

# 전기철도 급전시스템의 전력전자 기술

창 상 훈

(한국철도기술연구원 전철전력연구실 수석연구원)

## 1. 서 언

세계적으로 환경문제가 대두되면서 저탄소 녹색성장의 친 환경 교통수단인 철도의 중요성이 그 어느 때보다 부각되고 있다. 세계철도와 우리나라 철도 또한 리오선언과 교토협약에 의해 UIC(International Union of Railways, 국제철도연맹)를 중심으로 친환경 철도 구현에 대대적인 연구가 진행 중에 있으며, 특히 장기적인 목표를 설정하여 이에 대한 프로그램이 도입되어 운용 중에 있거나 계획되고 있다.

이런 철도시스템의 빠른 변화의 중심에는 전기철도 분야(전기차, 전철, 전력, 신호, 정보통신)의 첨단기술이 존재하고 있다. 전기철도 분야의 역할은 열차안전운행과 철도시스템의 신뢰도 및 안정성 향상에 중요한 영향을 미치고 있다.

전기 에너지를 이용한 전기철도는 안전성, 고속성, 고효율, 환경친화성의 이유로 열차의 주권인원으로 사용되고 있는 추세이다. 이러한 전기철도 시스템은 간단하게 보면 전기에너지를 받아 전달하여 전동기의 구동으로 견인력을 얻는 형태의 시스템으로서 전력 계통과 매우 유사한 요소를 모두 갖추고 있다. 예를 들어, 급전구분소내의 변전소는 전력계통의 발전소, 전차선은 송·배전선, 차량은 전기적 부하로 표현된다. 따라서 전력계통에서 발생할 수 있는 전력품질의 문제점이 전기철도에서도 나타날 수 있다.

여기서는 전기철도 급전시스템의 전력품질에 대한 문제와

전력전자 기술에 대하여 서술하고자 한다.

## 2. 전기철도 급전시스템의 전력품질 문제

먼저, 전력 공급측면에서 보면 한국전력으로부터 3상 전력을 공급받아 스코트(scott) 변압기를 통해 단상전력으로 변환한 전기에너지를 공급받기 때문에, 3상 전압 불평형을 초래할 수 있는 문제가 있다. 이러한 전압불평형은 결과적으로 계통의 전력 품질을 저해하여 관련된 다른 설비의 운전에도 영향을 끼치게 된다. 즉, 교류전기철도에서 주로 사용하는 3상 유도전동기의 경우 정상임피던스에 비해 약 20%의 작은 역상임피던스를 가지고 있어 비교적 근소한 역상전압에 대해서도 상당한 역상전류가 흐르는 문제를 야기할 수 있기 때문에 권선의 온도를 상승시켜 능률저하 및 출력감소를 초래하는 경향이 있다. 또 전기공급자 측면에서는 발전기, 조상기 등에 대한 역상전류의 유입으로 인한 편열(偏熱) 발생으로 절연열화를 일으키거나 유도전압 파형을 변형시키는 문제를 야기할 수도 있다.

또한, 전기차는 가선으로부터 받은 전력을 이용하여 견인 전동기를 구동시키기 위해 반도체 전력변환장치를 사용한다. 경부고속철도 KTX-I 차량은 thyristor 위상제어 전류형 인버터 방식을, 호남선에서 운행하게 될 KTX-II 차량은 PWM(Pulse Width Modulation) 전압형 인버터가 적용되

며, 산업선 구간에서 운행되고 있는 전기기관차는 세미브리지(Semi-bridge)형 정류기와 PWM 전압형 인버터, 과전/안산선 등 수도권 전철과 도시철도 운영구간의 경우 PWM 전압형 인버터를 이용하여 견인전동기의 속도 제어를 수행하기 때문에 위와 같은 반도체 전력변환장치에 의한 고조파 발생이 큰 문제점이 되고 있다. 전기철도에서 고조파는 통신유도장해, 신호회로에 미치는 악영향, 보호계전기의 오동작, 병렬 캐패시터로의 과전류, 고조파 공진현상 초래, 형광등 안정기의 소손, 과전류 계전기 코일의 소손, 배전용 차단기의 오동작 등 많은 악영향을 끼친다.

전기철도에서의 또 하나의 문제점이 급전구분소(Section Post; SP) 말단의 전압강하이다. 변전소에서 공급되는 전력은 전차선을 통해 견인전동기에 집전되기 때문에 변전소와의 거리가 멀수록 전차선에 의한 임피던스는 커져 전압강하가 발생하여 변압기 구분소 말단에서는 기준치 이하의 전압이 수전될 수도 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 종래에는 직렬 콘덴서에 의해 전차선로의 리액턴스를 보상하는 방법, AT급전회로에서 사이리스터 스위치에 의해 고속으로 변압기의 tap 절환을 행하는 ACVR(AC Voltage Regulation) 방법을 사용하여왔다. 그러나 대용량의 견인전동기를 사용하는 전기차가 여러 대 동시에 기동을 할 경우에는 짧은 순간에 전압값이 떨어지는 Voltage Sag이 발생할 경우 위와 같은 방법은 응답속도가 느려 효과적인 전압 보상이 이루어질 수 없는 단점이 있다.

이상과 같은 전기철도 전력품질 저하 문제를 해결하기 위해 고려될 수 있는 것이 전력전자 기술을 이용한 FACTS(Flexible AC Transmission System) 기기의 적용이다. FACTS 기술은 전력계통 특성 개선을 위한 방안으로 제안된 신기술로서 전력수송설비 이용을 극대화하기 위해 1980년대 미국 EPRI에서 기본 개념이 제시된 후 미국, 유럽, 일본 등 전력기술 선진국을 중심으로 연구개발이 활발히 이루어지고 있으며, 상용화를 위한 실증시험 단계에 이르고 있다.

전기철도에서는 FACTS 기기중에서 특히 SVC(Static Var Compensator)의 적용이 앞서 언급한 문제들에 의한 전력품질 저하의 향상 대책으로 적절할 것이다. SVC는 수전단 전압 유지, 전압 불평형 및 변동 제어, 저차고조파 제어, 부하 역률 개선할 수 있는 기능을 가지고 있다. 이미 일본에서는 단상 SVC를 급전회로 말단의 급전구분소에 설치하고, 급전회로 전체에 걸쳐 전압강하를 보상하는 SP-SVC가 개발된 상태이다. 이에 국내에서도 고속철도가 도입되고 있는 실정에서 전기철도에 의한 전력품질 저하에 대한 대책 검토가 필요한 실정이다.

이렇게 전 산업부문에서 전력품질 문제가 대두되면서 전기철도에서도 심각한 문제로 인식되고 있다. 특히 우리나라와 같이 전력회사로부터 일반 3상 전력을 수전받아 변환하여 사용하는 경우 전력회사에서 규정하는 제한치를 만족해야 하는 특이성이 존재한다.

그림 1은 교류전기철도 급전시스템의 구성도를 나타낸 것이다.

### 3. 전기철도 급전시스템의 전력전자 기술 (전력품질 제어기술)

일반 전력계통에서 장거리 송전의 효율 향상을 목적으로 개발된 전력전자 기술에 기초한 전력품질 보상장치들은 근래에 들어 새로운 설비의 증설에 따른 비용에 비하여 저렴하게 설치하여 동일한 혹은 개선된 효과를 얻을 수 있어 각광을 받고 있다. 기계적 스위치 조작에 의한 회로정수 제어로부터 출발하여 반도체 스위칭으로 발전된 FACTS 기기들은 다음과 같은 종류의 장치들로 구분할 수 있다.

- 기계적으로 스위칭되는 리액터와 캐패시터
- 동기조상기
- Thyristor controlled shunt and series compensation
- converter controlled shunt and series compensation

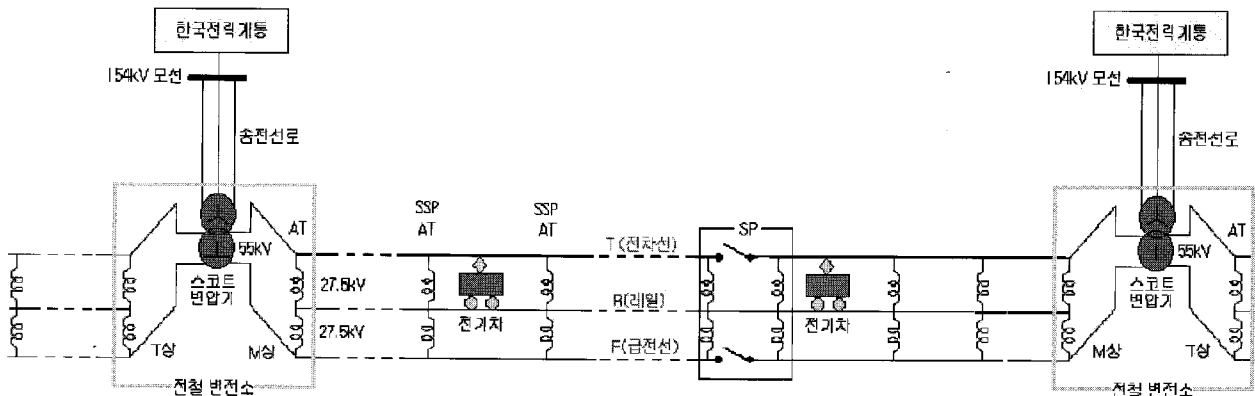


그림 1 교류전기철도 급전시스템의 구성도

표 1 병렬 보상장치

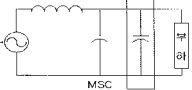

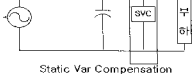
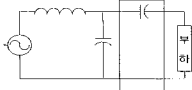
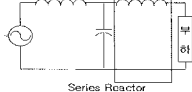
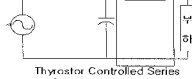
병렬 보상장치	적용	단락레벨	전송 위상각
 MSC	중부하에서의 전압 보상	변경불가	다소 증가
 MSR	경부하에서의 전압보상	변경불가	다소 감소
 Static Var Compensation	빠른 전압 및 무효전력 보상	변경불가	제어가능

표 2 직렬 보상장치

직렬 보상장치	적용	단락레벨	전송 위상각
 Series Capacitor	장거리 송전선로 대용량 전력전송	증가	아주 작음
 Series Reactor	단거리 송전선로 단락전류의 제한	감소	아주 큼
 Thyristor Controlled Series Compensation, SSSC	전력조류 제어	제어가능	제어가능

이상의 장치들은 현재 주로 사용되고 있는 장치들을 나타낸 것으로서 다음 표 1 및 표 2 처럼 병렬 보상을 위한 기기와 직렬 보상을 위한 장치로 구분할 수 있다.

이상과 같은 장치들중 전기철도 급전시스템에서 효과적으로 적용할 수 있는 기기들을 중심으로 불평형 및 전압강하 대책방안을 살펴보면 다음과 같다.

3.1 무효전력 보상에 의한 전원 불평형, 전압 불평형의 억제

3.1.1 사이리스터 제어처에 대한 전원의 불평형 전압 변동 대책

가) 단상 SVC

보상대상이 TAP제어 및 사이리스터 제어에 의한 역행차일 경우는 그림 2에 나타난 것 같이 무효전력을 검출해 역률각을 거의 0이 되도록 보상하는 것이고 전압변동이 발생하는 상간이 다른 것의 최대치는 약1/2로 억제되어 전압변동 대책으로서 유효하다.

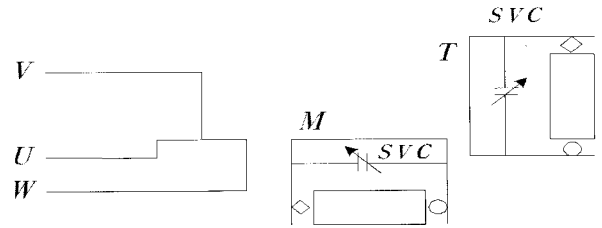


그림 2 단상 SVC에 의한 전압변동대책

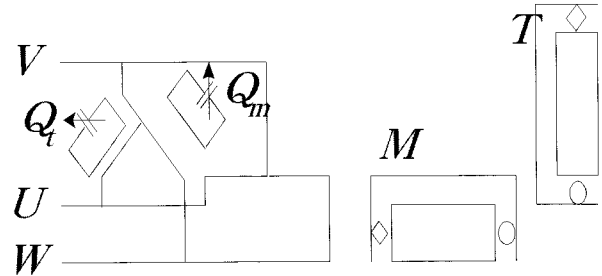


그림 3 변위상 스코트식 SVC

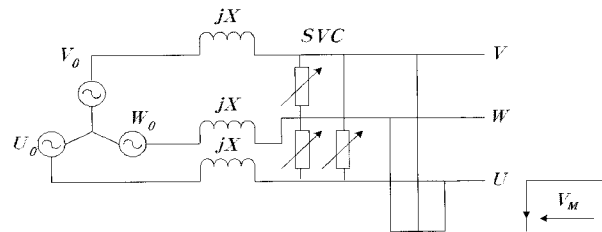


그림 4 삼상 SUC에 의한 전원전압변동제어회로

나) 변위상 스코트식 SVC

변위상 스코트식 SVC는 그림 3에 표시한 것처럼 스코트결선 변압기를 부하용 스코트 결선 변압기에 대하여 120° 위상을 진상으로 접속하고 이 이차측에 SVC를 배치하고 있다. 변위상 스코트식 SVC의 최적 변위  $\theta$ 는 부하역률각을  $\Psi$ 로 하면  $\theta$ 는  $\Psi/2 - 135^\circ = -120^\circ$  표시되고, 부하 역률각이 30° 일때 최적으로 된다. 신간선부하의 역률각은 40 ~ 50이고  $\theta$ 는  $-120^\circ$ 에서 5° ~ 7°의 변동이 있다. 그러나, 변압기 결선이 대단히 단순하고 적정위상에서의 변동이 적기 때문에 근사대책으로서 120° 변위상 스코트식 SVC는 실용상의 충분한 특성을 가지고 있다.

다) 3상 SUC

전철 부하에 의한 불평형 전압변동을 보상하는 방법을 일반의 SVC에 대하여 삼상 SUC라고 칭하고 있다. 그림 4에 표시한 것처럼 삼상 각 부하간의 단상 SVC를 접속한다.

본 방식에 의한 보상 수치가 (-)가 되면 지상용량으로서 리액터를 접속한다. 이 결과 부하측의 유효 무효전력을 검출해

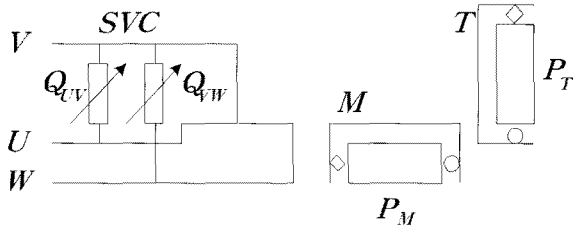


그림 5 삼상 V결선 SVC

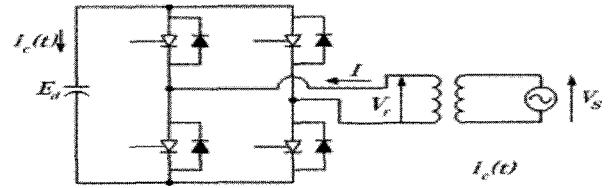


그림 7 SVG의 기본회로 구성

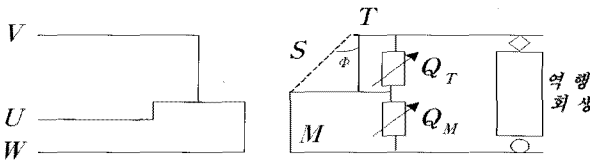


그림 6 3상 부등변 스코트 결선 변압기의 3상-단상변환

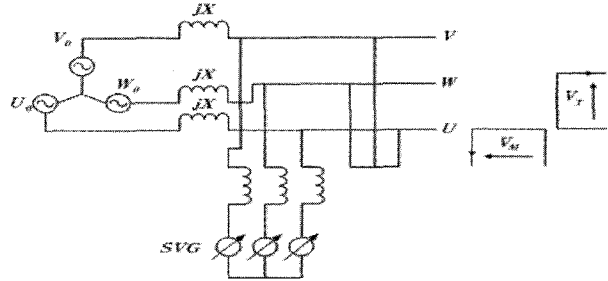


그림 8 3상 SVG회로에 의한 전원전압변동제어회로

서 SVC를 제어하는 것에 의한 몇 가지의 부하 패턴에 대해서도 급전측의 유효전력이 삼분할 되어서 평형되고 역률은 1이 된다. 3상 SVC는 설비용량이 크기 때문에 실용화되어 있지 않지만 사이리스터 제어차 등, PWM제어차 등의 역률이 다른 차량이나 역행 회생의 몇 가지 부하 패턴에 대해서도 전원의 불평형 전압 대책이 가능하게 된다.

### 3.1.2 PWM제어차 교류 VVVF차에 대한 전원 불평형 전압 변동 대책

(역행시 역률1, 회생시 역률 -1을 목표로 함)

#### 가) 3상 V결선 SVC

PWM제어차의 역률이 (±)1이고 무효전력이 없기 때문에 UV상간에 무효전력 보상은 불필요하게 된다.

즉, 그림 5에 표시한 것처럼 UV상간 및 VW상간의 SVC를 접속하고 보상을 행하면 PWM제어차에 의해 발생하는 역상 전류는 0이 된다. 또한 전압 불평형 및 전압 변동은 개선된다.

본 방식은 일본 동해도 신간선에 대해서 역상 전류를 보상하는 장치로서 실용화되고 있다.

나) 부등변 스코트 결선에 의한 불평형보상 단상 급전장치  
스코트 결선 변압기의 M측과 T측의 1:√3로서 사변의 S측에 부하를 접속하고 M측의 리액터 T측에 콘덴서를 접속하여 전원의 불평형을 보상하는 것으로 일본 동북 상월신간선의 차량기지 등에 적용되고 있다. 변압기는 일반적으로 M측과 T측의 전압이 서로 다르기 때문에 부등변 스코트 변압기라고 칭하고 T측과 S로 이루어지는 각을 스코트 각 Φ로 하고 있다.

### 3.2 자력식 무효전력 보상장치에 의한 불평형 전압변동의 억제

#### 3.2.1 자력식 무효전력 보상장치의 동작 원리

전력계통의 안정화용으로 GTO사이리스터를 사용한 자력식 인버터에 의한 정지형 무효전력 보상장치가 개발되어 있고 대용량 SVG(Static Var Generator)의 실현이 가능하게 되고 있다. SVG의 기본회로 구성도를 그림 8에 표시한다. SVG의 출력전압  $V_L$ 은 직류측 콘덴서 C에 충전된 전압  $E_d$ 를 GTO 인버터에서 교류전압으로 변환하는 것에 의해 이루어진다.

SVG의 출력전압  $V_L$ 에 위상을 계통전압  $V_S$ 에 동기된 상태에서  $V_L$ 의 크기를 제어하는 것에 의하여 무효전력을 제어한다. 즉  $V_L$ 과  $V_S$ 의 크기를 같게 하면 SVG의 무효전력출력은 0이 되지만  $V_L$ 을  $V_S$ 에 비하여 크게 하면 SVG에는 진상무효전류가 흐르고 역으로  $V_L$ 을  $V_S$ 에 비하여 적게 하면 SVG에는 지상 무효전력이 흐른다.

#### 3.2.2 3상측 설치 SVG

그림 8에 표시한 것처럼 급전용 변압기 3상측에서 SVG를 3상분 접속한다. 무효전력은 SVG에 의해 보상이 되고 유효전력은 3상 합계로 0이 되지 않으면 안되지만 각 상의 전력은 M측 부하전력을  $P_M$ , T측 부하전력을  $P_T$ 로서 다음 식으로 된다.

$$P_0 = 1/3(P_M + P_T)$$

이결과 임의의 부하에 대해서 전원측에서는 역률로 각 3상 평형화 한다.

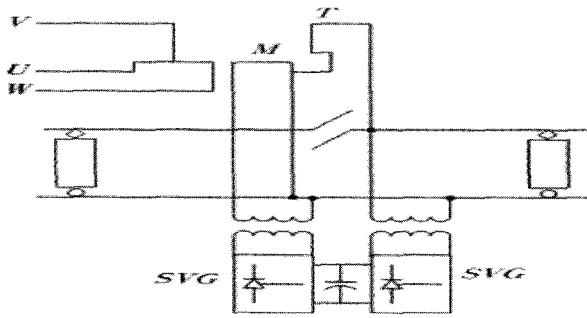


그림 9 급전측 이상 SVG의 구성

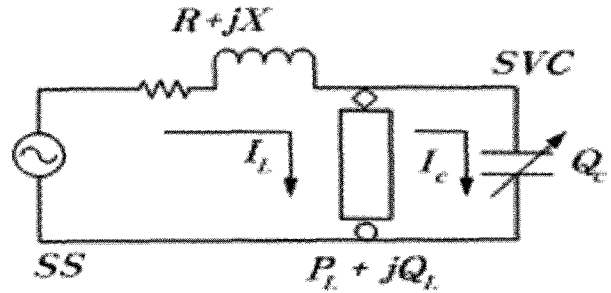


그림 10 SP-SVC의 원리

### 3.2.3 급전측에 대한 이상 SVG에 대한 보상

스코트 결선 변압기는 3상 2상 변환을 행하고 M축과 T축의 부하가 같다면 3상 축에서 평형하게 된다. 거기서 그림 9에 표시한 것처럼 M축과 T축간의 SVG설치하여 무효전력을 보상하는 것과 동시에 부하 전력의 크기가 부하전력이 큰 축에서 작은 축으로 행하고 다음 식의 전력을 율통한다.

$$P = (P_M \sim P_T) / 2$$

그 결과 M축과 T축의 전력이 같게 되고 3상축에서 평행하는 것과 동시에 역률이 1이 된다.

### 3.3 SP-SVC에 대한 전압 강하 대책

#### 3.3.1 급전회로로 단말에 SVC를 설치하는 효과

급전회로의 무부하를 공급하는 전압을 V, 전원에서 부하까지의 임피던스를  $R + jX$ , 부하전류를  $I(\cos\theta - j\sin\theta)$ 로 하면 부하점 전압  $V_p$ 는 다음 식으로 표현된다.

$$V_p = V - I\{(R\cos\theta + X\sin\theta) - j(R\sin\theta - X\cos\theta)\}$$

교류 급전회로에는 저항 R과 리액턴스 X의 비는 1:4정도이고 부하 역률각은 예를 들면 사이리스터 위상제어차의 40° 정도이다. 이 때문에  $X\sin\theta$ 에 의한 전압 강하가 크기 때문에 부하와 병렬로 용량성 무효전력으로써 콘덴서를 접속하면  $\sin\theta$ 는 적게 되고 전압 강하도 적게 된다. 동시에 변전소에서 역률이 개선되기 때문에 3상축의 전압 변동도 적게 된다.

전기 철도 일반 전력부하와 크게 다른 점은 급전회로를 대용량 부하가 이동하는 것이고, 급전회로 전체에서 요구하는 부하점의 전압을 확보하는 것이 필요하다. SVC를 설치하는 개소로서는 변전소와 말단에 급전구분소 SP가 있지만 SP설치의 경우가 급전회로 전반에서 요구하는 전압 강하를 보상할 수 있고 동시에 SVC의 설비 용량도 변전소 설치의 경우보다도 적게 가능해서 유리하다. 또 일본 신간선의 경우에는

급전회로 고장시에 SP-SVC를 개방하는 연동을 적용하고 있다.

#### 3.3.2 TCR(Thyristor Controlled Reactor)방식의 SP-SVC

TCR 방식 SP-SVC는 급전회로 말단(SP)에 설치하고 고정콘덴서와 병렬로 TCR을 접속하여 제어한다. 본 방식은 보상용량을 연속제어가능하기 때문에 SP에 가상전압을 검출하여 CLOSED LOOP 제어를 통하여 일정 전압값 이상을 확보할 수 있다. 일본 신간선에는 다른 전원절체색선을 전기차가 통과할 때 제2조파를 많이 포함한 값에 커다란 차량용 변압기의 무부하 여자 돌입전류가 발생한다. 이 때문에 SVC의 고정콘덴서에 제2조파 필터를 설계하여 여자돌입전류의 확대를 방지하고 있다. 나아가서 차량용 변압기의 무부하 여자 돌입전류의 일부가 SP-SVC의 분류하는 것에 의하여 거리 계전기 및 교류 DELTA I형 고장 선택장치의 제2조파 동작 억제 및 제 3조파에 의한 억제 기능이 저하하고 불필요한 동작이 발생하는 것을 방지하기 위해서 변전소에 절체 색선에서 전류를 검출한다.

## 4. 맺음말

전기철도부하에서는 주로 과도적 전압변동, 고조파, 상간불평형이 문제가 되어 이러한 대책장치로서 종래의 장치에 추가로 power electronics 기술을 응용한 정지형 무효전력보상장치(SVC), 불평형보상장치(SUC), active filter(AF)등이 개발되어 실용화되고 있다.

또한 전력용 반도체소자의 고속화, 대용량화와 제어성능의 향상에 의해 전력계통에서 요구하는 전력품질 개선장치가 다양하게 연구개발 되고 있는데 지금까지는 전압변동과 불평형의 보상을 무효전력만으로 담당하였으나, 최근에는 유효전력의 영역까지 담당하는 보상장치가 개발되어 일부 국가의 철도급전시스템에 적용되고 있다.

우리나라 전기철도 급전시스템에도 현재 운행되고 있는 전기차는 거의 역률 100%인 부하로 T상, M상간의 전력용통도 가능하게 하는 유효전력보상장치와 밧데리를 전력저장소 자로하는 인버터와 조합된 전력용통시스템의 도입을 추진중에 있다. ㉔

### 참고 문헌

[1] Heinz K. Tyll, SM IEEE, "FACTS Technology for improved system operation", Siemens AG PHD-166, 2003.  
[2] I. Etxeberria-Otadui et al, "Power Electronics Converters for Railway Infrastructure Upgrading: Advantages and Potential Risks, Power Systems and Communication Infrastructures for the future, Beijing, September 2002.  
[3] Application of SVC(Static Var Compensator) to A.C. Electric Railway System, 일신전기기보, Vol. 41, No. 3, 1996. 11.  
[4] Fang Zheng Peng, Jih-Sheng Lai, "Dynamic Performance and Control of a Static Var Generator Using Cascade Multilevel Inverters", IEEE Trans.

on Industry Applications, Vol. 33, No. 3, pp. 748-755, May/June 1997.

[5] 창상훈 외, Evaluation of power Quality and its Countermeasure in Seoul-Daejeon High-Speed Railway, 1999.  
[6] T.A.Kneschke, "Control of Utility System Unbalance Caused by Single-Phase Electric Traction", IEEE Transactions, Vol. IA-21, No. 6, pp. 1559-1570, 1985.  
[7] 한국철도기술연구원, "Smart-Rail 기술개발", KRRI 03-70, 2003.

### < 필 자 소 개 >



#### 창상훈(倉相勳)

1961년 3월 28일생. 2002년 홍익대 대학원 전기정보제어공학과 졸업(공학). 1992년~1994년 철도청 기술연구소. 2004년~2005년 고려대 차세대전력연구센터 객원연구원. 2002년~서울산업대 철도전문대학원 겸임교수. 1994년~2009

년 현재 한국철도기술연구원 수석연구원.