 있다.

먼저, 각각의 전차선로를 4단자 회로해석관점에서 보면, 전차선 색선과 차량이 서로 번갈아 종속 접속된 모델로 표현할 수 있으므로 이에 대한 등가 결합은 식 (27)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} V'_{TR} \\ I'_T \end{bmatrix} = M^{(1)}_{Line} M^{(1)}_{Train} M^{(2)}_{Line} \cdots M^{(n)}_{Line} \begin{bmatrix} V''_{TR} \\ I''_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A^{(1)} & B^{(1)} \\ C^{(1)} & D^{(1)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V''_{TR} \\ I''_T \end{bmatrix} \quad (27)$$

차량기지는 식 (27)로 표현되는 전차선로가 수개 ~ 수십 개까지 이웃하여 분기되어 있고 각각의 전차선과 레일은 병렬로 접속되어 있으므로 이들에 대한 등가 병렬결합은 식 (28)을 차례로 적용하여 구할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} V'_{TR} \\ I'_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{A^{(1)}B^{(2)} + A^{(2)}B^{(1)}}{B^{(1)} + B^{(2)}} & \frac{B^{(1)}B^{(2)}}{B^{(1)} + B^{(2)}} \\ \frac{A^{(1)}D^{(1)} - 1}{B^{(1)}} & \frac{D^{(1)}B^{(2)} + D^{(2)}B^{(1)}}{B^{(1)} + B^{(2)}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V''_{TR} \\ I''_T \end{bmatrix} \quad (28)$$

3.3 계산 알고리즘

앞서 3.1 및 3.2절에서는 차량기지의 각 회로요소에 대한 4단자 회로망모델에 대하여 다루었다. 본 연구에서 차량 부하는 정전력 부하로 취급하였기 때문에 차량의 전류는 차량의 전압에 따라서 변한다. 즉, 차량의 주행에 필요한 전력을 공급받기 위한 차량전류는 전차선로의 전압강하에 의존된다. 따라서 전차선로의 전압 분포 계산은 1회의 계산으로 완료할 수가 없고 다음의 3단계를 순차적으로 반복 계산하여 수렴된 값을 구해야 한다.

단계 1 : 회로요소 모델링

차량기지의 전력공급시스템의 각 회로요소, 즉 전원계통, 전차선로, 차량부하에 대한 4단자회로망 모델을 3.1절에서와 같이 구성한다. 전원계통과 전차선로에 대한 4단자 회로정수는 일정한 상수로 표현된다. 그러나 차량의 정전력부하에 대한 등가임피던스는 차량전압에 의존하므로 초기에는 차량전압을 정격전압인 27.5kV로 가정하여 4단자회로정수를 구한다.

단계 2 : 전력공급시스템 등가구성 모델

철도차량기지내의 여러 분기회로의 각 회로요소에 대한 4 단자 등가회로망 모델을 직병렬 결합하고 회로의 임피던스를 전원계통쪽으로 집계함으로써 전체급전시스템에 대한 등가회로를 Fig. 6과 같이 구성한다.

단계 3 : 전압불평형 해석 모델

그림 6.의 등가회로에서 스코트변압기의 전압·전류관계식을 이용하여 회로해석을 수행한다. 먼저, 스코트변압기의 전압 및 전류관계식[2]을 이용, 1차측 두 폐회로에 대해 KVL을 적용하면 회로방정식을 구할 수 있고, 회로방정식으로부터 급전측 전류 I_T, I_M 는 식 (29)로 계산된다.

$$\begin{pmatrix} I_T \\ I_M \end{pmatrix} = \frac{1}{\Delta} \begin{pmatrix} 2Z_s \frac{N_2}{N_1} + Z_M \frac{N_1}{N_2} & Z_s \frac{N_2}{N_1} + \frac{1}{2} Z_M \frac{N_1}{N_2} \\ 0 & \sqrt{3} Z_s \frac{N_2}{N_1} + \frac{\sqrt{3}}{2} Z_T \frac{N_1}{N_2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_{ab} \\ E_{bc} \end{pmatrix} \quad (29)$$

여기서,

$$\Delta = 2\sqrt{3} Z_s^2 \left(\frac{N_2}{N_1} \right)^2 + \sqrt{3} Z_s (Z_{TH}^T + Z_{TH}^M) + \frac{\sqrt{3}}{2} Z_{TH}^T Z_{TH}^M \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2$$

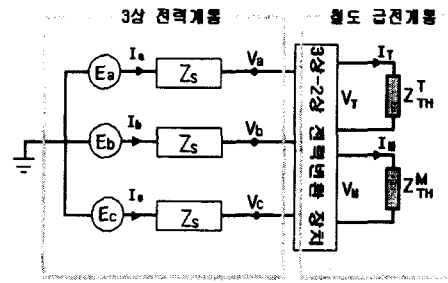


그림 6 철도 급전시스템의 등가회로모델
Fig. 6 Equivalent circuit model for power supply system in electrified railway

이제 식(29)의 I_T, I_M 을 식(30)에 대입하여 변압기 1차측 인 3상 전력계통측의 전류 I_a, I_b, I_c 와 전압 V_a, V_b, V_c 를 계산한다.

$$\begin{pmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{pmatrix} = \frac{N_2}{N_1} \begin{pmatrix} \frac{2}{\sqrt{3}} & 0 \\ -\frac{1}{\sqrt{3}} & 1 \\ -\frac{1}{\sqrt{3}} & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_T \\ I_M \end{pmatrix} \quad (30)$$

$$\begin{pmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_a \\ E_b \\ E_c \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} Z_s & 0 & 0 \\ 0 & Z_s & 0 \\ 0 & 0 & Z_s \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{pmatrix}$$

전압 및 전류불평형지수를 구하기 위해서는 상성분 전압·전류값을 대칭성분값으로 변환시켜야 한다. 따라서 대칭좌표법의 정의식을 이용, 식 (30)으로 계산된 상성분 전압·전류에 대한 대칭성분 전압·전류는 식(31)로 계산하였다.

$$\begin{aligned} V_{012} &= T_s^{-1} V_{abc} \\ I_{012} &= T_s^{-1} I_{abc} \end{aligned} \quad (31)$$

$$\text{단, } T_s^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \\ \alpha = e^{j\frac{2\pi}{3}}, \quad a^2 = e^{-j\frac{2\pi}{3}}$$

불평형 지수는 정상성분에 대한 역상성분의 비로써 정의되므로, 결국 전압불평형지수 및 전류불평형지수는 식(32)로 계산된다.

$$\begin{aligned} \text{전압불평형지수}(d_V) &= \frac{\text{역상성분 전압}(|V_2|)}{\text{정상성분 전압}(|V_1|)} \\ \text{전류불평형지수}(d_I) &= \frac{\text{역상성분 전류}(|I_2|)}{\text{정상성분 전류}(|I_1|)} \end{aligned} \quad (18)$$

4. 고속철도 차량기지에서의 적용

본 연구에서 제안한 전기철도 전압불평형 평가방법의 계산 특성과 실제통에의 활용가능성을 검증하기 위해 실제통(경부 고속철도 서울차량기지)에 대하여 사례연구를 실시하여 그 결과를 다각적으로 검토분석 하였다.

4.1 대상계통

서울차량기지는 전철변전소의 T상으로부터 전력을 공급받으며 기지내의 선로는 Fig. 7에 보인 바와 같이 크게 3구간으로 대별된다.

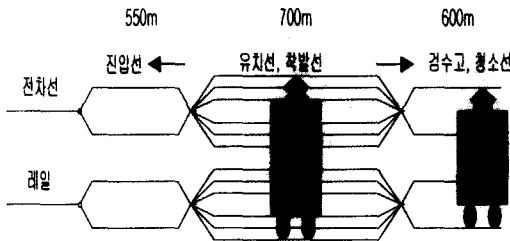


그림 7 서울차량기지의 구성도
Fig. 7 The configuration of Seoul railway depot

첫 번째 구간은 차량기지내로의 출입을 위한 복선의 진입선이고, 두 번째 구간은 유치선과 착발선이 있는 22개의 선로이며, 세 번째 구간은 청소선과 검수고로 향하는 2개의 선로로 구성되어 있다.

서울차량기지에 전력을 공급하기 위한 3상 전력계통 및 철도급전계통에 대한 세부자료를 Table 1에 보인다.

표 1 차량기지 전력공급시스템의 데이터
Table 1 Details for power feeding system in the electric railway depot

구분	값	
전원계통	3상 전압[KV]	154
	단락임피던스[%]	0.123+j0.548
	선로임피던스[pu]	0.017+j0.121
스코트 변압기	정격용량[MVA]	90
	정격전압[kV]	154/55
	임피던스[pu]	j12.5
단권 변압기	정격용량[MVA]	10
	정격전압[kV]	55/27.5
	임피던스[Ω]	j0.35
전차선로	전차선[Ω/km]	0.1417+j0.3231
	래일 [Ω/km]	0.0547+j0.1215
차량	정격전압[kV]	27.5
	소비전력[kVA]	
	-동력부하	3,266 (30km/h)
	-보조부하	300
역	역률	
	-동력부하	0.30 - 0.45
	-보조부하	0.59 - 0.76

4.2 계산결과 및 고찰

제안한 전압불평형 평가방법의 계산특성과 그 유용성을 다음과 같이 검토하였다.

4.2.1 종래 방법과의 계산결과 비교

Fig. 8은 제안한 방법과 종래의 방법에 의한 전압불평형 계산결과를 비교하여 나타낸 것이다.

그림에서 제안한 알고리즘을 이용하여 구한 전압불평형률 계산결과를 종래의 근사방법에 비해 8% 크게 계산되었다. 이

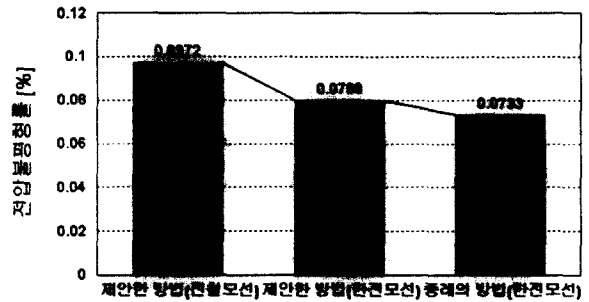


그림 8 계산방법에 따른 전압불평형률 비교
Fig. 8 Comparison of voltage unbalance factors for calculation methods

러한 계산결과의 차이는

- ① 종래의 방법은 불평형 평가식이 전압평형조건하에서 유도되었고[식(3)],
- ② 제안한 방법에서는 송전선로, 전철 주변압기, 전차선로 및 단권변압기의 임피던스까지를 고려하였으며,
- ③ 이로 말미암아 종래의 방법에서는 고려할 수 없었던 전력손실 부분까지 반영되어, 전압불평형률이 제안한 방법에서 더욱 크게 계산된 것이다.

또한 전철변전소의 154kV모선과 한전변전소의 154kV 모선에서의 전압불평형 결과는 전철변전소 모선에서 더욱 크게 계산되었다. 이 현상은 전철변전소선의 3상전압은 한전변전소선의 전압에 불평형 3상전류에 의한 송전선의 전압강하 불평형분 만큼이 추가되었기 때문이다.

한편, 제안한 방법의 정확성을 검증하기 위해 기존선 군포 전철변전소의 3상 수전측에서의 실측한 결과, 전압불평형률은 10분평균 0.1889%로 측정되었고 이는 예측계산값 0.1802%와 거의 일치하는 값이다. 이는 제안한 방법의 정밀성을 입증하는 예라 할 수 있다.

4.2.2 차량 기지의 전압불평형 평가

차량기지에 대한 불평형보상설비의 설치필요 유무를 결정하기 위하여, 차량의 운행상태에 따른 전압 불평형률을 평가한 결과를 표. 2에 보인다. 계산결과 전인부하 역률이 0.45, 보조부하역률이 0.59인 경우에 전압불평형률이 0.0798%로 가장 크게 나타났으나, 한국전력에서 규정한 전압불평형 10분평균 1% 이내에 있으므로 전압불평형 문제는 발생하지 않는 것으로 판단된다.

4.2.3 전원계통 임피던스와 전압불평형과의 상관성

Fig. 9는 전원계통 특성이 전압불평형에 미치는 영향을 분석하기 위하여 전력인출 변전소선의 단락임피던스에 따른 전압불평형률을 계산한 결과이다.

그림에서 단락 임피던스의 기준은 Table 1의 값에 대한 배수이며, 단락 임피던스에 대해 전압불평형률은 공히 선형적 비례특성을 보이고 있다. 이 사실로부터 전원임피던스가 큰 급전계통일수록 전압불평형 문제에 직면할 가능성이 크다고 할 수 있다.

한편, Fig. 9의 결과는 철도부하 공급을 위한 후보변전소

선정문제에도 적용할 수 있다. 이를테면, 전압 불평형을 1% 이내를 만족하기 위한 후보 변전소는 단락 임피던스가 기준 임피던스의 13배 이하인 것으로 선정되어야 할 것이다.

표 2 차량의 운행상태에 따른 전압불평형
Table 2 Operational state vs. voltage unbalance

		전원부하 비율			
		0.30	0.35	0.40	0.45
보 조 장 치	0.59	0.0791	0.0794	0.0797	0.0798
	0.63	0.0787	0.0791	0.0794	0.0796
	0.67	0.0782	0.0786	0.0790	0.0793
	0.71	0.0777	0.0781	0.0785	0.0789
역 률	0.76	0.0768	0.0773	0.0778	0.0783

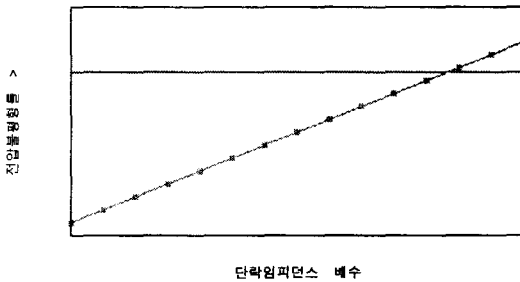


그림 9 전원임피던스에 따른 전압불평형률
Fig 9. Source impedance vs. voltage unbalance

5. 결론

차량기지의 철도부하에 의한 전압불평형을 보다 정밀하게 평가하기 위한 본 연구의 결론을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 철도차량기지의 수많은 분기회로의 각 회로요소를 4단자 등가회로망 모델로 정의하고 이들을 직병렬 결합함으로써 전압불평형을 산정을 위한 회로해석을 간단한 4단자망 해석문제로 단순화시켜 계산의 정밀성을 유지하면서 동시에 계산의 효율성을 도모할 수 있다.
- 2) 회로해석기법을 이용하여 불평형율을 산정하므로써 기존의 방법에서는 고려할 수 없었던 계통 파라미터를 충분히 고려하여 불평형율을 선정할 수 있었다.
- 3) 제안한 알고리즘을 이용하여 구한 전압불평형률 계산결과를 종래의 근사방법과 비교함으로써 두 방법의 계산결과상의 차이와 이유를 조사하였다.
- 4) 차량기지에 대하여 전압불평형 당면가능성을 평가하여 대책설비 필요성 유무를 결정하였다.
- 5) 전원계통 임피던스와 전압불평형과의 상관성을 밝혀, 차량기지에 전력을 급전할 수 있는 한전후보모선을 선정하는데 제안한 알고리즘을 활용할 수 있음을 입증하였다.

참고 문헌

- [1] Minoru Obe, Masaaki Ono and Tadao shibuya, "Voltage Compensation and 3-Phase Balancer for Efficient Operation of Electric Trance", MEIDEN REVIEW series No.105, 1995, No.3, pp20-28
- [2] Cha, Jun-Min, Chang, Sang-Hoon, Oh, Kwang-Hae, "Assessment of Autotransformer-Fed Electric Traction Systems Using Thevenin's Equivalent Circuit", The International Conference on Electrical Engineering, JULY 21-24, 1998
- [3] Tsai-Hsiang Chen, "Criteria to Estimate the Voltage Unbalances due to High-Speed Railway Demands", IEEE Trans. on Power Systems, Vol.9, No.3, August, 1994
- [4] Ronald John Hill and Ibrahim H. Cevik, "On-Line Simulation of Voltage Regulation in Auto-transformer-Fed AC Electric Railroad Traction Networks", IEEE Trans. on Vehicular Technology, Vol.42, No.3, August 1993

저 자 소 개



창 상 훈 (倉相勳)

1961년 3월 28일 생. 1982년 한국철도대학 철도전기과 졸업. 1992년 연세대 산업대학원 전기공학과 졸업(석사). 2001년 홍익대학원 전기제어공학과 박사수료. 현재 한국철도기술연구원 철도전력연구팀장(전기철도기술사, 철도기술대학원 겸임교수)

Tel : 031-461-8531 (181)

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). 현재 한국철도기술연구원 철도전력연구팀 선임연구원.

Tel : 031-461-8531 (188)

E-mail : khoh@krri.re.kr



김 정 훈 (金正勳)

1955년 9월 13일 생. 1978년 서울대 전기공학과 졸업. 1985년 서울대 전기공학과(공학). 1988~1989년 미국 Penn State Univ. 방문교수. 1981년~현재 홍익대 전자전기공학부 교수. 현 대한전기학회 사업이사 및 용어위원회 위원장

Tel : 02-320-1621

E-mail : kimjh@wow.hongik.ac.kr