

교류철도급전계통에 전력품질보상장치 적용에 관한 연구

(A Study on the Application of UPQC in AC Railway System)

최준호*

(Joon-Ho Choi)

요 약

전기 철도계통은 기존 전력계통과 달리 단상, 대용량 부하로 필연적으로 전압강하, 전압불평형 및 고조파 왜곡 등의 전력품질의 문제가 발생한다. 최근 철도계통의 전력품질문제는 철도차량 및 시스템의 제어 및 안전 때문에 중요한 화두가 되고 있다. 이는 또한 기존 전력계통의 전력품질에도 영향을 미친다. 본 논문에서는 전기철도 급전시스템에 발생하는 전력품질문제의 보상에 관한 연구를 수행하고자 한다. 이를 위해 국내 교류전기철도 표준 급전방식인 AT(Auto Transformer)급전시스템, 철도급전변압기인 스코트 변압기(Scott Transformer), AT변압기, 철도선로 및 철도 차량부하를 모델링 하였다. 과도응답은 전자기과도해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 사용하여 해석하였다. 또한 전력품질을 보상하기위한 방안으로 급전선-전차선에 설치되는 전력품질보상기(Unified Power Quality Conditioner : UPQC)를 제안하였고 이의 성능 및 유효성을 시뮬레이션을 통하여 확인하였다.

Abstract

The AC railway system is quite differing from the general electric power system because it is single-phase and intermittently heavy loads. Thus, inevitably power quality problems are occurred in the AC railway system, i.e. voltage regulation, voltage sags, voltage imbalance, and harmonic distortion. Recently, the power quality of the AC railway system becoming a hot issue because it is affect the control and safety of high-speed traction. In addition, it is also affect the power quality of the electric power system. In this paper, single-phase Unified Power Quality Conditioner(UPQC) for the AC railway system is proposed to compensate the voltage sags and harmonic distortion. The configurations and control schemes of the proposed single-phase UPQC are presented. The effectiveness of the proposed single-phase UPQC application is verified by the PSCAD/EMTDC simulation works. It can be shown that the application of UPQC in the AC railway system is very useful to compensate the voltage sags and harmonic distortion from the results of related simulation works.

Key Words : AC railway system, high-speed traction, power quality, AT(auto transformer), UPQC(unified power quality conditioner), voltage sag, harmonic distortion, PSCAD/EMTDC

* 주저자 : 전남대학교 전기공학과 전임강사

Tel : 062-530-1742, Fax : 062-530-1749

E-mail : joono@chonnam.ac.kr

접수일자 : 2004년 9월 17일 1차심사 : 2004년 9월 22일 심사완료 : 2004년 10월 8일

1. 서 론

현재 우리나라는 산업의 고도화에 따른 배기가스 및 소음 등 환경 공해 문제를 해결할 수 있는 철도가 새로운 교통수단의 대안으로 부각되고 있으며 현재 고속전철이 상용 운전중이다. 특히 전기철도는 수송력이 월등히 높고 안정성과 신속성 및 환경적인 요소로 인해 세계 각국에서 미래 교통문제 해결의 최선의 대안으로 제시되고 있다. 그러나 이러한 전철화에 따른 상당한 이점에도 불구하고 필연적으로 철도 급전시스템의 전차선의 전압강하, 상위 계통의 전압불평형 발생, 고조파 왜곡 문제 등이 발생하며 아직 해결하지 못한 기술적 문제들이 산재해 있다. 이러한 문제점을 분석하고 해결하기 위해 철도급전시스템의 전압강하 해석[1], 철도급전시스템 등가 회로 및 파라미터 해석[1-2], 사고해석[2-3], 전력품질 보상[4-14] 등의 여러 가지 연구가 진행되어 왔다. 본 논문에서는 전기철도 급전시스템에 발생하는 전력품질문제의 보상에 관한 연구를 수행하고자 한다. 이를 위해 국내 교류전기철도 표준 급전방식인 AT (Auto Transformer)급전시스템, 철도급전변압기인 스코트 변압기(Scott Transformer), AT변압기, 철도선로 및 철도 차량부하를 모델링 하였다. 과도응답은 전자기과도해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 사용하여 해석하였다. 또한 전력품질을 보상하기 위한 방안으로 급전선-전차선에 설치되는 전력품질보상기(Unified Power Quality Conditioner : UPQC)의 구성 및 제어알고리즘을 제안하였고 이의 성능 및 유효성을 시뮬레이션을 통하여 확인하였다.

2. AT 급전계통

전차선과 급전선 사이에 AT를 삽입하여 권선의 중앙에 레일을 접속시킨 급전방식이다. 일반적으로 사용하는 AT의 직렬권선과 분로권선의 권수 비는 1 : 1로 되어 있어 전차선과 레일 사이의 전압은 레일과 급전선 사이의 전압과 같다. 열차는 전차선과 레일 사이에 위치하게 되어 운행시 흐르는 열차전류는 반으로 줄어든다. AT변압기 급전방식을 이용하면 변전소에서 공급하는 전압이 열차에 급전되

는 전압의 2배가 된다. 이런 이유로 변전소 간격을 넓게 할 수 있고 급전전압이 BT급전 방식보다 크므로 같은 출력의 열차에 공급하는 전류가 작아져 전차선로의 전압 강하가 작아진다. 또한 대용량 열차 부하에도 전압 변동이나 전압 불평형이 적어 안정된 전력 공급이 가능하다. AT급전방식은 교류식 전기철도에서 표준 급전방식으로 채택되고 있다[1-2,14].

2.1 스코트 변압기

전철 급전 주변압기의 결선방식은 삼상 교류 전력을 단상으로 변환하는 변압기 결선의 한 방법 중 일반적으로 부하불평형률이 가장 적고 이용률이 가장 좋은 스코트결선 방식을 채택하고 있다.

스코트 변압기의 1차측은 중성점 탭(O)을 가지고 있으며, 2차 측은 M상(Main Transformer), 또는 주 권선과 다른 한쪽의 T상(Teaser Transformer) 권선이 있다. 또 T상측 1차 권선은 M상측 1차 권선의 $\sqrt{3}/2$ 이다. 스코트 결선의 최대 장점은 2차측 즉, T상과 M상에 용량 및 역률이 같은 단상부하가 접속되면 1차측 3상에는 3상 평형 전류가 유입하여 불평형률이 영이 되는 것이 특징이며 장점이기도 하다. 만약 M상과 T상에 부하 불평형이 생기면 전원측 전류에 불평형이 발생하지만 다른 결선 방식에 비해 그 불평형 정도가 가장 적다. 일반적으로 불평형률은 2시간 부하에 대하여 3[%] 이내(외국의 경우는 5[%] 순간 부하 이내)로 억제하고 있다.

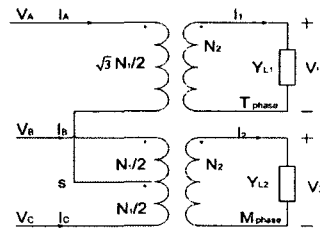


그림 1. 스코트 결선도
Fig. 1. Scott connection diagram

2.2 AT 변압기

그림 2는 AT의 구조이다. AT는 2권선 변압기와는 달리 1차 권선과 2차 권선으로 되어 있지 않고, 공통 철심을 이용하여 코일 2개를 감고 이를 직렬로

접속해서 1차와 2차의 단자를 인출함으로써 2권선 변압기와 동일한 변성 비를 얻을 수 있다. 그러나 1차 측에서 이상 현상이 발생하면 2차 측에 영향이 그대로 나타나기 때문에 1차 측에서 이상 현상을 차단해야 한다. 전차선로에서 사용되는 AT는 1차 측의 권수가 2차 측의 2배가되며, 직렬권선과 분로권선이 1:1의 권수 비를 가지고 있다. 1차 측의 전압은 55[kV]이고, 2차측의 전압은 27.5[kV]가 되며, 두 권선을 접속하는 지점에 전차선로의 레일과 연결한다. AT는 1차 권선과 2차 권선이 연결되어 있기 때문에 용량을 말할 때는 자기용량과 부하용량을 사용하고 있다. 자기용량이란 직렬 권선과 또는 분로권선의 용량을 말하며, 부하용량은 AT를 통하여 공급하는 부하의 크기를 말하고 2차 단자 전압과 2차전류의 곱으로 나타낸다. 자기용량과 부하용량의 관계식은 다음 식 (1)과 같다.

$$\frac{\text{자기용량}}{\text{부하용량}} = \frac{(E_2 - E_1) \times I_1}{E_2 \times I_2} \quad (1)$$

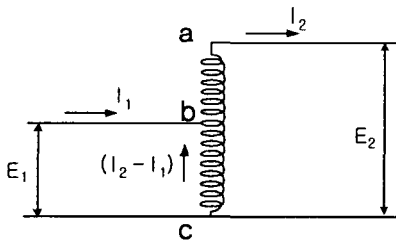


그림 2. AT 등가 회로
Fig. 2. Equivalent circuit of AT

2.3 전차선로

전차선의 임피던스는 전선 고유의 도체 내부 임피던스와 가선의 지표상 높이와 대지 도전을 등에 따라 변화하는 외부 임피던스의 합으로 나타낸다. 전선의 내부 임피던스를 구하는 방법은 다음 식(2)와 같다. 그림 3에는 AT급전시스템의 단면도를 나타내었다.

$$Z_e = \gamma_T + jwL_i [\Omega/km] \quad (2)$$

$$L_i = \frac{\mu}{2} \times 10^{-4} [H/km]$$

여기에서 γ_T : 전선의 고유저항 [Ω], μ : 전차선의 투자율($\mu_0\mu_s$), L_i : 전선내부 유도계수 [H]

일반적으로 지표에서 h[m]높이에 가선된 도체 반지름 r[cm]의 대기커로 외부 임피던스는 Carlson-Polaczek의 식 (3)을 이용하여 구할 수 있다.

$$Z_0 = [w(\frac{\pi}{2} - \frac{4x}{3\sqrt{2}}) + jw(4.605\log_{10} \frac{4h}{\gamma x} + \frac{4x}{3\sqrt{2}} - 0.1544)]10^{-4} [\Omega/km] \quad (3)$$

여기에서 $w = 2\pi f$, $x = 4\pi h \sqrt{2\sigma f}$, h : 지표에서 도체까지 평균 높이 [cm], σ : 대지도전율, j : 주파수

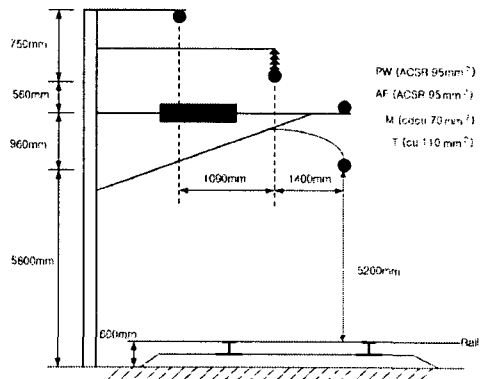


그림 3. AT 급전방식 설치 단면도
Fig. 3. Diagram of AT feeding system

2.4 전기철도차량

일반적으로 전기철도 차량의 모델은 상시전압강하 등의 정상상태 해석에서는 그 해석의 용도에 따라 정 임피던스, 정전류, 정전력 모델이 사용된다. 전기철도차량의 동력은 PWM(Pulse Width Modulation) 인버터를 이용하여 삼상 유도전동기를 구동하는 방식이다. 즉 교류전원을 수전반아 이를 직류전원으로 변환한 후 이를 다시 삼상PWM인버터를 통해 견인전동기인 유도기에 전력을 공급하여 차량을 구동하는 방식이다. 따라서 이의 과도상태 해석을 위해서는 이를 정확히 모델링할 필요가 있다. 그림 4에는 전형적인 철도차량 부하모델을 나타내었다.

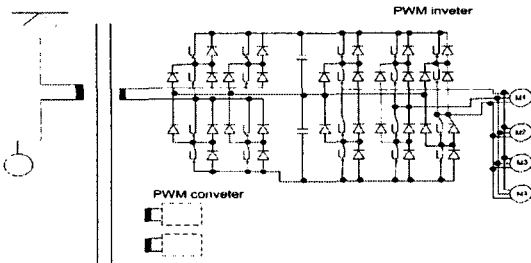


그림 4. 전형적 전기철도차량 모델
Fig. 4. Typical electric traction locomotive load

3. 철도급전계통의 과도해석 모델링

3.1 전원 모델

급전계통의 전철변전소는 한전 154[kV] 변전소에서 전철부하 공급전력을 수전하여 스코트(Scott) 변압기에 의해 154[kV] 3상을 50[kV] 단상으로 변환한다. 일반적으로 전압강하를 고려하여 스코트 변압기의 2차측 전압은 55[kV]로 한다. 전원 모델링은 3상 전압원으로 모델링하였고 일반적인 국내 전력계통에서 배전 변전소에서 상위 계통을 등가한 임피던스를 무한 전원으로 축약하였다. 과도해석을 위한 PSCAD/EMTDC 모델링은 이상 전압원을 사용하여 모델링하였으며 이의 파라미터는 표 1과 같다.

표 1. 전원 파라미터
Table 1. Parameters of utility source

전원	영상분 임피던스 (Z_{s0})[%]	0.257+j1.336
	정상, 역상분 임피던스 (Z_{s1}, Z_{s2})[%]	0.072+j0.757

3.2 스코트 및 AT 변압기

스코트변압기와 AT변압기의 모델은 국내 철도급전계통에 실제 사용되는 기기를 조사하여 이의 파라미터를 사용하여 모델링 하였다. PSCAD/EMTDC에서, AT변압기는 권선비 1:1인 단상변압기의 이차측을 일차측에 전기적으로 연결하여 모델링하였고, 스코트변압기는 T상은 권선비 $\sqrt{3}/2$ 인 단상변압기, M상은 측은 1:1:1인 삼권선변압기를 이용하여 M상의 1차측 중성점에서 T상의 일차측을 전기적으로 연결하여 모델링 하였다. 표 2와 3에는

PSCAD/EMTDC의 등가 모델링 파라미터를 나타내었다. 이 때 AT변압기의 전압비는 전압강하를 고려하여 55/27.5[kV]로 한다.

표 2. 스코트 변압기 파라미터
Table 2. Parameters of Scott transformer

M상 (Main transformer)	용량	15[MVA]
	전압비	154/55[kV]
	임피던스	10[%]
T상 (Teaser transformer)	용량	15[MVA]
	전압비	133/55[kV]
	임피던스	10[%]

표 3. AT변압기 파라미터
Table 3. Parameters of auto transformer

자기용량(부하용량)	5(10)[MVA]
전압비	55/27.5[kV]
임피던스	0.45[%]

3.3 전차선로

전차선로는 현재 국내 전기철도 시스템에 사용되는 전차선로를 등가화하여 그림 3과 같이 AT급전선로를 급전선, 전차선, 레일로 등가화하여 자기 임피던스 및 상호 임피던스를 식 (2), (3)을 이용하여 구하였다. 이의 결과는 다음의 표4와 같다[1-2,14].

표 4. 전차선로 등가 파라미터
Table 4. Equivalent parameters of traction conductor

구분	임피던스[Ω /km]
급전선 자기 임피던스(Z_f)	0.3597 + j0.9576
전차선 자기 임피던스(Z_t)	0.1771 + j0.7485
레일 자기 임피던스(Z_r)	0.2470 + j0.8520
급전선-전차선 상호 임피던스 (Z_{fr})	0.0582 + j0.4699
급전선-레일 상호 임피던스(Z_{fr})	0.0586 + j0.3646
전차선-레일 상호 임피던스(Z_{tr})	0.0587 + j0.3778

3.4 철도차량

전기철도 차량의 단상 변압기, 정류기, 3상 인버터 및 삼상 유도전동기와 같은 구성요소를 기본으로 하여 이의 특성 및 과도 응답을 정확히 파악하기 위한

정확한 모델링을 실제 전기철도 차량의 파라미터를 바탕으로 검토 하였으며 이를 PSCAD/EMTDC상에서 구현하였다. 현재 전기철도 차량의 구성은 총 10개의 차량으로 구성되어 있으며 차량의 역할별로 TC, M, M', T차량으로 구분되어 진다. TC차량은 전기철도의 앞, 뒤에 위치하고 제어를 담당하며, M 및 M' 차량은 견인전동기가 4대씩 설치되어 총 5개의 차량이 편성되고, M' 차량에는 수전변압기가 설치되어 있다. 이의 편성은 TC-M-M'-T-T-M'-T-M-M'-TC의 순으로 총 10개의 차량이 편성된다. 전기철도 차량부하 모델에 사용된 파라미터는 표 5에 나타내었다.

표 5. 철도차량 부하 모델 파라미터
Table 5. Parameters of electric traction load

M' 차량의 단상 변압기	전압비	25/0.84[kV]
	정격 용량	1.79[MVA]
M' 차량의 PWM 인버터	직류 캐퍼시터 용량	12600[μF]
	직류단 전압	1.8[kV]
	필터 (L, C)	0.005[mH], 400[μF]
M 및 M' 차량의 유도 전동기 단위 용량	정격전압	1.1[kV]
	정격전류	0.13[kA]
	정격부하시 역률	0.88[p.u]
	전부하시 슬립	0.977[p.u]
	전전압 기동토크	1.5[p.u]
	최대토크/전부하 토크	3.0[p.u]
	전전압 기동전류	6[p.u]
정격부하시 효율	0.98[p.u]	
총부하	유도전동기 20대	4.95[MVA]

PSCAD/EMTDC에서는 이를 증가화하여 그림 5와 같이 모델링하였다[14].

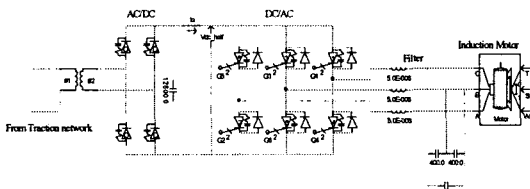


그림 5. PSCAD/EMTDC 상에서 구현된 전기철도차량 모델

Fig. 5. Electric traction locomotive model in PSCAD/EMTDC

4. 철도급전계통용 전력품질보상장치

전기철도계통에서는 필연적으로 전압강하, 전압 불평형, 고조파 및 역률등의 전력품질 문제가 발생한다. 최근 전력품질 문제를 해결하기 위해 기존 전력계통에 쓰이는 FACT(Flexible AC Transmission) 및 UPQC의 철도급전계통 적용에 관한 연구가 선진국을 중심으로 진행되고 있는 실정이다 [4-11]. 특히 90년대 후반 이후 일본 및 선진외국에서는 AT급전계통에 단상 SVC(Static Var Compensator)나 STACOM(Static Compensator)을 설치하여 상시전압강하 및 역률을 보상하는 연구가 진행되었고 일부 운전중에 있다. 따라서 현재 국내에서 운행되는 고속전철의 보다 나은 운전을 위해서는 이러한 연구가 절실히 필요한 실정이다. 그러나 이러한 상시전압강하 보상을 위한 SVC나 STACOM의 설치는 철도급전계통의 전원계통의 영구사고나 순간사고시 발생하는 순간전압강하를 적절히 보상하지 못한다는 것이 일반적 견해이다[14]. 또한 전기철도의 운전에 따라 열차의 인버터/컨버터에 기인하여 발생하는 고조파문제도 최근 그 문제의 심각성이 부각되고 있는 실정이다. 따라서 철도급전계통에서 발생하는 순간전압강하 및 전원전류왜곡을 보상하기 위한 전력품질 보상장치가 필요하다. 본 논문에서는 순간전압강하시 전기철도 차량부하의 과도응답 특성 및 정상상태 전원전류 왜곡을 분석하고 이를 보상하는 철도계통용 전력품질보상장치를 제안하였다. 이의 유용성을 전자기과도해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 사용하여 분석, 입증하였다.

4.1 전력품질 보상장치 모델링

철도 급전계통은 기존 전력계통과 달리 단상계통으로 단상 직병렬 인버터를 사용한 전력품질 보상장치를 적용하여야 한다. 일반적인 전력품질 보상장치의 구성은 직렬인버터와 병렬인버터를 동시에 가지고 직렬인버터는 전압을 병렬인버터는 전류를 각각 계통에 직렬과 병렬연결되어 주입한다.

PSCAD/EMTDC상에서 구성된 전력품질 보상장치의 구조는 다음의 그림 6과 같으며 이의 파라미터는 표 6에 나타내었다. 표 6에서 UPQC의 직병렬인

버터의 연계 필터 파라미터는 인버터에서 발생하는 노이즈의 저감을 위해 설치하며 이 때 차단주파수 1[kHz]를 상정하였다. 철도급전계통의 특성상 급전선과 전차선 사이에 연결되는 단상으로 설계되었다. 전력품질 보상장치의 직렬 보상기는 그림 6과 같이 직렬주입변압기를 통해 계통에 연계되며 보상전압을 주입한다. 또한 병렬 보상기는 그림 6과 같이 병렬로 계통에 연계되어 보상전류를 주입한다.

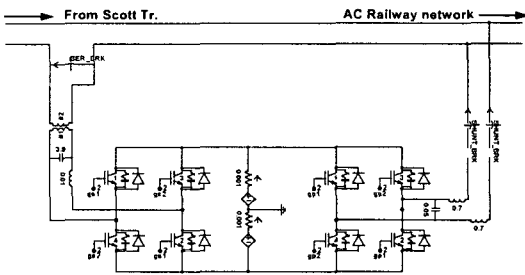


그림 6. 철도계통용 전력품질 보상장치 구성 (PSCAD/EMTDC)
 Fig. 6. The configuration of the UPQC for AC railway system(PSCAD/EMTDC)

표 6. 철도계통용 전력품질 보상장치 파라미터
 Table 6. Parameters of the UPQC for AC railway system

직렬보상기		
연계 필터	L	20[mH]
	C	3.5[μF]
직렬 변압기	정격 용량	10[MVA]
	전압비	27.5/27.5[kV]
	임피던스	4[%]
병렬보상기		
연계 필터	L	100[mH]
	C	0.7[μF]

4.2 전력품질보상장치 제어알고리즘

기존 전력계통과 달리 철도 급전계통은 단상 계통이므로 단상용 전력품질 보상장치의 제어 회로가 필요하다.

4.2.1 직렬인버터 제어알고리즘

전력품질 보상장치의 직렬인버터는 전원측의 사

고나 전압변동등에 의한 순간전압강하가 부하측에 전달되지 않도록 전압변동 크기만큼의 전압을 직렬로 주입하여 부하측의 전압을 일정하게 유지하도록 한다. 즉 강하된 전압의 크기만큼을 보상하여 전압강하에 민감한 부하의 영향을 줄이는 것이다. 이상적인 직렬인버터의 주입 전압은 다음 식(4)와 같다.

$$V_{SERIES} = V_{Lpre} - V_S \quad (4)$$

여기에서 V_{SERIES} : 직렬인버터에서 공급하는 전압의 벡터, V_{Lpre} : 사고 전 부하전압, V_S : 사고후 부하전압

철도계통용 단상 순간전압강하 보상장치의 제어의 경우 스코트 변압기의 2차측 전압이 전원전압이 되고, AT 구간의 전차선과 레일의 전압이 부하전압이 된다. 따라서 사고전 부하전압은 AT구간의 전차선과 레일의 사고전 전압이다.

그림 7에는 제안한 철도 계통용 순간전압강하 보상장치의 제어도를 나타내었다. 제안된 순간전압강하 보상장치의 제어도를 보면, 부하에 공급되는 전원전압을 측정하여 기본파 성분만을 이용하여 이의 크기와 위상을 구하여 기준전압으로 한다. 사고 판별기(Fault detector)에서 사고를 판별하면 사고전의 전압(기준전압)에서 사고후의 전압을 빼서 그 차이만큼을 PWM의 사인 기준파로 보내어 보상한다. 이때 사고전 전압을 유지하기 위해 사고 전 전압의 위상을 보존하는 과정이 필요하다. PWM 스위칭 주파수는 9[kHz]의 삼각파로 이를 기준으로 사인 기준파를 이용하여 인버터의 온·오프 스위칭 신호를 보낸다.

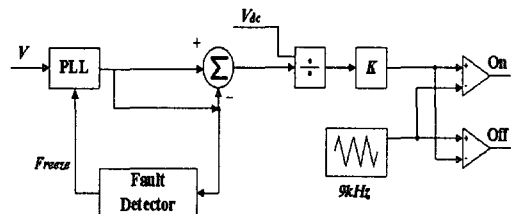


그림 7. 직렬인버터 제어도
 Fig. 7. Control diagram of series inverter

4.2.2 병렬인버터 제어알고리즘

전력품질 보상장치의 병렬인버터는 철도차량부하의 비선형적인 부하특성으로 발생하는 전류의 왜곡을 보상한다. 일반적으로 삼상전원계통에서 사용되는 전력품질보상장치의 병렬인버터의 제어는 계산상 및 하드웨어적으로 매우 효율적인 방법인 삼상 순시전력이론을 사용하였다. 직·병렬 인버터의 제어에 대한 연구 흐름을 살펴보면 정상 상태에서 기본 무효 전력을 보상하다가 1984년 Hirofumi Akagi가 순시 전력의 개념을 제안하고 이를 무효 전력 보상에 도입함으로써 과도 상태에서의 기본 무효 전력 및 고조파 전류를 보상할 수 있게 되었다[12]. 이후 Mauricio Aredes에 의해 인버터에 적용되었고 많은 연구 결과들이 발표되었다. 본 연구에서는 Mauricio Aredes의 인버터 제어 방식을 적용하였다[13].

순시 전력 이론은 순시 유효·무효 전력의 보상을 통해 과도 상태에서의 보상을 가능하게 했을 뿐 아니라 abc 혹은 dq 축에서의 제어 이론이 전압 혹은 전류 중 하나만을 직접적인 제어 변수로 취하는 데 반해서 순시 유효 전력과 순시 무효 전력을 제어 변수로 취함으로써 3상 교류 회로의 전력의 흐름과 고조파 성분 등을 통일적으로 취급할 수 있는 장점이 있다. 또한 3상 교류 회로의 무효 전류, 역상 전류, 고조파 전류 등을 $\alpha\beta$ 축 상에서 통일적으로 취급이 가능하다는 장점이 있다.

삼상 순시전력 계산식은 다음의 식(5)와 같다.

$$p(t) = i_a(t)v_a(t) + i_b(t)v_b(t) + i_c(t)v_c(t) \quad (5)$$

삼상 순시전력이론은 계통이 평행이고 부하가 선형일 경우 삼상 순시전력의 값이 일정하다는 것에 착안하여 이를 이용하여 병렬인버터의 전류보상치를 계산한다.

그러나 철도계통은 단상이므로 삼상전압 및 전류를 측정하여 삼상 순시전력을 계산할 수 없다. 본 논문에서는 삼상 순시전력이론을 단상계통에 쉽게 적용하기 위해 스코트 변압기 2차측의 단상의 전압 및 전류를 측정하여 이에 위상이 각각 120°, 240° 벌어진 가상의 전압, 전류를 발생시켜 이를 이용하여 삼

상 순시전력을 계산하는 방법을 사용하였다. 따라서 단상 철도급전계통에서 삼상순시전력은 다음의 식 (6)과 (7)을 이용하여 구할 수 있다.

$$p(t) = i_{as}(t)v_{as}(t) + i_b^*(t)v_b^*(t) + i_c^*(t)v_c^*(t) \quad (6)$$

$$\begin{aligned} i_b^*, v_b^* &: i_{as}u(t-\alpha_1), \quad v_{as}u(t-\alpha_1) \\ i_c^*, v_c^* &: i_{as}u(t-\alpha_2), \quad v_{as}u(t-\alpha_2) \end{aligned} \quad (7)$$

여기에서 i_{as}, v_{as} : 스코트 변압기 2차측의 전류, 전압, $\alpha_1 : 120^\circ$ 시간지연, $\alpha_2 : 240^\circ$ 시간지연, i_b^*, v_b^* : 스코트 변압기 2차측의 전류, 전압에 위상이 120° 뒤진 가상의 전류, 전압 i_c^*, v_c^* : 스코트 변압기 2차측의 전류, 전압에 위상이 240° 뒤진 가상의 전류, 전압

abc 축의 식 (6)은 $\alpha\beta$ 축으로 변환 가능하며 다음의 식(8)과 같다[12].

$$\begin{aligned} p &= V_a \cdot i_a + V_\beta \cdot i_\beta \\ q &= V_a \cdot i_\beta - V_\beta \cdot i_a \\ \begin{bmatrix} V_a \\ V_\beta \end{bmatrix} &= \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (8)$$

삼상 순시전력은 삼상 순시유효전력과 삼상 순시 무효전력으로 구분할 수 있으며 삼상의 전압과 전류가 평형된 사인과 형태라면 일정하다. 그러나 전압 및 전류에 왜곡이 있다면 일정한 값을 가지지 않고 동요되는 성분을 포함한다. 즉 순시 유효 전력과 순시 무효 전력은 DC 성분과 영점을 중심으로 진동하는 항의 합으로 나타난다. 이를 수식으로 쓰면 삼상 순시유효전력과 무효전력으로 구분되고 이는 다음의 식(9)와 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} p &= \bar{p} + \tilde{p} \\ q &= \bar{q} + \tilde{q} \end{aligned} \quad (9)$$

이때 \bar{p} 와 \bar{q} 는 상수이고 3상의 경우는 선형 부하와 동일하다. \tilde{p} 와 \tilde{q} 는 고조파에 의해서 발생하는 진동 성분이며 평균은 0이다.

전류왜곡을 보상하기 위해서는 식(9)의 성분 중 유효성분에서는 동요되는 성분인 \tilde{p} 를, 무효성분에서는 직류성분 \bar{q} 과 동요성분 \tilde{q} 를 병렬인버터가 공급하도록 제어를 설계하면 된다. 따라서 병렬인버터의 보상전류는 $\alpha\beta$ 축 상에서 다음의 식(10)과 같이 계산되며 이를 다시 abc상으로 역변환하면 된다.

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha, REF} \\ i_{\beta, REF} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{\alpha} & V_{\beta} \\ -V_{\beta} & V_{\alpha} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} -\tilde{p} \\ \bar{q} + \tilde{q} \end{bmatrix} \quad (10)$$

그림 8에는 제안된 병렬인버터의 제어도를 표시하였다. 먼저 선로 전압의 정상성분을 추출한다. 이는 고조파 및 역상성분의 영향을 받지 않는 기준으로 이용하기 위해서 정상성분을 추출한다. 이 때 제안된 방식에서는 식(6)을 사용하여 스코트 변압기 2차측의 단상 전압을 이용 가상의 삼상전압을 만들고 이것을 사용하여 식(10)의 기준전류를 생성한다. 측정된 정상성분의 전압을 바탕으로 부하측 선로에 흐르는 전류를 기준으로 식(6)의 순시전력을 구한다. 이 때 순시전력의 진동성분(\tilde{p} , \tilde{q})은 전류에 발생한 고조파 성분이 된다. 따라서 이것을 보상하면 계통 쪽에 흐르는 전류를 제거할 수 있다. 이를 보상하기 위해 $\alpha\beta$ 축의 기준전류를 계산하고 이를 다시 abc변환을 통해 i_{abc}^{REF} 의 기준전류를 계산한 뒤 PWM 신호를 거쳐 인버터의 온, 오프 스위칭 신호를 보낸다.

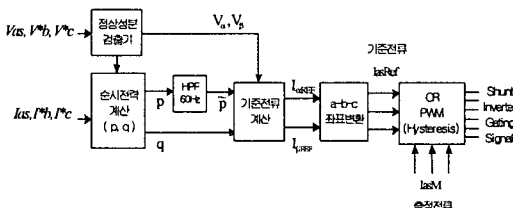


그림 8. 병렬인버터 제어도
Fig. 8. Control diagram of shunt inverter

4.3 모의계통 및 사례연구

철도급전계통에서 제안된 UPQC의 고조파 왜곡 및 순간전압강하 보상 및 과도응답을 모의하기 위한 모의계통은 그림 9와 같다. 철도차량은 0.1초에 스코트 변압기 T상에만 투입되는 것으로 모의하였고 전원측의 순간사고로 발생하는 순간전압강하는 0.4초에 3상지락사고가 발생하고 송전계통의 리클로징을 고려하여 지속시간은 100[ms]로 모의하였다. 제안된 전력품질 보상장치는 스코트 변압기 T상에만 연계되어 있고 직렬인버터는 순간전압강하를 병렬인버터는 전류왜곡을 보상하는 시뮬레이션을 수행하였다. 직렬인버터의 보상시기는 순간전압강하 발생시기이며 병렬인버터의 보상시기는 보상효과 비교를 위해 0.25초로 모의하였다.

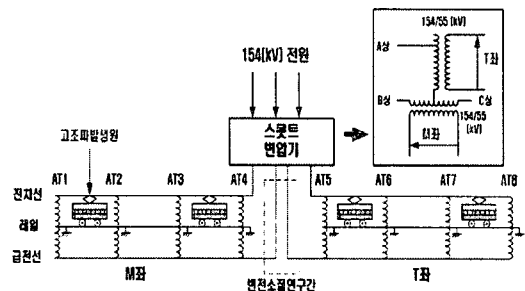


그림 9. 모의 전철전력계통
Fig. 9. Sample AC railway system

그림 10에는 스코트변압기 T상에서 UPQC의 연계점(Point of Common Coupling: PCC) 이전의 전류 측 전원에서 유입되는 부하전류, T상 전류, 그리고 인버터 공급전류를 나타내었다. 그림 11에는 UPQC 동작이전과 이후의 삼상전원전류의 파형을 나타내었다. 그림 12에는 전원측의 순간사고로 철도급전계통에 발생하는 순간전압강하시 직렬인버터의 동작에 따른 스코트변압기 이차측 T상과 M상의 전압을 나타내었다. 고조파 저감의 효과를 분석하기 위해 제안한 UPQC의 설치전후 전원전류 및 스코트 변압기 2차측 전류의 THD(Total Harmonic Distortion)을 비교, 분석하였다. 그림 13에는 스코트 변압기 2차측 전류의 THD의 실시간 프로파일을 표시하였다.

그림 10, 11의 시뮬레이션 결과를 보면, 스코트 변

압기 T상에만 철도차량이 운행함에 T상에 공급되는 전류가 왜곡됨을 알 수 있으며 0.25초에 전력품질장치를 투입하여 보상한 결과 전원전류의 왜곡이 상당히 감소함을 알 수 있었다. 또한 병렬인버터의 무효전력 공급으로 전원에서 공급되는 전원 전류가 감소함을 알 수 있었다.

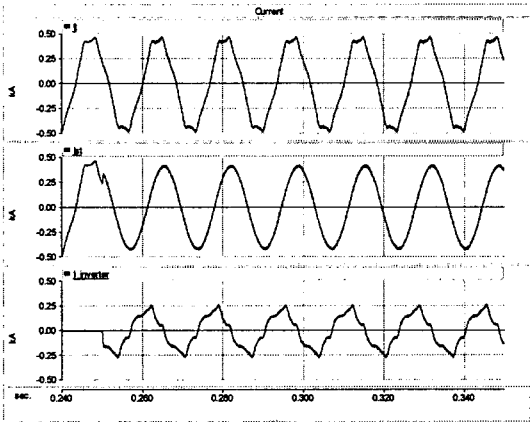
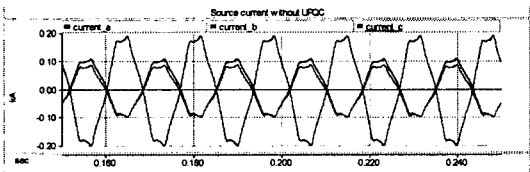
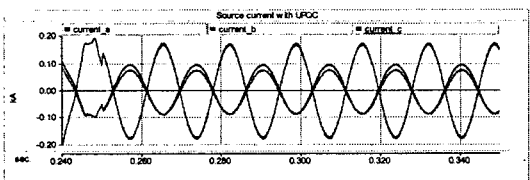


그림 10. 부하전류(i_t), T상 전류(i_{ist}) 및 인버터 공급 전류($i_{inverter}$)
Fig. 10. Load current(i_t), T-phase current(i_{ist}), and inverter supply current($i_{inverter}$)



(가) UPQC 적용 전



(나) UPQC 적용 후

그림 11. 전원전류
Fig. 11. Utility source current :
(a) without UPQC, (b) with UPQC

철도급전계통의 순간전압강하는 철도차량의 속도 변화 등에 영향을 미치고 더불어 철도차량 구동제어에 영향을 미칠것으로 예상된다[14]. 그림 10의 시물

레이션 결과를 살펴보면, 순간전압강하가 계통에 발생하고 이로 인해 전원측 전압은 공칭전압의 30[%]까지 강하하지만 UPQC의 직렬인버터의 동작으로 인해 철도급전변압기의 2차측 전압중 UPQC가 설치되어 있는 T상의 전압이 사고전 전압으로 유지됨을 알 수 있다. 그러나 UPQC가 설치되지 않은 M상의 전압은 순간적으로 공칭전압의 30[%]까지 강하함을 알 수 있다. 이때 UPQC의 직렬인버터동작으로 인해 순간전압강하 발생시 초기 동작으로 노이즈가 생기는 것을 알 수 있었으며 순간전압강하가 계통에서 제거되는 순간에도 노이즈가 생김을 알 수 있었다. 결과적으로 철도차량의 운행 및 안전에 전력품질 보상 장치의 순간전압강하 보상이 유용함을 알 수 있었다.

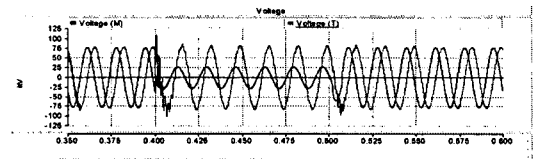


그림 12. 순간전압강하 발생시 T상 및 M상의 전압
Fig. 12. Voltage of T-phase and M-phase on the voltage sag

그림 13의 결과를 보면, 철도급전계통의 고조파 왜곡을 UPQC의 병렬인버터 동작으로 상당히 개선되는 것을 알 수 있다. 이때 UPQC의 병렬인버터동작으로 인해 초기 과도 상태시 THD가 순간적으로 증가하였다 감소하는 현상이 관측되었다. 고조파 왜곡의 개선 효과를 정량적으로 살펴보면, 병렬인버터의 동작으로 전원 전류의 THD는 7.6[%]에서 1[%]내외로, 스코트변압기 2차측 전류의 THD는 8.1[%]에서 1[%]내외로 개선되었다. 따라서 제안한 UPQC의 적용으로 전원 및 스코트변압기 2차측 즉 철도급전계통의 THD가 상당히 개선됨을 알 수 있다.

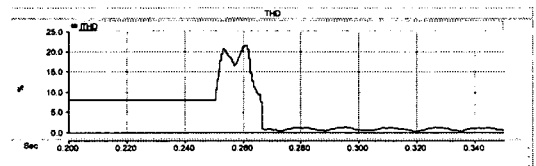


그림 13. 스코트변압기 2차측 전류 THD의 프로파일
Fig. 13. THD profiles of the secondary side of scott transformer

5. 결 론

본 논문에서는 철도급전계통의 전력품질 보상장치 적용에 관한 연구를 수행하였다. 철도 급전계통의 과도해석을 위해 수립된 수학적 모델을 기본으로 하여 전자기 과도해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 철도급전계통을 모델링 하였다. 또한 철도 급전계통에서 발생하는 전력품질 문제를 보상하기 위한 철도계통용 UPQC를 제안하였다. 이의 유용성은 전자기 과도해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 사용하여 시뮬레이션 하였으며 이를 요약하면 다음과 같다.

(1) 전력계통의 사고로 인한 전철급전계통의 순간 전압강하시 UPQC 직렬인버터의 순간전압강하 보상을 시뮬레이션 하였으며, UPQC가 설치되어 있는 계통의 전압이 사고전 전압으로 적정하게 유지됨을 확인하였다.

(2) 철도차량의 운전 에 의한 전철급전계통의 전류 고조파 왜곡은 UPQC의 병렬인버터의 동작으로 전 원전류 및 스코트변압기 2차측 THD가 7~8[%]에서 1[%]내외로 개선됨을 확인하였다.

본 논문의 철도차량 급전계통 및 부하 모델링, 전력품질 보상의 사례연구 결과는 국내 전기철도 전력품질기준연구 기초자료로서 상당히 유용할것이라 사료된다.

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력공학 공동연구소(R-2003-B-279) 주관으로 수행된 과제 임.

References

- (1) 추동욱, 김재철, 전용주, 임성정, 김태수, "교류 전기의 AT 급전계통 내 다수열차 운행 모의알고리즘연구", 대한전기학회논문지, Vol. 50, No. 2, 2001년 6월.
- (2) 김재철 외, "교류급전시스템 고장해석 및 철도배전계통 보호시스템 체계화", 숭실대학교 생산기술연구소, 2002년 3월.
- (3) Tsai-Hsiang Chen and Yen-Feng Hsu, "Systematized short-circuit analysis of a 2x25 kV electric traction network", Electric Power Systems Research, Vol. 47, No. 2, pp. 133-142, 15. October. 1998.
- (4) Ando, M., et. al., "Development of railway static power conditioner used at substation for Shinkanse",

- Proceedings of the Power Conversion Conference, Vol. 3, pp. 1108-1111, 2002.
- (5) Watanabe, T., "Trend of railway technologies and power semiconductor devices", Proceedings of The 11th International Symposium on ISPSD 1999, pp. 11-18, 1999.
- (6) Hackwell, D., et. al., "The use of static shunt compensation to upgrade existing electrified railways", International Conference on Main Line Railway Electrification, pp. 232-235, Sep. 1989.
- (7) Baichao Chen and Kokernak, J.M., "Thyristor controlled two-stage magnetic-valve reactor for dynamic VAR-compensation in electric railway power supply systems", IEEE Fifteenth Annual APEC, Vol. 2, pp. 1066-1072, 2000.
- (8) Hasuike, K., et. al., "Static power conditioner using GTO converters for AC electric railway", Power Conversion Conference 1993, pp. 641-646, Apr. 1993.
- (9) Baba, K., et. al., "Control methods and characteristics of power converter with large capacity for electric railway system", Power Conversion Conference 2002, Vol. 3, pp. 1039-1044, 2002.
- (10) Eguchi, N., et. al., "Self-commutated SVC for electric railways", International Conference on Power Electronics and Drive Systems, Vol. 2, pp.732-737, Feb. 1995.
- (11) Hase, S.-I., et. al., "Compensation of voltage drop using static VAR compensator at sectioning post in AC electric railway system", Power Conversion Conference 1997, Vol. 2, pp. 955-960, Aug. 1997.
- (12) H. Akagi, Y. Kanazawa, and A. Nabae, "Instantaneous reactive power compensators comprising switching devices without energy storage components", IEEE Transaction on IA, Vol. IA-20, No. 3, pp. 625-630, May/June 1984.
- (13) M. Aredes, K. Heumann, and E.H. Watanabe, "An Universal active power line conditioner", IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 13, No. 2, pp. 545-551, Apr. 1988.
- (14) 최준호, 김태수, 김재철, 문승일, 남해근, 정일엽, 박성우, "전기철도계통에 순간전압강하 보상장치 적용에 관한 연구", 한국조명전기설비학회논문지, Vol. 17, No. 6, pp. 95-104, 2003년 11월.

◇ 저자소개 ◇

최준호 (崔峻豪)

1970년 7월 30일생. 1996년 숭실대학교 전기공학과 졸업. 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2002년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 2002년 서울대학교 BK21 박사후 연구원. 현재 전남대학교 전기공학과 전임강사.