

철도 시스템의 불평형 해석을 위한 EMTDC 모델링

이한상*, 이한민**, 장길수*
*고려대학교, **한국철도기술연구원

Unbalanced Power System Analysis in Railroad System Using PSCAD/EMTDC

Hansang Lee*, Gilsoo Jang*, Hanmin Lee**
*Korea University, **Korea Railroad Research Institute

Abstract - This paper proposes a method for estimating unbalance in electric railroad system. PSCAD/EMTDC models for voltage unbalance analysis of electric railroad system that transfer electric power through Scott transformer from KEPCO's 154kV transmission line are developed. In order to verify model's validity, we compare simulation results with simple calculation results.

1. 서 론

전기철도 부하는 시공간적으로 급변하는 대용량의 단상부하이고 주로 3상 전력계통으로부터 단상의 전력으로 변환하여 급전받고 있으므로, 3상 전원계통의 각 상전류는 더 이상 평형을 유지하지 못하고 3상전압의 불평형을 초래할 수 있다. 이러한 전압불평형은 결과적으로 계통의 전력품질을 저해하여 관련된 다른 설비의 운전에 영향을 끼친다. 즉, 전력용 설비의 중성점 전위상승의 원인이 되고 국부적인 가열현상을 초래하며 절연열화를 촉진시킨다. 특히 동기기의 불평형 전류에 포함된 역상분 전류는 회전자 표면, 슬롯 웨지, 계자권선에 정격의 2배 주파수의 전류를 발생시켜 회전자의 과열과 진동을 유발시킨다. 따라서 철도 시스템에서 불평형에 대한 평가와 그것을 위한 철도 시스템의 모델링이 필요하다.

본 논문은 철도계통에서의 불평형에 의한 문제점과, 불평형의 해석을 위하여 기존의 방법을 제시하였다. 또한, PSCAD/EMTDC를 이용하여 모델링한 철도계통에 적용하여 그것의 타당성을 검토하였다.

2. 전압 불평형 정의

전압불평형은 아래와 같이 정의된다

$$\text{전압불평형} = 100 \times \frac{\text{평균전압의 최대변화량}}{\text{평균전압}} \text{ (NEMA)}$$

$$\text{전압불평형} = 100 \times \frac{\text{역상전압}}{\text{정상전압}} \text{ (Voltage Unbalance Factor)}$$

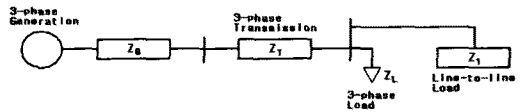
위의 두 가지 정의로부터 실제 전압불평형을 계산하기 위하여 전압불평형 경험법칙으로서 아래의 계산식을 사용한다.

$$U = \frac{L}{S} \times 100 \quad (1)$$

- U : 전압 불평형률
- L : MVA 단위의 단상부하 (M상과 T상의 불평형부하)
- S : MVA 단위의 단락용량 (변전소의 3상 단락용량)

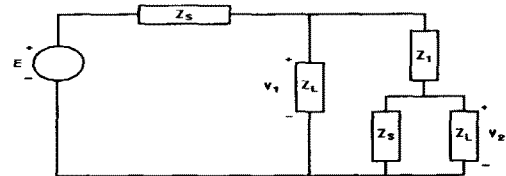
위의 경험법칙을 이해하기 위하여 <그림 1>을 제시하

였다. <그림 1>은 평형 3상부하와 선로 간에 연결된 단상부하를 가진 3상 송전선로에 연결되어 있는 발전기를 보여준다. 이 시스템의 위상 표현의 등가회로를 나타내면 <그림 2>에서처럼 그려질 수 있다.



<그림 1>

여기서, Z_G : 발전기의 소스 임피던스
 Z_T : 송전선의 임피던스
 Z_L : 3상 부하의 임피던스
 Z_1 : 단상 부하의 임피던스



<그림 2>

여기서, $Z_S = Z_G + Z_T$ 즉, Z_S 는 발전기 내부 임피던스와 송전선 임피던스의 합이다. <그림 2>에서 V_1 과 V_2 의 관계는 다음과 같다.

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{\frac{1}{Z_1}}{\frac{1}{Z_S} + \frac{1}{Z_L} + \frac{1}{Z_1}} \quad (2)$$

만약, 계통의 종단에 3상 부하가 없다면, 식(2)는 음과 같이 간략화될 수 있다.

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{\frac{1}{Z_1}}{\frac{1}{Z_S} + \frac{1}{Z_1}} = \frac{Z_S}{Z_S + Z_1} \quad (3)$$

일반적으로, $Z_1 \gg Z_S$ 이므로, 식(3)은 다음과 같이 정리될 수 있다.

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{Z_S}{Z_1} \quad (4)$$

식(4)는 식(1)의 경험의 법칙과 정확히 일치함을 알 수 있다.

3. EMTDC 모델링

3.1 EMTDC 등가계통 모의

EMTDC를 이용한 철도계통은 아래의 <그림 3>과 같이 모델링하였다. 철도계통은 한전계통의 154kV 선로에 의하여 전력을 공급받고, 스코트변압기를 이용하여 M상과 T상의 두 단상으로 전차에 전력을 공급하게 된다. 특히, 이 모델에서는 차량을 저항과 인덕터의 직렬조합으로 간단히 하였다. 이것은 철도차량에 사용되는 유도 전동기의 특성을 고려하여 간략화한 것이다.

3.2 EMTDC 등가계통 해석 결과

본 모의에서는 M상과 T상 각각에 부하가 연결되어 있지 않은 경우와 20 MVA의 부하가 연결되어 있는 경우의, 3가지 조합을 고려하였다. 또한, 철도 차량의 임피던스를 조정하여 부하의 역률이 0.9로 변화한 경우를 모의하였다.

모의를 통하여 얻어진 결과는 기존의 수식에 의한 수 계산 결과와 비교하여 타당성을 검증하였다.

3.2.1 부하역률 1일 때 모의

철도 차량이 저항성분만을 포함하도록 즉, 부하의 역률이 1인 경우를 모의하였다. 철도계통으로 공급되는 한전측 전압은 153.92kV이고, 스코트 변압기를 통한 M상의 전압은 54.86kV이고 T상의 전압은 55.06kV이다.

또한, M상, T상의 전류와 각 3상전류의 관계는 아래와 같다.

$$I_a = \frac{2}{\sqrt{3}} \times I_{1T} \quad (5)$$

$$I_b = I_{1M} - \frac{1}{\sqrt{3}} \times I_{1T} \quad (6)$$

$$I_c = -I_{1M} - \frac{1}{\sqrt{3}} \times I_{1T} \quad (7)$$

가. M상에 20MVA의 부하가 연결된 경우

A상을 기준 벡터로 하면 역률이 1이므로 V_M 은 V_a 보다 90° 늦고 또 전류 I_M 도 V_a 보다 90° 늦으며 그 크기는 다음과 같다.

$$I_M = \frac{20 \times 10^6}{27.5 \times 10^3} = 727.273 \text{ A} \quad (8)$$

$$I_{1M} = \frac{27.5 \times 10^3}{154 \times 10^3} \times 727.273 \angle -90^\circ = 129.87 \angle 270^\circ \text{ A} \quad (9)$$

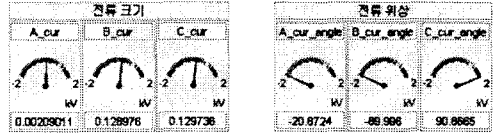
따라서 A, B, C 상의 전류는 다음과 같다.

$$I_a = 0 \text{ A} \quad (10)$$

$$I_b = 129.87 \angle 270^\circ = -j129.87 \text{ A} \quad (11)$$

$$I_c = -129.87 \angle 270^\circ = j129.87 \text{ A} \quad (12)$$

철도 계통에 의한 모의와 비교하면 다음과 같다.



	간략 계산	EMTDC 계산
A상 전류	0	0
B상 전류	$129.87 \angle 270^\circ$	$128.97 \angle -89.996^\circ$
C상 전류	$129.87 \angle 90^\circ$	$129.73 \angle 90.867^\circ$

나. T상에 20MVA의 부하가 연결된 경우

T상에만 부하가 걸렸을 경우에는 T상의 전류 I_T 는 A상전압 V_a 와 동상이므로 그 크기는 다음과 같다. A상을 기준 벡터로 하면 역률이 1이므로 V_M 은 V_a 보다 90° 늦고 또 전류 I_M 보다 90° 늦으며 그 크기는 다음과 같다.

$$I_T = \frac{20 \times 10^6}{27.5 \times 10^3} = 727.273 \text{ A} \quad (13)$$

$$I_{1T} = \frac{27.5 \times 10^3}{154 \times 10^3} \times 727.273 \angle 0^\circ = 129.87 \angle 0^\circ \text{ A} \quad (14)$$

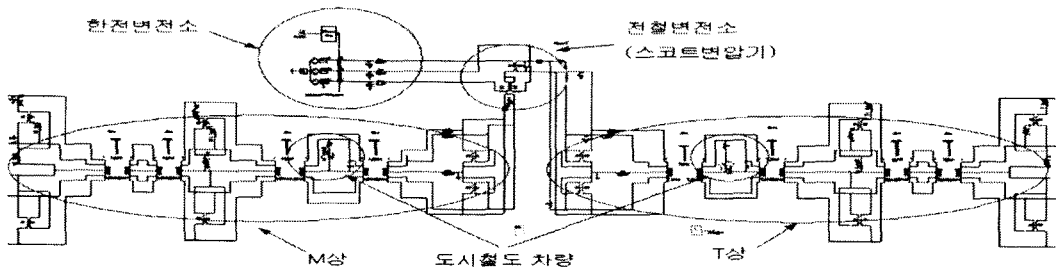
따라서 A, B, C 상의 전류는 다음과 같이 계산된다.

$$I_a = \frac{2}{\sqrt{3}} \times I_{1T} = 149.96 \angle 0^\circ \text{ A} \quad (15)$$

$$I_b = -\frac{1}{\sqrt{3}} \times I_{1T} = 74.98 \angle 180^\circ \text{ A} \quad (16)$$

$$I_c = -\frac{1}{\sqrt{3}} \times I_{1T} = 74.98 \angle 180^\circ \text{ A} \quad (17)$$

철도 계통에 의한 모의와 비교하면 다음과 같다.



<그림 3> 도시철도 시스템

	간략 계산	EMTDC 계산
A상 전류	149.96 ∠ 0°	149.2 ∠ 0.226°
B상 전류	74.98 ∠ 180°	75.23 ∠ -178.491°
C상 전류	74.98 ∠ 180°	74.23 ∠ 178.924°

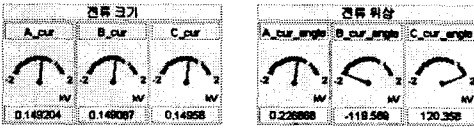
다. M상, T상에 20MVA의 평형부하가 연결된 경우 두 상에 평형부하가 연결된 경우는, 앞서 (나)와 (다)에서 계산된 결과의 합으로서 3상전류가 표현된다.

$$I_a = I_{a(\gamma)} + I_{a(\lambda)} = 149.96 \angle 0^\circ \text{ A} \quad (18)$$

$$I_b = I_{b(\gamma)} + I_{b(\lambda)} = 149.96 \angle 240^\circ \text{ A} \quad (19)$$

$$I_c = I_{c(\gamma)} + I_{c(\lambda)} = 149.96 \angle 120^\circ \text{ A} \quad (20)$$

계통의 모의와 비교하면 다음과 같다.



	간략 계산	EMTDC 계산
A상 전류	149.96 ∠ 0°	149.204 ∠ 0°
B상 전류	149.96 ∠ 240°	149.087 ∠ -119.589°
C상 전류	149.96 ∠ 120°	149.956 ∠ 120.358°

3.2.2 부하역률 0.9일 때 모의

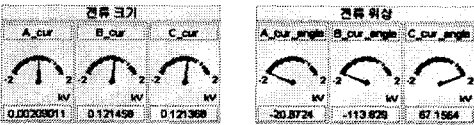
부하 역률이 0.9라 하면 $\theta = \tan^{-1} 0.9 = 25.84^\circ$ 즉, 전류의 위상이 25,84° 씩 늦어진다.

가. M상에 20MVA의 부하가 연결된 경우

$$I_a = 0 \text{ A} \quad (21)$$

$$I_b = 129.87 \angle 244.16^\circ \text{ A} \quad (22)$$

$$I_c = 129.87 \angle 64.16^\circ \text{ A} \quad (23)$$



	간략 계산	EMTDC 계산
A상 전류	0	0
B상 전류	129.87 ∠ 244.16°	121.458 ∠ -113.829°
C상 전류	129.87 ∠ 64.16°	121.368 ∠ 67.156°

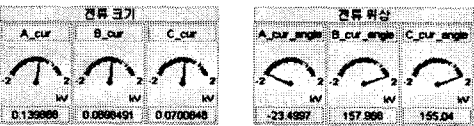
나. T상에 MVA의 부하가 연결된 경우

$$I_a = 149.96 \angle 334.6^\circ \text{ A} \quad (24)$$

$$I_b = 74.98 \angle 154.16^\circ \text{ A} \quad (25)$$

$$I_c = 74.98 \angle 154.16^\circ \text{ A} \quad (26)$$

계통의 모의와 비교하면 다음과 같다.



	간략 계산	EMTDC 계산
A상 전류	149.96 ∠ 334.16°	139.89 ∠ -23.50°
B상 전류	74.98 ∠ 154.16°	69.85 ∠ 157.97°
C상 전류	74.98 ∠ 154.16°	70.08 ∠ 155.04°

다. M상, T상에 20MVA의 평형부하가 연결된 경우

$$I_a = 149.96 \angle 334.16^\circ \text{ A} \quad (27)$$

$$I_b = 149.96 \angle 214.16^\circ \text{ A} \quad (28)$$

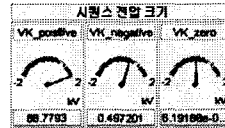
$$I_c = 149.96 \angle 94.16^\circ \text{ A} \quad (29)$$

계통의 모의와 비교하면 다음과 같다.

	간략 계산	EMTDC 계산
A상 전류	149.96 ∠ 334.16°	149.204 ∠ 0°
B상 전류	149.96 ∠ 214.16°	149.087 ∠ -119.589°
C상 전류	149.96 ∠ 94.16°	149.956 ∠ 120.358°

3.2.3 불평형 지수 계산

앞에서 설명한 것처럼 불평형 경험법칙의 식에 의하여 간략 계산된 것과 모의 결과를 비교하였다. 한전 변전소의 %Z가 $0.318 + j2.814$ [%]인 경우 3상 단락용량은 3531MVA가 된다. 그런데 M, T상의 부하 차이가 20MVA라면 불평형은 0.566%가 된다. 이에 대한 모의 결과는 다음과 같다.



$$\left| \frac{V_{Pcc}^{(2)}}{V_{Pcc}^{(1)}} \right| = \frac{0.497}{88.779} \times 100 = 0.560\% \quad (30)$$

4. 결 론

본 논문은 불평형 해석 방안으로 PSCAD/EMTDC를 이용하였다. 불평형 저감 대책 방안으로 스코트 결선의 변압기를 적용한 불평형 해석용 도시철도 시스템을 모델링하였다. 스코트 결선 변압기에 대해서 간단한 전기 회로 계산을 하고 이 계통에 대해서 M상과 T상에 20MVA의 부하가 각각 있고 없는 경우와 동시에 평형부하가 있는 경우로 나누고 또한 부하 역률을 1과 0.9로 하여 수치계산을 하였다. 이 값들을 PSCAD/EMTDC로 구현한 도시철도 시스템 모델과 비교 분석하였다. 모든 결과에 대해서 고의 동일한 결과를 나타냈다. 그러나 미미한 오차가 발생하였는데, 이것은 PSCAD/EMTDC에 스코트 변압기 모델이 존재하지 않아서, 단상 변압기를 이용하여 구현하였기에 발생한 오차로 판단된다. 또한, 차량 공급 전차선로 전압을 27.5kV로 간략계산을 한 것에 비해 모의는 송전선로 및 단권변압기 등에 의한 전압 강하가 발생하여 오차가 발생한 것으로 판단된다. 그러나 이 오차는 거의 무시할 수 있을 정도로 작고, 실제 계산 결과와 거의 동일한 결과를 얻었다.

[참 고 문 헌]

- [1] 김정철, "Scott 결선 변압기의 전압 전류 분포와 차동보호"
- [2] 한국철도기술연구원, "도시철도 전력품질 관련 국제 규격 및 해석방안 수립" 보고서, 2003년 9월
- [3] 한국고속철도건설공단, "고속전철 서울-대전간고조교차 전압 불평형, 역률 예측계산 및 대책설계" 보고서, 1999년 12월