

고조파저감설비 위상제어를 통한 역률 향상에 관한 연구

최원규*, 이 환*, 정노건*, 전용주**, 권경민***, 김재문*
 한국교통대학교*, 한국철도공사**, ㈜우진산전***

A Research of Power Factor Improvement using Phase Control of Active Harmonic Filter

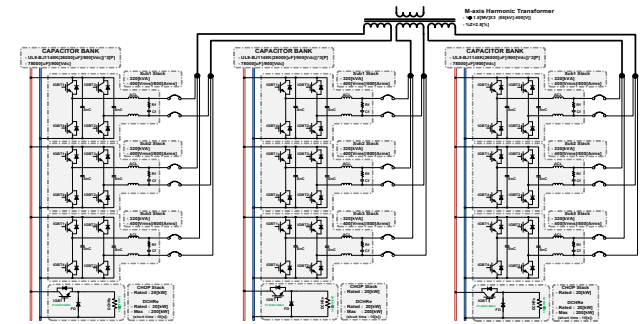
Won-kyu Choi*, Hwan Lee*, No-Geon Jung*, Yeon-Ju Jeon**, Kyoung-min Kwon***, Jae-Moon Kim*
 Korean National University of Transportation*, KORAIL**, Woojin CO***

Abstract - 국내 철도 변전소의 부하전력은 부하인 철도차량의 부하특성에 의해 고조파와 역률이 매우 좋지 못한 실정이다. 이러한 이유에서 철도변전소에는 고조파를 보상하기 위한 고조파 저감설비와 역률을 개선시키기 위한 역률보상용 콘덴서와 같은 전력품질개선설비(FACTS)들이 설치되고 있다. 본 논문에서는 이러한 철도차량 부하의 차량별 고조파 특성을 살펴보고, 이를 효과적으로 제어할 수 있는 방법을 제안하였다. 제안된 알고리즘은 고조파저감설비의 위상제어를 통한 역률 향상을 도모하기 위한 것으로 일반적인 밴드패스 필터를 사용한 고조파 전류성분 검출에 따른 제어방식과 달리 고조파 전류에 대한 Lyapunov 안정도에 기반을 둔 제어방식을 적용하여 빠른 전류제어 동특성을 갖도록 제안하였고 시뮬레이션과 실 부하 계통에 설치하여 운용함으로써 타당성을 입증하였다.

규정치를 만족하지 못하고 있음을 확인 할 수 있다. 국내 전기철도의 경우 구형 전기기관차와 KTX는 위상제어방식을 사용하고 있으며, 신형 전기기관차나 KTXⅡ의 경우에는 VVVF방식의 PWM제어를 사용하고 있다.

1. 서 론

국내 철도 급전 시스템은 한전으로부터 3상 154[kV]를 수전 받아, 스카트 변압기를 통하여 90°위상차가 나는 단상 55[kV] 2상을 발생시키고, 이는 AT변압기를 통하여 전차선에 공급되고 있다. 전차선에 공급된 전력은 철도차량에 의해 소비되고 있으며, 또한 철도차량의 대부분에 전력은 추진제어장치에서 소비하고 있다. 이러한 철도차량의 추진제어장치는 제어방식에 따라 고조파 전류를 발생시킨다. 이렇게 발생된 고조파는 변압기 과열 및 소음, 중성선 케이블 과열, 차단기 및 계측기의 오동작, 통신선 장애 등의 심각한 문제를 발생 시키는 원인으로 작용한다. 이러한 이유에서 표 1과 같이 각 국가에서는 고조파 발생에 대하여 엄격히 규정을 하고 있으며, 이를 보완하기 위하여 철도 변전소 및 구분소에는 AC동조필터와 같은 수동필터와 IGBT를 사용한 능동형 고조파 필터가 설치되고 있다. 국내에서는 일반적으로 제어 특성은 떨어지지만 제어가 용이하고 가격이 저렴한 수동필터를 설치하고 있다. 이에 반해 능동형 고조파 필터는 제어가 복잡하고, 가격이 다소 비싸지만 차단 고조파의 차수를 선택할 수 있고, 그 대역폭도 넓게 선정할 수 있다는 장점을 가진다. 본 논문에서는 고조파 저감설비에 역률보상에 대한 부분을 제어하기 위한 알고리즘을 제안하였고, 이를 시뮬레이션 및 시험을 통하여 검증함으로써 그 타당성을 입증하였다.



〈그림 1〉 변전소 AHF 구성 인터페이스

2.2 AHF 구성

변전소에 설치된 AHF(Active Harmonic Filter)는 그림 1에서 보는 것과 같이 스카트 변압기의 2차 측인 55[kV]에 설치가 되며, 변압기에 의해 400[V]로 강압시켜 단상 인버터에 병렬로 접속하는 형태로 구성된다. 부하단 전압과 전류는 GIS에 설치되어 있는 센서를 통하여 AHF의 제어기로 전송되며, AHF에서는 이 정보를 통하여 무효전력 및 고조파 전력을 제어하게 된다. 구성된 각 단상 인버터는 차단기, AC리액터, IGBT, 그리고 고조파 전력과 무효전력을 수용하기 위한 DC링크 캐패시터로 구성되며, 변전소와의 보호협조를 위한 PLC와의 인터페이스로 구성된다. 이렇게 설치된 고속철도 변전소의 AHF는 1200[V]/1400[A]급 IGBT를 사용하였고, 리액터는 80[uH]/800[A]급을 사용하여 전류 제어기 응답 속도를 빠르게 대응할 수 있도록 하였다. 또한 DC링크 캐패시터는 26000[uF]의 대용량 캐패시터로 선정함으로써 무효전력분에 대응할 수 있도록 하였다.[4]

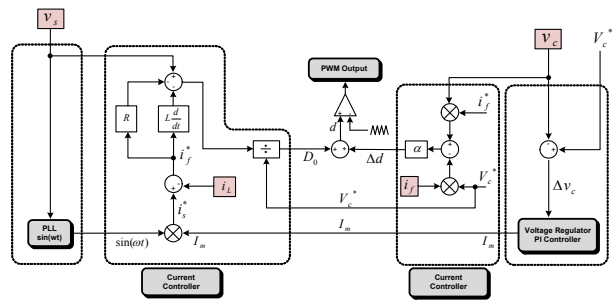
〈표 1〉 국가별 고조파 제한 규정

국가별	규 제 치 [%]		
한 국	154 [kV] 이상	1.5 이하	
	66 [kV] 이하	3.0 이하	
일 본	7[kV] 이상	3.0 이하	
미 국	2.4~69[kV]	5.0	독립된 전력계통 8.0
	115[kV] 이상	1.5	독립된 전력계통 1.5
IEEE	69[kV] 미만	5.0	개별적 전압제한 3.0
	69~161[kV]	2.5	개별적 전압제한 1.5
	161[kV] 초과	1.5	개별적 전압제한 1.0

2. 본 론

2.1 철도차량 부하 및 특성

철도 차량부하는 제어방식에 의해 다양한 고조파 발생 패턴을 보이고 있으며, 일본에서는 철도차량에 제어방식에 관계없이 각 조파의 고조파 전류 함유율이 200/n²[%]보다 작은 관계를 만족하는 것으로 규제하고 있다. VVVF 전동차는 모든 주파수 대역에서 100/n²[%]이하를 만족하고 있다. 하지만 위상제어를 수행하는 차량의 경우에는 9조파 이상에서 200/n²[%]이상의 고조파 분포로



〈그림 2〉 단상 AHF 제어 블럭도

2.3 AHF 제어알고리즘

AHF제어 알고리즘은 일반적인 밴드패스 필터를 통한 고조파 제어 알고리즘과 달리 Lyapunov함수를 통한 변위(Δd)계산을 통하여 제어하는 방식으로 AC전류를 직접 제어방식에 따라 빠른 동특성을 유도할 수 있으며, 제어변위 α값 선정에 따라 안정적인 제어를 수행할 수 있다는 장점이 있다. Lyapunov함수를 통한 변위(Δd)계산은 초기에너지를 가지고 있는 시스템은 궁극적으로 평형상태에 도달하게 된다는 Lyapunov 안정도 이론에 의해 계산되어진다. Lyapunov안정도 전제조건은 하기의 네가

지 조건에 의해 전개된다.

- 조건 1 : $V(0) = 0$
- 조건 2 : $V(x) = \infty$ (여기서 $\|x\| \rightarrow \infty$)
- 조건 3 : $V(x) > 0$ (여기서 $x \neq 0$)
- 조건 4 : $\dot{V}(x) \leq 0$ (여기서 $x \neq 0$)

AHF 시스템의 전달함수는 식 1,2와 같이 표현할 수 있다.

$$L \frac{di_f}{dt} + Ri_f = v_s - dv_{dc} \quad (1)$$

$$C \frac{dv_{dc}}{dt} = di_f \quad (2)$$

또한, AHF의 DC링크 캐패시터의 전압을 일정하게 유지하기 위한 변전소의 공급전류는 식 3과 같이 표현할 수 있다.

$$i_s^* = I_m(t) \sin(\omega t) \quad (3)$$

여기서 $i_m(t)$ 는 AHF의 전압 제어기의 출력으로 식 4와 같다.

$$I_m(t) = k_p(v_c - V_c) + k_i \int (v_c - V_c) dt \quad (4)$$

식 1~4로부터 정상상태에 대한 통유율은 식 5와 같이 정의할 수 있다.

$$D_o(t) = \frac{1}{v_{c(t)}} \left(v_s - Ri_f^* - L \frac{di_f^*}{dt} \right) \quad (5)$$

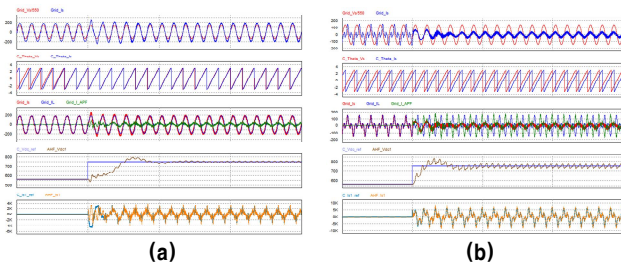
Lyapunov안정도에 의한 제어법칙으로부터 도출된 통유율 변위는 식 6와 같이 정의할 수 있다.

$$\Delta d = \alpha (v_{c_f}^* - V_{c_f}), \quad \alpha < 0 \quad (6)$$

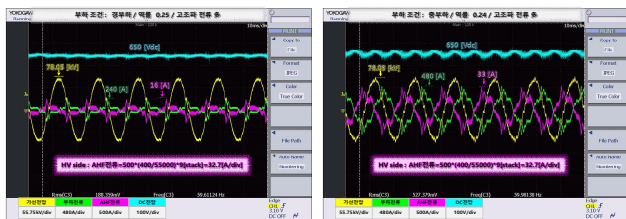
식 5의 정상상태 통유율과 식 6에 의한 Lyapunov안정도에 의해 도출된 통유율 변위에 의해 APF의 전체 통유율이 결정이 되고, 이는 음의 값을 취하는 α 개인에 의해 안정적으로 제어될 수 있다. 여기서, α 변위의 값에 의해 고조파에 대한 제어 속응성을 결정할 수 있다.

2.4 시뮬레이션 및 시험결과

시뮬레이션은 실제 제어에 사용되는 디지털 제어기의 모델링을 위해 d11로 구성하여 수행하였고, 그림 3(a),(b)는 Lyapunov 안정도를 통한 변위 통유율에 의한 제어 수행 결과이다. 결과에서 보는 것과 같이 부하 특성에 관계없이 AHF기동에 의해 한전으로 부터의 수전단의 고조파 및 역률이 부하단에 비해 상당부분 개선됨을 확인 할 수 있다.



〈그림 3〉 시뮬레이션 수행 결과



(a) 경부하 / 역률 0.25 (b) 중부하 / 역률 0.24
〈그림 4〉 시험결과

또한 그림 4(a)(b)는 변전소에서 AHF설치 후 부하단의 전력사용에 따라 경부하와 중부하시에 가선전압과 부하전류 그리고, AHF의 공급전류 및 DC링크 전압을 오실로스코프를 사용하여 측정한 결과로서 부하단 전류의 변화에 응동하여 AHF가 빠르게 추종하고 있음을 알 수 있다. 더불어 DC링크 전압의 경우에는 추종전압인 650[V]에서 부하단의 역률 및 고조파에 의한 무효분 전력분에 양에 따라 응동하고 있음을 확인 할 수 있다. 이러한 시험결과는 시뮬레이션에서 수행한 결과와 동일한 양상의 결과로서 제안된 알고리즘 운용이 원활히 수행되고 있음을 알 수 있다.

3. 결 론

고속철도의 변전소의 전력의 대부분은 철도차량부하에 의해 소비되며, 철도차량은 부하특성상 무효전력 및 심각한 양의 고조파를 발생 시키고 있다. 이러한 고조파들은 변전설비 및 통신장비들에 심각한 문제를 야기 시키고 있으며 이에 따른 적절한 대책이 필요하다. 본 논문은 철도차량 제어방식에 따른 부하단 전류의 고조파를 분석하고, 이를 효과적으로 저감하기 위한 대응량 능동형 고조파 저감장치(AHF)를 제안하였다. 제안된 시스템과 알고리즘의 타당성 검증을 위해 시뮬레이션을 수행하였으며, 시뮬레이션 결과의 신뢰성을 높이기 위하여 변전소에서 측정한 고조파 부하전류를 반영하여 제어를 수행하였다. 또한 시뮬레이션 검증을 바탕으로 실 부하계통에 적용하여 운용함으로써 제안된 알고리즘에 의한 고조파와 역률에 대한 보상으로 인한 전력품질개선을 재확인하였다. 추후에는 변전소의 부하에 따른 AHF의 적정용량 설치 효과에 대한 연구가 지속적으로 이루어져야 할 것으로 사료된다.

[참 고 문 헌]

- [1] H. Akagi, "New Trends in Active Power Filters for Power Conditioning," *IEEE Trans. on Industry Application*, vol. 32, no. 6, pp. 1312 - 1322, 1996.
- [2] H. Akagi, Y. Kanazawa, and N. Nabae, "Instantaneous Reactive Power Compensator Comprising Switch Device without Energy Storage Components," *IEEE Trans. on Industry Application*, vol. 20, no. 3, pp. 625 - 630, 1984.
- [3] Hasan Komurcugil, and Osman Koker, "A new Control Strategy for Single-Phase Shunt Active Power Filters Using a Lyapunov Function", *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol 53, pp305-312, 2006.
- [4] 권경민, 전병진, 이은규, 전용주, 최재호, "고속철도 변전소용 고조파 저감시스템 기술개발", 대한전기학회 하계학술대회, 2014.