

PSCAD/EMTDC를 이용한 전기철도급전계통에 DVR(Dynamic Voltage Restorer)해석에 관한 연구

최준호^{*}, 김재철^{**}, 박수만^{***}, 김태수[†], 추동욱[†], 정일엽^{††}, 박성우^{††}
^{*}전남대학교, ^{**}숭실대학교, ^{***}철도청, [†]경문대학, ^{††}서울대학교

A study on analysis of DVR(Dynamic Voltage Restorer) in electric traction network by using the PSCAD/EMTDC

J.-H. Choi^{*}, J.-C. Kim^{**}, S.-M. Park^{***}, T.-S. Kim[†], D.-W. Choo[†], I.-Y. Chung, S.-W. Park
^{*}Chonnam National Univ., ^{**}Soongsil-Univ., ^{***}Korail, [†]Kyungmoon-College, ^{††} Seoul National Univ.

Abstract - The electric traction load is quite differ from general power system load which is single-phase, high-speed heavy load receiving power from 3-phase power system and also has variable load characteristics over time and space. Therefore, there are inevitably power quality problems such as steady state or transient voltage drop, voltage imbalance and harmonic distortion. In addition, it is expected that transient voltage sag could affect the safety of feeding system.

Thus, in this paper transient analysis and voltage sag compensation of AT(Auto Transformer) feeding system are studied. The fault study of traction network is analysed by using PSCAD/EMTDC simulation tool.

In addition, application of DVR in electric traction system is proposed to compensate the voltage sag of traction network which is occurred by the fault of utility source. The results of fault study will be a useful research works for operation and setting of electric traction relay. Also, it can be shown that application of the DVR in electric system is very useful to compensate the voltage sag from the result of related simulated work.

The results of study will be a useful research works for management and planning of power quality in electric traction system.

1. 배경

전기철도에 대한 국내 현황을 살펴보면 지금까지는 주로 산업전철화와 도심지 지하철 건설에 치중하여 왔으나 현재 시공 중인 경부선 고속전철을 계기로 고속전철과 연계하여 경부선, 호남선, 충북선 등 기존선 전철화 사업이 활발히 이루어지고 있으며, 앞으로도 지속적인 추진이 예정되어 있다.

국내 전기철도 건설을 위한 정부의 21세기 장기 국가철도망 구축 기본 계획에 의하면 "2000년 전철화를 21.2%, 전철화 거리 661 km를, 2010년에는 전철화 70%, 전철화거리 4118km, 2020년도에는 전철화 86%, 전철화거리 4,440km로 달성하도록 계획"하고 있다. 또한 최근 들어 남북한 종단 철도 및 중국과 시베리아를 통한 국제철도 연계방안(철도 실크로드 사업)이 심도 있게 논의되고 있으며 북한과 공동으로 경의선 및 동해선의 일부 구간 공사를 진행하고 있다.

그러나 고빈도, 대량수송, 고속화에 따른 필연적으로 철도 급전계통 전차선의 전압강하, 상위 계통의 전압 불평형 발생, 고조파 왜곡문제 등이 발생하여 아직 국내에서 해결하지 못한 기술적 문제들이 산재해 있다.

따라서 본 논문에서는 철도급전계통(AT급전계통)의 상위 전원계통에서 3상 사고가 발생했을 경우의 사고에 대한 해석과 이 사고에 대해서 DVR을 적용했을 시의 결

과를 비교 분석 하였다.

2. 전기철도 급전방식

2.1 급전방식의 종류

전기철도의 급전방식에는 직접급전방식, BT급전방식, 그리고 AT급전방식으로 크게 나눌 수 있다. 그러나 본 논문에서는 AT급전방식에 대해서만 언급을 하겠다.

2.2 AT 급전방식의 구성

전철용 변전소에서 전차선과 레일 등의 전용 도체를 통해서 열차에 전력을 공급하기 위한 전선을 급전선로라 하고 이것을 지지 또는 보강하는 공작물을 총칭하여 급전계통이라 한다. AT 급전방식을 이용하는 가공 전차선로의 경우 급전선, 전차선, 조가선, 보호선, AT, 진동방지장치, 곡선 당김 장치, 구분 장치, 인류장치, 흐름방지 장치, 레일 등으로 구성되어 있다. 정상상태에서 전류가 흐르는 부분은 전차선, 레일, 급전선, AT로 한정하여 볼 수 있다. 그림 1은 급전계통을 포함한 AT급전방식을 이용하는 전차선로의 구성을 나타내고 있다. 급전 분소(SP: Sectional Post)는 양쪽 전차선로의 전압위상이 다를 수 있기 때문에 전기적으로 구분하기 위하여 개폐 설비를 이용하여 설치한다.

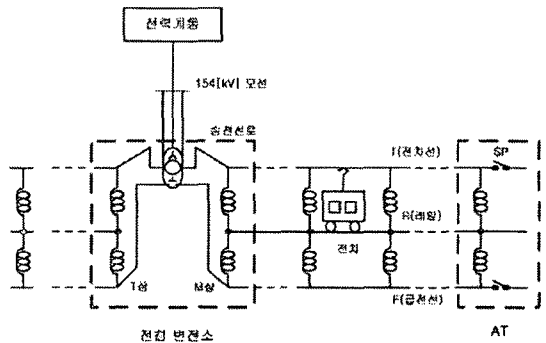


그림 1. AT 전차선로의 구성

2.3 전철 변전소의 주 변압기 (스콧트 변압기)

그림 2는 전철용 변전소의 주 변압기를 나타내고 있다. 1차측은 중성점 탭을 가지고 있으며, 2차측은 m좌와 T좌 권선이 있다. 또 T좌와 1차 권선은 M좌 측 1차 권선의 $\frac{\sqrt{3}}{2}$ 이다. 이 스콧트 결선의 최대 장점은 단상, 또는 2차측에 용량 및 역률이 같은 부하가 접속되면 1차측 3상에는 3상 평형전류가 흘러 불평형률이 영(zero)이 되는 것이 장점이다.

스콧트 변압기의 소요 용량은 다음 식 (1)을 통하여 구할 수 있다.

$$\text{변압기용량} = \frac{\text{부하부담}}{\text{변압기효율} \times \text{역률}} \times \text{여유율} \quad (1)$$

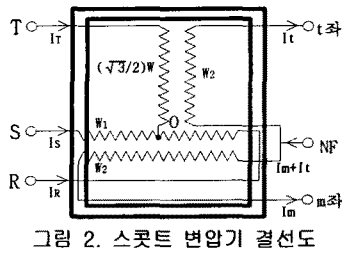


그림 2. 스코트 변압기 결선도

2.4 AT(단권변압기)

그림 3은 AT의 구조이다. AT는 2권선 변압기와는 달리 1차 권선과 2차권선으로 되어 있지 않고, 공통 철심을 이용하여 코일 2개를 감고 이를 직렬로 접속해서 1차와 2차의 단자를 인출함으로써 2권선 변압기와 동일한 변성비를 얻을 수 있다. 그러나 1차 측에서 이상 현상이 발생하면 2차측에 영향이 그대로 나타나기 때문에 1차측에서 이상 현상을 차단해야 한다. 전차선로에서 사용되는 AT는 직렬권선과 분로권선이 1:1의 권수비를 가지며 두 권선을 접속하는 지점에 전차선로의 레일과 연결한다. 1차 측은 b-c 권선으로 이것을 분로권선이라 하며, 2차측은 분로권선과 직렬권선을 직렬로 접속한 a-c 권선을 말하며 이 양 권선에는 서로 다른 전류가 흐른다. 1차 측에 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 말하며, 부하용량은 AT를 통하여 공급하는 부하의 크기를 말하고 2차 단자 전압과 2차 전류의 곱으로 나타낸다. 자기용량과 부하용량의 관계식은 식(2)와 같다.

$$\frac{\text{자기용량}}{\text{부하용량}} = \frac{(E_2 - E_1) \times I_2}{E_2 \times I_2} \quad (2)$$

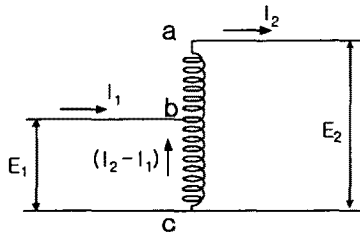


그림 3. AT 등가회로

2.5 전차선로의 구성

전차선로의 구성은 전차선, 급전선, 레일, 기타장비등으로 구성되어 있으며, 기타장비로는 집전장치, 조가선, 귀선, 행거, 진동방지, 곡선당김장치, 가동브래킷, 장간애자, 현수애자 등이 있다. 선로의 임피던스는 내부임피던스와 외부임피던스의 합으로 구할 수 있다.

3. 급전계통 과도해석

3.1 모의 계통

상위 전원계통의 순간 사고 시 철도급전계통 및 차량 부하의 과도응답을 모의하기 위한 모의 계통은 다음 그림 4와 같다. 순간사고는 1초에 3상 지락사고가 발생하였다고 가정하였으며 지속시간은 10 사이클로 하였다. 그리고 철도차량은 AT1과 AT2의 중간지점인 5km에 운행 중이라고 가정하였다.

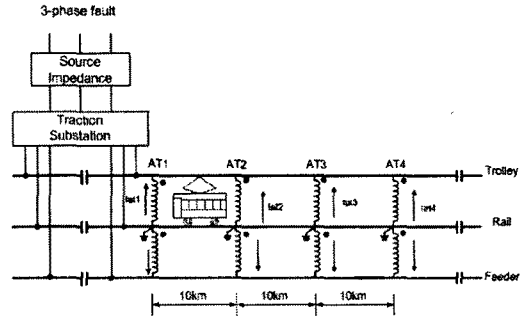


그림 4. 모의 계통

본 모의 계통에서 사용한 급전선로의 등가 임피던스 및 스코트변압기 모델 파라미터는 다음과 표와 같다.

표 1. 철도급전선로의 등가파라미터

구분	임피던스(Ω/km)
급전선 자기 임피던스	0.3597+j0.9576
전차선 자기 임피던스	0.1771+j0.7485
레일 자기 임피던스	0.2470+j0.8520
급전선-전차선 상호 임피던스	0.0582+j0.4699
급전선-레일 상호 임피던스	0.0586+j0.3646
전차선-레일 상호 임피던스	0.0587+j0.3778

표 2. 스코트 변압기 모델 파라미터

M차	용량	15(45) [MVA]
	전압비	154/55 [kV]
T차	용량	15(45) [MVA]
	전압비	133/55 [kV]
	임피던스	10 %

그리고 일반적으로 현재 널리 사용되는 철도차량의 동력은 PWM인버터를 이용하여 삼상유도전동기를 구동하는 방식이다. 즉 교류전원을 수전 받아 이를 직류전원으로 변환한 후 이를 다시 삼상 PWM인버터를 통해 유도전동기에 전력을 공급하여 철도 차량을 구동하는 방식이다.

따라서 본 논문에서는 철도 차량의 일반적인 부하인 단상변압기, 단상정류기, 3상 인버터 및 삼상 유도전동기와 같은 구성요소를 정확하게 모델링 하여 전기철도 차량의 파라미터에 적용하였다.

3.2 3상 전원계통 사고시의 결과 파형

상위 계통의 3상 사고시의 결과 파형을 아래의 그림 5~그림 9에서 나타내고 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 전원 계통의 사고가 급전선, 레일 및 전차선 전압, 유도기에 공급되는 전압, 전류 및 속도에 영향을 미침을 알 수 있다.

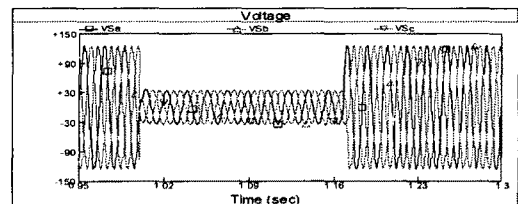


그림 5. 전원 사고 전압 [kV]

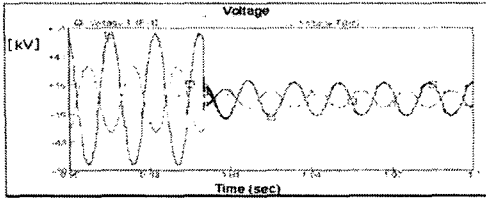


그림 6. 급전선-전차선 및 전차선-레일 전압 [kV]

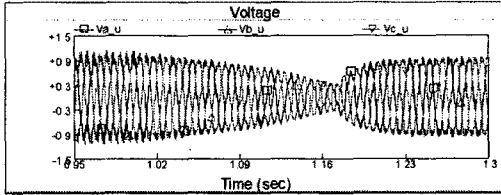


그림 7. 유도기 공급 전압 [kV]

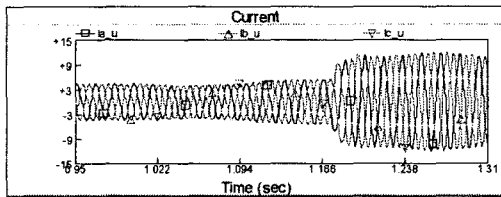


그림 8. 유도기 공급 전류 [kA]

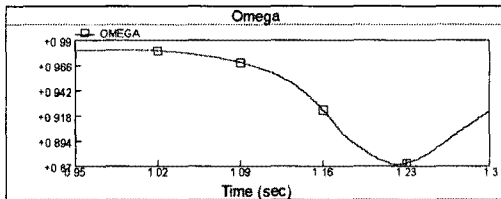


그림 9. 유도기의 속도 변화 [PU]

3.3 순간전압 보상장치(DVR)의 적용

직렬 보상기인 순간전압 보상장치는 그림 10과 같이 직렬주입 변압기를 통해 계통에 연계된다. 전원 측의 전압변동이 부하 측에 전달되지 않도록 전압변동 크기만큼의 전압을 직렬로 삽입해 주는 역할을 한다.

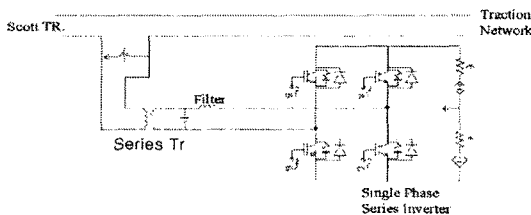


그림 10. 철도 계통용 순간전압강하 보상장치 구성

순간전압강하 보상장치의 적용 후에도 전원계통의 사고전압은 변하지 않았다. 이것은 DVR을 전원계통이 아

닌 철도급전계통에 적용하였기 때문이다. 그리고 DVR 적용후의 급전선-전차선 및 전차선-레일 전압을 보면 사고 직후에 순간적인 과도현상이 일어나기는 하나 이내 정상적인 전압으로 복구 되는 특징을 그림 11에서 볼 수 있다. 뿐만 아니라, 유도기에 공급되는 전류, 전압 및 유도기의 속도변화도 개선되었음을 그림 12~그림 14를 통해서 확인할 수 있다.

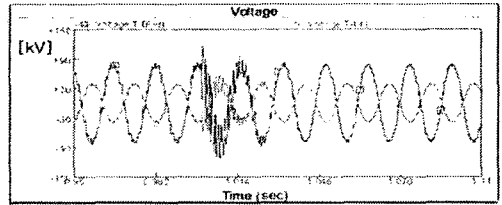


그림 11. DVR 적용 후의 급전선-전차선 및 전차선-레일 전압 [kV]

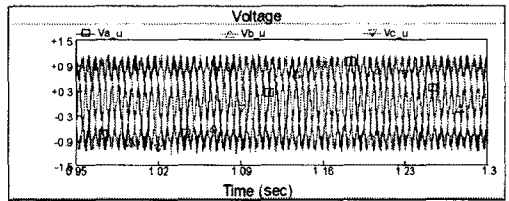


그림 12. DVR 적용 후의 유도기에 공급되는 전압 [kV]

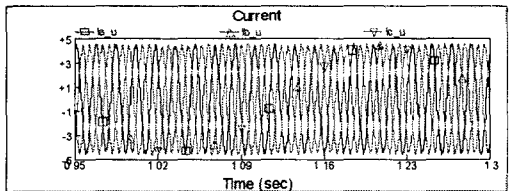


그림 13. DVR 적용 후의 유도기에 공급되는 전류 [kA]

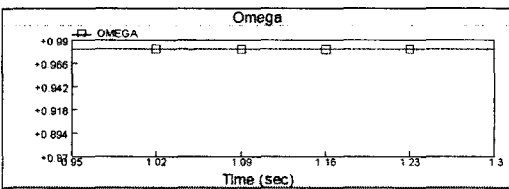


그림 14. DVR 적용 후의 유도기의 속도 변화 [PU]

시뮬레이션 결과 상위 전원 계통의 사고로 인해 순간 전압강하가 계통에 발생하고 이로 인해 전압은 30%까지 강하하지만 순간전압보상 장치의 동작으로 인해 철도 급전변압기의 2차 측 전압 중 순간 전압강하 보상장치가 설치되어 전압이 사고 전 전압으로 유지됨을 알 수 있다. 또한 유도기의 속도 변화는 아주 작아 철도차량의 운행 및 안전에 순간전압강하 보상장치의 전압보상이 유용함을 알 수 있다.

4. 결 론

국내의 전기철도는 교통수용의 급증과 환경친화적 특

성, 에너지 절감 등의 측면에서 그 중요성이 더욱 부각되고 있다. 국내 전기철도 건설을 위한 정부의 21세기 장기 국가 철도망의 구축 기본계획에 대해서도 앞의 서론 부분에서 다루었다.

그러나 이러한 전철화에 따른 상당한 이점에도 불구하고 철도의 고빈도 대량수송, 고속화에 따라 필연적으로 철도 급전계통의 전차선의 전압강하가 발생하며 아직 국내에서 해결하지 못한 기술적 문제들이 산재해 있다.

본 논문에서는 현재 우리나라에서 많이 사용하고 있는 AT 급전계통에 대해서 간략하게 설명을 하였으며, 철도 급전계통의 안정, 차량의 제어 및 안정성에 상당히 영향을 미칠 것으로 예상되는 상위 전원계통 사고 시 발생하는 순간전압 강하에 의한 급전계통 및 철도차량 부하의 과도특성을 분석하였다. 시뮬레이션 결과, 순간전압강하가 급전계통 및 철도 차량부하의 제어 및 안전에 상당한 영향을 미칠 것으로 보인다. 또한 순간전압강하를 보상하기 위한 방안으로 철도 급전계통에 설치되는 순간전압강하 보상기를 제안하였다. 순간전압강하 보상기의 적용 후에 대한 시뮬레이션 결과 상위 전원계통 사고 시에도 순간전압강하 보상장치의 운전으로 철도급전계통 및 차량부하의 과도 특성이 안정적임을 알 수 있었다.

본 논문의 순간전압강하 보상의 사례연구 결과는 향후 추진될 국내 전기철도 전력품질 기준에 기초 자료로써 상당히 유용할 것이라 사료되며, 향후 운행 중인 전기철도 실 부하 시험 등을 통하여 전기철도의 안정된 전원공급에 기여할 것으로 기대된다.

[참 고 문 헌]

- [1] 오광해 외, "전철부하에 기인된 계통전압 불평형 평가 기법", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, C권, pp. 787-789, 1997. 7월.
- [2] 전용주 외, "AT 교류 철도계통 내 다량 열차 운전 시 새로운 동적전압 해석 알고리즘 연구", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp. 1399-1401, 2000년. 7월.
- [3] 추동욱 외, "AT 급전계통 해석 알고리즘 연구", 대한전기학회 논문지, Tran KIEE, Vol. 51B, No. 4, April. 2002
- [4] Vladimir A. Milin, Donald A. Johnston and Natalie A. Lepsky, "A General Model for Optimization of Track Circuit Parameter", IEEE, 1995.
- [5] Natarajan, R., Imece, A.F., Popoff, J., Agarwal, k., Meliopoulos, P.S., "Analysis of grounding systems for electric traction", Power Delivery, IEEE Transaction on, Volume 16, Issue 3, July. 2001.