

전기철도계통에 순간전압강하 보상장치 적용에 관한 연구

(A Study on the Application of the DVR in AC Electric Traction System)

최준호* · 김태수 · 김재철 · 문승일 · 남해곤 · 정일엽 · 박성우

(Joon - Ho Choi · Tae - Soo Kim · Jae - Chul Kim · Seung - Il Moon · Hae - Kon Nam · Il - Yop Chung · Sung - Woo Park)

요 약

전기 철도계통은 기존 전력계통과 달리 단상, 대용량 부하로 필연적으로 전압강하, 전압불평형 및 고조파 왜곡 등의 전력품질의 문제가 발생한다. 이러한 문제점 중 상시전압강하는 전력품질의 기중 중요한 요소로서 SVC(Static Var Compensator) 또는 STACOM(Static Compensator)를 설치하여 전압강하를 보상하는 연구가 수행되었다. 또한 순시전압강하는 고속으로 운전중인 철도차량의 제어 및 안전에 상당한 영향을 미칠 것으로 예상된다. 따라서 본 논문에서는 AT(Auto Transformer)급전계통에 적용되는 순간전압강하 보상장치에 관한 연구를 수행하였다. 순간전압강하에 의한 철도차량의 과도해석을 위해 전원, 철도급전변압기, AT, 철도선로 및 철도 차량부하를 모델링 하였다. 또한 순간전압강하 발생시 철도차량부하의 과도특성을 분석하였고 이를 보상하기 위한 순간전압강하 보상장치(DVR:Dynamic Voltage Restorer)를 제안하였다. 순간전압강하 보상 시 시뮬레이션 결과, 순간전압강하 보상장치의 철도급전계통의 적용은 상당히 유용함을 알수있었다.

Abstract

The electric traction systems are quite differ from general power systems which is single-phase and heavy load. Therefore, there are inevitably power quality problems such as steady state or transient voltage drop, voltage imbalance and harmonic distortion. Among these problems, since steady-state volatge drop is the one of most important factor in electric power quality, many researches about on the compensation of volatge drop by using SVC(Static Var Compensator) and/or STACOM(Static Compensator) have been studied and proposed. Also, it is expected that transient voltage drop(voltage sag) could affect the control and safety of high speed traction load. In this paper, voltage sag compensation of AT(Auto Transformer) feeding system are studied. The detailed transient models of utility source, scott transformer, AT, and traction load are established. The application of DVR(Dynamic Voltage Restorer) in electric traction system is proposed to compensate the voltage sag of traction network which is ocured by the fault of utility source. It can be shown that application of the DVR in electric traction system is very useful to compensate the volatge sag from the result of related simulation works.

Key Words : electric traction system, AT(auto transformer), voltage sag, DVR(dynamic voltage restorer), PSCAD/EMTDC

* 주저자 : 전남대학교 전기공학과 전임강사
Tel : 062-530-1742, Fax: 062-530-1749
E-mail : joono@chonnam.ac.kr
접수일자 : 2003년 5월 13일
1차심사 : 2003년 5월 27일
심사완료 : 2003년 6월 25일

조명 · 전기설비학회논문지 제17권 제6호, 2003년 11월

1. 서 론

현재 우리나라는 산업의 고도화에 따른 베기가스 및 소음 등 환경 공해 문제를 해결할 수 있는 철도가 새로운 교통수단의 대안으로 부각되고 있으며 현재

경부고속전철이 건설중이다. 특히 전기철도는 수송력이 월등히 높고 안정성과 신속성 및 환경적인 요소로 인해 세계 각국에서 미래 교통문제 해결의 최선의 대안으로 제시되고 있다. 전기철도에 대한 국내 현황을 살펴보면 지금까지는 주로 산업전철화와 도심지 지하철 건설에 치중하여 왔으나 현재 시공중인 경부선 고속전철을 계기로 고속전철과 연계하여 경부선, 호남선, 충북선 등 기존선 전철화 사업이 활발히 이루어지고 있으며 앞으로도 지속적인 추진이 예정되어 있다. 그러나 이러한 전철화에 따른 상당한 이점에도 불구하고 필연적으로 철도 급전계통의 전차선의 전압강하, 상위 계통의 전압불평형 발생, 고조파 왜곡 문제 등이 발생하며 아직 해결하지 못한 기술적 문제들이 산재해 있다 [2-4]. 이러한 문제점을 분석하고 해결하기 위해 철도급전계통의 전압강하 해석[2], 철도급전계통 등가 회로 및 파라미터 해석[2-4], 사고해석 및 보호협조[4-8], 전압불평형 평가[1], 전력품질 보상[9-16] 등의 여러 가지 연구가 진행되어 왔다. 본 논문에서는 전기철도 급전시스템에 발생하는 순간전압강하를 보상에 관한 연구를 수행하였다. 이를 위해 국내 교류전기철도 표준 급전방식인 AT (Auto Transformer) 급전시스템, 철도급전변압기인 스코트 변압기, AT변압기, 철도선로 및 철도 차량부하를 모델링 하였다. 과도응답은 전자기과도해석 프로그램인 PSCAD/ EMTDC를 사용하여 해석하였다. 또한 순간전압강하를 보상하기 위한 방안으로 급전선-전차선에 설치되는 순간전압강하 보상기 (DVR: Dynamic Voltage Restorer)를 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 줄어들게 된다. AT변압기 급전방식을 이

용하면 변전소에서 공급하는 전압이 열차에 급전되는 전압의 2배가된다. 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. 이 방식은 현재 우리나라의 수도권 전철 및 제천-영주간의 중앙선, 영주-철암 간의 영동선에서 이용되고 있으며, 현재 건설 중인 경부 고속철도 노선의 급전방식으로 채택되었다. 또한 이 AT급전방식은 교류식 전기철도에서 표준 급전방식으로 채택되고 있다.

2.1 스코트 변압기

전철 급전 주변압기로서, 3상 교류 전력을 2상으로 변환시키는 변압기의 결선 방법으로 스코트 결선, 메이어 결선 및 우드브리지 결선 방식이 사용되나 전기철도에서는 일반적으로 이용률이 가장 좋은 스코트결선 방식을 채택하고 있으며 국내외에서 많이 사용되는 결선방식이다.

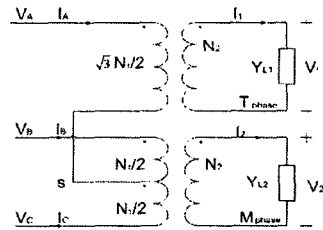


그림 1. 스코트 결선도
Fig. 1. Scott connection diagram

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 단상, 또는 2차측에 용량 및 역률이 같은 부하가 접속되면 1차측 3상에는 3상 평형 전류가 유입하여 불평형률이 영이 되는 것이 특징이며 장점이기도 하다. 만약 불평형 전류가 흐르면 자연히 불평형이 되고 전원측, 부하측에 여러 가지 악 영향을 끼친다. 그리하여 불

평형률을 2시간 부하에 대하여 3% 이내(외국의 경우는 5% 순간 부하 이내)로 억제하고 있다.

2.2 AT(단권 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 2배가 되며, 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. 1차 측은 b-c 권선으로 이것을 분로권선 이라 하며, 2차측은 분로 권선과 직렬권선을 직렬로 접속한 a-c 권선을 말하며 이 양 권선에는 서로 다른 전류가 흐른다. 1차측에 E1의 전압을 가하면 여자 전류가 흘러 기전력이 발생하고 2차측에는 E2의 전압이 나타난다. AT는 1차 권선과 2차 권선이 연결되어 있기 때문에 용량을 말할 때는 자기용량과 부하용량을 사용하고 있다. 자기용량이란 직렬 권선과 또는 분로 권선의 용량을 말하며, 부하용량은 AT를 통하여 공급하는 부하의 크기를 말하고 2차 단자 전압과 2차 전류의 곱으로 나타낸다. 자기용량과 부하용량의 관계식은 다음 식 (1)과 같다.

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

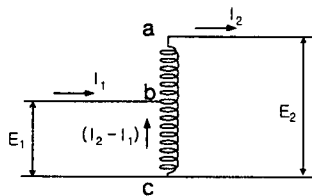


그림 2. AT 등가 회로
Fig. 2. Equivalent circuit of AT

2.3 전차선로

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

$$Z_{\epsilon} = \gamma_T + j\omega L_i \quad [\Omega/km] \quad (2)$$

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

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 대지위로 외부 임피던스는 Carlson-Polaczek의 식 (3)을 이용하여 구할 수 있다.

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

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

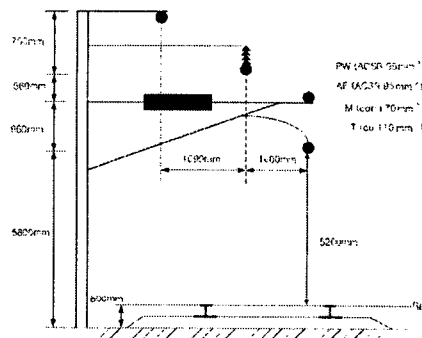


그림 3. AT 급전방식 설치 단면도
Fig. 3. Diagram of AT feeding system

2.4 전기철도차량

일반적으로 전기철도 차량의 모델은 상시전압강

하등의 정상상태 해석에서는 그 해석의 용도에 따라 정 임피던스, 정전류, 정전력 모델이 사용된다. 전기 철도차량의 동력은 PWM(Pulse Width Modulation) 인버터를 이용하여 삼상 유도전동기를 구동하는 방식이다. 즉 교류전원을 수전받아 이를 직류전원으로 변환한 후 이를 다시 삼상PWM인버터를 통해 건 인전동기인 유도기에 전력을 공급하여 차량을 구동하는 방식이다. 따라서 이의 과도상태 해석을 위해서는 이를 정확히 모델링할 필요가 있다. 그림 4에는 전형적인 철도차량 부하모델을 나타내었다.

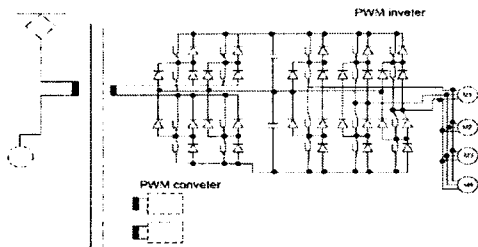


그림 4. 전형적 전기철도차량 모델
Fig. 4. Typical electric traction locomotive load

3. 철도급전계통의 PSCAD/EMTDC 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 축약하였으며 파라미터는 다음의 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

표2와 3에는 국내에 실제 적용된 스코트변압기와 AT변압기의 PSCAD/EMTDC의 등가 모델링 파라미터를 나타내었다. 철도계통에서 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 선로 모델링

그림 3의 AT급전선로를 급전선, 전차선, 레일로 등가화하여 자기 임피던스 및 상호 임피던스를 식 (2), (3)을 이용하여 구하면 다음의 표4와 같다.

표 4. 철도급전선로 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_d)	0.1771+j0.7485
레일 자기 임피던스 (Z_r)	0.2470+j0.8520
급전선-전차선 상호 임피던스 (Z_{fd})	0.0582+j0.4699
급전선-레일 상호 임피던스 (Z_{fr})	0.0586+j0.3646
전차선-레일 상호 임피던스 (Z_{dr})	0.0587+j0.3778

3.4 철도차량 부하

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 PSCAD/EMTDC 상에 구현된 모델을 그림 5에 나타내었다. 현재 전기철도 차량의 구성은 총 10개의 차량으로 구성되어 있으며 차량의 역할별로 TC, M, M', T 차량으로 구분되어진다. TC 차량은 전기철도의 앞, 뒤에 위치하고 제어를 담당하며, M 및 M' 차량은 견인전동기가 4대씩 설치되어 총 5개의 차량이 편성되고, 특히 M' 차량에는 수전변압기가 설치되어 있다. 차량의 편성은 TC-M-M'-T-T-M'-T-M- M'-TC의 순으로 총 10개의 차량이 편성된다. 견인전동기가 설치되어 있는 M 및 M' 차량의 구성 요소를 살펴보면 다음과 같다. 25[kV]의 주계통에 연결된 단상 변압기는 전압비가 25[kV]/840[V]로 설정되어 있고 3상 인버터의 사용으로 인하여 발생한 고조파가 주전원쪽으로 전파되는 것을 어느 정도 감쇄시킨다.

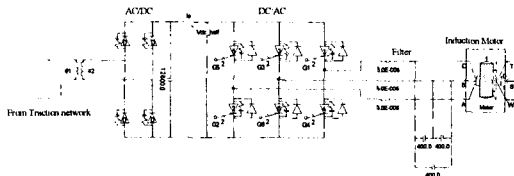


그림 5. PSCAD/EMTDC 상에서 구현된 전기철도차량 모델
Fig. 5. Electric traction locomotive model in PSCAD/EMTDC

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 캐패시터 용량	12600 [μF]
	직류단 전압	1.8 [kV]
	필터(L, C)	0.005 [mH], 400 [μF]
M 및 M' 차량의 유도전동기 단위 용량	정격전압	1.1 [kV]
	정격전류	0.13 [kA]
	정격부하시 역률	0.88 [p.u]
	전부하시 슬립	0.977 [p.u]
	전전압 기동토크 / 전부하 토크	1.5 [p.u]
	최대토크/전부하토크	3.0 [p.u]
	전전압 기동전류	6 [p.u]
정격부하시 효율	0.98 [p.u]	
총부하	유도전동기 20대	4.95 [MVA]

단상 정류기는 두개의 12600[μF] 캐패시터 (Capacitor)에 1800 [kV]의 직류 전압이 충전되도록 하는 정류 역할을 수행한다. 그리고 3상 인버터는 제어를 통하여 정류된 직류 전압을 1.1 [kV]의 교류 전압으로 바꾸어 주는 역할을 수행하여 유도 전동기에 전원을 공급한다. 인버터의 필터로는 값이 0.005 헨리[mH], 400[μF]인 L-C 필터가 사용되어 인버터의 출력 전압에 섞인 고조파를 제거한다. PSCAD/EMTDC 상에서 유도 전동기는 스피드 제어 모드에서 동작하다가 0.7초 후엔 일정 토크 (Torque) 제어 모드로 변환된다. 전기철도 차량부하 모델에 사용된 파라미터는 표 5에 나타내었다.

4. 철도급전계통의 순간전압강하 보상장치 적용

전기철도계통에서는 필연적으로 전압강하, 전압 불평형, 고조파 및 역률등의 전력품질 문제가 발생한다. 최근 전력품질 문제를 해결하기 위해 기존 전력계통에 쓰이는 FACT(Flexible AC Transmission) 및 UPQC(Unified Power Quality Conditioner)의 철도급전계통 적용에 관한 연구가 선진국을 중심으로 활발히 진행되고 있는 실정이다[10]. 특히 90년대 후반 이후 일본 및 선진외국에서는, AT 급전계통에 단상 SVC나 STACOM을 설치하여 전압강하 및 역률을 보상하는 연구가 진행되었고 일부 운전중에 있다[10-16]. 따라서 현재 국내에서 진행되는 고속전철의 보다 나은 운전을 위해서는 이러한 연구가 절실히 필요한 실정이다. 그러나 이러한 상시전압강하 보상을 위한 SVC나 STACOM의 설치 는 철도급전계통의 전원계통의 연구사고나 순간사고시 발생하는 순간전압강하를 적절히 보상하지 못한다는 것이 일반적인 견해이다. 전원 계통의 사고시에 철도 급전변압기 2차측 즉 철도 선로에는 순간 전압강하가 일어나며 이때 발생하는 철도급전계통의 순간전압강하는 달리고 있는 철도차량의 제어 및 안전에 상당한 영향을 미칠것으로 예상되므로 이의 정확한 해석은 상당히 중요하다. 본 장에서는 전원 계통의 순간사고시 발생하는 순간전압강하시 전기 철도 차량부하의 과도응답 특성을 전자기과도해석

전기철도계통에 순간전압강하 보상장치 적용에 관한 연구

프로그램인 PSCAD/EMTDC를 사용하여 분석하였다. 또한 철도급전계통에서 발생하는 순간전압강하를 보상하는 철도계통용 순간전압강하 보상장치(DVR)를 제안하였고 이의 유용성을 전자기과도해석 프로그램인 PSCAD/ EMTDC를 사용하여 분석, 입증하였다.

4.1 순간전압강하시 전기철도 차량 과도 해석

전원 계통의 사고시에 철도 급전변압기 2차측 즉 철도 천차선로에는 순간전압강하가 일어나며 이때 주행 중인 전기철도차량의 과도해석은 상당히 중요하다. 본 절에서는 전원계통의 순간사고시 발생하는 순간전압강하시 전기철도 차량부하의 과도응답 특성 및 영향을 전자기과도해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 사용하여 분석하였다.

4.1.1 모의계통 및 시뮬레이션

수립된 과도해석 모델을 이용하여 전원 계통의 순간 사고시 철도 차량부하의 과도응답을 모의하기 위한 모의 계통은 다음의 그림 6과 같다. 순간사고는 1초에 3상지락사고가 발생하였다고 가정하였으며 지속시간은 10 사이클(16.67[ms])로 하였다.

철도계통의 모델 및 이의 파라미터는 3장에서 수립된 전원, 스코트 변압기, AT 및 과도해석용 철도 차량부하를 사용하였다. 이 때 철도차량은 AT1과 AT2의 중간지점인 6[km]에 운행중이라고 가정하였다. 그림 7에서 그림 12에는 순간전압강하시 전기철도차량의 과도해석 시뮬레이션 결과를 나타내었다.

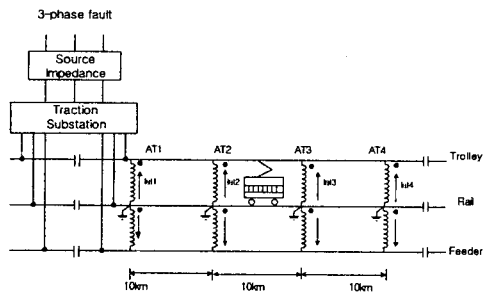


그림 6. 모의 계통
Fig. 6. Sample system

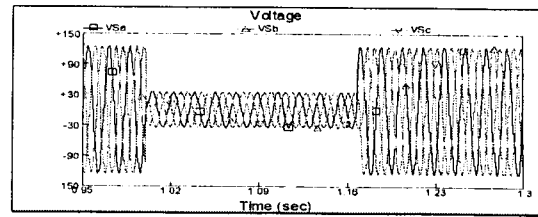


그림 7. 전원 전압
Fig. 7. Source voltages

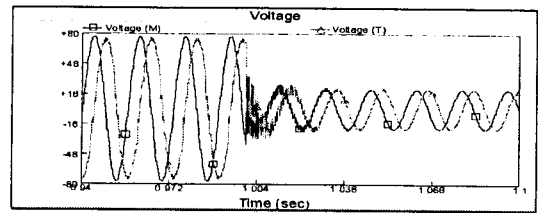


그림 8. 스코트변압기 2차측 전압
Fig. 8. Secondary voltages of scott transformer

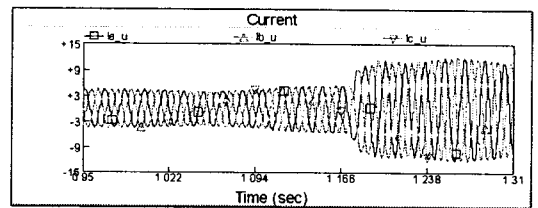


그림 9. 유도기 공급전류
Fig. 9. Supply current of induction motor

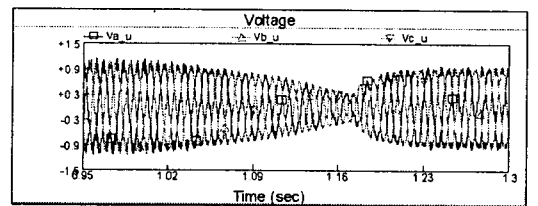


그림 10. 유도기 공급전압
Fig. 10. Supply voltage of induction motor

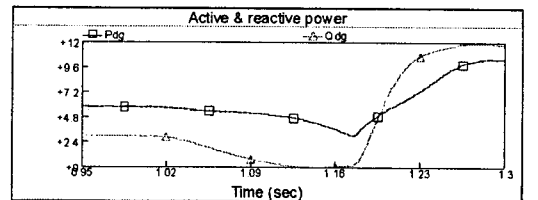


그림 11. 유도기 유효 및 무효전력
Fig. 11. Active and reactive power of induction motor

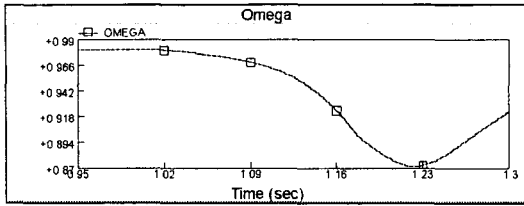


그림 12. 유도기 속도 변화
Fig. 12. Speed variation of induction motor

시뮬레이션 결과를 보면, 순간 사고시 전원 전압의 순간전압강하로 인하여 철도 급전변압기의 M상 및 T상 전압이 순간적으로 떨어짐을 알 수 있었다. 또한 철도차량부하의 동력원인 유도전동기에 공급되는 전압, 전류 파형이 왜곡되며 이로 인해 유도기에 공급되는 유효 및 무효전력이 감소하는 특성을 보이게 된다. 이 때 유도기의 회전속도는 순간사고 시라 할지라도 정격 회전수보다 13 [%]이상 떨어짐을 알 수 있다. 또한 순간전압강하 이후 전원전압 복구후 유도기가 재가속(Reacceleration)되어 무효전력의 소비가 증가함을 알 수 있다. 시뮬레이션의 경우 직류 캐패시터의 용량을 여유있게 선정하였으나 순간전압강하 발생시 직류단의 전압이 일정 수준으로 이하로 떨어질 경우 이는 철도 차량의 제어에 상당한 영향을 미칠것으로 예상된다. 즉 철도 급전계통에서 발생하는 순간전압강하는 전기철도 차량의 운전 및 제어에 악 영향을 미칠것으로 예상된다. 따라서 전원 계통의 사고로 인해 철도급전에 발생 가능한 순간전압강하 문제에 대한 대책 마련이 필요한 것으로 보여진다.

4.2 순간전압강하 보상장치

철도 급전계통은 기존 전력계통과 달리 단상계통으로 단상 직렬 인버터를 적용하여야 한다. 일반적인 전압강하 보상장치의 구성은 그림 13과 같다.

PSCAD/EMTDC상에서 구성된 직렬인버터의 구조는 다음의 그림 14와 같으며 이의 파라미터는 표 6에 나타내었다. 철도급전계통의 특성상 급전선과 전차선 사이에 연결되는 단상으로 설계되었다. 직렬 보상기기인 순간전압강하 보상장치는 그림 13과 같이 직렬주입변압기를 통해 계통에 연계된다. 순간전압강하 보상장치는 크게 직류 에너지 저장장치,

조명 · 전기설비학회논문지 제17권 제6호, 2003년 11월

전압원 인버터, 고조파 필터 그리고 주입변압기로 구성된다. 순간전압강하 보상장치는 전원측의 전압 변동이 부하측에 전달되지 않도록 전압변동 크기만큼의 전압을 직렬로 삽입해 주는 역할을 한다.

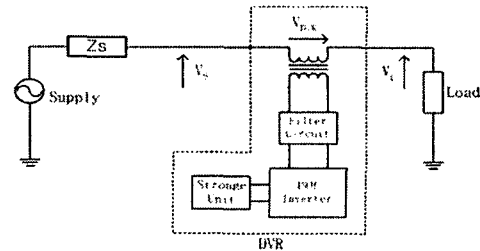


그림 13. 전형적 순간전압강하 보상장치 구성
Fig. 13. A typical configuration of DVR

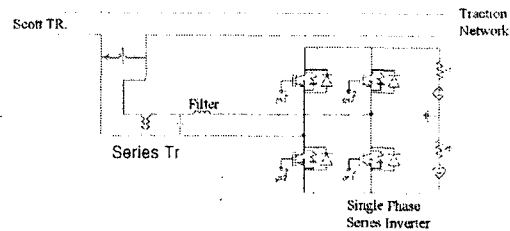


그림 14. 철도계통용 순간전압강하 보상장치 구성
Fig. 14 Configuration of DVR for traction network

표 6. 철도계통용 순간전압강하 보상장치 파라미터
Table 6. DVR Parameters for traction network

필터	L	10[mH]
	C	3.5[μ F]
직렬 변압기	정격 용량	10[MVA]
	전압비	27.5/27.5[kV]
	입피턴스	4[%]

4.2.1 제어 알고리즘

기존 전력계통과 달리 철도 급전계통은 단상 계통이므로 단상용 순간전압강하 보상장치의 제어 회로가 필요하다. 순간전압강하 보상장치는 전원측의 사고나 전압변동에 의한 전압강하가 부하측에 전달되지 않도록 전압변동 크기만큼의 전압을 직렬로 주입하여 부하측의 전압을 일정하게 유지하도록 한다. 이상적인 순간전압강하 보상장치의 주입 전압은 다음 식(4)와 같다.

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

여기에서, V_{DVR} : 순간전압강하 보상장치에서 공급하는 전압의 벡터, V_{Lpre} : 사고 전 부하전압, V_S : 사고후 전압

즉 순간전압강하 보상장치는 강하된 전압의 크기 만큼을 보상하여 전압강하에 민감한 부하의 영향을 줄이는 것이다. 철도계통용 단상 순간전압강하 보상장치의 제어의 경우 스콧트 변압기의 2차측 전압이 전원전압이 되고, AT 구간의 전차선과 레일의 전압이 부하전압이 된다. 따라서 사고전 부하전압은 AT구간의 전차선과 레일의 사고전 전압이다.

그림 15는 제안된 철도 계통용 순간전압강하 보상 장치의 제어도를 보여준다. 제안된 순간전압강하 보상 장치의 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.

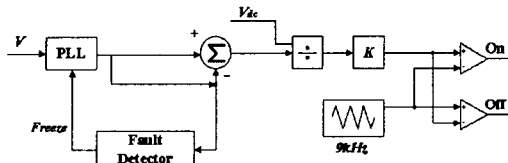


그림 15. 제안된 순간전압강하 보상장치 제어도
Fig. 15. Proposed DVR control diagram

4.3 순간전압강하 보상 사례연구

제안한 순간전압 강하 보상 장치의 유효성을 입증하기 위해 순간전압 강하 보상에 대한 성능을 평가하였다. 순간전압 강하 보상은 철도차량부하가 AT1과 AT2 구간사이에서 운행하고 있을 때 전원 계통에 순간사

고가 발생할때 이때 발생하는 철도 급전선로의 전압 강하를 보상하는 사례를 분석하였고, 이의 결과를 그림 16에서 부터 20에 나타내었다. 순간사고는 3상 단락사고로 1초에 발생하여 지속시간은 10사이클로 가정하였다.

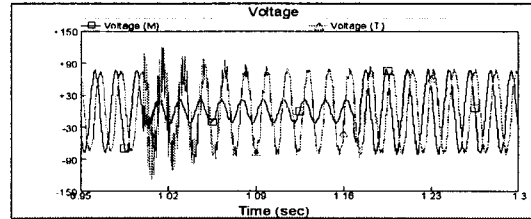


그림 16. DVR적용시 스콧트변압기 2차측 전압
Fig. 16. Secondary voltages of scott transformer with DVR

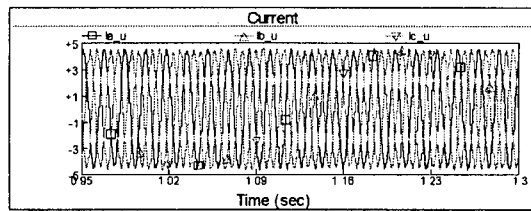


그림 17. DVR적용시 유도기 공급전류
Fig. 17. Supply current of induction motor with DVR

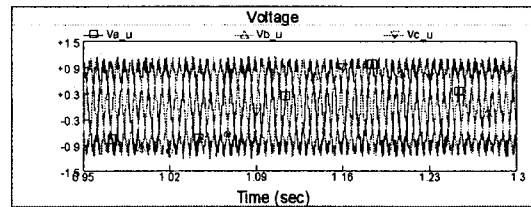


그림 18. DVR적용시 유도기 공급전압
Fig. 18. Supply voltage of induction motor with DVR

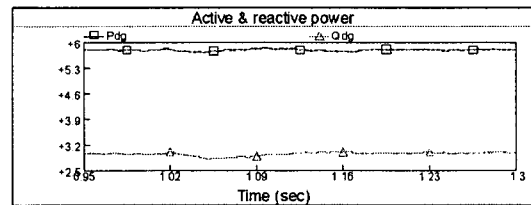


그림 19. DVR적용시 유도기 유효 및 무효전력
Fig. 19. Active and Reactive power of induction motor with DVR

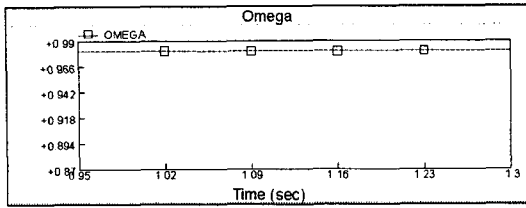


그림 20. DVR적용시 유도기 속도변화
Fig. 20. Speed variation of induction motor with DVR

시뮬레이션 결과 전원 계통의 사고로 인해 순간전압강하가 계통에 발생하고 이로 인해 전원측 전압은 공칭전압의 30[%]까지 강하하지만 순간전압보상 장치의 동작으로 인해 철도급전변압기의 2차측 전압중 순간전압강하 보상장치가 설치되어 있는 M상, T상의 전압이 사고전 전압으로 유지됨을 알 수 있다. 이때 순간전압강하 보상장치의 동작으로 인해 초기 과도 상태시 노이즈가 생기는 것을 알 수 있었다. 유도기의 공급전압, 공급전류, 유효 및 무효전력은 순간전압강하 보상장치의 동작으로 사고전과 동일하게 안정적으로 동작함을 알 수 있었다. 또한 유도기 속도변화는 아주 작아 철도차량의 운행 및 안전에 순간전압강하 장치의 순간전압강하 보상이 유용함을 알 수 있었다.

5. 결 론

본 논문에서는 철도급전계통의 사고해석 및 순간전압강하 보상장치 적용에 관한 연구를 수행하였으며 이를 요약하면 다음과 같다. 철도 급전계통의 과도해석을 위해 수립된 수학적 모델을 기본으로 하여 전자기 과도해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 사용하여 철도 차량의 제어 및 안정성에 상당히 영향을 미칠 것으로 예상되는 전원계통 사고시 발생하는 순간전압강하에 의한 철도차량 부하의 과도특성을 분석하였다. 시뮬레이션 결과, 순간전압강하가 철도차량부하의 제어 및 안전에 상당한 영향을 미치는 것으로 보인다. 또한 순간전압강하를 보상하기 위한 방안으로 급전선-전차선에 설치되는 순간전압강하 보상기(DVR)를 제안하였으며 이의 모델링을 확립하였으며 이의 유효성을 시뮬레이션을 통해 검증하였다. 시뮬레이션 결과 전원 계통사고시에 순간전압

조명 · 전기설비학회논문지 제17권 제6호, 2003년 11월

강하 보상장치의 운전으로 철도차량부하의 과도특성이 안정적임을 알 수 있었다.

본 논문의 철도차량 부하 모델링 및 순간전압강하 보상의 사례연구 결과는 향후 추진될 국내 전기철도 전력품질기준연구에 기초자료로서 상당히 유용할 것이라 사료된다.

- 감사의 글 -

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력공학공동연구소(R-2003-B-279) 주관으로 수행된 과제임.

References

- (1) 오광해 외, "전철부하에 기인된 계통전압 불평형 평가 기법", 대한전기학회 하계학술대회논문집 C권, pp. 787-789, 1997년. 7월.
- (2) 추동욱 외, "교류 전기의 AT 급전계통 내 다수열차 운행 모의알고리즘연구", 대한전기학회논문지, Trans. KIEE, Vol. 50P, No. 2, 2001년. 6월.
- (3) 임성정 외, "전기철도 시스템에서 직격뢰에 대한 가공지선의 뇌뢰 효과", 한국 조명.전기설비 학회 논문지. Vol. 15, No.3, pp. 91-96, 2001년. 5월.
- (4) 김재철 외, "교류급전시스템 고장해석 및 철도배전계통 보호시스템 체계화", 숭실대학교 생산기술연구소, 2002년. 3월.
- (5) 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.
- (6) Gao Shibin, He Weijun, and Chen Xiaochuan, "Study on microprocessor-based adaptive protective relay for heavy duty electric traction system", Sixth International Conference on Developments in Power System Protection (Conf. Publ. No. 434), pp. 319-322, 1997.
- (7) Millard, A, Taylor, I.A., and Weller, G.C., "AC electrified railways-protection and distance to fault measurement", International Conference on Electric Railways in a United Europe, pp. 73-77, 1995.
- (8) Sezi, T. and Menter, F.E., "Protection scheme for a new AC railway traction power system", IEEE Transmission and Distribution Conference, Vol. 1, pp. 388-393, 1999.
- (9) 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.
- (10) Watanabe, T., "Trend of railway technologies and power semiconductor devices", Proceedings. of The 11th International Symposium on ISPSD '99, pp. 11-18, 1999.
- (11) Hackwell, D., et. al., "The use of static shunt compen-

전기철도계통에 순간전압강하 보상장치 적용에 관한 연구

- sation to upgrade existing electrified railways”, International Conference on Main Line Railway Electrification, pp. 232-235, Sep. 1989.
- [12] Baichao Chen and Kokemak, 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.
- [13] Hasuike, K., et. al., “Static power conditioner using GTO converters for AC electric railway”, Power Conversion Conference 1993, pp. 641-646, Apr. 1993.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.

◇ 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.

김태수 (金泰洙)

1954년 9월 3일생. 1982년 명지대학교 전기공학과 졸업. 1996년 연세대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2003년 숭실대학교 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재: 철도청 전기본부 전철전력과장.

김재철 (金載哲)

1955년 7월 12일생. 1979년 숭실대학교 전기공학과 졸업. 1983년 서울대학원 전기공학과 졸업(석사). 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재: 숭실대 전기공학과 교수.

문승일 (文承逸)

1961년 2월 1일생. 1985년 서울대학교 전기공학과 졸업. 1989년 Ohio State University 졸업(석사). 1993년 Ohio State University 졸업(박사). 현재: 서울대학교 전기컴퓨터공학부 부교수.

남해곤 (南海鯤)

1950년 10월 16일생. 1975년 서울대학교 전기공학과 졸업. 1980년 University of Huston 졸업(석사). 1986년 University of Texas at Austin 졸업(박사). 현재: 전남대학교 전기공학과 교수.

정일엽 (丁一燁)

1976년 3월 16일생. 1999년 서울대학교 공대 전기공학부 졸업. 2001년 동 대학원 전기공학부 졸업(석사). 현재: 동 대학원 전기공학부 박사과정.

박성우 (朴成雨)

1975년 7월 6일생. 2001년 고려대학교 공대 전기공학부 졸업. 현재: 서울대학교 대학원 전기공학부 석사과정.