

교류 전기철도의 전압강하 보상에 관한 연구

한석우
경문대학

A Study on the Voltage Drop Compensation in AC Electric Railway

S.W. Han
Kyungmoon College

ABSTRACT

The electric railway has been widely used as a transportation all over the world. It also was opened in 1973 in Korea and it has been steadily proceeded in making electric railway network for a big city and building Keongbu high speed electric railway. That's why the system of electric railway is able to solve the environmental pollution and operate the useful energy in environmental ways, it helps to increase the ability of transportation and to decrease the cost. Because of the advantage of making the economic situation better, the system of electric railway is trying to do their best in developing technique of electric railway. Because of the increasing of transportation and the high speed operation, cars with regenerative braking system was adapted. Therefore, unbalanced voltage and current of three phase system and the drop and rise of voltage of feeding circuit is expected. Now that building the substation newly spends lots of costs and time, it is a very difficult situation to solve the problem. We can guess that electric railway line can't receive power from the power system of bigger size in building newly electric railway. In this paper, it was proved that series voltage compensator was suitable as a solution according to voltage drop and voltage fluctuating through computer simulation.

1. 서론

전기철도는 지구촌 곳곳에서 널리 이용되는 수송수단으로 우리나라에서는 1973년 개통되었으며 이후 대도시 전철망 확충 및 경부고속철도 건설 등 주요

간선의 전철화가 꾸준히 추진되어 왔다. 전 세계 철도망의 13%가 전철화 되었으며, 앞으로도 40%가 전철화로 건설될 예정이다. 우리나라도 2020년까지 전 철도의 82%를 전철화 한다는 계획을 수립하고 사업을 적극 추진 중에 있다.

전기철도 시스템은 에너지의 효율적 운용과 공해문제 해결이 가능한 친환경적인 시스템으로서 수송능력 증강 및 원가 절감 등으로 철도 경영개선에 크게 기여하기 때문에 세계 각 국은 기술개발에 심혈을 기울이고 있는 실정이다. 이런 추세에 발맞추어 우리나라에서도 경부고속철도 및 호남고속철도를 비롯한 일반 주요간선의 고속 전철화로 10년 이내에 전 국토가 반나절 생활권으로 이루어질 전망이며, 정부에서 적극 추진 중인 경의선과 유라시아 횡단 철도망이 연결되면 유럽까지 국산 고속열차가 운행될 것으로 전망하고 있다.

일반적으로 교류 전기철도의 급전방식은 단상교류방식으로 구성되어 있다. 그러므로 3상 전력계통으로부터 교류 전기철도가 전력을 급전 받는 경우에 3상 2상 변환을 통하여 2조의 단상교류를 방면별로 이상 급전하고 대규모 전력계통으로부터 수전하여 3상 계통의 전압, 전류 불평형 및 전압변동을 경감시키고 있다^[4].

수송량의 증가 및 전기차의 고속운전에 따른 교류 회생 브레이크 장착 차량의 도입에 따라 3상 계통의 전압전류 불평형, 전압변동 및 급전회로의 전압강하가 증가 될 것으로 예측된다^[5]. 이의 근본적인 대책으로서 변전소 증설은 송전선로 건설에 막대한 비용과 시간이 소요되어 곤란한 상황이다. 그리고 향후 건설 예정인 교류 전기철도에서는 철도 연선에 단락용량이 큰 대규모의 전력계통으로부터 수전을 받을 수 없는 경우가 예상되고 있다.

본 논문에서는 전차선의 전압변동에 따른 급전회로의 전압강하 대책으로 직렬형 전압보상기가 타당성이 있음을 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 입증하였다.

2. 급전 시스템

2.1 급전 시스템 구성 및 특성

교류 전기철도는 단상 25kV/50kV 급전방식이 일반적으로 사용되며, 단상의 대용량 전력을 받기 위해서는 3상 전력계통과 연계되어야 한다. 이를 위해 교류철도 급전회로는 그림 1과 같이 전철변전소의 스코트결선변압기에 의해 단상으로 변환된 전력을 급전선, 전차선, 레일을 통하여 차량에 공급한다. 단권변압기(Auto Transformer)는 10km 정도의 간격으로 설치되며, 변전소와 변전소의 거리는 약 50km이고, 중간지점은 양쪽 변전소의 전압위상이 다르기 때문에 개폐설비를 구성하여 전기적으로 구분하여 운전하고 있는데 이것을 급전구분소(Sectioning Post)라 하며, 변전소 고장 시 인근 변전소에서 연장급전을 하기 위해 연결해 주는 역할도 한다.

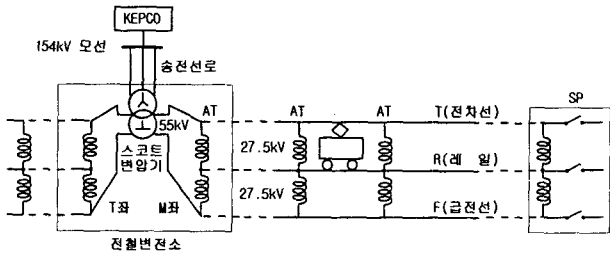


Fig. 1 Feeder circuit of AC electric railway.

전기철도는 여러 가지 장점을 가지고 있는 반면, 전철운행에 필요한 각종 시스템은 전철 변전소로부터 공급받은 25kV의 고압전기를 전기차량에 탑재된 각종 반도체 등의 핵심 전력변환장치가 변성하여 사용하므로써, 전압불평형, 전압강하 및 고조파를 다량 유발시킬 수 있는 단점을 지니고 있다. 전철 급전시스템을 이해하기 위해서는 전기적인 특성인 전압강하, 수전전력, 전력손실 등을 계산하는데 4개의 선로정수가 필수적인 요소라 할 수 있으며, 다음과 같은 부하특성을 가지고 있다.

첫째, 전기철도의 부하는 빈번히 기동, 정지를 반복하므로 부하변화가 매우 심하고 부하소비 위치가 시, 공간적으로 이동하며 움직이는 대용량의 단상부하이다.

둘째, 전기철도 급전계통은 차량에 전력을 공급하는 전차선과 레일 그리고 귀환전류를 변전소로 유인하는 급전선 등 3가지 도체군으로 구성되어 있다. 전차선 도체군은 접촉용 전차선과 조가선으로 이루어지고 레일 도체군은 레일, 접지 케이블, 가공보호선, 대지회로 등으로 이루어진다. 이들 각 도체들은 자체의 임피던스뿐만 아니라 도체간에 작용하는 부하간 상호 임피던스를 가지고 있다.

셋째, 전기차량이 투입된 급전회로는 선로의 대지 정전용량 때문에 고차에서 공진을 하고, 차량이 고차 고조파를 발생할 경우 선로공진에 의해 신호, 통신계통에 유도장해를 줄 가능성이 있다.

넷째, 전철 급전계통은 레일을 귀로로 이용하므로 1선 직접 접지방식의 전차선로가 되어 인접한 통신선에 유도장해를 일으킨다. 따라서 급전선에 흐르는 공급전류는 직류방식과 교류방식 모두 고조파 전류를 포함하게 되며, 고차 및 저차고조파의 발생에 따른 각종 공진을 일으킨다.

2.2 교류 급전회로의 전압강하

교류 급전회로는 일반적으로 단독급전 이므로 그림 2와 같이 부하가 분포된다[4]. 전원 및 급전용 변압기의 임피던스 $R_o + jX_o(\Omega)$, 전차선로의 단위 길이당 임피던스 $R + jX(\Omega)$, 변전소에서 본 부하전류를 $i_j(A)$, 역률각을 ϕ , 거리를 $l_j(km)$ 라고 하면, k번째의 부하전압은 식 (1)과 같이 표현 할 수 있다.

$$V_k = V_o - [(R_o + jX_o)(\cos \phi - j\sin \phi) \sum_{j=1}^k i_j + (R + jX)(\cos \phi - j\sin \phi) (\sum_{j=1}^k i_j l_j + l_k \sum_{j=k+1}^n i_j)] \quad (1)$$

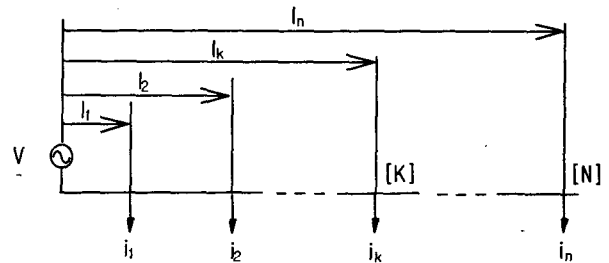


Fig. 2 Load distribution of independent feeding power.

2.3 급전 축의 2상 SVG에 의한 전압강하 보상

스코트결선변압기는 M좌 변압기(Main Transformer)와 T좌 변압기(Teaser Transformer)의 부하가 동등하면 3상축이 평형을 이룬다. 그러므로 그림 3과 같이 M좌와 T좌간에 SVG(Static Var Generator)를 설치하여 무효전력을 보상하고 동시에 부하전력이 큰 좌 변압기로부터 작은 좌 변압기로 흐르므로 식 (2)와 같이 전력을 보상한다.

$$P = (P_M - P_T) / 2 \quad (2)$$

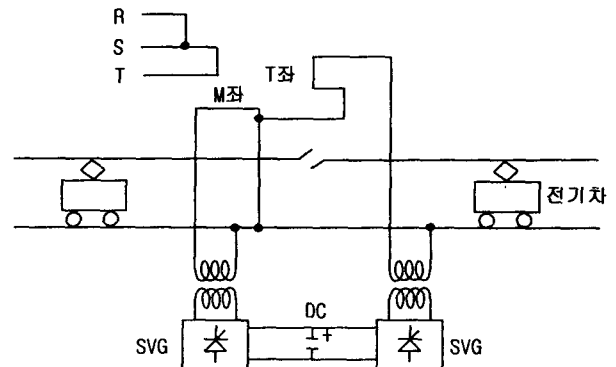


Fig. 3 Voltage drop compensation using 2 phase SVG.

이 결과, M좌와 T좌의 전력이 동등하게 되고 3상 측에서 평형을 이루며 동시에 역률이 1로 된다. 이 방식을 RPC (Railway Static Conditioner)라고 하고, 급전 측에서 보상하므로 3상 SVG(Static Var Generator)와 다르게 급전용 변압기의 전압강하를 보상할 수 있는 특성이 있다. 더불어, 당해 변전소의 고장으로 급전이 불가능한 경우에 급전 말단에 설치된 무효전력 보상장치로 전압강하를 보상할 수 있다.

2.4 급전회로 말단의 SVC에 의한 전압강하 보상

급전회로의 무부하 전압을 V , 전원에서 부하까지의 임피던스를 $R + jX$, 부하전류를 $I(\cos \phi - j\sin \phi)$ 로 두면 부하점 전압 V_p 는 식 (3)으로 표현된다.

$$V_p = V - I(R\cos\phi + X\sin\phi) - j(R\sin\phi - X\cos\phi) \quad (3)$$

교류 급전회로에서 저항 R 과 리액턴스의 X 의 비는 1:4 정도이고 부하 역률각은 예를 들면 사이리스터 위상제어 차의 경우에 40도 정도이다. 이 때문에 $X\sin\phi$ 에 의한 전압강하가 크므로 부하와 병렬로 용량성 무효전력으로 콘덴서를 접속하면 $\sin\phi$ 는 작아지고 전압강하도 작게 된다. 그림 4와 같이 구성하여 동시에 변전소 지점에서의 역률이 개선되므로 3상측의 전압변동도 작게 된다[1].

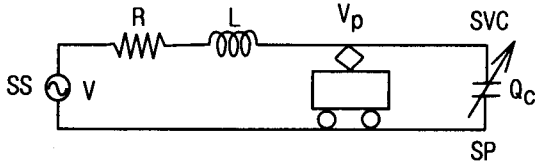


Fig. 4 Voltage drop compensation using static Var compensator.

전기철도 부하가 일반 전력부하와 크게 상이한 점은 급전회로를 대용량 부하가 이동하고, 급전회로 전체에 걸쳐서 부하점의 전압을 확보할 필요가 있다는 것이다. SVC(Static Var Compensator) 설치 위치로는 변전소와 급전구분소(SP)가 있으며, SP에 설치하는 경우가 급전회로 전체에 걸쳐서 전압강하를 보상할 수 있고, 동시에 SVC의 설치용량도 변전소 설치의 경우보다 작게 되어 유리하게 된다.

3. 제안된 시스템

3.1 시스템 구성

제안된 시스템은 그림 5와 같이 전압원 PWM 인버터, 출력전압의 리플 성분을 제거하기 위한 LC필터, 직렬변압기 그리고 직류 에너지 저장장치로 구성된다. 시스템은 전원 이상현상으로 인한 전원전압 변동에 능동적으로 대처하기 위한 것으로, 주 변압기에 보상전압을 결합하기 위하여 1개의 전압 주입용 변압기를 통하여 전원 임피던스에 직렬 결합된다. 차후 고조파전류 보상과 전원 전압 변동을 동시에 보상할 수 있다면 컨버터의 이용률

을 증대시킬 수 있다.

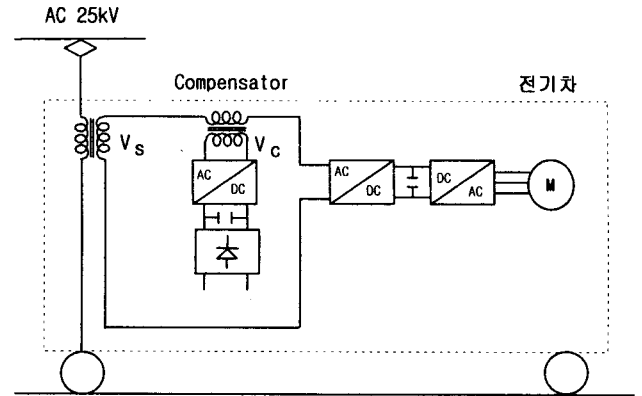


Fig. 5 System configuration.

3.2 제어 알고리즘

그림 6은 제어 블록선도이며, 전원전압의 변동을 보상하기 위하여 기준전압과 전원전압과의 차를 검출한 후 이를 직렬변압기에 주입한다[3].

검출된 전압의 차가 보상기준 전압으로서 식 (4)와 같이 표현된다.

$$v_c(t) = v_{ref}(t) - v_s(t) \quad (4)$$

여기서 $v_c(t)$ 는 직렬변압기에 주입되어야 할 전압변동에 관한 보상전압이고, $v_s(t)$ 는 전원전압이며, $v_{ref}(t)$ 는 전원전압의 변동에도 불구하고, 부하단에 유지되어야 할 기준전압으로, 전원전압의 정상분에 동기하는 위상각을 갖는다.

직렬형 전압보상기의 보상전압은 전원과 부하 사이에 1개의 단상 결합변압기를 통해 계통에 직렬로 주입된다.

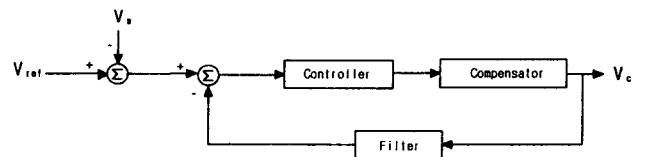


Fig. 6 Control block diagram.

직렬 변압기는 누설 인덕턴스가 최소가 되도록 설계하고, 인버터의 직류단은 정류기를 통하여 에너지를 저장한다. 이상적인 전압보상 시 현재 제작되고 있는 보상기 용량은 단상사고에 대해서는 정격 전압의 50[%] 까지, 3상 사고의 경우는 정격 전압의 38[%] 까지 보상이 가능하다[2].

4. 시뮬레이션 결과

제안된 보상시스템의 시뮬레이션은 표 1의 파라미터와 PSIM을 이용하였다. 실험에 사용된 부하용량은 현재 건

설 중인 경부고속전철을 참고하여 고속전철 1편성 주행 시 14MW 정도의 대형 이동 단상부하로 전력변환기를 이용하여 견인전동기를 구동시키는 시스템을 참고하였다. 급전전압의 변동은 전원용량, 변전용량, 및 부하와 상대적인 관계가 있으며, 일반적으로 급전거리가 길고 특히 연장급전하여 운용할 때에는 부하의 증대에 따라 전압강하가 크게 되어 변전소의 공급전압을 상승시켜 주어야 한다[5].

차량에 설치된 주 변압기의 전압을 검출하여 기준치와의 비교 시 변동분 만큼 보상전압을 발생시켜 직렬변압기에 주입하였다. 그림 7은 주 변압기의 전압이 20000V로 감소되었을 때 보상전압을 발생시켜 주입시킬 결과 기준치를 유지함을 보여준다.

그림 8은 주 변압기의 전압을 27000V로 증가되었을 때 보상전압을 발생시켜 주입시킬 결과 기준치를 유지함을 보여준다.

그림 9는 주 변압기의 전압이 25000에서 20000V로 두 번 변동되었을 때 보상전압을 발생시켜 주입시킬 결과 기준치를 유지함을 보여준다.

Table 1 System parameters.

항 목	용 량
전원	25000[V], 60[Hz]
부하	14[MW]
스위칭 주파수	10[kHz]

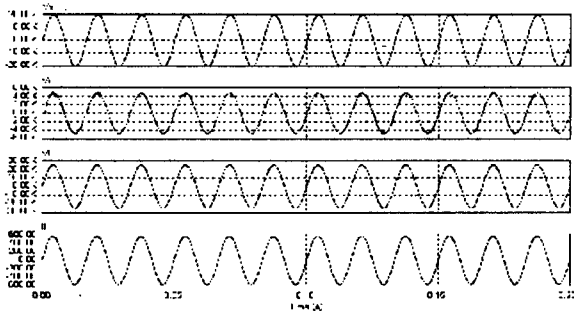


Fig. 7 Simulation result for voltage drop(20000V).
(a)source voltage (b)compensation voltage
(c)load voltage (d)load current

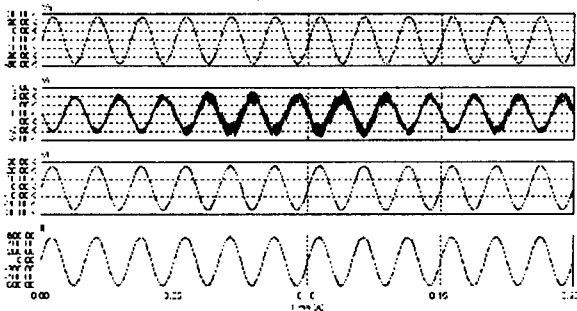


Fig. 8 Simulation result for voltage rise(27000V).
(a)source voltage (b)compensation voltage
(c)load voltage (d)load current

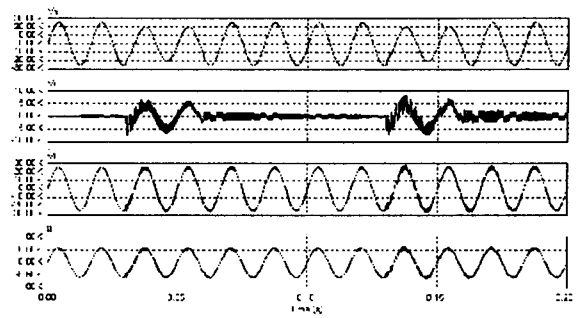


Fig. 9 Simulation result for voltage fluctuating.
(a)source voltage (b)compensation voltage
(c)load voltage (d)load current

5. 결 론

전원 전압강하, 상승, 변동에 의한 문제는 직접적이고, 그 피해도 크다 할 수 있다. 급전전압의 변동은 전원용량, 변전용량, 및 부하와 상대적인 관계가 있으며, 일반적으로 급전거리가 길고 특히 연장급전하여 운용할 때에는 부하의 증대에 따라 전압강하가 크게 되어 변전소의 설비용량을 증가시켜야 한다. 따라서 본 논문에서는 직렬형 전압보상기를 적용하여 전원 전압의 변동을 보상하여 부하 측에 일정한 전원 조건이 형성되도록 하였다.

실험에 사용된 부하용량은 현재 건설 중인 경부고속전철을 참고하여 고속전철 1편성 주행 시 14MW 정도의 대형 이동 단상부하로 전력변환기를 이용하여 견인전동기를 구동시키는 시스템을 참고하였다.

시뮬레이션 결과와 같이 전원전압에 전압강하와 상승이 발생하더라도 부하에 공급되는 전압은 정격전압의 98[%] 이상 유지 제어가 가능함을 보였다.

따라서 본 기기를 전기철도에 적용하는 경우, 수송량의 증가, 연장급전운행, 고속운전 등에 따른 전압강하를 보상하여 AT의 설치간격 증대에 따른 건설비 절약, 각종 경제적 손실, 위험성 등으로부터 벗어날 수 있을 것으로 기대 된다.

참 고 문 헌

- [1] Keiji Kawahara, et. al., "Compensation of Voltage Drop using Static Var Compensator at Sectioning Post for Shinkasen Power Feeding System," *T.IEE Japan'*, Vol. 119-D No. 4, pp. 523-524, 1999, April.
- [2] 한병문, 박종근, 문승일, "DVR에서의 직류에너지 제어법," *대한전기학회논문지*, 50권 12호, pp. 575-583, 2001년 12월.
- [3] 한석우, 최규하, "순간전압변동 보상기능을 갖는 3상 하이브리드형 직렬 능동전력필터," *전력전자학회논문지*, 제5권, 제6호, pp 544-551, 2000년 12월.
- [4] 김양수, 유해출, "전기철도공학," *동일출판사*, pp. 170-178, 1999년, 3월.
- [5] 한국전기연구소, "급전시스템 해석기술개발," pp. 21-50, 1998년, 10월.