

전기철도 급전시스템의 순시전압강하 보상을 위한 단상 배전 STATCOM의 적용

(Compensation of Instantaneous Voltage Drop at AC Railroad System with Single-Phase Distributed STATCOM)

김준상* · 이승혁 · 김진오 · 이준경 · 정현수

(Jun-Sang Kim · Seung-Hyuk Lee · Jin-O Kim · Jun-Kyung Lee · Hyun-Soo Jung)

요 약

AC 전기철도 시스템은 동적 단상부하가 빠르게 변화하고, 전철 급전변전소에서 3상 전력을 단상 전력으로 변환한다. 이것은 일반 배전 시스템과 비교해서 AC 전기철도 시스템의 전기적인 현상들이 다르다는 것을 나타낸다. AC 전기철도 열차부하의 전기적인 특성은 동적부하의 운영과 운행 스케줄, 트랙의 구배 등에 따라 연속적인 변화를 받고 있다. 이와 같은 열차부하의 운영에 따른 급전거리가 길어 전압강하, 전압 불평형 및 고조파 왜곡현상 등의 전력 품질 저하요인이 발생하게 된다. 이러한 문제점은 상위계통인 송전시스템의 안정도에 악영향을 줄뿐만 아니라, 전기철도 급전시스템의 전력품질 저하, 전기철도차량의 통신장비, 운행 및 수송량 제한에도 영향을 미치게 된다. 따라서 본 논문에서는 전기철도시스템의 과도상태 평가를 위해 PSCAD/EMTDC를 이용한 평가모델을 제시하고, 전압강하에 주안점을 두어, 전기철도 급전시스템의 말단 분기점(Sectioning Post)에 정지형 무효전력 보상장치인 단상 배전 STATCOM(Single-phase Static Synchronous Compensator)을 설치하여 그 작용에 따른 전압강하 보상을 평가하였다.

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 for AC electrical railroad system both with single-phase distributed STATCOM(Static Synchronous Compensator) installed at SP(Sectioning Post) and without.

Key Words : Single-phase distributed-STATCOM, Voltage drop, Railroad feeding system

* 주저자 : 한국철도공사, 한양대학교 전력시스템 연구실

Tel : 02-2220-0347, Fax : 02-2297-1569, E-mail : junsangk@yahoo.co.kr

접수일자 : 2006년 8월 1일, 1차심사 : 2006년 8월 3일, 2차심사 : 2006년 8월 29일, 심사완료 : 2006년 9월 5일

1. 서 론

현대사회에 접어들어 고도의 산업화를 이루면서 전력 반도체 기술이 발달하고, 아울러 산업화에 따른 환경 문제들이 부각됨에 따라 철도는 전기철도로의 변화를 꾀하고 있다. 이는 기존 시스템의 소음, 공해 문제를 해결해 줄 뿐만 아니라 스피드, 승차감 등을 향상시켜 최고의 고객 서비스를 실현시킬 수 있기 때문이다. 우리나라도 2004년 한국형 고속철도인 KTX의 개통을 시작으로, 그동안 중앙선의 산업물류 운반을 주축 했던 8000대 기존 전기철도 시스템의 기능을 향상시켜 기존선에서도 경부선, 충북선, 호남선 등으로 전기철도 시스템을 확대해 나가고 있으며 차량의 시속 또한 150[km/H]로 향상시켜 대량/친환경/고속화의 전국적인 상용화를 눈앞에 두고 있다. 그러나 전기철도 시스템은 이러한 여러 이점에도 불구하고 일반 배전 시스템과는 달리 대용량 동적 부하가 운영되고 있고, 이와 같은 동적 부하 운영에 따라 급전 거리가 길어 전압강하, 전압 불평형 및 고조파 왜곡 현상 등의 전력 품질 저하 요인이 발생하게 된다. 이러한 문제점은 상위 계통인 송전 시스템의 안정도에 악 영향을 줄뿐만 아니라 전기철도 급전 시스템의 전력 품질저하, 전기철도 차량의 통신장비, 운행 및 수송량 제한에도 영향을 미치게 된다. 이러한 전력 품질 저하에 대한 보상으로 SVC(Static Compensator), Shunt Active Filter, DVR(Dynamic Voltage Restorer) 등의 다양한 연구가 진행 중이나 본 논문에서는 이러한 기기들 보다 한 단계 진일보한 단상(Single-phase) 배전 STATCOM(Distributed-Static Synchronous Compensator)을 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 말단 분기점(SP: Sectioning Post)에 정지형 무효전력 보상 장치인 단상 D-STATCOM을 설치하여 전기철도 부하의 기동 및 증가되어 운행될 경우, 고장으로 인한 연장급전 경우에 대해 단상 D-STATCOM 적용의 전기철도 시스템 전압강하 보상 및 전력 품질 향상을 평가하였다.

2. 전기철도 급전 시스템 모델링

전기철도 급전 시스템은 AT(Auto-Transformer: 단권변압기) 급전 시스템과 BT(Booster-Transformer: 흡상 변압기) 급전 시스템으로 나누어지는데, 본 논문에서는 AT 급전 시스템을 모델링 하였다. AT 급전 방식은 급전선과 전차선 사이에 약 10[Km] 간격으로 권선비 1 : 1의 단권변압기를 병렬로 설치하여 변압기 권선의 중성점을 레일에 접속하는 방식으로 BT 급전 방식에 비해 고속 집전이 용이하며 급전 전압이 중전의 2배로 할 수 있어 전압강하가 적고 변전소 간격을 멀리할 수 있다(40~100[Km]). 대용량의 열차 부하에서도 전압변동, 전압 불평형이 적어 안정된 전력공급이 가능하고 통신선로의 유도 장애도 적어 전기철도 시스템의 표준방식일 뿐만 아니라 KTX에서도 이 방식을 채택하고 있다[9-10].

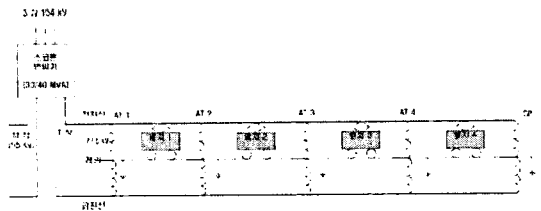


그림 1. 전기철도 급전 시스템 모델링 개략도
Fig. 1. Electric railroad feeding system

2.1 SCOTT 변압기

철도 급전 주변압기는 3상의 교류 전력을 단상으로 변환하는 스코트 변압기를 사용한다. 스코트 변압기는 부하 불평형률이 적을 뿐 아니라 이용률이 좋은 장점을 가지고 있다. 154[kV]의 3상 전력을 공급받아 단상 55[kV]의 출력으로 변환하는데, 2차측에 M상(Main Transformer)과 T상(Teaser Transformer)으로 나누어 출력되고 각각 55[kV]의 출력값을 가진다. 스코트 변압기는 전철 변전소(S/S)에 30/40[MVA]용량이 각 두 대씩 설치되고 임피던스는 다음 식에 의해 구해진다[9-11].

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

여기서, Z_{TR} : 스코트 변압기의 M상 또는 T상 임피던스 [Ω]
 $\%Z_{TR}$: 스코트 변압기의 %임피던스[%]
 V : 기준 전압(급전 전압)[KV]
 P_{TR} : 스코트 변압기의 3상 용량[KVA]

2.2 전차선로

단권변압기(AT) 급전방식의 전차선로는 일반적으로 상·하선별로 급전선, 전차선, 조가선, 가공보호선, 매설 접지선으로 구성되어 있다. 이들 전차선로는 상·하선별로 전차선과 조가선이 일정 간격의 드로퍼(Dropper)에 의해 연결되어 있고, 상·하선 레일, 가공보호선, 매설 접지선이 서로 연결되어 있다.

2.2.1 임피던스 계산

전차선로의 단위 길이 당 자기 임피던스는 내부 임피던스와 외부 자기 임피던스의 합으로 구해진다[9].

$$Z'_{ii} = Z_{Aii} + Z_{Eii} \quad (2)$$

여기서, Z_{Aii} : 도체의 단위 길이당 내부 임피던스
 Z_{Eii} : 대기 귀환을 고려한 도체의 단위 길이 당 외부 임피던스

임피던스 계산에 있어 가정은 다음과 같다.

- 전류는 도체 단면적에 균일하게 분포(표피효과 무시)
- 도체는 비자기 이거나 상대 투과율(μ_r)이 이 미 주어짐

내부 임피던스는 식 (3)과 같이 주어진다.

$$Z'_{Aii} = R'_i + jX'_i \quad (3)$$

여기서, R'_i : 도체 i의 단위 길이 당 저항

X'_i : $2 \times 10^{-4} w \frac{1}{4}$ 값을 가지는 도체 I의 내부 리액턴스

외부 임피던스는 Carson 공식에 의해서 다음 식 (4)와 같이 주어진다[9].

$$Z'_{Eii} = \Delta R'_{ii} + j(w \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{2h_i}{r_i} + \Delta X'_{ii}) \quad (4)$$

따라서 전체 자기 임피던스는 식 (5)와 같이 구해진다.

$$Z'_{ii} = (R'_i + \Delta R'_{ii}) + j(w \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{2h_i}{r_i} + X'_i + \Delta X'_{ii}) \quad (5)$$

여기서, h_i : 도체 i의 지표면에서의 평균 높이[m]

r_i : 도체 i의 반경[m]

w : Hz 단위의 주파수를 가진 $2\pi f$

$\Delta R''$, $\Delta X''$: 대기 귀환 효과를 가진 Correction term [Ω/m]

μ_0 : 자유공간의 투자율

2.2.2 전차선로 모델링

본 논문에서는 2006년 12월 상용화를 눈앞에 두고 있는 경부선 옥천 S/S에서 사곡 S/S까지의 101.3 [Km] 구간을 PSCAD/EMTDC 모델링 하였으며, 선로 등가 파라미터는 표 1과 같다.

표 1. 철도 선로 등가 파라미터(AT 급전 계통)
 Table 1. Electric railroad feeding line equivalence parameter (AT feeding system)

급전선 자기임피던스(Z_f)	0.2036+j0.8847
전차선 자기임피던스(Z_l)	0.1192+j0.7522
레일 자기임피던스(Z_r)	0.1618+j0.6709
급전선-전차선 상호임피던스(Z_{fl})	0.051+j0.361
급전선-레일 상호임피던스(Z_{fr})	0.053+j0.373
전차선-레일 상호임피던스(Z_{lr})	0.058+j0.369

2.3 Trainload

본 논문에서 제시된 열차 부하는 신형 전기 기관차(locomotive)인 8200대형을 모델링하였다. 가선에서 팬터그래프를 통하여 집전된 전기는 주회로 차단기를 경유하여 주변압기의 1차 부상에 공칭 25[kV]의 전압이 인가되어 변압기 2차측에 설치된 4개의 견인 권선과 2개의 보조권선에 2차 전압을 유기하여 해당 기기에 전원을 공급하게 되어 있다. 견인 권선의 경우 변압기의 2차 전압 1232[V]가 예비충전 장치를 통하여 4개 초퍼(Chopper)에 공급되면 DC 링크단의 전압은 약 DC 2400~2600[V]로 유지되고, 인버터는 제어기의 지령에 따라 주전동기에 전원을 공급하여 동력이 발생되고, 발생된 동력을 적절한 치차비(5.88)를 갖는 치차를 거쳐서 동륜에 전달되게 되는 것이다[9].

그림 2는 전기철도차량부하를 PSCAD/EMTDC 모델로 구현한 것을 나타낸 것이다.

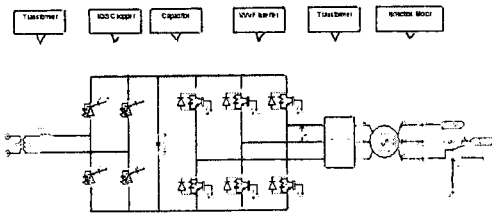


그림 2. PSCAD/EMTDC를 이용하여 모델링 된 Trainload model

Fig. 2. Trainload modeled by PSCAD/EMTDC

표 2. 열차부하 제원

Table 2. Trainload parameter

구분	형식	EL 8200		
공급 전압	27.5[kV]	주파수	60[hz]	
연속 최대 출력	5,900[kW]			
	- 최대견인	5,200		
	- 보조	600		
속도	150[Km/h]			
중량	88[ton]	최대출발 견인력	320 [kN]	
속도 제어방식	VVVF, 인버터 제어(PWM)			

2.4 단권변압기(AT)

단권변압기는 전차선로 전압강하 방지 및 궤도전류 귀선을 위한 목적으로 전차선과 급전선 사이에 권수비 1 : 1의 변압기를 삽입하여 권선과 레일을 접속시킨 방식을 말한다. 단권변압기는 전철 변전소, 급전구분소(SP), 보조 급전구분소(SSP) 등에 설치되게 되며, 용량은 자기용량과 부하용량을 사용하는데, 자기 용량은 직렬권선과 또는 분로권선의 용량을 말하며 부하용량은 AT를 통하여 공급하는 부하의 크기를 말하고 2차 단자전압과 2차 전류의 곱으로 나타낸다. 자기용량과 부하용량의 관계식은 식 (6)과 같다.

$$\frac{\text{자기용량}}{\text{부하용량}} = \frac{(V_2 - V_1)I_1}{V_2 I_2} \quad (6)$$

아래 표 3은 옥천, 직지사, 사곡 전철 변전소에 설치된 단권변압기의 임피던스 및 용량에 관한 파라미터 값들을 나타내고 있다.

표 3. AT parameter
Table 3. AT parameter

	옥천 S/S	Z_{AT}	0.03206+j0.44885	7500[KVA]
AT	직지사 S/S	Z_{AT}	0.03206+j0.44885	$Z_{AT} = 0.45[\Omega]$
	사곡 S/S	Z_{AT}	0.03206+j0.44885	X/R = 14

3. STATCOM을 사용한 전압 보상

단상 배전 STATCOM은 한 개의 전압원 인버터가 직류 캐패시터와 병렬 연결된 형태를 띠고 있으며 무효 전력을 계통에 공급하거나 흡수하는 역할을 한다. D-STATCOM은 SVC 등과 같은 전압 보상기에 비해 설치면적이 작을 뿐만 아니라 연속제어와 응답속도가 빠르고 낮은 계통에서도 무효전력 공급량을 일정하게 유지시킬 수 있다는 장점 등을 가지고 있다.

3.1 급전구분소(SP)에 단상 배전 STATCOM을 사용한 전압 보상의 원리

전압강하는 급전 회로의 임피던스($Z=R+jX$)를 통한 부하전류(I_L) 때문에 부하점(Load point)에서 일어난다. 이러한 전압강하를 수학적으로 표현해 보면 식 (7)과 (8)처럼 정의된다.

$$\epsilon = \frac{V_0 - V_R}{V_0} \times 100 \quad (7)$$

여기서, V_0 : 무부하시 Load point의 전압
 V_R : 부하전류(I_L)가 흐르고 있을 때의 전압

$$\begin{aligned} \epsilon &= \frac{I_L \times Z}{V_0} \times \cos(\theta - \gamma) \times 100 \\ &= \frac{I_L \times Z}{V_0} \times (\cos \gamma \cos \theta + \sin \gamma \sin \theta) \times 100 \\ &= \frac{1}{V_0^2} \times (P_L R + Q_L X) \times 100 \end{aligned} \quad (8)$$

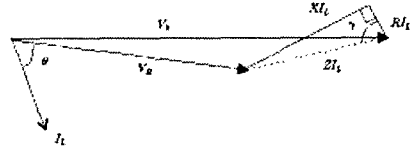
여기서, $Z = \sqrt{R^2 + X^2}$
 $\gamma = \tan^{-1} \frac{X}{R}$
 $P_L = V_0 I_L \cos \theta$
 $Q_L = V_0 I_L \sin \theta$

여기서 R 과 X 는 급전 계통 회로에 의해 결정되어 지고 P_L 은 부하에 의해 결정되어 진다. 따라서 우리는 전압강하를 막기 위해 무효전력 Q_L 을 제어할 수 있다. SP에 단상 배전 STATCOM을 설치하여 무효전력 Q_S 를 발생시킬 때, 식 (9)와 (10)으로 정리할 수 있다.

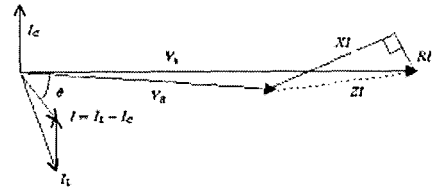
$$\epsilon = \frac{1}{V_0^2} \times [P_L R + (Q_L - Q_S) X] \times 100 \quad (9)$$

$$Q_S = Q_L + \frac{R}{X} P_L \quad (10)$$

단상 D-STATCOM이 무효전력 Q_S 를 발생시킬 때 이론적으로 load point에서 전압강하는 영(0)이 된다.



(a) STATCOM 보상 전 벡터도



(b) STATCOM 보상 후 벡터도

그림 3. 단상 D-STATCOM을 사용했을 때 전압 보상의 벡터도
 Fig. 3. Voltage drop vector diagram with D-STATCOM

그림 3은 D-SATATCOM을 사용하지 않았을 경우와 사용했을 경우의 벡터도를 보여주고 있다. 그림에서 보는 것처럼 D-STATCOM을 사용했을 경우가 그렇지 않았을 경우에 비해 전압보상에 상당한 효과를 나타내고 있음을 볼 수 있다. 또한 그림 4는 D-STA TCOM을 급전구분소(SP)에 설치했을 경우의 급전 시스템을 보여주고 있다.

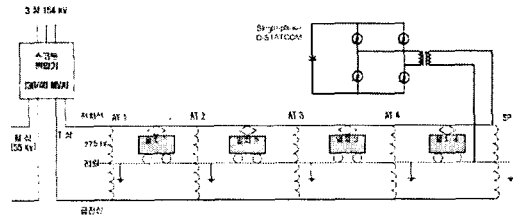


그림 4. 단상 D-STATCOM을 SP에 설치한 AT 급전 시스템
 Fig. 4. AT feeding system using single-phase D-STATCOM at SP

3.2 단상 배전 STATCOM의 PSCAD/EMTDC 구현 모델

철도 급전 계통은 일반 전력 계통과 달리 단상 계통으로 단상 D-STATCOM을 사용하여야 한다.

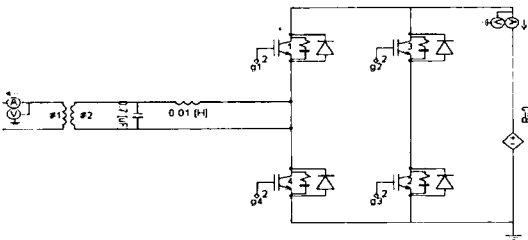


그림 5. PSCAD/EMTDC를 이용하여 모델링된 D-STATCOM
Fig. 5. Single-phase D-STATCOM modeled by PSCAD/EMTDC

단상 D-STATCOM은 인버터, 결합용 변압기, DC Capacitor, 제어회로, 펄스발생기 등으로 구성되어 있다. 그림 5는 PSCAD/EMTDC에 의해 모델링된 단상 D-STATCOM 모델이다. 또한 그림 6은 단상 D-STATCOM의 전압제어기를 나타낸다.

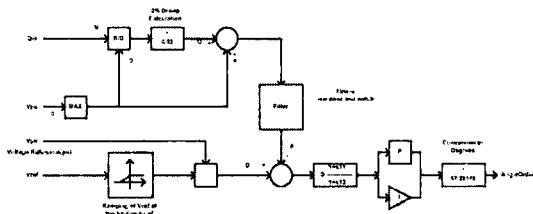


그림 6. PSCAD/EMTDC에 의해 모델링된 D-STATCOM 전압 제어기
Fig. 6. D-STATCOM voltage controller modeled by PSCAD/EMTDC

D-STATCOM 전압제어는 선로에서 센싱된 무효 전력 Q_m 이 Divider와 3% Droop Calculation을 통하여 출력된 신호와 선로에서 센싱된 전압의 크기와 비교하여 생성된 신호를 Filter를 통해 필터링 해주고 그 값을 전압 지령치인 V_{ref} 와 비교한 후 PI 제어기를 거쳐 Angle-order를 형성한다. 이렇게 형성

된 각을 이용하여 D-STATCOM의 Inverter 출력전압을 형성하게 되고 무효전력을 선로에 공급 또는 흡수하게 된다.

4. 사례연구

모의실험은 전기철도 옥천 S/S 에서 사곡 S/S까지의 구간에서 진행 되었다. 직지사 S/S를 기준으로 양쪽 51.3[Km] 구간(영동 SP에서 추풍령 SP)에 8대의 열차가 운행 될 경우를 토대로 단상 D-STATCOM을 사용했을 경우와 fault를 가정했을 경우를 모의실험 하였다.

4.1 Case 1 : 단상 D-STATCOM이 설치되지 않은 경우

정상 운전시 직지사 S/S 51.3[Km] 구간에 8대의 차량이 운행될 경우(Without D-STATCOM)를 보여준다.

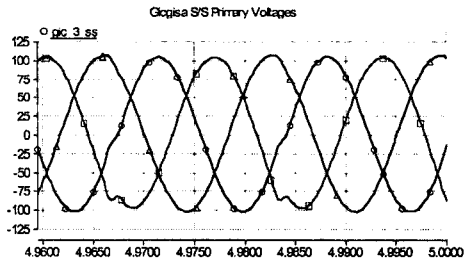


그림 7. 열차 8대가 정상 운행시 직지사 S/S의 1차측 전압 파형(D-STATCOM이 설치되지 않은 경우)
Fig. 7. When trainloads operate at the section of track, primary voltages of Gigisa S/S SCOTT

사례연구 결과는 그림 7에서 9에 나타내었다. 그림 7의 경우 열차 부하가 전기철도 급전 시스템에 투입이 되면 열차 부하로 인한 고조파의 영향으로 인해 스코트 변압기 1차측의 3상 파형의 일그러짐이 현저하게 나타나고 있다. 그림 8과 9는 직지사 S/S의 2차측의 전압 파형과 V상 RMS 전압파형들을 보여준다.

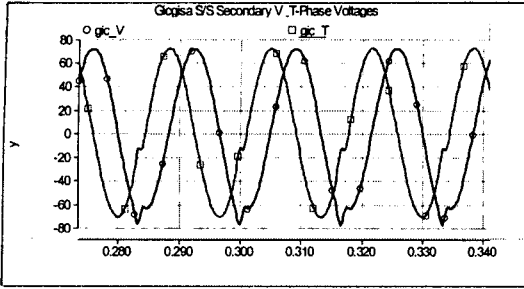


그림 8. 열차 8대가 정상 운행시 직지사 S/S의 2차측 전압 파형
 Fig. 8. When trainloads operate at the section of track, Secondary voltages of Gigisa S/S SCOTT

그림에서 보면 알 수 있듯이 스코트 변압기의 2차측 전압 또한 고조파의 영향으로 일그러져 있음을 볼 수 있으며, 결과값 또한 70.70[kV]까지 상당한 전압강하가 일어나 있음을 볼 수 있다. 그림 9의 V-상 RMS 결과값 또한 정상치인 27.5[kV]에서 상당히 전압이 감소하여 최소 22.61[kV]까지 떨어져 있음을 확인할 수 있다. 이는 향후 기술력의 발달과 운행시격의 단축으로 더 많은 열차가 운행될 경우 열차운행에 지장을 줄 수도 있음을 예측할 수 있다. 그림 9에서 파형이 두 줄로 나타나는 이유는 각각의 다른 AT 섹션에 열차가 투입이 되어 나타나는 현상이다.

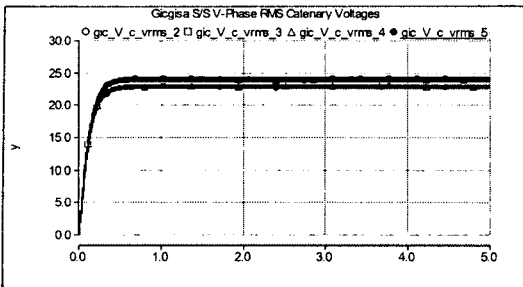


그림 9. 열차 8대가 운행시 직지사 S/S의 2차측 V-상 RMS 전압 파형
 Fig. 9. Gigisa S/S secondary V-phase RMS catenary voltages

4.2 Case 2 : 단상 D-STATCOM이 설치된 경우

정상 운전시 직지사 S/S 51.3[Km] 구간에서 8대의

차량이 운행될 경우(D-STATCOM을 T-phase에 설치)에 대한 사례연구이다. Case 1의 경우에 대하여 단상 D-STATCOM을 사용했을 경우의 시뮬레이션 결과를 그림 10에서 12에 나타내었다. 단상 D-STATCOM은 T-상 영동 SP에 설치하였다. 그림 10은 스코트 변압기의 1차측 3상 전압을 나타내고 있다. Case 1의 경우에서처럼 열차 부하로 인한 고조파의 영향으로 파형이 일그러져 있음을 알 수 있다. 이는 D-STATCOM이 스코트 변압기 1차측에는 전압의 변화나 고조파에 별다른 영향을 미치지 못함을 볼 수 있다. 그러나 그림 11과 12에서는 그 영향을 확인할 수 있다. 그림 11을 보면 T-상의 파형이 V-상의 파형에 비해 높은 값을 가지고 있음을

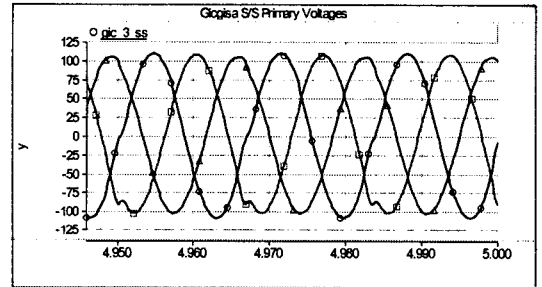


그림 10. 열차 8대가 정상 운행시 직지사 S/S의 1차측 전압파형 (D-STATCOM이 T-phase에 설치된 경우)
 Fig. 10. When trainloads operate at the section of track, primary voltages of Gigisa S/S SCOTT.(With D-STATCOM)

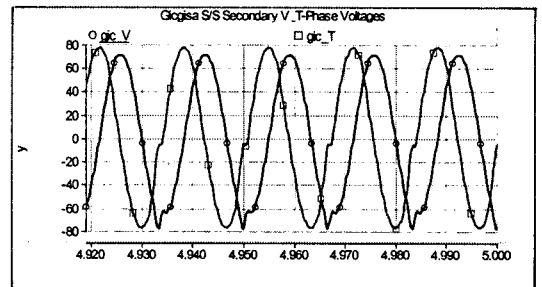


그림 11. 열차 8대가 정상 운행시 직지사 S/S의 2차측 전압 파형(D-STATCOM이 T-phase에 설치된 경우)
 Fig. 11. When trainloads operate at the section of track, Secondary voltages of Gigisa S/S SCOTT(With D-STATCOM)

확인할 수 있다. 이는 스코트 변압기의 T-상인 영동 SP에 D-STATCOM을 설치하였기 때문에 70.70 [kV]이하로 떨어졌던 전압을 78.52[kV]까지 7.82 [kV]를 보상해 주었음을 확인할 수 있다.

그림 12는 T-상 전차선 RMS 전압을 나타내고 있다. 그림에서 보듯이 D-STATCOM이 정상적인 기능을 발휘하는 시점(2초 이후)부터 Case 1에서 22.61~23.99[kV] 이하로 떨어졌던 전차선 전압이 거의 정상치인 26.22~27.19[kV]까지 보상되었음을 확인할 수 있다.

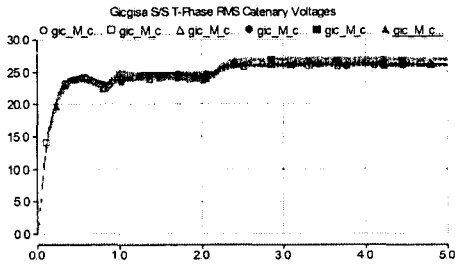


그림 12. 열차 8대가 운행시 직지사 S/S의 T-상 전차선 RMS 전압 파형(D-STATCOM이 T-phase에 설치된 경우)

Fig. 12. Ggisa S/S secondary T-phase catenary RMS voltages(With D-STATCOM)

표 4와 5는 Case 1과 Case 2에서 측정된 전압과 고조파를 나타내고 있다. 측정된 데이터를 전압강하식과 고조파 발생 정도를 나타내는 THD 공식에 대입하여 표 6의 결과를 산출해 내었다. 표 6에서 알 수 있듯이 Case 1의 경우에 비해 D-STATCOM을 사용한 Case 2의 T-상은 전압 강하율이 8.16에서 0.34로 상당히 낮아졌다. 이는 D-STATCOM이 전압 보상에 상당한 효과가 있다는 것을 입증한 것이다.

표 4. Case 1과 Case 2에서 측정된 전압
Table 4. Voltages of Case 1 and Case 2

	V-Phase	T-Phase
Case 1	71.69	71.19
Case 2	71.60	77.26

표 5. Case 1과 Case 2에서 측정된 고조파
Table 5. Harmonics of Case 1 and Case 2

고조파차수	Case 1	Case 2
1st	102.249	108.991
3rd	1.935	2.317
5th	1.446	2.115
7th	1.030	1.347
9th	0.709	0.672
11th	0.454	0.334
13th	0.260	0.237
15th	0.111	0.131

고조파 발생 정도를 나타내는 THD(Total Harmonics Distortion)는 고조파 전압과 기본파 전압의 비로써 나타내며 식 (11)과 같이 정의된다.

$$THD = \frac{\sqrt{v_2^2 + v_3^2 + \dots + v_n^2}}{v_1} \times 100 \quad (11)$$

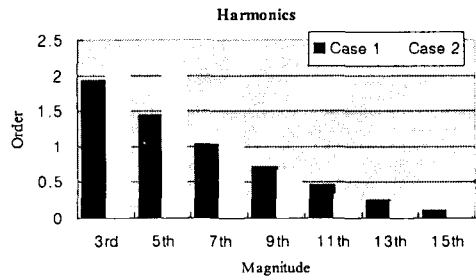


그림 13. Case 1과 Case 2의 고조파 수치
Fig. 13. The harmonics result comparison of Case 1 and Case 2

그림 13은 Case 1과 Case 2의 고조파 수치를 비교해 놓은 것이다. 그림과 표 6을 종합해보면 Case 1에 비해 Case 2의 경우 THD가 미세하게 증가 하였음을 알 수 있다. 이는 본 논문의 D-STATCOM은 전압 제어형 인버터를 기본으로 한 보상기이며, 이로 인해 고조파가 미세하게 증가하였다. 이를 제거하기 위해서는 비용적인 측면을 고려하지 않고 전류 제어형 인버터를 설계하여 D-STATCOM을 설치하거나 Shunt Active Filter가 유용하다. 또한 필터링이라든지 선택적 고조파제거(Selective Harmonics Elimination)

전기철도 급전시스템의 순시전압강하 보상을 위한 단상 배전 STATCOM의 적용

nated)-PWM을 사용하면 고조파를 경감할 수 있다. 하지만, 신형 전기기관차 8,200대는 8,100대의 개량형으로 설계 시부터 고조파 발생율을 대폭 낮추어 설계가 되었다. 그리고 물리적으로 철도차량은 이동 부하이기 때문에 특정 고조파 발생뿐만 아니라 비선형적 고조파도 발생되며, 차량의 운행에 따라 발생 고조파는 상쇄되거나 증폭될 수도 있다. 그렇기에 본 논문에서 D-STATCOM을 설치할 경우 고조파가 증가하기는 하였으나 차량 운행에 따라 특정 경우 고조파 발생이 낮게 나올 수도 있다. 따라서 본 논문에서는 전력품질에 있어 가장 중요한 전압강하에 주안점을 두고 논문을 진행하였기 때문에 D-STATCOM의 기능인 전압강하 보상에 초점을 두고 있다.

표 6. Case 1과 Case 2의 전압강하율과 THD 비교
Table 6. The comparison of voltage drop ratio and THD of Case 1 and Case 2

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

4.3 Case 3 : 단상 D-STATCOM이 설치된 경우 순간고장이 발생시

직지사 S/S 51.3[Km] 구간에 fault(2~3[sec])가 발생했을 경우(D-STATCOM을 T-phase에 설치)는 다음의 결과와 같다.

시뮬레이션 구간에 2초에서 3초 사이 상정사고(fault)를 주었을 경우 단상 D-STATCOM 보상이 얼마만큼 이루어지는가에 대한 실험을 해 본 결과, D-STATCOM 보상으로 인하여 fault시에 최소 집전전압인 19[kV]를 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. 보상능력이 있어 제한을 받는 요소는 DC link Capacitor의 용량이다. 물론 용량을 수없이 늘린다면 보상 능력이 좋아져 유용하겠

지만, 그만큼 비용적인 면에서 불리한 측면이 있으므로 설계 시에 보상능력과 비용적인 측면을 같이 생각하여 가장 적절한 용량을 산정해야 한다. 그림 14는 순간사고 발생시 D-STATCOM을 설치했을 경우의 결과를 보여준다.

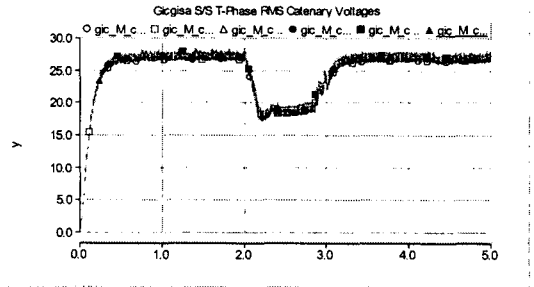


그림 14. fault(2~3(sec))가 발생했을 경우 직지사 S/S T-상 전차선 RMS 전압 파형(D-STATCOM이 T-phase에 설치된 경우)

Fig. 14. When feeding line occurred fault(2~3 [sec]), Gigkisa S/S secondary T-phase catenary RMS voltages(With D-STATCOM at the T-phase)

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 22.61[kV]까지 떨어진 전압을 보상하여 거의 정상전압에 가까운 27.19[kV]까지 보상함을 확인할 수 있었으며, 계통 사고 시 최저집전 전압인 19[kV]를 상회하는 전압을 유지시킴으로 열차운행을 정상적으로 운영되도록 할 수 있음을 확인 하였다.

결과적으로 이 논문에서 제안된 단상 배전 STAT-COM은 열차운행에 커다란 방해요소가 될 수 있는 전압강하를 보상함으로써 그 효과를 증명하였다.

References

- [1] 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.
- [2] P. C. Tan, "Voltage Form Factor Control and Reactive Power Compensation in A 25(kV) Electrified Railway System Using A Shunt Active Filter Based On Voltage Detection", IEEE PEDS 2001-INDONESIA, p.605-610, 2001.
- [3] Zhu Yongqing, "Balancing Compensation of Unbalanced Based on Single-Phase STATCOM", Tsinghua University Beijing.
- [4] Walimir 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.
- [5] Mohan, "Power Electronics", pp. 211-225.
- [6] Hun-soo Jung, "Compensation of Voltage Drop Using the TSC-SVC in Electric Railway Power Supply System", Journal of KIEE, VOL. 16, pp. 29-36, 2002.
- [7] Seung-Hyuk Lee, "Compensate Voltage Drop for Autotransformer-Fed AC Electric Railroad System with Single-Phase STATCOM", Journal of the Korean Institute and Electrical Installation Engineers Vol. 16, No5, pp. 53-60, 2002.
- [8] Joon-Ho Choi, "A Study on the Application of UPQC in AC Railway System", Journal of KIEE, VOL. 18, NO.6, pp. 220-229, 2004.
- [9] KOTRA, "Kyung-bu Line Chochiyoun-Daegu Transmission/Distribution Project Report", 2005.
- [10] Ko-rail, "The Electric Locomotive", 2004.

◇ 저자소개 ◇

김준상 (金準相)

1976년 4월 13일생. 2002년 한국철도대학 운전기전과 졸업. 2005년 한밭대 전기공학과 졸업. 2005년~현재 한양대 대학원 전기공학과 석사과정. 현재 한국철도공사 본사 근무.

이승혁 (李丞赫)

1974년 8월 3일생. 2003년 한양대 대학원 전기공학과 공학석사. 2003년~현재 동 대학원 박사수료.

김진오 (金鎭吾)

1956년 1월 17일생. 1980년 서울대 전기공학과 졸업. 1983년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1990년 Texas A&M University 전기공학과 졸업(박사). 1987년~현재 한양대 전기공학과 정교수.

이준경 (李埈敬)

1962년 1월 29일생. 1993년 서울산업대 전기공학과 졸업. 2001년 한양대 대학원 전기공학과 공학석사. 2006년 동 대학원 공학박사. 현재 세종기술 근무.

정현수 (鄭鉉洙)

1950년 8월 13일생. 1974년 전남대 전기공학과 졸업. 1988년 한양대 대학원 전기공학과 공학석사. 2003년 동 대학원 공학박사. 현재 삼원전력 근무.