

전철부하에 기인된 계통 전압불평형 평가기법

오 광 해\*<sup>Ⓞ</sup>    창 상 훈\*    한 문 섭\*    이 장 무\*  
 \* 한국철도기술연구원

(Evaluation Techniques for the Voltage Unbalance due to Railway Demand)

KwangHae Oh\*<sup>Ⓞ</sup>, SangHoon Chang\*, MoonSeob Han\*, ChangMu Lee\*  
 \* Korea Railroad Research Institute

ABSTRACT

This paper presents an algorithm to estimate voltage unbalance which is due to railway demand, and which is most troublesome to polyphase motors.

For the sake of accuracy, a circuit analysis procedure is introduced in this algorithm. The circuit analysis procedure enables the algorithm to produce a voltage and current profiles as well as unbalance indices.

The proposed algorithm is applied to the test system( standard AT fed system ) for the analyses of unbalance phenomena. The result shows that the algorithm is useful in the field of railway system planning.

1. 서론

우리나라에서는 1973년 전철이 개통된 이래 대도시 전철망 확충 및 경부고속철도 건설 등 주요 간선의 전철화가 꾸준히 추진되어 왔다. 전기철도 시스템은 수송능력 증강, 에너지 이용효율 증대, 수송편가 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 전력계통의 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 극부적인 가열현상을 초래하며 절연열화를 촉진시킨다.<sup>[1],[2]</sup> 따라서 철도시스템과 같은 대규모 수용가의 계획 및 설계 단계에서는 부하 예측과 함께 전압불평형 평가가 선행되어야 할 중요한 과제라 할 수 있다.

전압불평형에 관한 최근의 연구<sup>[3]</sup>에서는 철도급전시스템에 사용되는 변압기 절선방법들을 논하고 전압불평형을 평가하는 공식을 유도하였다. 이 공식은 간단하며 불평형 평가에 쉽게 적용할 수 있다는 장점을 갖고 있어 널리 사용되고 있으나, 몇가지 가정하에 수립된 것이므로 그 정확성에 대해서는 보장하기 어렵다.

따라서 본 연구에서는 철도부하에 의한 전압불평형을 보다 정밀하게 평가하기 위한 불평형지수 선정기법을 다룬다. 이를 위해 철도급전시스템의 등가 모델을 정의하고 전압불평형율을 회로해석으로부터 평가하였다.

본 연구의 알고리즘을 시험계통에 적용하여 불평형현상을 다각적으로 조사 분석하고 몇가지 중요한 정보를 도출함으로써 제안한 방법의 유용성을 검증하였다.

2. 급전시스템의 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 25Kv 급전계통은 전차선과 레일 사이에 직접 25Kv의 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 소의전력이 커지면서 전압강하 문제와 함께 전철변전소의 입지선장 및 건설비 문제 등으로 인해 변전소의 공급거리를 연장시키는 수단으로 단권변압기를 사용하는 AT급전방식이 채택되었다. 이 방식에서 변전소의 급전 전압은 차량 사용전압의 2배가 되기 때문에 전압강하가 경감되어 변전소간의 거리를 길게 할 수 있다. 또한 귀환전류가 단권변압기를 통하여 피더로 흐르기 때문에 통신선로의 유도장해를 크게 개선시키는 효과도 있다.<sup>[4]</sup> 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.

2.1 AT급전계통의 등가화

통상 단권변압기의 설치간격은 10Km 정도이며 변전소간의 거리는 약 50Km이다. 변전소와 변전소의 중간지점은 양쪽 변전소의 전압위상이 다르기 때문에 개폐설비로서 전기적으로 구분하여(급전구분소) 운전하고 있는데 이것은 변전소 고장시 인근 변전소에서 연장급전을 하기 위해 해결해 주는 역할도 한다. 단권 변압기는 변전소 간격에 따라 중간에 1-2개소에 설치하게 되는데 이곳에 상하 행선을 연결하는 개폐기가 함께 설치된다(별립급전소).

이러한 AT급전계통에 대한 일반적인 등가모델은 그림 1과 같이 구성되며, 아울러 단권변압기 특성에 의한 부주류 전류의 분포도 그림에 도시하였다.

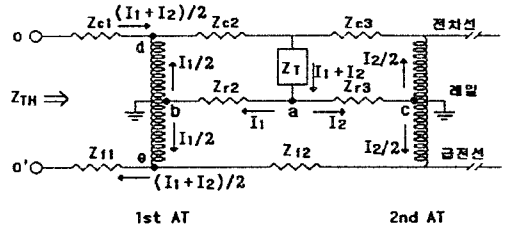


그림 1. AT급전계통의 등가모델

이제 0-0'단자에서 AT급전계통을 바라본 테브난 임피던스  $Z_{TH}$ 를 계산한다.  $V_{ab} = V_{ac}$ 의 관계로부터 전류  $I_1$ 과  $I_2$ 는 다음 식(1)을 만족한다.

$$I_2 = \frac{Z_{r2}}{Z_{r3}} I_1 \quad (1)$$

그림 1의 회로도에서 부하전류( $I_1 + I_2$ )를 공급하기 위해서는 0-0'단자에 전류( $I_1 + I_2$ )/2를 주입해야 하며, 이 경우 단자전압  $V_{00'}$ 은 식(2)와 같다.

$$V_{00'} = 2V_{ab} + 0.5(Z_{c1} + Z_{c3})(I_1 + I_2) \\ = Z_{c2}(2I_1 + I_2) + 2Z_{r2}(I_1 + I_2) + 2Z_{r3}I_1 + 0.5(Z_{c1} + Z_{c3})(I_1 + I_2) \\ = I_1[2Z_{c2} + 2Z_{r2} + 2Z_{r3} + 0.5(Z_{c1} + Z_{c3})] + I_2[Z_{c2} + 2Z_{r2} + 0.5(Z_{c1} + Z_{c3})] \quad (2)$$

식(1)을 식(2)에 대입하여  $I_2$ 를 소거하면

$$V_{00'} = I_1[2Z_{c2} + 2Z_{r2} + 2Z_{r3} + 0.5(Z_{c1} + Z_{c3}) \\ + \frac{Z_{r2}}{Z_{r3}}(Z_{c2} + 2Z_{r2} + 0.5(Z_{c1} + Z_{c3}))] \quad (3)$$

결국 0-0'단자에서의 전압-전류관계로부터 테브난 임피던스는 식(4)와 같이 계산된다.

$$Z_{TH} = \frac{2V_{00'}}{(1 + Z_{r2}/Z_{r3})I_1} \\ = \frac{1}{(1 + Z_{r2}/Z_{r3})} [4Z_{c2} + 4Z_{r2} + Z_{c1} + Z_{c3} \\ + \frac{Z_{r2}}{Z_{r3}}(2Z_{c2} + 4Z_{r2} + Z_{c1} + Z_{c3})] \quad (4)$$

식(4)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.

2.2 스크트 변압기의 전압·전류 관계

스크트 변압기는 3상전력을 철도부하용 2상전력으로 변환시키는 3상-2상 변환장치이다. 실제로 대용량 변압기는 손실이 아주 적으므로 본 연구에서는 변압기를 이상적이라고 가정하였다. 변압기에서 임피던스는 존재하지 않으므로 전압강하와 손실은 일어나지 않는다. 그림 2는 이러한 가정에 따라 스크트 변압기의

전기적 내부구조와 전압에 관한 페이지도를 도시한 것이다.

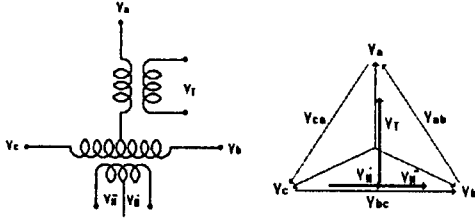


그림 2. 스코트변압기의 결선도 및 페이지도

그림 2의 페이지도에서 T와 전압  $V_T$  및 M과 전압  $V_M$  및  $V_{M'}$ 을 1차측 선간전압으로써 표현하면 식(5)와 같다.

$$\begin{aligned} V_T &= \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{N_2}{N_1} (V_{ab} + \frac{1}{2} V_{bc}) \\ V_M &= \frac{1}{2} \frac{N_2}{N_1} V_{bc} \\ V_{M'} &= \frac{1}{2} \frac{N_2}{N_1} V_{bc} = \frac{1}{2} \frac{N_2}{N_1} (-V_{ab} - V_{ca}) \end{aligned} \quad (5)$$

식(5)는 Non-singular 이므로 식(6) 및 식(7)의 행렬 형태로 정리할 수 있다.

$$\begin{pmatrix} V_T \\ V_M \\ V_{M'} \end{pmatrix} = \frac{N_2}{N_1} \begin{pmatrix} \frac{2}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{3}} & 0 \\ 0 & \frac{1}{2} & 0 \\ -\frac{1}{2} & 0 & -\frac{1}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_{ab} \\ V_{bc} \\ V_{ca} \end{pmatrix} \quad (6)$$

$$\begin{pmatrix} V_{ab} \\ V_{bc} \\ V_{ca} \end{pmatrix} = \frac{N_1}{N_2} \begin{pmatrix} \frac{\sqrt{3}}{2} & -1 & 0 \\ 0 & 2 & 0 \\ -\frac{\sqrt{3}}{2} & 1 & -2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_T \\ V_M \\ V_{M'} \end{pmatrix} \quad (7)$$

식(6)과 식(7)의  $3 \times 3$  행렬은 전철용 스코트 변압기의 1차전압과 2차전압 사이의 관계를 나타내는 변환행렬이다.

한편 스코트 변압기의 1차전류와 2차전류 사이의 관계를 나타내는 변환행렬도 전압의 경우와 같은 방법으로 식(8), (9)로 유도된다.

$$\begin{pmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{pmatrix} = \frac{N_2}{N_1} \begin{pmatrix} \frac{2}{\sqrt{3}} & 0 & 0 \\ -\frac{1}{\sqrt{3}} & 1 & 0 \\ -\frac{1}{\sqrt{3}} & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_T \\ I_M \\ I_{M'} \end{pmatrix} \quad (8)$$

$$\begin{pmatrix} I_T \\ I_M \\ I_{M'} \end{pmatrix} = \frac{N_1}{N_2} \begin{pmatrix} \frac{\sqrt{3}}{2} & 0 & 0 \\ \frac{1}{2} & 1 & 0 \\ \frac{1}{2} & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{pmatrix} \quad (9)$$

### 2.3 전체 급전계통 등가모델링

본 연구에서는 3상전력계통을 위한 모선에 단위 임피던스가 연결된 형태로 취급하였고, 2.1절과 2.2절에서의 AT급전시스템 및 스코트 변압기의 전압·전류 변환 모델을 이용함으로써 전체 급전시스템에 대한 등가모델을 그림 3과 같이 구성하였다.

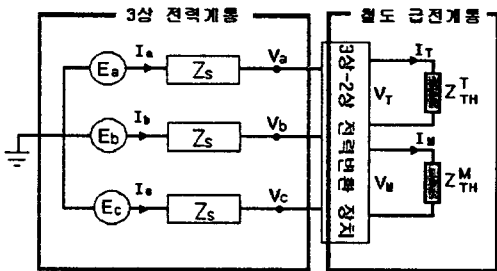


그림 3. 전체급전계통 모델

### 3. 회로해석에 의한 전압불평형 산정 기법

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

#### 3.1 회로해석

그림 3의 등가회로와 2.2절의 스코트 전압·전류관계식 (6), (7), (8), (9)을

이용하여 회로해석을 수행하였다. 먼저, 스코트 변압기의 전압 및 전류관계식 (7), (8)을 이용, 1차측 두 폐회로에 대해 K.V.L.을 적용하면 식(10)의 회로 방정식을 구할 수 있다.

$$\begin{pmatrix} \sqrt{3} Z_s \frac{N_2}{N_1} + \frac{\sqrt{3}}{2} Z_{TH} \frac{N_1}{N_2} - Z_s \frac{N_2}{N_1} - \frac{1}{2} Z_{TH} \frac{N_1}{N_2} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_T \\ I_M \\ I_{M'} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_a - E_b \\ E_b - E_c \\ E_c - E_a \end{pmatrix} \quad (10)$$

식(10)에서  $I_T, I_M$ 에 대하여 풀면 식(11)이 된다.

$$\begin{pmatrix} I_T \\ I_M \end{pmatrix} = \frac{1}{2\sqrt{3} Z_s^2 (\frac{N_2}{N_1})^2 + \sqrt{3} Z_s (Z_{TH} + Z_{TH}') + \frac{\sqrt{3}}{2} Z_{TH} Z_{TH}' (\frac{N_1}{N_2})^2} \begin{pmatrix} 2Z_s \frac{N_2}{N_1} + Z_M \frac{N_1}{N_2} & Z_s \frac{N_2}{N_1} + \frac{1}{2} Z_M \frac{N_1}{N_2} \\ 0 & \sqrt{3} Z_s \frac{N_2}{N_1} + \frac{\sqrt{3}}{2} Z_T \frac{N_1}{N_2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_{ab} \\ E_{bc} \end{pmatrix} \quad (11)$$

이제 식(11)의  $I_T, I_M$ 을 식(8)에 대입하여 전류  $I_a, I_b, I_c$ 를 구하고, 이를 다음 식(12)에 대입하여  $V_a, V_b, V_c$ 를 구함으로써 변압기 1차측인 3상 전력계통측의 전압 전류의 값을 모두 계산한다.

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

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

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(1)과 같이 표현되므로,  $I_1$ 과  $I_2$ 는 식(13)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.

$$I_1 = \frac{2Z_{\alpha}}{Z_{\alpha} + Z_{\beta}} I_T \quad (13)$$

$$I_2 = \frac{2Z_{\beta}}{Z_{\alpha} + Z_{\beta}} I_T$$

### 3.2 불평형지수 산정

전압 및 전류불평형지수를 구하기 위해서는 상성분 전압·전류값을 대칭성분 값으로 변환시켜야 한다. 따라서 대칭과표법의 정의를 이용, 식(12)로 계산된 상성분 전압·전류에 대한 대칭성분 전압·전류는 식(14)로 계산하였다.

$$\begin{aligned} V_{012} &= T_r^{-1} V_{abc} \\ I_{012} &= T_r^{-1} I_{abc} \end{aligned} \quad (14)$$

$$\text{단, } T_r^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix}$$

$$a = e^{j\frac{2\pi}{3}}, \quad a^2 = e^{-j\frac{2\pi}{3}}$$

불평형 지수는 정상성분에 대한 역상성분의 비로써 정의되므로, 결국 전압불평형지수 및 전류불평형지수는 식(15)로 계산된다.

$$\begin{aligned} \text{전압불평형지수}(d_v) &= \frac{\text{역상성분 전압}(|V_2|)}{\text{정상성분 전압}(|V_1|)} \\ \text{전류불평형지수}(d_i) &= \frac{\text{역상성분 전류}(|I_2|)}{\text{정상성분 전류}(|I_1|)} \end{aligned} \quad (15)$$

## 4. 사례연구

### 4.1 입력자료

본 연구에서 제안한 불평형 평가법의 유용성을 검증하기 위해 문헌<sup>(5)</sup>을 참고로 한 가상 철도변전소 1개에 대하여 사례연구를 실시하였다. 3상 전력계통 및 철도급전계통에 대한 입력자료는 표 1.에 보인다.

표 1. 입력자료

구분	기호	값
3상 전력계통(변전소)		
전압	$E$	154 [kV]
단락임피던스	$Z_s$	18.5+j152.9 [Ω]
철도급전계통		
전차선	$Z_c$	0.1192+j0.7522 [Ω/km]
급전선	$Z_f$	0.2036+j0.8847 [Ω/km]
레일	$Z_r$	0.1618+j0.6709 [Ω/km]
차량		
정격소비전력		3.9 [MW]
정격전압		27.5 [kV]
정격 역률		0.83
임피던스(정격)	$Z_T$	133.6+j89.8 [Ω/km]
AT 배치간격		12 [km]

4.2 차량 위치에 따른 전압불평형지수의 분석

전차 차량 운행에 따른 전압 불평형을 조사하기 위해 M과 구간에는 차량이 없고 T과의 두 AT 사이를 하나의 차량이 통과하는 경우, 차량 위치에 따른 전압 불평형을 계산하고 그 결과를 그림 4에 보인다.

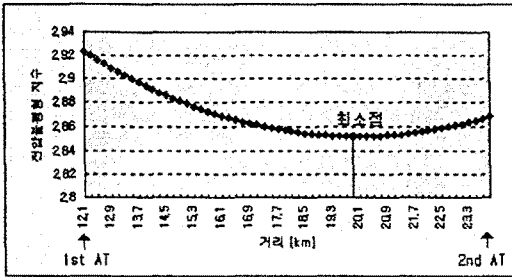


그림 4. 차량 위치에 따른 전압불평형 지수

그림 4에서 차량이 1st AT에서 2nd AT로 접근함에 따라 전압불평형은 감소하여 20km 지점에서 최소가 되고 다시 2nd AT에 접근하면서 불평형은 증가하게 된다. 이러한 현상이 발생하는 이유를 분석하기 위해 차량 위치에 따른 AT접근제통의 테브난 임피던스를 계산하고 이를 그림 5에 보인다.

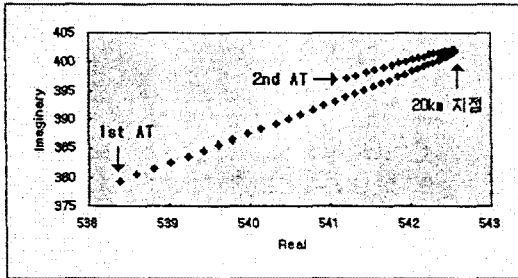


그림 5. 차량 위치에 따른 AT접근제통의 테브난 임피던스

그림 5에서 차량의 위치가 20km지점에 도달할 때 까지는 테브난 동가 임피던스가 증가하지만, 그 이후 구간에서는 테브난 임피던스가 다시 감소한다. 따라서 부하용량은 20 km 지점이 최소가 되어 불평형도 역시 최소가 되고 양쪽의 AT로 접근할수록 부하용량이 증가하기 때문에 그만큼 불평형도 현저하게 커지게 된다.

4.3 차량 운행 대수가 전압·전류 불평형률에 미치는 영향

차량 운행 대수가 전압·전류 불평형률에 미치는 영향을 조사하기 위해 M과 T과에 최대 4대의 열차가 운행되고 있는 모든 경우에 대하여 전압 및 전류 불평형률을 산정하고 이를 표 2에 보인다. 운행부분은 전압 불평형을 규제하 3%인 경우에 운행 가능한 조합을 표시한 것이다.

표 2. 차량 운행 대수가 전압·전류 불평형률에 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)	2.86 (100)	5.60 (100)	8.22 (100)	10.76 (100)
	1	2.86 (100)	0.00 (0.00)	2.74 (31.6)	5.38 (47.09)	7.91 (56.28)
	2	5.60 (100)	2.74 (31.6)	0.00 (0.00)	2.64 (18.17)	5.17 (29.96)
	3	8.22 (100)	5.38 (47.09)	2.64 (18.17)	0.00 (0.00)	2.53 (12.46)
	4	10.76 (100)	7.91 (56.28)	5.17 (29.96)	2.53 (12.46)	0.00 (0.00)

주) 각 림의 수치는 '전압불평형률(전류불평형률)'을 의미함

표 2에서 전류불평형률은 전압불평형을 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 불평형률을 갖기 때문이다.

또한, 표로부터 불평형률은 M과 T와 부하량의 차이에도 의존할 뿐만 아니라 같은 부하량의 차이일 경우에는 부하의 분담율의 차이에 따라 커진다는 사실을 관찰할 수 있다. 즉, M과 T와 차량대수의 차이가 1대인 경우, 그 분담율이 0:1, 1:2, 2:3, 3:4 로 변함에 따라 전압불평형률은 2.86, 2.74, 2.64, 2.53으로 감소하고 있다.

4.4 변전소 단락용량과 전압불평형을 및 전압강하율과의 상관성

그림 6은 변전소 단락용량에 따른 전압불평형 및 전압강하율을 계산한 결과이다. 그림에서 단락임피던스는 표 1의 값을 기본으로한 %값이며, 단락임피던스에 대해 전압불평형과 전압강하율의 크기는 공히 선형적 비례특성을 보이고 있으므로, 이 사실로부터 전압강하율이 큰 급전계통일수록 전압불평형 문제가 당면할 가능성이 크다고 할 수 있다.

한편, 그림 6의 결과는 철도부하 공급을 위한 변전소 선정문제에도 적용할 수 있다. 이를 태면, 전압 불평형률은 3%, 전압강하율은 10% 이내로 규제된다면 이 경우 각 변전소는 단락임피던스가 기본 임피던스의 20 [%]이하인 것으로 선정하여야 할 것이다.

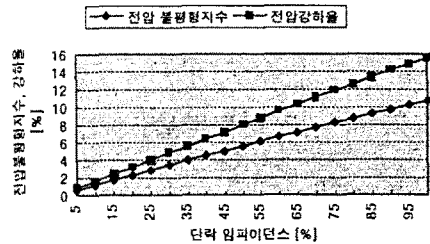


그림 6. 변전소 단락용량과 전압불평형을 및 전압강하율과의 상관성

5. 결론

본 연구의 결론을 요약하면 다음과 같다.

- (1) 본 연구에서는 철도부하에 기인된 전압불평형을 보다 정밀하게 평가하기 위해, 회로해석에 의한 불평형지수 산정기법을 제안하였다.
- (2) 회로해석을 이용한 알고리즘을 구성함으로써 전압·전류 불평형지수 뿐만 아니라 철도급전시스템의 전압강하율, 전압 및 전류분포도 동시에 산출하여 이들 사이의 상호 관계를 비교검토할 수 있도록 하였다.
- (3) 가상 철도변전소에 대하여 사례연구를 실시하고 급전시스템의 불평형 현상을 다각적으로 조사분석함으로써 제안한 불평형 평가기법의 유용성을 검증하였다.
- (4) 본 연구에서는 차량부하를 정상상태의 일정 임피던스 부하로 취급하였다. 그러나 철도부하는 건전진동기가 대부분을 차지하고, 시간간적으로 급변하는 특성이 있으므로 보다 적합한 부하표현을 모색해야 할 것으로 생각된다. 아울러 정밀하고 체계적인 해석을 위해서 다이내믹 특성을 고려한 철도부하 표현이 필수적이고 차후에 진행되어야 할 과제라 사료된다.

참고문헌

- (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, Masaki Ono and Tadao Shibuya, "Voltage Compensation and 3-Phase Balancer for Efficient Operation of Electric Trains", MEIDEN 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.