

전기철도 급전시스템 전력품질 향상을 위한 새로운 보상장치 검토

Analysis on New Equipment for countermeasure of Power Quality in Electric Railway

김주락*
Kim, Joorak

한문섭*
Han, Moonseob

이장무*
Lee, Changmu

정호성*
Jung, Hosung

김희중**
Kim, Huijung

ABSTRACT

This paper proposes analysis on new equipment for power quality in electric railway. The proposed equipment consists of series inverter and parallel inverter. Each inverter is connected by capacitor as dc link. This structure can be compensated for active and reactive power in catenary through transformer.

1. 서론

국가 교통 물류의 혁신적인 변화를 가지는 경부고속철도를 위시하여, 여러 간선철도의 전철화 사업으로 인하여 국내의 전철노선의 연장을 확장 일로에 있다. 이 같은 국내 전기철도의 확충은 한국전력의 일반전력계통과 전기철도 시스템과의 잦은 연계를 의미하기도 한다. 이에 따라 일반전력계통에서는 단상시스템이며, 이동하는 집중부하 특성을 갖는 전기철도 급전시스템으로 인한 전력품질 저하에 관심을 갖기 시작하였고, 전기철도 입장에서 전력품질 문제에 대하여 수용가로서 규제사항의 충실한 의무수행을 해야 한다.

현재 한국전력에서는 전력품질 문제중 불평형과 고조파 전압왜형율을 전기철도와 한국전력시스템이 접속되는 PCC에서 일정 제한치로서 규제하고 있다. 이에 따라 현재 경부선에는 능동필터와 수동필터가 설치되어 고속철도 개통과 함께 운영되고 있다[1-2]. 그러나 이는 선로의 고조파 전류를 저감시킬 목적으로 설치되었으며, 국내 기술이 아닌 외국기술에 의존하여 설치되었다. 그러나 전기철도에서는 고조파 문제뿐 아니라 선로의 전압강하도 종종 문제시 되고 있는 현실이다.

본 논문에서는 병렬 인버터를 통한 고조파 보상은 물론 직렬 인버터로 전압강하 보상 및 부하불평형 문제도 해결할 수 있는 새로운 설비를 제안하고자 한다. 제안하는 설비의 구조와 제어방법을 제시하고 제안한 설비와 제어방법의 효과를 검증하기 위하여 전기철도 급전시스템 및 보상설비를 모델링하여 모의계산을 수행하였다.

2. 새로운 전기철도용 직렬 병렬 보상설비

본 연구에서 제안한 전력품질 보상장치는 직렬보상장치와 병렬보상장치가 혼합된 형태를 가지고 있으며, 그 개략적인 구조는 그림 1과 같다. 제안한 시스템은 스코트 변압기 2차측에 M상과 T상에 각각 설치된다.

* 한국전도기술연구원, 정회원

** LG선전, 비회원

그림 1의 접선부분 안에 있는 것이 제한하는 보상설비를 보여준다. 그림에서 보듯이 전차선로에 직렬로 변압기를 통하여 연결된 인버터와 병렬로 연결된 인버터가 한쪽 상에 하나씩 연결된 것을 볼 수 있다. 또한 직렬 및 병렬 인버터는 캐패시터를 통하여 DC-Link를 공유하며 연결되어 있어, 캐패시터에 저장된 유효전력의 사용이 가능한 특성을 가지고 있다. 보상설비에서 유효전력을 사용할 수 있다는 것은 선로전압을 바로 보상할 수 있으며, 불평형 문제를 해결할 수 있는 장점을 가진다.

3. 제어시스템의 설계

위와 같은 구조의 시스템에서 병렬인버터는 정상적인 선로운전 조건에서 전류고조파 제거, 무효전력 보상, DC-Link 전압제어 등을 수행하게 되며, 직렬인버터는 사고 등으로 발생하는 순간전압강하와 같은 전압외란으로부터 부하를 보호하고 전압강하를 보상하기 위한 전압제어 기능을 수행하게 된다. 다음은 제안 시스템의 제어에 대하여 논하고자 한다.

3.1 PLL(Phase Locked Loop)

계통연계 형 인버터는 인버터의 동작 기준점을 찾기 위한 위상각 연산이 필수적이라 할 수 있으며, 그림 3의 PLL회로가 이러한 연산동작을 수행하기 위한 위상각을 연산하게 된다.

본 시스템의 제어기에서는 M상의 경우 M상 전원전압을 90°위상 지연 필터를 거쳐 M상과 90°를 이루는 하나의 전압을 생성하고 이를 마치 3상 전압을 Park's 변환을 통해 얻은 90°차를 갖는 정지좌표상의 전압으로 가상하여 위상각을 구하였다. 그림 3은 구해진 위상각을 보여준다.

3.2 병렬인버터의 제어

병렬인버터는 철도차량에 비선형 부하이기 때문에 선로에 나타나는 전류고조파를 제거하고 시스템의 DC-Link 전압을 유지하기 위한 제어가 주된 기능이라 할 수 있다. 병렬인버터 또한 선로에 보상 동작을 수행하기 위해서는 선로와의 동기점 검출을 위한 연산이 필요하게 되며, 이러한 연산과정은 직렬인버터 제어구조에 포함된 Sine Generator까지의 연산과정과 동일하다. 생성된 기준 정현파는 선로의 전류고조파를 제거하기 위한 연산과정과 DC-Link 전압제어를 위한 연산과정에 사용된다. 기준 정현파는 선로의 전류와 비교되어 병렬인버터가 주입하여야 할 고조파 전류들 연산하게 되고 이는 DC-Link 전압제어기 연산을 통한 결과와 더해져 병렬인버터가 주입하여야 할 전류기준치를 생성하게 된다. 이는 병렬인버터 출력전류의 실측치와 비교되어 기준치를 추종하기 위한 전류제어기를 거쳐 병렬인버터의 스위칭 신호를 생성하게 된다. 그림 3은 병렬인버터의 이러한 연산과정을 보여준다.

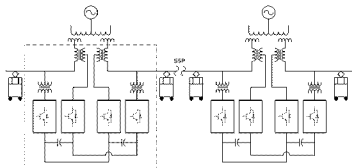


그림 1. 새로운 전기철도용 전력품질 보상설비

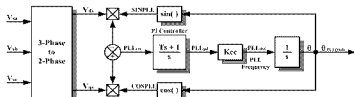


그림 2. PLL을 통한 위상검출기

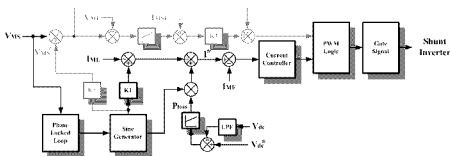


그림 3. 병렬인버터 제어

3.3 고조파 보상전류 제어

병렬인버터의 보상전류에 대한 제어는 다음과 같이 이루어진다. 병렬인버터의 기준전압 V_1^* 은 선로 보상 기준전압과 실제 필터전압의 차를 선로전압과 더해줌으로 해서 구할 수 있으며, 이때 전류제어를 위한 방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta I_{FF} = I_{FF}^* - I_{FF} \quad (1)$$

$$V_1^* = V_s^* + L_{FF} \frac{\Delta I_{FF}}{dt} = V_s^* + K \Delta I_{FF} \quad (2)$$

이 방정식은 전류제어기가 이득 K를 가진 비례제어기처럼 동작함을 보여주며, 그림5는 이와 같은 제어구조를 보여준다.

3.4 직류 커패시터 전압 제어

(1) 직류 커패시터 선정

전압형 인버터의 에너지원으로는 커패시터를 사용하며 이때 커패시터의 용량은 병렬인버터의 용량과, 부하에서 소비되는 순시전력의 변화에 따른 전압 맥동의 크기에 따라서 결정된다. 본 연구에서는 커패시터의 용량을 병렬인버터의 직류단 최대 전압 맥동율을 고려하여 설계하였으며, 아래 식(3)은 직류 축 커패시터에 나타나는 최대 과전압을 나타낸다.

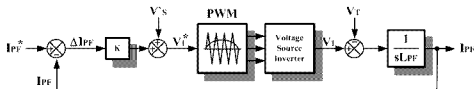


그림 4. 병렬인버터의 전류제어구조

$$V_{dc,max} = \frac{1}{C_{dc}} \int_{t_1}^{t_2} i_{dc}(t) dt + V_{dc} \quad (3)$$

여기서, $V_{dc,max}$: 적류커패시터의 최대전압

V_{dc} : 적류커패시터의 정상상태 전압

$i_{dc}(t)$: 적류커패시터에 흐르는 순시전류

식 (3)에서 과도상태시 전압맥동의 크기 ΔV 를 감당할 수 있는 커패시턴스는 다음과 같이 결정된다.

$$C_{dc} = \frac{1}{\Delta V} \int_{t_1}^{t_2} i_{dc}(t) dt \quad (4)$$

(2) 제어기 설계

DC-Link 전압을 일정하게 유지하기 위하여 본 연구에서는 PI제어기를 이용한 제어를 수행하였으나, PI제어기의 비례이득과 적분이득의 적절한 선정이 필요하다 할 수 있다.

피드백 제어기로서 PI제어기를 구성하면 P_{loss} 성분은 다음과 같이 표현된다.

$$P_{loss} = k_{ff} (V_{dc}^* - V_{dc}) \quad (5)$$

이때, DC-Link의 전압제어 블록다이어그램은 아래의 그림 3.5와 같이 표현되며, 전달함수를 구하면 식(6)과 같다.

$$\frac{V_{dc}}{V_{dc}^*} = \frac{K_{inv}k_f s + K_{inv}k_I}{C_{dc}s^2 + K_{inv}k_f s + K_{inv}k_I} = \frac{\frac{K_{inv}k_f}{C_{dc}}s + \frac{K_{inv}k_I}{C_{dc}}}{s^2 + \frac{K_{inv}k_f}{C_{dc}}s + \frac{K_{inv}k_I}{C_{dc}}} \quad (6)$$

여기서, C_{dc} : 적류커패시턴스

K_{inv} : 인버터 전달이득

k_f : 비례이득

k_I : 적분이득

3.5 직렬인버터의 제어

직렬인버터의 주요 기능은 선로의 전압안정화로서, 모선 측의 예기치 않은 선간단락이나 지락사고로 인해 공급전원이 순간적으로 강압한다거나 하는 상황 발생시 제한하는 시스템은 자체적으로 보상 동작을 수행하며, 그림 7은 직렬인버터의 제어구조를 나타내고 있다.

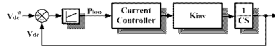


그림 5. DC 전압 제어 블록도

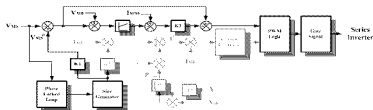


그림 7. 직렬인버터 제어

M상만을 대상으로 설명한다면, M과의 기준 선로 전압은 55kV를 유지하여야 한다. 이를 위해 M상의 전압이 세이기의 입력이 되어 직렬인버터의 동작 기준점이 되는 것이다. PLL연산을 통한 Sine파 발생기에서 기준 정현파를 생성한다. 생성된 기준 정현파는 한 선로의 기준 전압으로 간주하게 되며, 선로에서 측정된 실측 전압과의 차를 구하게 된다. 이 차가 실질적으로 직렬인버터가 선로에 주입하여야 할 전압이 되며, 이를 통해 직렬인버터가 유효전압을 선로에 공급할지, 흡수할지를 결정하게 된다. 직렬인버터가 주입하여야 할 전압이 결정되면 이를 효율적으로 공급하기 위한 제어수행이 이루어지는데, 이를 위해서 직렬인버터 출력단의 전압을 위하여 원하는 양의 전압이 주입되고 있는지를 확인하게 되고 이의 차를 PI제어기를 거쳐 원하는 양에 추종하게 한다. PI제어기를 거친 연산량은 직렬인버터 출력단에 흘러가는 전류를 제어하기 위한 세이기를 거쳐 인버터 스위칭에 필요한 스위칭 신호를 생성하게 된다.

4. 사례연구

본 연구에서 제안한 보상설비의 효과를 모의계산을 통하여 검증하기 위하여 사례연구를 수행하였다. 모의계산 모델은 그림 8과 같이 PSCAD/EMTDC를 통하여 구축하였으며 계산은 전압강하와 고조파 저감효과를 중심으로 수행하였다. 표 1은 직렬 및 병렬 인버터의 시뮬레이션 조건이다.

먼저 전압강하 보상효과 모의계산결과는 그림 8~10과 같다. 급전선로의 인위적인 전압강하를 위하여 선로에 고장을 상정하여 시도하였다. 고장저항을 실제 고장보다 크게 하여 선로에서 전압강하가 일어난 상황을 상정하였다. 그림 8은 급전보선측(55kV) 전압을 보인 것으로 전압강하가 일어난 후 인버터를 동작시켜 설비에 의한 전압강하 효과를 보여준다. 그림 9는 급전측(27.5kV)의 전압강하 보상 효과를 보여준다. 두 그림 모두에서 선로전압을 보상해준 효과를 볼 수 있다.

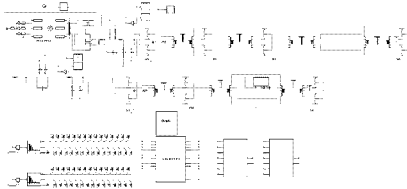


그림 8. 모의계산을 위한 제안 시스템 모델

표 4.1 시뮬레이션 회로정수

병렬인버터	결함변압기	10[MVA] (5.5kV : 55kV)
	필터 L, C	2[mH], 1[μF]
	스위칭 주파수	3060[Hz]
직렬인버터	주입변압기	10[MVA] (8kV : 24kV)
	필터 L, C	2[mH], 30[μF]
	스위칭 주파수	3060[Hz]
커패시터	커패시턴스	4,200[μF]
	기준전압	14[kV]

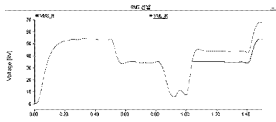


그림 8. 전압강하 보상효과 모의계산 결과(RMS)

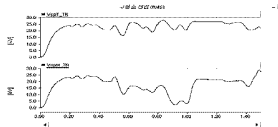


그림 9. 전압강하 보상효과 모의계산 결과

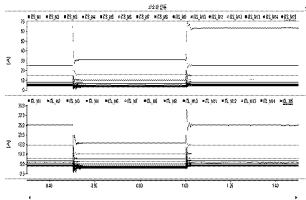


그림 10. 고조파 전류 보상효과 모의계산 결과(RMS)

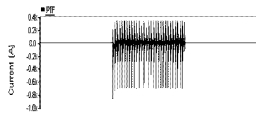


그림 11. 고조파전류보상을 위한 인버터 전류 출력 파형

고조파 전류 보상의 모의계산은 차방을 고조파 전류원으로 설정하여 급전전선에 흐르는 전류 파형으로 검증하였다. 그림 10은 급전시스템에서 발생한 고조파 전류의 보상효과를 각 조파별 전류로 보여주고 있으며, 그림 11은 이때의 인버터 출력 전류의 순시파형을 보여준다. 그림 10에서 보듯이 인버터가 동작한 0.5초부터 1초까지의 전류파형은 상당히 전류량이 감소한 것을 볼 수 있다. 각 조파별 감소된 폭은 다르지만 확실히 감소됨을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 교류전기철도용 전력품질 보상설비의 새로운 형태를 제안하였다. 제안한 설비는 기존의 병렬형 보상설비와는 달리 DC-Link를 통한 적력 및 병렬형의 조합으로 전로에 무효전력의 보상뿐만 아니라 유효전력의 보상도 할 수 있다. 제안한 설비의 경우 아직 실용화까지는 시간이 걸리겠지만 본 연구의 시뮬레이션을 통하여 보상효과는 충분히 있음을 알 수 있었다.

본 논문에서는 모의계산에 정밀함이 다소 부족하여 시스템의 최적 용량 및 상세 설계데이터는 계산하지 못하였지만 향후 지속적인 연구를 통하여 시뮬레이션 모델의 정밀성을 향상시키고, 시스템의 하부시스템을 구체화 한다면 전기철도시스템 전력품질 보상에 상당한 기여를 할 것으로 생각된다.

참고문헌

1. 이상부의 (2003), "경부고속철도 서울-대구구간 전력품질 안정화대책연구 보고서", 한국철도기술연구원
2. 이상부의 (2003), "고속철도 기존선 전철화 구간의 고조파 저감대책 용역 보고서", 한국철도기술연구원
3. 김주라의 (2003), "차세대 철도원전 기술개발(Smart-Rail 기술개발 연구보고서)" 한국철도기술연구원
4. R. E. Morrison (2000), "Power quality issues on AC traction systems," Int. Conf. Harmonics and Quality of Power, pp. 709-714.