

전기철도 급전시스템의 전압불평형 평가기법 연구

오광해 창상훈 최규형
 (한국철도기술연구원)

Methodology on Voltage Unbalance Evaluation in Electric Railway Systems

K.H. Oh S.H. Chang K.H. Choi
 (Korea Railroad Research Institute)

Abstract - This study presents a new method to estimate voltage unbalance practically. Adding the power simulation procedure to the conventional researches for the voltage unbalance, the proposed method can be practically used and easily applied to evaluation of voltage unbalance indices.

1. 서 론

본 절에서는 철도부하에 의한 전압불평형에 주안점을 두어 그 발생 원인을 규명하고 이를 평가하기 위한 방법을 다룬다.

먼저 전압불평형에 관한 종래의 연구에서 개발한 전압불평형 평가방법을 소개하고, 이 방법을 이용하여 철도용 주변압기의 결선방식에 따른 전압불평형을 산정하였다. 아울러 급전시뮬레이션 프로그램의 모듈을 결합한 실용적인 불평형평가모형을 제안하였다.

제한한 유도한 전압불평형 평가모형을 이용하여 경부고속철도 본선구간의 전압불평형 문제의 당면가능성을 평가하였다.

2. 전압불평형 평가모형

2.1 종래의 불평형 평가식

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 기계 기구에 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 가능한 한 적게 하도록 설계, 시공하고 유지되어야 한다. 이 조항은 전압불평형 경감조치를 요구한 것으로서 고시 제 51조에서는 교류식 전기철도 변전소의 변압기 결선방식에 따라 다음 식 (1)-(3)과 같이 계산식을 지정하고, 변전소의 수전점에 있어서 전압불평형율을 3%이하가 되도록 의무화하고 있다. 이때 전압불평형률은 정상전압에 대한 역상전압의 비 즉, V_1/V_2 100[%]으로 나타낸다.

변압기가 단상결선일 경우 :

$$K = \frac{P}{P_s} \times 100 = ZP \times 10^{-4} \quad (1)$$

변압기가 T 결선일 경우 :

$$K = \frac{P_A \sim P_B}{P_s} \times 100 = Z(P_A \sim P_B) \times 10^{-4} \quad (2)$$

변압기가 V 결선일 경우 :

$$K = \frac{a^2 P_A + P_B}{P_s} \times 100 = Z\sqrt{(P_A^2 - P_A P_B + P_B^2)} \times 10^4 \quad (3)$$

단, K : 전압불평형율 [%]

P : 전 급전구역에서의 연속2시간 kVA평균부하

P_s : 변전소 수전점의 3상 단락용량 [KVA]

Z : 변전소 수전점의 3상계통 %단락 임피던스

(10,000KVA기준)

P_A, P_B : 각각의 급전구역에서의 연속 2시간 평균 kVA 부하 [KVA]

2.2 급전시뮬레이션 모듈을 이용한 평가모형

앞서 4.2절에서 유도한 전압불평형 계산식을 이용하여 경부고속철도 본선구간의 전압불평형 문제의 당면가능성을 평가하였다. 경부고속철도의 전철변전소는 주변압기가 스카트결선이므로 전압불평형 계산에 식 (2)가 적용된다.

식 (2)는 결국 다음 (4)식의 의미를 갖는다.

$$\text{전압불평형}[\%] = \frac{M\text{상과 T상의 불평형부하}[\text{MVA}]}{\text{변전소 단락용량}[\text{MVA}]} \times 100 \quad (4)$$

전압불평형 평가에 있어서 차량의 실제운전상황을 고려하기 위해 급전시뮬레이션 프로그램으로부터 매순간의 M상부하와 T상부하를 산출하고 이를 위의 식 (4)에 대입한다. 그러면 매순간 순간의 전압불평형 프로파일을 얻을 수 있고 각종 규정에 의한 시간평균 불평형 지수로 환산할 수 있다.

본 연구에서는 급전시뮬레이션 프로그램 ENAS의 알고리즘을 이용하였다.

급전시뮬레이터 ENAS를 이용한 전압불평형 계산 과정을 다음 그림 1에 보인다.

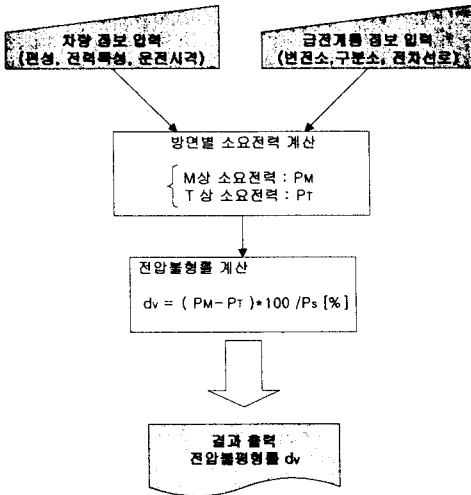


그림 1 전압불평형 평가모형

3. 사례연구

본 연구에서 제안한 평가모형을 이용하여 실제동(경부고속철도)에서의 전압불평형 당면가능성을 분석하였다.

3.1 종래의 방법에 의한 전압불평형 평가

현재, 경부고속철도에서는 전압불평형 규제를 10분 평균 1% 이하를 기준으로 설계/건설하고 있다. 식 (4)로부터 M상과 T상의 10분 평균 허용불평형은 다음 식 (5)로 환산할 수 있다.

$$\text{허용 부하불평형[MVA]} = \frac{\text{전압불평형 규제치}[\%]}{100} \times \text{변전소단락용량[MVA]} \quad (5)$$

식 (5)를 이용한 경부고속철도 변전소의 허용 부하불평형량 계산결과를 표 1에 보인다.

표 1 경부고속철도의 허용 부하불평형량

전철 변전소	한전 수전 변전소			허용 부하불평형 (10분 1%기준)
	이름	모선 정상임피던스	모선 단락용량	
안산	일동	0.193+j1.101	8,638 MVA	86.38 MVA
평택	추팔	0.546+j4.350	3,680 MVA	36.80 MVA
신청주	청원	0.072+j0.4748	13,398 MVA	133.98 MVA
옥천	옥천	0.17+j1.736	5740 MVA	57.40 MVA
김천	김천	0.429+j3.301	3004 MVA	30.04 MVA

표 4.3.1에서 경부고속철도 변전소 중에서 평택변전소와 김천변전소의 허용 부하불평형량이 가장 적어, 이 변전소가 전압불평형 문제의 당면 가능성이 가장 높은 것으로 평가되었다. 그 이유는 전압불평형이 철도변전소에 전력을 공급하는 한전변전소의 단락용량에 반비례하고, 한전 추팔변전소와 한전 김천변전소의 단

락용량에 가장 적기 때문이다. 한편, 경부고속철도의 최소 운행시격은 4분으로 방면별 상하선에 최대 4편성의 차량이 운행될 수 있다. 이러한 차량운행조건을 감안하여 경부고속철도 본선구간의 각 변전소별 차량 운행대수에 따른 전압불평형 계산결과를 표 2, 표 3에 보인다. 이때 각 차량은 최대출력으로 운전하고 있는 경우를 상정하였다.

표 2 차량운행 대수에 따른 전압불평형(평택SS)

T 상 \ M 상		M상의 차량대수			
		1	2	3	4
T 상의 차량대수	1	0.00	0.48	0.95	1.43
	2	0.48	0.00	0.48	0.95
	3	0.95	0.48	0.00	0.48
	4	1.43	0.95	0.48	0.00

한전 단락용량[MVA] 3,680 차량 최대출력[Mw] 17.5

표 3 차량운행 대수에 따른 전압불평형(김천SS)

T 상 \ M 상		M상의 차량대수			
		1	2	3	4
T 상의 차량대수	1	0.00	0.58	1.17	1.75
	2	0.58	0.00	0.58	1.17
	3	1.17	0.58	0.00	0.58
	4	1.75	1.17	0.58	0.00

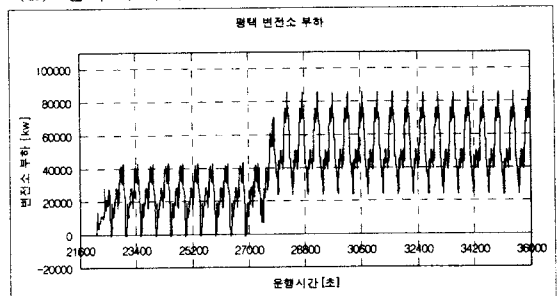
한전 단락용량[MVA] 3,004 차량 최대출력[Mw] 17.5

표 2 및 표 3에서 전압불평형 계산조건을 최악의 경우로 상정하면 평택변전소와 김천변전소는 현행 규제치인 1.0%를 넘고 있어, 실제 운전상황에서의 전압불평형평가가 요구된다. 이에 관한 사례연구는 다음 절에서 다룬다.

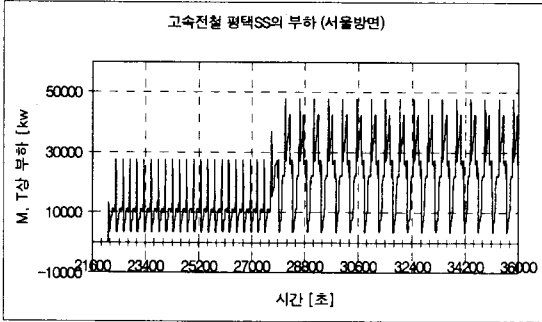
3.2 제안한 방법에 의한 전압불평형 평가

4분 운행시격 조건에서 ENAS를 실행하여 각 변전소의 M상부하와 T상부하를 계산하고 이를 다시 식 (4)에 대입하여 전압불평형을 평가하였다. 먼저, ENAS의 계산결과인 변전소별 전체부하와 M상부하 및 T상부하의 패턴을 그림 3, 그림 4에 보인다.

(a) 전체 부하패턴



(b) 서울방면의 부하패턴



(c) 부산방면의 부하패턴

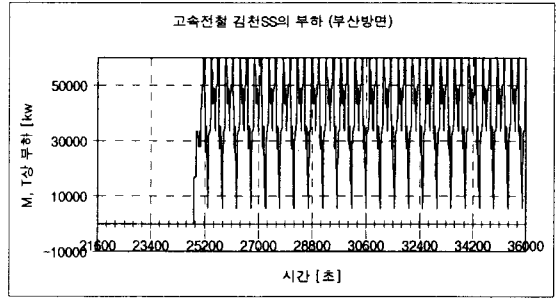


그림 4 김천변전소의 부하패턴

(c) 부산방면의 부하패턴

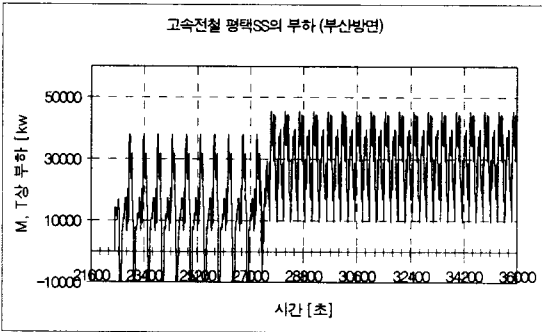
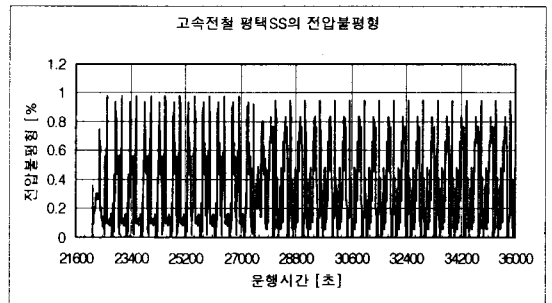


그림 3 평택변전소의 부하패턴

그림 3 및 그림 4의 변전소별 부하패턴 자료를 식 (4)에 대입하여 각 변전소에서 전압불평형을 계산하였다. 변전소별 전압불평형 평가 결과를 그림 5 및 그림 6에 보인다.

(a) 순시 전압불평형률



(b) 10분평균 전압불평형률

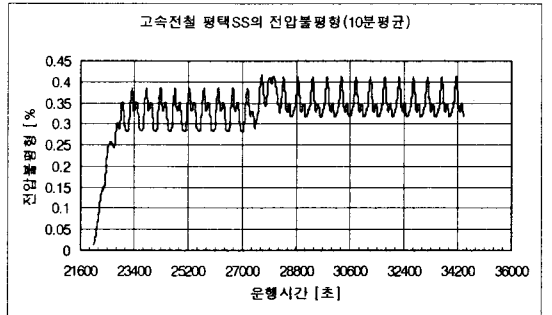
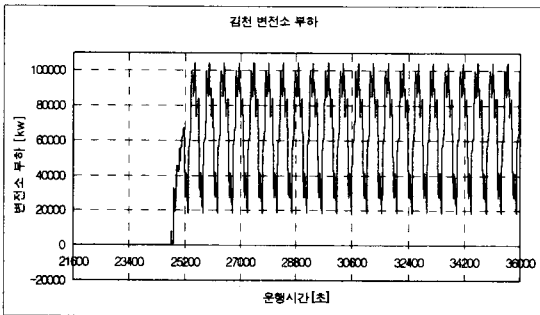
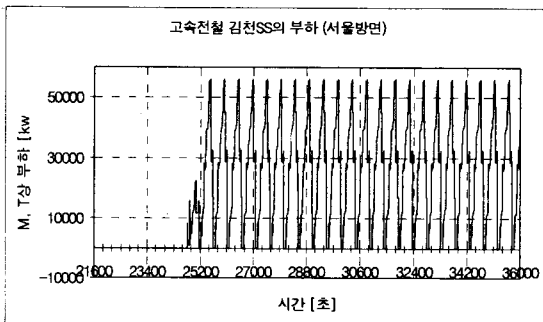


그림 5 평택변전소에서의 전압불평형(06:00-10:00)

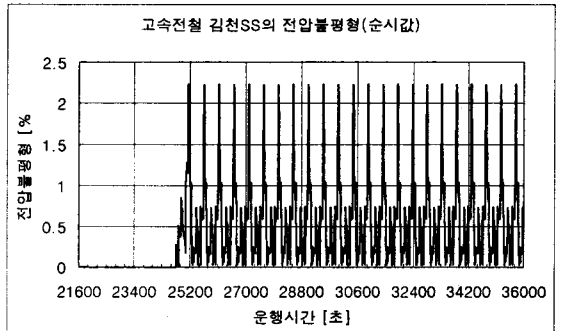
(a) 전체 부하패턴



(b) 서울방면의 부하패턴



(a) 순시 전압불평형률



(b) 10분평균 전압불평형률

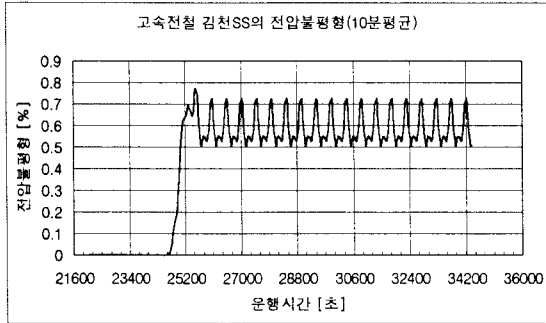


그림 6 김천변전소에서 전압불평형 (06:00-10:00)

그림 5 및 그림 6의 결과로부터 경부고속철도의 모든 변전소에서 전압불평형은 문제되지 않는 것으로 평가되었다. 단, 김천변전소는 전압불평형이 최대 0.77%로 정상운행조건에서는 문제되지 않으나, 연장 급전 등의 경우에는 이에 대한 별도의 대책이 필요할 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 급전시뮬레이터를 도입한 전기철도 전압불평형 계산모형을 검토하여 그 알고리즘을 제안하였다. 실 계통에 대한 시뮬레이션을 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 급전시뮬레이터를 이용하여 불평형율을 산정하므로 기존의 방법에서 고려할 수 없었던 운행상황을 정확히 반영하여 불평형율을 선정할 수 있었다.
- 2) 종래의 방법에서 사용하는 최악의 상황은 지나치게 비관적인 결과를 얻을 수도 있음을 확인할 수 있었다.
- 3) 실제 운영시간을 기초로한 전기철도 급전시스템의 불평형 지수(순시지수 및 10분 평균지수 등)를 다각적으로 산출함으로써, 제안한 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", 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