

회로해석을 이용한 전기철도 급전시스템의 전압불평형 평가

(Voltage Unbalance Evaluation in Autotransformer-Fed
Electric Railway Systems using Circuit Analysis)

오광해* · 차준민**

(Kwang-Hae Oh · Jun-Min Cha)

요 약

본 논문에서는 테브난 등가회로를 이용하여 전기철도 급전시스템의 전압불평형을 정확히 산정하는 새로운 방법을 제안한다. 기존의 방법에서 사용한 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 연구자들은 철도부하에 의한 전압불평형을 보다 정밀하게 평가하기 위한 불평형지수 산정기법을 제안하였다. 제안한 방법에서는 철도급전시스템을 테브난 등가 회로로 모델링하고 불평형율을 회로해석으로부터 평가하였다. 회로해석을 이용한 알고리즘을 구성함으로써 전압·전류 불평형지수 뿐만 아니라 철도급전시스템의 전압강하율, 전압 및 전류분포도 동시에 산출하여 이들 사이의 상호 관계를 비교검토할 수 있었다. 또한 철도급전시스템의 운용상황 시뮬레이션을 통하여 거리별 불평형지수를 산정하고, 차량 운행 조합에 따른 전압강하율과 불평형지수를 산정하므로써 규제치를 만족하며 운행할 수 있는 차량 조합을 결정할 수 있었다.

Abstracts

This study proposes a new method to estimate voltage unbalance more exactly using Thevenin's equivalent circuit. The conventional simple formula were easily applied to evaluate voltage unbalance. Because the formula was derived on the assumption that traction load would be directly connected to the secondary windings of the main transformer, they could not consider the detailed characteristics of traction power supply system, for example, self and mutual impedances of rail, catenary and return feeder. So, the accuracy of the results could not be guaranteed.

The proposed algorithm is applied to a standard autotransformer-fed test system to analyze unbalance phenomena. Through simulations, we could evaluate voltage and current unbalance factors and compare the voltage unbalance for the three transformer connection schemes : single phase, V- and Scott-connections which are required for suitable train operation schedules. Additionally, we could determine the combinations of trains which can be operated under the unbalance factor limits.

*정회원 : 한국철도기술연구원 선임연구원

접수일자 : 1998. 3. 5

**정회원 : 대전대 공대 전기공학과 조교수

1. 서 론

우리나라에서는 1973년 전철이 개통된 이래 대도시 전철망 확충 및 경부고속철도 건설 등 주요 간선의 전철화가 꾸준히 추진되어 왔다. 전기철도 시스템은 수송 능력 증강, 에너지 이용효율 증대, 수송원가 절감 및 환경문제에의 대비 등의 측면에서 큰 이점을 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 회전자의 표면, 슬롯 웨지, 계자권선에 정격의 2배 주파수의 전류를 발생시켜 회전자의 과열과 진동을 유발시킨다. 따라서 철도시스템과 같은 대규모 수용가의 계획 및 설계 단계에서는 부하 예측과 함께 전압불평형 평가가 선행되어야 할 중요한 과제라 할 수 있다.

본 연구에서는 철도부하에 의한 전압불평형에 주요점을 두어 그 발생 원인을 규명하고 이를 평가하기 위한 방법을 다룬다.

전압불평형에 관한 종래의 연구[3]에서는 철도급전시스템에 사용되는 변압기 결선방법들을 논하고 전압불평형을 개략적으로 평가할 수 있는 공식을 유도하였다. 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 연구에서는 철도부하에 의한 전압불평형을 보다 정밀하게 평가하기 위하여 Thevenin 등가회로를 이용한 불평형지수 산정방법을 제안하였다. 제안한 방법에서는 철도급전시스템을 등가 모델로 정의하고 불평형율을 회로해석으로부터 평가하였다. 회로해석을 이용한 알고리즘을 구성함으로써 전압·전류 불평형지수 뿐만 아니라 철도급전시스템의 전압강하율, 전압 및 전류분포도 동시에 산출하여 이들 사이의 상호 관계를

비교검토할 수 있다.

제안한 알고리즘의 정확성을 검증하기 위해 전체급전시스템의 전압전류분포 계산결과를 PTI(Power Technologies Inc.)사의 배전계통해석 프로그램인 PSS/U에 의한 결과와 비교하였다. 또한 가상 철도변전소에 대하여 사례연구를 실시하고 급전시스템의 불평형 현상을 다각적으로 조사분석함으로써 제안한 불평형 평가기법의 유용성을 검토하였다.

2. 전기철도의 전압 불평형 평가에 대한 기존의 방법

교류식 전기철도 관련 법규 제 275조에 의하면, “교류식 전기철도는 그 단상부하에 의한 전압불평형에 의하여 교류식 전기철도 변전소의 변압기에 접속하는 전기사업용으로 공급하는 발전기, 조상기, 변압기 기타의 기계기구에 장애가 생기지 아니하도록 시설하여야 한다.” 라고 명시되어 있다. 이는 교류식 전기철도가 단상부하이고 또한 그 용량도 종래의 전기로, 용접기 등의 단상부하에 비해 상당히 커서 이를 3상 전력계통에 접속할 때에는 전기공급사업자의 발전설비, 송전선설비 및 일반 수용가의 부하설비에 주는 영향이 크기 때문이다. 즉, 3상 전원에 심한 불평형이 발생하면 발전기, 조상기 등의 회전기는 온도상승이 심해져 계통의 보호장치 및 계측장치의 오동작을 초래하고, 또한 유도전동기는 토오크의 감소나 이상온도상승이 발생한다. 따라서, 교류식 전기철도는 단상부하에 의한 불평형을 가능한한 적게 하도록 설계, 시공하고 유지되어야 한다. 이 조항은 전압불평형 경감조치를 요구한 것으로서 고시 제 51조에서는 교류식 전기철도 변전소의 변압기 결선 방식에 따라 다음식 (1)~(3)과 같이 계산식을 지정하고, 변전소의 수전점에 있어서 전압불평형율을 3%이하가 되도록 의무화하고 있다. 이때 전압불평형률은 정상전압에 대한 역상전압의 비 즉, $V1/V2 \times 100[\%]$ 로 나타낸다.

▶ 변압기가 단상결선일 경우 :

$$K = \frac{P}{P_s} \times 100 \quad (1)$$

$$= ZP \times 10^{-4}$$

▶ 변압기가 T 결선일 경우 :

$$K = \frac{P_A \sim P_B}{P_s} \times 100 \quad (2)$$

$$= Z(P_A \sim P_B) \times 10^{-4}$$

▶ 변압기가 V 결선일 경우 :

$$K = \frac{a^2 P_A + P_B}{P_s} \times 100 \quad (3)$$

$$= Z \sqrt{(P_A^2 - P_A P_B + P_B^2)} \times 10^4$$

단, K : 전압불평형율 [%]

P : 전 궤전구역에서의 연속 2시간의
평균부하 [KVA]

PS : 변전소 수전점의 3상 단락용량 [KVA]

Z : 변전소 수전점의 3상계통 %단락
임피던스 [%] (10,000[KVA]기준)

PA, PB : 각각의 궤전구역에서의 연속2시간의
평균부하 [KVA]

3. Thevenin 등가회로 해석에 의한 불평형 지수 평가 기법

앞서 언급한 바와 같이 종래의 연구[3]에서는 전압 불평형지수를 공식으로 유도함으로써 철도급전시스템에 사용되는 변압기 결선방식에 따른 전압불평형을 평가하였다. 이 공식은 간단하며 불평형 평가에 쉽게 적용할 수 있다는 장점을 갖고 있어 정성적 분석에 유리하여 널리 사용되고 있으나, 차량부하[kVA]가 주변압기 2차측에 직접 접속된 것으로 모델링하였기 때문에 급전선로의 자기/상호임피던스 뿐만아니라 부하특성 등이 고려되지 않았다. 그러므로 철도급전시스템의 세밀한 특성을 반영할 수 없으며 그 정확성에 대해서도 보장하기 어렵다.

따라서 본 연구에서는 철도부하에 의한 전압불평형을 보다 정밀하게 평가하기 위해 새로운 불평형지수 산정기법을 제안한다. 제안한 알고리즘에서는 철도용 주변압기와 단권변압기(Auto Transformer; AT)의 임피던스 뿐만 아니라 선로의 상호임피던스등 급전계통 특성을 정밀하게 반영시키기 위해 철도급전계통의 등가 모델을 정의하고 전압불평형지수를 회로해석으로부터 구하였다.

본 연구의 알고리즘을 시험계통에 적용하여 전압전

류분포를 계산하고 그 결과를 계통해석 시뮬레이션(PSS/U)의 결과와 비교함으로써 제안한 알고리즘의 정확성을 입증하였다. 아울러 불평형현상을 다각적으로 조사 분석하고 여러 가지 중요한 정보를 도출함으로써 제안한 방법의 유용성을 검토하였다.

3.1 급전계통의 등가 모델링

전기철도는 통상 단상 25[kV]/50[kV] 급전방식에 기초를 두고 있다. 단상의 대용량 전력을 공급 받기 위해서는 3상 전력계통과 연계되어야 한다. 이를 위해 철도 교류급전회로는 단상변압기 또는 3상-2상 변환장치에 의해 단상으로 변환된 전력을 급전선, 전차선, 레일에 의해 차량에 공급한다.

초기의 25[kV] 급전계통은 전차선과 레일 사이에 직접 25[kV]의 전압을 인가하여 열차에 전력을 공급하는 방식으로, 60[%] 정도의 귀환전류가 대지를 통하여 흐르게 되어 인근의 통신선로에 영향을 주는 문제가 있었다. 이러한 문제를 해결하기 위해 부급전선과 흡상변압기를 이용하여 대지로 흐르는 전류를 경감시키는 방식도 사용되어 왔다.

근래에는 열차의 소비전력이 커지면서 전압강하 문제와 함께 전철변전소의 입지선정 및 건설비 문제 등으로 인해 변전소의 공급거리를 연장시키는 수단으로 단권변압기를 사용하는 AT급전방식이 채택되었다. 이 방식에서 변전소의 급전전압은 차량 사용전압의 2배가 되기 때문에 전압강하가 경감되어 변전소간의 거리를 길게 할 수 있다. 또한 귀환전류가 단권변압기를 통하여 피이더로 흐르기 때문에 통신선로의 유도장해를 크게 개선시키는 효과도 있다[4]. 이런 이유로 최근 신설된 전기 철도구간에는 AT급전방식이 채택되었으며 현재 건설중인 경부고속철도에도 이 방식이 적용되고 있다. 본 연구에서는 근래에 주로 채택하고 있는 AT급전방식에서의 전압·전류불평형을 연구대상으로 하였다.

3.1.1 3상 전원계통을 포함한 전체 급전계통

본 연구에서는 3상 전력계통을 무한 모선에 단락 임피던스가 연결된 형태로 취급하였고, AT급전선로 및 스코트 변압기의 전압·전류변환 모델을 포함한 전체 급전시스템에 대한 등가모델을 그림 1과 같이 구성하였다.

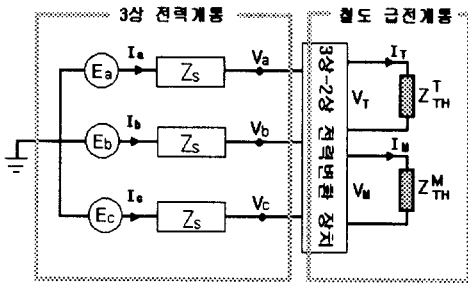


그림 1. 전체급전계통 모델

3.1.2 AT 급전선로

전기철도에서 통상 단권변압기의 설치간격은 10[km] 정도이며 변전소간의 거리는 약 50[km]이다. 변전소와 변전소의 중간지점은 양쪽 변전소의 전압위상이 다르기 때문에 개폐설비로써 전기적으로 구분하여(급전구분소) 운전하고 있는데 이것은 변전소 고장시 인근 변전소에서 연장급전을 하기 위해 해결해 주는 역할도 한다. 단권변압기는 변전소 간격에 따라 중간에 1~2개소에 설치하게 되는데 이곳에 상하행선을 연결하는 개폐기가 함께 설치된다.(병렬급전소)

이러한 AT급전선로에 대한 일반적인 등가모델은 그림 2와 같이 구성되며, 아울러 단권변압기 특성에 의한 루우프 전류의 분포도 그림 2에 함께 나타내었다.

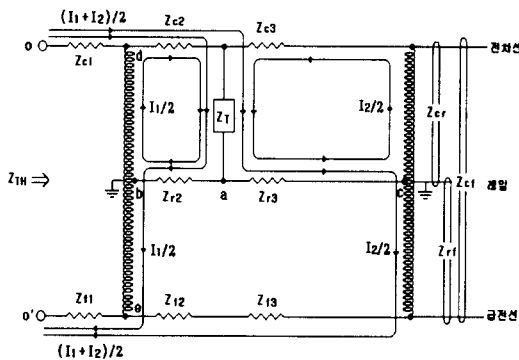


그림 2. AT급전계통의 등가모델

그림 2는 단권변압기 사이에 부하임피던스 Z_T 인 차량이 운행하고 있는 경우를 나타낸 것이다. 단, Z_{c1} , Z_{c2} , Z_{c3} , Z_{r2} , Z_{r3} , Z_{f1} , Z_{f2} , Z_{f3} 는 각각 전차선, 레일, 급전선의 자기임피던스이며 Z_{α} , Z_{cf} ,

Z_{ff} 는 각각 전차선-레일간, 전차선-급전선간, 레일-급전선간의 상호임피던스를 의미한다. 또한 OO' 는 스코트변압기의 2차인 T상 급전축 단자이다.

이제 OO' 단자에서 AT급전선로를 바라본 테브난 임피던스 Z_{TH} 를 계산한다. $V_{ab} = V_{ac}$ 의 관계로부터 양쪽 단권변압기로의 흡상전류비 H 를 식 (4)와 같이 정의한다.

$$H = \frac{I_2}{I_1} = \frac{2Z_{r2} - 2Z_{\alpha 2}}{2Z_{r3} + Z_{\alpha 2} - Z_{rf2} - Z_{\alpha 3} - Z_{rf3}} \quad (4)$$

그림 2의 회로도에서 부하전류($I_1 + I_2$)를 공급하기 위해서는 $o-o'$ 단자에 전류 $I_1 (1+H)/2$ 를 주입해야 하며, 이 경우 단자전압 $V_{oo'}$ 은 식(5)와 같다.

$$V_{oo'} = I_1 (0.5Z_{AT} + 2Z_{c2} + 2Z_T + 2Z_{r2} - 4Z_{\alpha 2} + 0.5Z_{c1} + 0.5Z_{f1} - Z_{cf1}) + I_2 (Z_{c2} + 2Z_T - Z_{cf2} - Z_{\alpha 2} + Z_{rf2} + 0.5Z_{c1} - 0.5Z_{f1} - Z_{cf1}) \quad (5)$$

식 (4)를 식 (5)에 대입하여 I_2 를 소거하면 식 (6)을 얻는다.

$$V_{oo'} = I_1 [(0.5Z_{AT} + 2Z_{c2} + 2Z_T + 2Z_{r2} - 4Z_{\alpha 2} + 0.5Z_{c1} + 0.5Z_{f1} - Z_{cf1}) + H(Z_{c2} + 2Z_T - Z_{cf2} - Z_{\alpha 2} + Z_{rf2} + 0.5Z_{c1} + 0.5Z_{f1} - Z_{cf1})] \quad (6)$$

결국 $o-o'$ 단자에서의 전압-전류관계로부터 테브난 임피던스는 식 (7)과 같이 계산된다.

$$Z_{TH} = \frac{V_{oo'}}{I_1} = \frac{2}{1+H} [(0.5Z_{AT} + 2Z_{c2} + 2Z_T + 2Z_{r2} - 4Z_{\alpha 2} + 0.5Z_{c1} + 0.5Z_{f1} - Z_{cf1}) + H(Z_{c2} + 2Z_T - Z_{cf2} - Z_{\alpha 2} + Z_{rf2} + 0.5Z_{c1} + 0.5Z_{f1} - Z_{cf1})] \quad (7)$$

식 (7)의 Z_{TH} 는 AT급전시스템을 포함한 철도부하를 표현한 것으로 열차의 대수 및 위치에 의존하며, 본 연구에서 철도부하는 테브난 등가 임피던스 Z_{TH} 로써 불평형지수 계산에 직접 고려하도록 하였다.

3.1.3 스코트 변압기

스콧 변압기는 3상전력을 철도부하용 2상전력으로 변환시키는 3상-2상 변환장치이다. 실제로 대용량 변압기는 손실이 아주 적으나 스콧변압기는 보통 8% 정도의 임피던스를 가지므로 본 연구에서는 스콧변압기를 이상 변압기로 고려하고 변압기 2차측에 임피던스를 포함시켰다. 이상 변압기에서는 임피던스가 존재하지 않으므로 전압강하와 손실은 일어나지 않는다. 그림 3은 이러한 가정에 따라 스콧변압기의 전기적 내부구조와 전압에 관한 페이저도를 도시한 것이다.

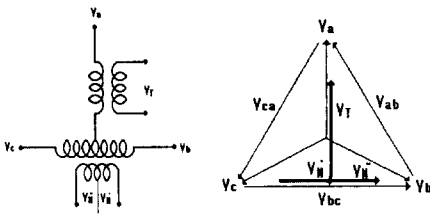


그림 3. 스콧변압기의 결선도 및 페이저도

그림 3의 페이저도에서 T좌 전압 V_T 와 M좌 전압 $V_{M'}$ 및 $V_{M''}$ 을 1차측 선간전압으로써 표현하면 식 (8)과 같다.

$$\begin{aligned} V_T &= \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{N_2}{N_1} (V_{ab} + \frac{1}{2} V_{bc}) \\ V_{M'} &= \frac{1}{2} \frac{N_2}{N_1} V_{bc} \\ V_{M''} &= \frac{1}{2} \frac{N_2}{N_1} V_{bc} = \frac{1}{2} \frac{N_2}{N_1} (-V_{ab} - V_{ca}) \end{aligned} \quad (8)$$

식 (8)은 Non-singular 이므로 식(9) 및 식(10)의 행렬 형태로 정리할 수 있다.

식 (9)와 식 (10)의 3×3 행렬은 전철용 스콧 변압기의 1차 전압과 2차 전압 사이의 관계를 나타내는 변환행렬이다.

$$\begin{pmatrix} V_T \\ V_{M'} \\ V_{M''} \end{pmatrix} = \frac{N_2}{N_1} \begin{pmatrix} \frac{2}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{3}} & 0 \\ 0 & \frac{1}{2} & 0 \\ -\frac{1}{2} & 0 & -\frac{1}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_{ab} \\ V_{bc} \\ V_{ca} \end{pmatrix} \quad (9)$$

$$\begin{pmatrix} V_{ab} \\ V_{bc} \\ V_{ca} \end{pmatrix} = \frac{N_1}{N_2} \begin{pmatrix} \frac{\sqrt{3}}{2} & -1 & 0 \\ 0 & 2 & 0 \\ -\frac{\sqrt{3}}{2} & 1 & -2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_T \\ V_{M'} \\ V_{M''} \end{pmatrix} \quad (10)$$

한편 스콧트 변압기의 1차전류와 2차전류 사이의 관계를 나타내는 변환행렬도 전압의 경우와 같은 방법으로 식 (11), (12)로 유도된다.

$$\begin{pmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{pmatrix} = \frac{N_2}{N_1} \begin{pmatrix} \frac{2}{\sqrt{3}} & 0 & 0 \\ -\frac{1}{\sqrt{3}} & 1 & 0 \\ -\frac{1}{\sqrt{3}} & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_T \\ I_{M'} \\ I_{M''} \end{pmatrix} \quad (11)$$

$$\begin{pmatrix} I_T \\ I_{M'} \\ I_{M''} \end{pmatrix} = \frac{N_1}{N_2} \begin{pmatrix} \frac{\sqrt{3}}{2} & 0 & 0 \\ \frac{1}{2} & 1 & 0 \\ \frac{1}{2} & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{pmatrix} \quad (12)$$

이상에서와 같이 스콧 변압기의 1, 2차 권선의 전압, 전류관계는 식(9)~식(12)의 변환행렬로 표현되며, 이 변환행렬은 불평형지수 계산을 위한 회로해석에서 스콧 변압기를 고려하는데 이용된다.

3.2 회로해석에 의한 전압불평형지수 산정

본 연구에서는 철도부하에 기인된 전압불평형을 정밀하게 분석하기 위해, 회로해석을 통하여 불평형을 평가하는 기법을 개발하였다. 이에 대한 구체적인 내용은 다음과 같다.

3.2.1 회로해석

그림 1의 등가회로와 스콧 변압기의 전압·전류관계식 (9)~(12)를 이용하여 회로해석을 수행하였다. 먼저, 스콧 변압기의 전압 및 전류관계식 (10), (11)을 이용, 1차측 두 폐회로에 대해 KVL을 적용하면 식(13)의 회로방정식을 구할 수 있다.

$$\begin{pmatrix} \sqrt{3}z_s \frac{N_2}{N_1} + \frac{\sqrt{3}}{2} z_{TH} \frac{N_1}{N_2} & -z_s \frac{N_2}{N_1} - \frac{1}{2} z_{TH} \frac{N_1}{N_2} \\ 0 & 2z_s \frac{N_2}{N_1} + z_{TH} \frac{N_1}{N_2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_T \\ I_{M'} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_a - E_b \\ E_b - E_c \end{pmatrix} \quad (13)$$

식 (13)에서 I_T, I_M 에 대하여 풀면 식 (14)가 된다.

$$\begin{pmatrix} I_T \\ I_M \end{pmatrix} = \frac{1}{2\sqrt{3}Z_s^2\left(\frac{N_2}{N_1}\right)^2 + \sqrt{3}Z_s(Z_{TH}^T + Z_{TH}^M) + \frac{\sqrt{3}}{2}Z_{TH}^TZ_{TH}^M\left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2} \begin{pmatrix} 2Z_s\frac{N_2}{N_1} + Z_M\frac{N_1}{N_2} & Z_s\frac{N_2}{N_1} + \frac{1}{2}Z_M\frac{N_1}{N_2} \\ 0 & \sqrt{3}Z_s\frac{N_2}{N_1} + \frac{\sqrt{3}}{2}Z_T\frac{N_1}{N_2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_{ab} \\ E_{bc} \end{pmatrix} \quad (14)$$

이제 식(14)의 I_T, I_M 을 식(11)에 대입하여 전류 I_a, I_b, I_c 를 구하고, 이를 다음 식(15)에 대입하여 V_a, V_b, V_c 를 구함으로써 변압기 1차측인 3상 전력계통 측의 전압 전류의 값을 모두 계산한다.

$$\begin{pmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{pmatrix} = \frac{N_2}{N_1} \begin{pmatrix} \frac{2}{\sqrt{3}} & 0 & 0 \\ -\frac{1}{\sqrt{3}} & 1 & 0 \\ -\frac{1}{\sqrt{3}} & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_T \\ I_M \\ I_M' \end{pmatrix} \quad (15)$$

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

한편, 변압기 2차전류 I_T, I_M 은 $(I_1 + I_2)/2$ 이고, 내부 루우프 전류는 I_1 과 I_2 의 관계는 식 (4)와 같이 표현되므로, I_1 과 I_2 는 식 (16)으로 계산된다. 또한 철도급전시스템의 각 요소에 흐르는 전류는 I_1 과 I_2 의 중첩이므로 변압기 2차측인 철도 급전시스템의 전압·전류분포 역시 모두 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} I_1 &= \frac{1}{1+H} I_T \\ I_2 &= \frac{H}{1+H} I_T \end{aligned} \quad (16)$$

3.2.2 불평형지수 산정

전압 및 전류불평형지수를 구하기 위해서는 상성분 전압·전류값을 대칭성분값으로 변환시켜야 한다. 따라서 대칭좌표법의 정의식을 이용, 식 (15)로 계산된 상성분 전압·전류에 대한 대칭성분 전압·전류는 식 (17)로 계산하였다.

$$\begin{aligned} V_{012} &= T_s^{-1} V_{abc} \\ I_{012} &= T_s^{-1} I_{abc} \end{aligned} \quad (17)$$

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

불평형 지수는 정상성분에 대한 역상성분의 비로써 정의되므로, 결국 전압불평형지수 및 전류불평형지수는 식 (18)로 계산된다.

$$\begin{aligned} \text{전압불평형지수}(d_V) &= \frac{\text{역상성분전압}(|V_2|)}{\text{정상성분전압}(|V_1|)} \\ \text{전류불평형지수}(d_I) &= \frac{\text{역상성분전류}(|I_2|)}{\text{정상성분전류}(|I_1|)} \end{aligned} \quad (18)$$

4. 사례연구

4.1 입력자료

본 연구에서 제안한 불평형 평가기법의 정확성과 유용성을 검증하기 위해 문헌[5]을 참고로 한 가상 철도 변전소 1개에 대하여 사례연구를 실시하였다. 3상 전력계통 및 철도급전계통에 대한 입력자료는 표 1에 보인다.

4.2 제안한 알고리즘의 정확성 검증

제안한 알고리즘의 정확성을 검증하기 위해, T상과 M상에 동일한 차량이 18[km] 지점에 운행하는 경우 3상계통의 인출점과 AT급전시스템의 전류 계산결과를 PSS/U에 의한 결과와 비교하여 표 2에 보인다.

표 2에서 제안한 알고리즘과 PSS/U에 의한 전류계산 결과는 0.19[%]이내로 거의 일치하고 있음을 알 수 있다. AT급전방식에서 M상과 T상의 부하가 동일할 경우 M상과 T상 전류는 크기가 같고 위상차가 90° 이며, 인출점 전류는 평형 3상이라는 사실을 감안해 보면

회로해석을 이용한 전기철도 급전시스템의 전압불평형 평가

표 1. 입력자료

구분	기호	값	
3상 전력계통 (변전소)	전압	E	154 [KV]
	단락임피던스	Z_s	$18.5+j152.9 [\Omega]$
스톡 변압기	정격용량		30 [MVA]
	정격전압		154/55 [kV]
	임피던스	Z_{ST}	8[%]
철도급전계통	전차선	Z_c	$0.1192+j0.7522[\Omega/\text{km}]$
	급전선	Z_f	$0.2036+j0.8847[\Omega/\text{km}]$
	레일	Z_r	$0.1618+j0.6709[\Omega/\text{km}]$
	전차선-급전선	Z_{cf}	$0.0568+j0.3953[\Omega/\text{km}]$
	전차선-레일	Z_{cr}	$0.0574+j0.3877[\Omega/\text{km}]$
	레일-급전선	Z_{rf}	$0.0571+j0.3410[\Omega/\text{km}]$
단권 변압기 (AT)	정격용량		5[MVA]
	정격전압		55/275 [kV]
	임피던스	Z_{AT}	8[%]
	AT 배치간격		12[km]
차량	정격소비전력		3.9 [MW]
	정격전압		27.5 [kV]
	정격역률		0.83
	임피던스 (정격)	Z_T	$133.6+j89.8 [\Omega/\text{km}]$

표 2. 제한한 알고리즘과 PSS/U에 의한 전류계산 결과의 비교

계산 지점	방법	PSS/U		상대오차
		PSS/U	제한한 방법	
인출점	A상	$32.23 \angle -39.4^\circ$	$32.2 \angle -39.5^\circ$	0.09 [%]
	B상	$32.20 \angle -159.5^\circ$	$32.2 \angle -159.5^\circ$	0.00 [%]
	C상	$32.18 \angle 80.6^\circ$	$32.2 \angle 80.5^\circ$	-0.06 [%]
AT 급전계통	T상	$78.15 \angle -39.4^\circ$	$78.0 \angle -39.5^\circ$	0.19 [%]
	M상	$78.02 \angle -129.5^\circ$	$78.0 \angle -129.5^\circ$	0.02 [%]

제한한 방법의 결과가 더욱 신빙성 있는 것으로 추정할 수 있다. 따라서 PSS/U의 결과와의 차이는 PSS/U 입력 데이터 작성시 변압기 권선비와 임피던스의 환산에서 기인된 Truncation Error 때문인 것으로 생각된다.

한편 AT급전회로의 전압분포 역시 동일한 결과를 산출하였으며 이를 그림 4에 보인다.

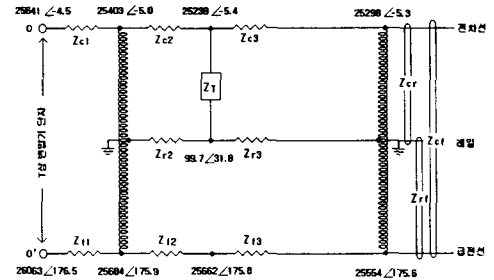


그림 4. AT급전회로의 전압분포 계산결과

4.3 차량 위치에 따른 전압불평형 분석

먼저 차량 운행에 따른 전압 불평형을 조사하기 위해 M와 구간에는 차량이 없고 T와의 두 AT 사이를 하나의 차량이 통과하는 경우, 차량 위치에 따른 전압 불평형을 계산하고 그 결과를 그림 5에 보인다.

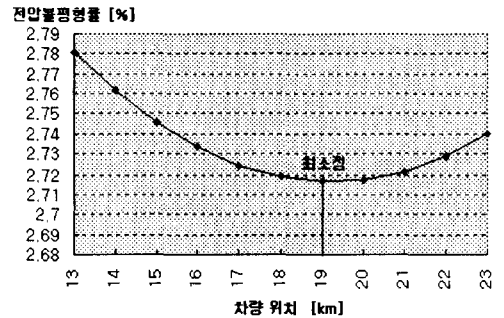


그림 5. 차량 위치에 따른 전압불평형 지수

그림 5에서 차량이 첫번째 단권변압기에서 두번째 단권변압기로 접근함에 따라 전압불평형은 감소하여 19[km] 지점에서 최소가 되고 다시 두번째 단권변압기에 접근하면서 불평형은 증가하게 된다. 이러한 현상이 발생하는 이유를 분석하기 위해 차량 위치에 따른 AT 선로의 테브난 임피던스를 계산하고 이를 그림 6에 보인다.

그림 6에서 차량의 위치가 19[km]지점에 도달할 때까지는 테브난 등가 임피던스가 증가하지만, 그 이후 구간에서는 테브난 임피던스가 다시 감소한다. 따라서 부하용량은 19[km] 지점이 최소가 되어 불평형도 역시 최소가 되고 양쪽의 단권변압기로 접근할수록 부하용량이 증가하기 때문에 그만큼 불평형도 현저하게 커진다.

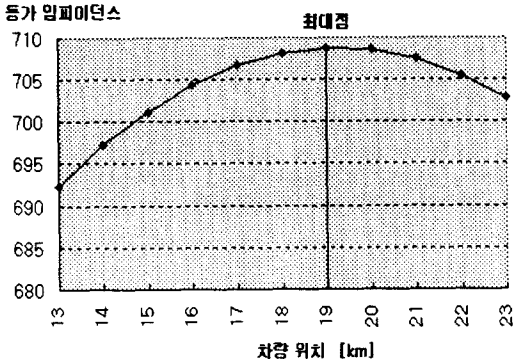


그림 6. 차량 위치에 따른 AT급전계통의 테브난 임피던스

4.4 차량 대수에 따른 전압, 전류 불평형

차량 운행 대수가 전압·전류 불평형에 미치는 영향을 조사하기 위해 M좌 및 T좌에 최대 4대의 열차가 운행되고 있는 모든 경우에 대하여 전압 및 전류불평형을 산정하고 이를 표 3에 보인다. 음영부분은 전압 불평형을 규제가 3%인 경우에 운행 가능한 조합을 표시한 것이다.

표 3. 차량 운행 대수가 전압·전류 불평형에 미치는 영향

		T 좌 차량 운행 대수				
		0 대	1 대	2 대	3 대	4 대
M 좌 차량 대수	0	0.00 (0.00)	2.72 (100)	4.86 (100)	6.54 (100)	7.87 (100)
	1	2.72 (100)	0.00 (0.00)	2.16 (27.8)	3.88 (40.9)	5.26 (48.4)
	2	4.86 (100)	2.16 (27.8)	0.00 (0.00)	1.74 (14.6)	3.14 (23.5)
	3	6.54 (100)	3.88 (40.9)	1.74 (14.6)	0.00 (0.00)	1.41 (9.19)
	4	7.87 (100)	5.26 (48.4)	3.14 (23.5)	1.41 (9.19)	0.00 (0.00)

주) 각 칸의 수치는 "전압불평형율(전류불평형율)"을 의미함

표 3에서 전류불평형율은 전압불평형율 보다 훨씬 큰 값을 보이는데, 이는 부하의 불평형이 부하전류의 불평형과 보다 밀접한 관계를 가지는데 반해 전압의 불평형은 부하전류에 의한 전압강하의 차이에서 기인되므로 전류 불평형보다 작은 불평형율을 갖기 때문이다.

또한, 표로부터 불평형율은 M좌 및 T좌 부하량의 차이에도 의존할 뿐만 아니라 같은 부하량의 차이일 경우에는 부하의 분담율의 차이에 따라 커진다는 사실

을 관찰할 수 있다. 즉, M좌 및 T좌 차량대수의 차이가 1대인 경우, 그 분담율이 0:1, 1:2, 2:3, 3:4로 변함에 따라 전압불평형율은 2.72, 2.16, 1.74, 1.41[%]로 감소하고 있음을 알 수 있다.

4.5 변전소 단락용량과 전압 불평형율 및 전압강하율과의 상관성

그림 7은 변전소 단락용량에 따른 전압불평형 및 전압강하율을 계산한 결과이다. 그림에서 단락임피던스는 표 1의 값을 기준으로한 [%]값이며, 단락임피던스에 대해 전압불평형과 전압강하율의 크기는 공히 선형적 비례특성을 보이고 있으므로, 이 사실로부터 전압강하율이 큰 급전계통일수록 전압불평형 문제에 직면할 가능성이 크다고 할 수 있다.

한편, 그림 7의 결과는 철도부하 공급을 위한 변전소 선정문제에도 적용할 수 있다. 이를 테면, 전압 불평형율이 3% 이내로 규제된다면 이 경우 변전소는 단락임피던스가 기준 임피던스의 35%이하인 것으로 선정되어야 함을 추정할 수 있다.

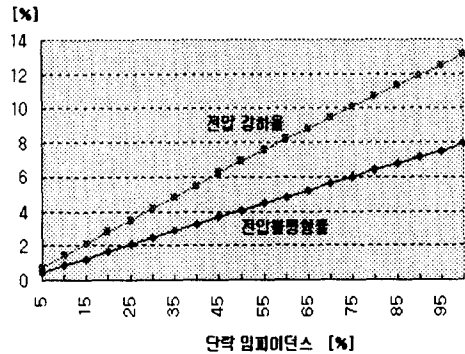


그림 7. 변전소 단락용량과 전압불평형율 및 전압강하율과의 상관성

5. 결론

본 연구에서는 테브난 등가회로를 이용하여 전기철도 급전시스템의 전압불평형을 변압기 결선방식에 따라 검토하여 그 알고리즘을 제안하였다. 예제 계통에 대한 시뮬레이션을 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 회로해석기법을 이용하여 불평형율을 산정하므로 기존의 방법에서 고려할 수 없었던 정확한 불평형율을

회로해석을 이용한 전기철도 급전시스템의 전압불평형 평가

선정할 수 있었다.

2) 제안한 알고리즘을 이용하여 구한 전류, 전압값을 PSS/U의 결과와 비교한 결과 두 값이 일치함을 보임으로써 제안한 알고리즘의 정확성을 검증할 수 있었다.

3) 전압·전류 불평형지수 뿐만 아니라 전압강하율, 전압 및 전류분포도를 동시에 산출하여 상호 관계를 비교 검토하여 차량운전가능종합등의 유용한 정보를 얻을 수 있었다.

4) 가상 전기철도 급전시스템의 불평형 현상을 다각적으로 분석하여 불평형 평가 기법의 유용성을 검증할 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] B. A. Ross, "Meeting Tomorrow's Railroad Power Requirements", IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-90, No.2, March/April, 1971.
- [2] Minoru Obe, Masaaki Ono and Tadao Shibuya, "Voltage Compensation and 3-Phase Balancer for Efficient Operation of Electric Trains", MIEDEN REVIEW Series No.105, 1995, No.3, pp.20~28.

- [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] 한국고속철도건설공단 전기시설본부 전기연구실, 고속철도 연구보고서(전기분야), 1996.
- [5] Ronald John Hill and Ibrahim H. Cevik, "On-Line Simulation of Voltage Regulation in Autotransformer-Fed AC Electric Railroad Traction Networks", IEEE Trans. on Vehicular Technology, Vol.42, No.3, August 1993.

◇ 저자소개 ◇

오 광 해 (吳廣海)

1968년 4월 10일생. 1990년 고려대학교 공대 전기공학과 졸업. 1992년 고려대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 고려대학교 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1997년~현재 한국철도기술연구원 선임연구원.

차 준 민 (車濬敏)

1964년 5월 9일생. 1989년 고려대학교 공대 전기공학과 졸업. 1991년 고려대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 고려대학교 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1996년~현재 대전대학교 공대 전기공학과 조교수.