

MCR방식에 의한 전압보상 연구에 대한 고찰

Study on Voltage Compensation by MCR

김종락†, 양인동†, 이성하*, 서우석*, 남궁현*, 호종호*

Jong-Rak Kim†, In-Dong Yang†, Sung-Ha Lee*, Woo-Suk Seo*, Goong-Hyun Nam, Jong-Ho Ho

초 록 전기철도 부하는 대용량의 단상 이동부하로, 전기철도 차량 기동 시 부하변화가 매우 크고 급격한 특징이 있으며, 그로 인해 전압강하, 역률저하 등 다양한 전력품질 문제가 발생하여 왔다. 또한, 그 여파가 상위 계통에 과급되어 전기철도 계통의 전력품질 향상을 위한 설비 도입이 시급한 실정이다. 이와 같은 전력품질 문제를 해결하기 위한 장비로, 연속적인 무효전력 보상 및 전압조정이 가능한 FACTS (Flexible AC Transmission System)설비인 SVC(Static Var Compensator)을 적용하여 전압강하 보상이 가능한 전력품질개선장치를 연구개발하고자 한다.

주요어 : 전압보상, 전압강하, 전력품질, SVC, 가변 리액터, 무효전력보상

1. 서론

전기철도는 대용량의 단상 이동 부하로, 시간대별 혹은 특별한 수요에 의해 부하가 크게 증가되는 특징이 있으며 이때 철도 전력 계통의 전력품질이 크게 위협받게 된다.

열차의 운행증가, 속도 증가, 적재등 부하의 무효전력이 커질수록 전압강하가 떨어진다. 연속적인 무효전력 보상 및 전압조정이 가능한 FACTS에는 콘덴서, 리액터 등이 결합된 SVC가 이다.

SVC에는 콘덴서 혹은 리액터를 직접 스위칭하는 Step 방식과, 고정콘덴서를 설치하고 리액터를 가변하는 Stepless 방식이 있다. Stepless 방식에는 싸이리스터 밸브를 이용하여 리액터를 가변하는 TCR

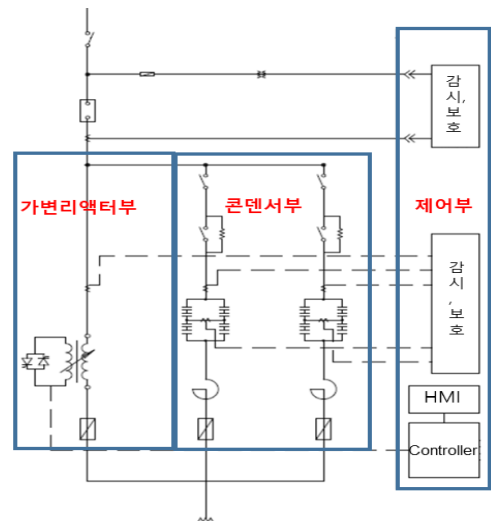
(Thyristor Controlled Reactor) 방식과, DC전류를 제어하여 리액터 자속을 변화시켜 가변하는 MCR(Magnetically Controlled Reactor)방식이 있다.

일부 전기철도 변전소에 시범 설치된 보상장비 등이 있으나, 이 장비들은 고가의 단품장비이며, 표준화가 되어 있지 않은 문제점이 있다.

일부 전기철도 변전소에 시범 설치된 보상장비 등이 있으나, 이 장비들은 고가의 단품장비이며, 표준화가 되어 있지 않은 문제점이 있다. 또한 주로 수입품이기 때문에 A/S기간 만료 후 유지보수의 어려움이 상존하여 전력품질 개선장치를 국산화 시켰다

2. 개요 및 구성

FACTS 장치 중 MCR-SVC 기술이 적용되어 개발되며, 철도전력계통의 특성에 맞도록 27.5kV 특고압 단상용으로 제작 완료 하였다.



† 주저자: 한국철도시설공단 기술연구처
* (주)시티이텍

그림 1. (MCR-SCV) 구성(1)

본 장치는 고정 AC콘덴서, 용량을 선형적으로 가변할 수 있는 가변리액터부/콘덴서부/제어부로 구성된다.

가변리액터부는 가변리액터 및 SCR반으로 구성된다. 가변리액터의 무효전력량을 제어하기 위해 메인 컨트롤러에서 광신호로 변환하여 SCR반에 전달한다. SCR반에서는 지령대로 리액터의 자속을 제어하여 무효전력 용량을 제어한다. 콘덴서부는 VCS, 리액터 및 콘덴서로 구성되며 콘덴서를 초기 투입시 돌입전류의 영향이 발생될 수 있으므로 이를 제거하기 위해 Pre Insertion Resistor를 이용한 스위칭 기술을 반영하여 개폐시켜가 최소화 되도록 개발한다. 제어부는 HMI, 메인 컨트롤러, 제어전원 공급장치, 릴레이 등으로 구성되며, 사용자의 지령 및 계통의 아날로그 신호(PT, CT)를 받아 계통의 전력 상태를 실시간으로 분석하며 전압 강하시 콘덴서를 투입하고 목표 전압에 가깝게 제어 되도록 리액터 용량을 가변시킨다. 또한, 사용자는 HMI를 통해 목표값 설정, 제어, 모니터링을 수행할 수 있다.

그림 2. (MCR-SCV) 구성(2)

3. 동작 원리

철심에 흐르는 자속을 DC전류를 통해 제어하여 리액턴스를 가변하는 자속제어 가변리액터(MCR, Magnetically Controlled Reactor)의 기본 개념은 가변 리액터는 아래 그림과 같은 구조를 갖는다.

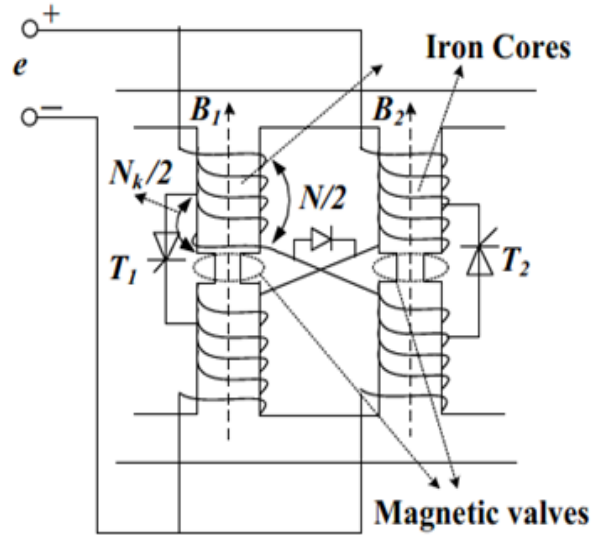


그림 3. 가변 리액터의 구조

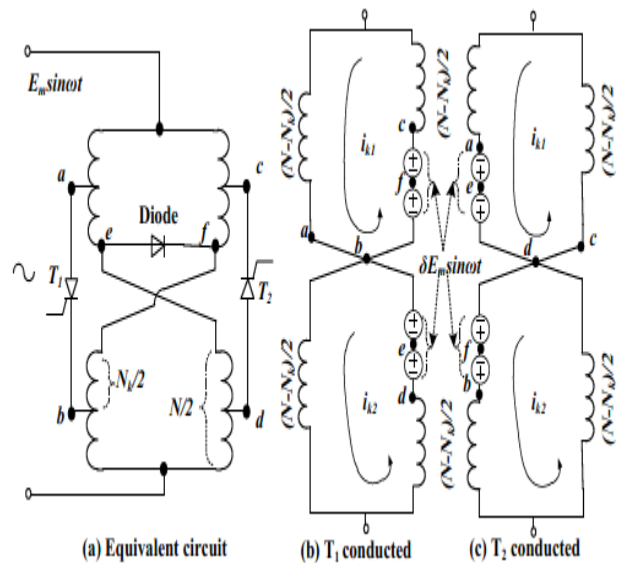
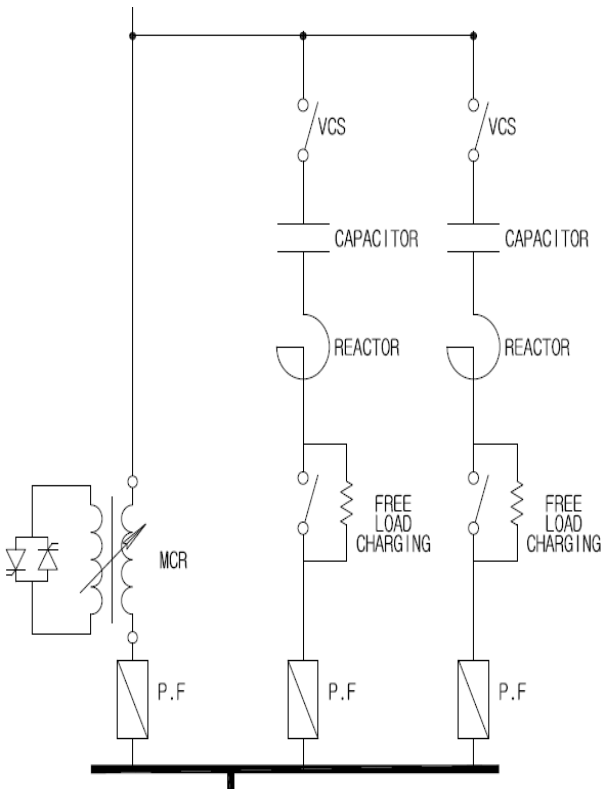


그림 4. 등가회로

그림에서 볼 수 있는 바와 같이, 철심 내구조가 좁게 되어 자속을 효과적으로 제어하도록 되어

있는데, 이것이 'magnetic valve' 이다. 또한, 'magnetic valve' 부분의 자속을 제어할 수 있도록 싸이리스터가 연결되어 있다. 이 부분의 전압은 시스템 정격의 1~5% 수준으로, 매우 낮은 전압으로 리액터를 제어할 수 있어 신뢰도가 매우 높다. T1과 T2는 싸이리스터 소자로, 각각 AC전원이 +, -일때 도통되게 된다. 이때, T1 및 T2의 도통각이 작을수록 전류 i_{k1} 및 i_{k2} 가 커지며, 철심의 포화도는 높아지고 리액턴스가 작아져서 리액터 용량은 증가하게 된다. 결론적으로, 싸이리스터의 도통각을 제어하는 것을 통해서 리액터의 용량을 선형적으로 가변할 수 있게 된다.

e와 f를 연결하는 다이오드는 free-wheeling diode로, 싸이리스터 OFF 시 역기전력으로 인한 싸이리스터 손상을 방지하는 역할을 수행한다.

4. 전압강하 보상

부하단의 전압강하는 선로 임피던스에 부하전류가 흘러서 발생한다.

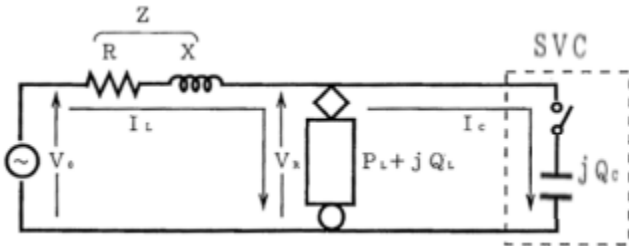


그림 5. 부하단의 전압강하 발생

전압강하율 ε (%)은 아래의 식 (1)로 표현된다.

$$\varepsilon = \frac{V_0 - V_R}{V_0} \times 100 \quad (1)$$

V_0 와 V_R 의 위상차가 매우 낮을 시 전압강하율 ε (%)는 아래 식 (2)로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \varepsilon &= \frac{I_L \times Z}{V_0} \times \cos(\theta - \gamma) \times 100 \quad (2) \\ &= \frac{I_L \times Z}{V_0} \times (\cos\gamma \cos\theta + \sin\gamma \sin\theta) \times 100 \\ &= \frac{I}{V^2_0} \times (P_L R + Q_L X) \times 100 \end{aligned}$$

따라서, 무효전력 Q_L 을 조절하여 식 (3)과 같이 전압강하를 보상할 수 있다.

$$\varepsilon = \frac{I}{V^2_0} \times \{P_L R + (Q_L - Q_C)X\} \times 100 \quad (3)$$

SVC에서 보상무효전력 Q_C 를 아래와 같이 발생시키면, 이론적으로 전압강하를 0으로 만들 수 있다

$$Q_C = Q_L + \frac{R}{X} P_L$$

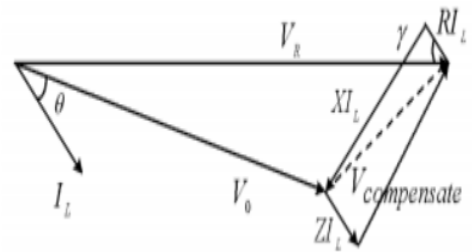


그림 6. 보상전 벡터도

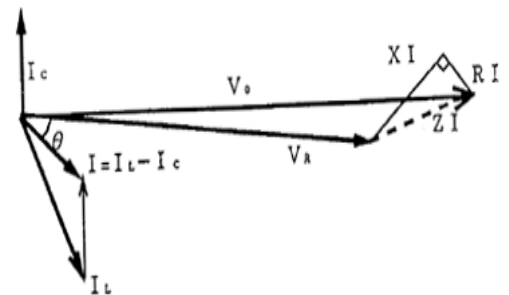


그림 7. 보상후 벡터도

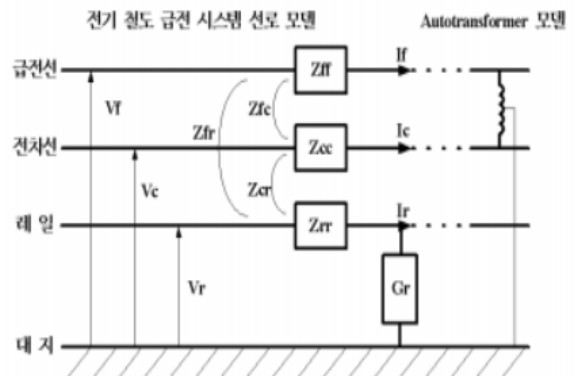


그림 8. AT급전시스템의 등가모델

V_c, V_r, V_f 는 전차선, 레일, 급전선의 상전압이고 I_c, I_r, I_f 는 각각 상전류, 그리고 Z_{cc}, Z_{rr}, Z_{ff} 는 각 선의 자기임피던스이고 Z_{cf}, Z_{cr}, Z_{rf} 는 각 선간의 상호임피던스이다. 전차 선로의 자기임피던스와 상호임피던스 값은 레일과 케이블 재료의 특성과 크기, 시스템의 기하학적 구조 그리고 대지 전도율에 의해 구할 수 있다

급전회로를 동일하게 공급전압을 유지하려면 변전소에서 SVC의 정격용량은 27kV이상 25MVA 이상이어야 한다. 반면에 SVC 섹션은 13MVA만 필요로 하고 SVC용량은 위치를 지정하여 절반으로 줄일수 있다.

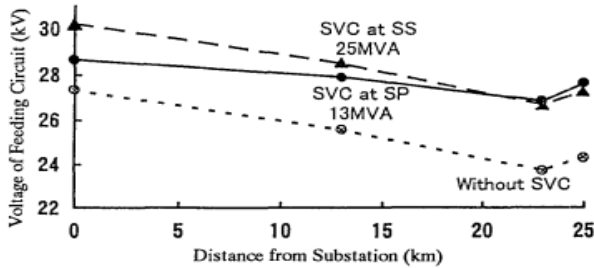


그림 9. 하행선의 전압

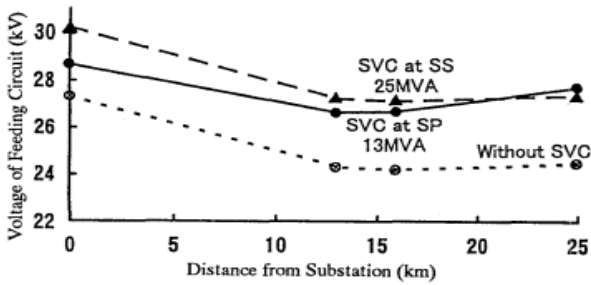


그림 10. 상행선의 전압

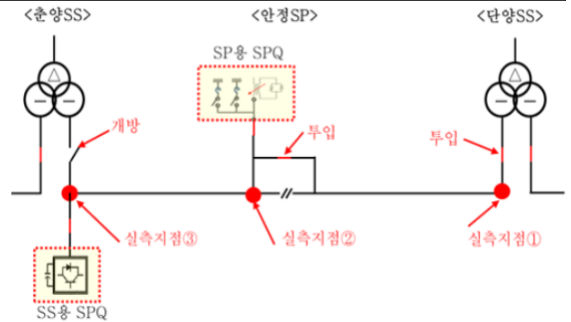
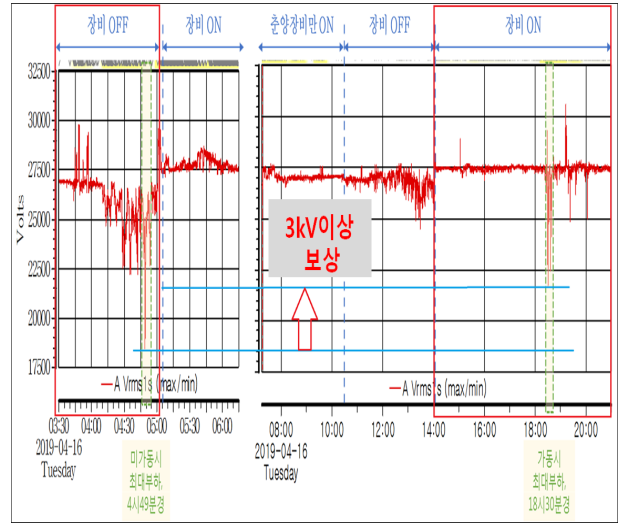
5. 연장급전시 실증시험

그림 11. 춘양 ~ 단양 연장급전 구성도

그림 12. 연장급전시 시험결과

열차정상 운행(부하)시 춘양SS M좌 전압이 3kV 이상 보상을 하고 구간 계통전압을 목표전압 이내에서 안정화를 유지한다.

6. 결론



본 논문에서는 연속적인 무효전력 보상 및 전압 조절이 가능한 FACTS 장비 일종인 콘덴서, 리액터 등이 결합된 SVC를 설치하여 전기철도 차량에 안정적이고 품질이 향상된 전원을 공급 할수 있도록 하였으며, 특히 연장급전시 크게 문제가 되었던 전압강하문제를 근본적으로 해결할 수 있도록 하여, 전기철도 계통의 신뢰도 및 안정성을 높여 전력품질로 인한 운행지연을 최소화 하고자 하였다. 연장급전시 전압강하 보상을 주목적으로 신뢰성이 매우 높은 MCR-SVC를 적용 하되 국내 철도 현황에 맞도록 단상 27.5kV급으로 개발 및 실증시험을 완료 하였다.