

단상 배전 STATCOM을 이용한 전기철도시스템의 전압강하 및 전력품질 향상

*김준상 · *김진오 · *이준경 · **정현수
*한양대학교 전기공학과, **대림대학

Compensation of voltage drop and improvement of power quality at AC railroad system with single-phase distributed STATCOM

*Jun Sang Kim · *Jin O Kim · *Jun Kyung Lee · **Hun Soo Jung
*Dept. of EE, Hanyang University, **Daelim College

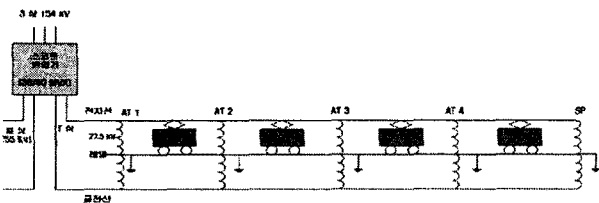
Abstract - An AC electrical railroad system has rapidly changing dynamic single-phase load, and at a feeding substation, three-phase electric power is transformed to the paired directional single-phase electric power. There is a great difference in electrical phenomenon between the load of AC electrical railroad system and that of general power system. Electric characteristics of AC electrical railroad's trainload are changed continuously according to the traction, operating characteristic, operating schedule, track slope, etc. Because of the long feeding distance of the dynamic trainload, power quality problems such as voltage drop, voltage imbalance and harmonic distortion may also occur to AC electrical railroad system. These problems affect not only power system stability, but also power quality deterioration in AC electrical railroad system. The dynamic simulation model of AC electrical railroad system presented by PSCAD/EMTDC is modeled in this paper, and then, it is analyzed voltage drop and power quality for AC electrical railroad system both with single-phase distributed STATCOM(Static Synchronous Compensator) installed at SP(Sectioning Post) and without.

1. 서 론

전기철도 시스템의 전력 품질 저하에 대한 보상으로 SVC(Static Var Compensator), Shunt Active Filter, DVR(Dynamic Voltage Restorer) 등의 다양한 연구가 진행 중이나 본 논문에서는 이러한 기술들 보다 한 단계 진일보한 Single-phase Distributed STATCOM(Static Synchronous Compensator)를 제안한다[1~8]. 전기철도 시스템의 과도상태 평가를 위해 PSCAD/EMTDC를 이용한 평가 모델을 제시하고, 전력 품질에 있어 가장 중요한 전압강하 및 고조파 분석에 주안점을 두어 전기철도 급전 시스템의 말단에 단상 D-STATCOM을 설치하여 전기철도 부하가 운행될 경우, 고장으로 인한 경우 등에 대해 단상 D-STATCOM 적용이 전기철도 시스템 전압강하 보상 및 전력 품질 향상에 어떠한 영향을 미치는지를 평가 하였다.

2. 전기철도 급전 시스템 모델링

전기철도 급전 시스템은 AT(단권변압기) 급전 시스템과 BT(흡상 변압기) 급전 시스템으로 나누어지는데, 현재 전기철도 급전시스템은 대부분 그림 1과 같은 AT 급전시스템이 적용되고 있다[9-10].



〈그림 1〉 전기철도 급전 시스템 모델링 개략도

2.1 SCOTT 변압기

스코트 변압기는 154 kV의 3상 전력을 공급받아 단상 55 kV의 출력으로 변환하는데, 2차측에 M상(Main Transformer)과 T상(Teaser Transformer)으로 나누어 출력되고 각각 55 kV의 출력값을 가진다. 임피던스는 식 (1)에 의해 구할 수 있다.

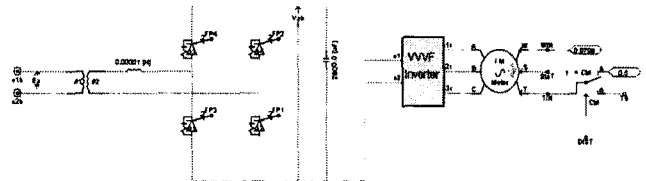
$$Z_{TR} = \%Z_{TR} \frac{10 \cdot V^2}{P_{TR}/2} [\Omega] \quad (1)$$

2.2 전차선로

본 논문에서는 2006년 12월 상용화를 눈앞에 두고 있는 경부선 옥천 S/S에서 사곡 S/S(Substation)까지의 101.3 [km] 구간을 PSCAD/EMTDC 모델링 하였다.

2.3 Trainload

본 논문에서 제시된 열차 부하는 신형 전기 기관차(Locomotive)인 8200대형을 모델링 하였다. 아래 그림은 열차부하의 모델을 나타낸 것이다.



〈그림 2〉 PSCAD/EMTDC를 이용하여 모델링된 Trainload

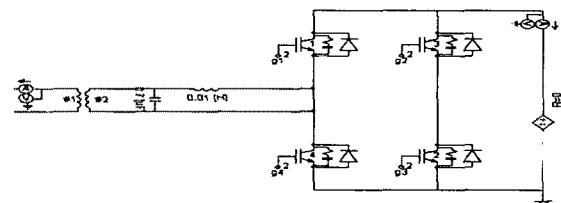
2.4 단권변압기(AT)

단권변압기는 전철 변전소, 급전구분소(SP), 보조 급전구분소(SSP) 등에 설치되게 되며, 용량은 자기용량과 부하용량을 사용하는데, 자기용량과 부하용량의 관계식은 다음과 같다.

$$\frac{\text{자기용량}}{\text{부하용량}} = \frac{(V_2 - V_1)I_1}{V_2 I_2} \quad (2)$$

3. PSCAD/EMTDC Simulation 결과 및 분석

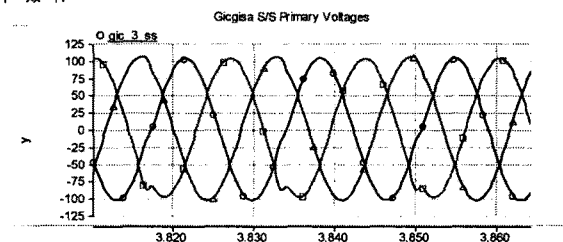
전기철도 급전시스템은 일반 전력 계통과 달리 단상 계통으로 단상 D-STATCOM을 사용 하여야 한다. 단상 D-STATCOM은 인버터, 결합용 변압기, DC Capacitor, 제어회로, 펄스발생기 등으로 구성되어 있다. 아래 그림은 PSCAD/EMTDC에 의해 모델링된 단상 D-STATCOM 모델이다.



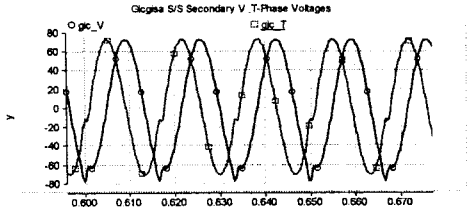
〈그림 3〉 PSCAD/EMTDC를 이용하여 모델링된 D-STATCOM

3.1 Case 1 : 정상운전시 직지사 S/S 51.3 km 구간에 8대의 차량이 운행될 경우 (D-STATCOM이 설치되지 않은 경우)

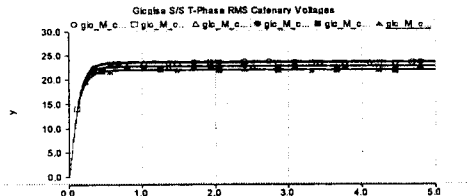
결과는 그림 4에서 6에 나타나있다. 열차 부하가 전기철도 급전 시스템에 투입이 되면 열차 부하로 인해 계통에 고조파의 영향이 있고, 전압 불평형과 전압강하가 이루어짐이 현저하게 나타나고 있다. 전압강하율과 스코트 변압기 1차측 THD는 표 1에 나타내었다. 그림 6은 직지사 S/S T-상의 전차선 RMS 전압을 나타내었는데 27.5 kV의 전압이 상당히 감소했음을 볼 수 있다.



〈그림4〉 열차 8대가 정상 운행시 직지사 S/S의 1차측 전압 파형 (D-STATCOM이 설치되지 않은 경우)



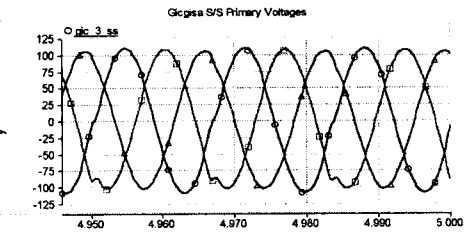
〈그림5〉 열차 8대가 정상 운행시 직지사 S/S의 2차측 전압 파형



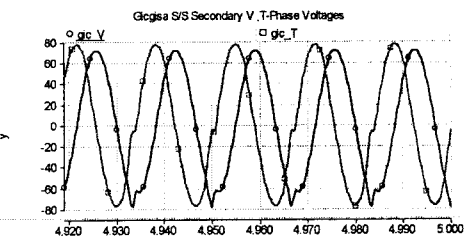
〈그림6〉 열차 8대가 정상 운행시 직지사 S/S의 T-상 전차선 RMS 전압 파형

3.2 Case 2 : 정상운전시 직지사 S/S 51.3 km 구간에 8대의 차량이 운행될 경우 (D-STATCOM이 T-phase에 설치된 경우)

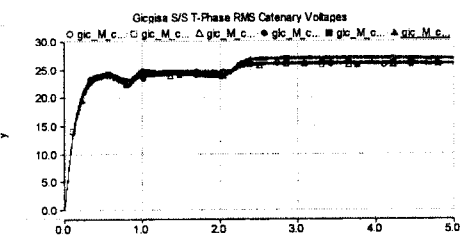
Case 1의 경우에 대하여 단상 D-STATCOM을 사용했을 경우의 시뮬레이션 결과를 그림 7에서 9에 나타내었다. 그림에서 보면 열차부하의 운행에 의해 25 kV 이하로 떨어진 집전전압이 거의 정상치인 27.5 kV까지 보상이 되었음을 볼 수 있다. 그러나 고조파 왜곡의 정도를 보여주는 THD(Total Harmonic Distortion)가 2.711에서 3.217로 미세한 증가를 나타내고 있음을 볼 수 있는데, 이는 D-STATCOM의 전력소자들의 고속 스위칭으로 인한 결과로 예측할 수 있다. 고조파에 대한 결과 파형과 내용은 그림9와 표 1에 나타내었다.



〈그림7〉 열차 8대가 정상 운행시 직지사 S/S의 1차측 전압 파형 (D-STATCOM이 T-phase에 설치된 경우)



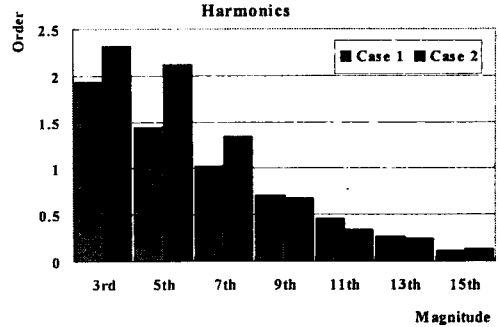
〈그림8〉 열차 8대가 정상 운행시 직지사 S/S의 2차측 전압 파형 (D-STATCOM이 T-phase에 설치된 경우)



〈그림9〉 열차 8대가 운행시 직지사 S/S의 T-상 전차선 RMS 전압 파형 (D-STATCOM이 T-phase에 설치된 경우)

〈표 1〉 Case 1과 Case 2의 전압강하율과 THD 비교

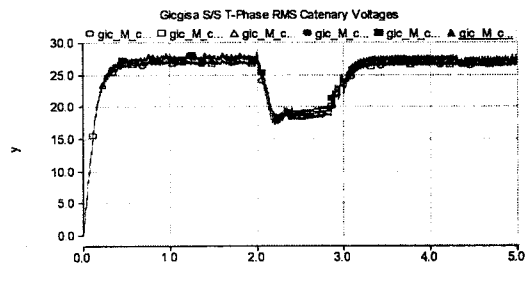
	전압강하율 [%]		Scott 변압기 1차측 THD [%]
	V Phase	T Phase	
Case 1	8.16	7.41	2.711
Case 2	7.54	0.34	3.217



〈그림10〉 Case 1과 Case 2의 고조파 수치 비교

3.3 Case 3 : 직지사 S/S 51.3 km 구간에 fault(2~3 sec)가 발생했을 경우 (D-STATCOM이 T-phase에 설치된 경우)

시뮬레이션 구간에 2초에서 3초 사이 fault를 주었을 경우 단상 D-STATCOM 보상이 얼마만큼 이루어지는가에 대한 실험을 해 본 결과, 보상으로 인하여 fault시에 최소전압인 19 kV를 상회할 수 있게 계통의 전압을 유지시킴을 확인할 수 있었다. 이는 연장급전을 하지 않는 상태에서 fault를 가정했기 때문에 최소 집전 전압을 유지할 수 있다는 것은 열차 운행에 있어서 큰 의미가 있다 하겠다. 그림 11은 그 결과를 보여준다.



〈그림11〉 fault(2~3 sec)가 발생했을 경우 직지사 S/S T-상 전차선 RMS 전압 파형 (D-STATCOM이 T-phase에 설치된 경우)

5. 결 론

본 논문에서는 전기철도 급전 시스템을 실제 급전시스템과 유사하게 제약조건을 두고 모델링하여 열차 부하 운행시와 급전 시스템에 fault를 가했을 경우 및 단상 D-STATCOM 보상의 경우를 PSCAD/EMTDC를 통하여 시뮬레이션 해 보았다. 그 결과 열차 부하로 인한 전기철도 급전 시스템의 전압강하를 크게 줄여 정상전압인 27.5 kV까지 보상함을 확인할 수 있었으며, 계통 사고시 최저집전 전압인 19 kV를 상회하는 전압을 유지시킴을 확인 하였다. 또한 전기철도 급전 시스템과 상위 송전 계통의 불평형을 감소시킬 수 있었다. 그러나 열차 부하의 전력 소자들에 의한 고속의 스위칭으로 인한 고조파 왜곡의 정도를 나타내는 THD가 정상 운전의 경우에 비하여 0.506 %로 미세하게 증가함을 볼 수 있었다. 이는 5 % 미만으로 아주 미세하기는 하나 전력품질을 저하시킬 수 있는 원인이므로 SHE(Selective Harmonics Eliminated) - PWM 등을 이용한 연구가 추가 진행이 되어 고조파를 경감시킬 수 있도록 해야 할 것이다.

결과적으로 이 논문에서 제안된 단상 D-STATCOM은 전압강하를 크게 보상하였고 낮은 출력 전류 고조파들과 빠른 응답특성으로 3상 불평형 부하의 평형 보상에 적당함을 증명하였다.

[참 고 문 헌]

- Keiji KAWAHARA, "Compensation of Voltage Drop Using Static Var Compensator at Sectioning Post on AC Electric Railway System", PCC-Nagaoka'97, pp.955-960, 1997.
- P. C. Tan, "Voltage Form Factor Control and Reactive Power Compensation in A 25kV Electrified Railway System Using A Shunt Active Filter Based On Voltage Detection", IEEE PEDS 2001 INDONESIA, pp.605-610, 2001.
- Zhu Yongqing, "Balancing Compensation of Unbalanced Based on Single-Phase STATCOM", Tsinghua University Beijing.
- Walmir Freitas, "Impacts of AC Generators and DSTATCOM Devices on the Dynamic Performance of Distribution Systems", IEEE Transactions of power delivery, VOL. 20, pp. 1493-1501, 2005.
- Mohan, "Power Electronics", pp. 211-225, 2003.
- 정현수, "전기철도 AT 급전시스템에서의 TSC-SVC를 이용한 전압강하 보상", Journal of KIIEE, VOL. 16, pp. 29-36, 2002.
- 이승혁, "STATCOM을 이용한 교류 전기철도 급전시스템의 전압강하 보상", 조명, 전기설비학회논문지 제 16권 제5호, pp. 53-60, 2002.
- 최준호, "교류철도급전계통에 전력품질보상장치 적용에 관한 연구", Journal of KIIEE, VOL. 18, NO.6, pp. 220-229, 2004.
- 한국철도시설공단, "경부선 조치원 대구간 송. 변전설비 실시 설계 보고서", 2005
- 철도청 열차제회과, "전기기관차 편법", 2004.