

교류 전기철도 급전시스템을 위한 철도용 전기품질 보상장치의 제어방법

(Control of Railway Power Quality Conditioner for AC Electrified Railway Systems)

박한얼* · 송중호**

(Haneol Park · Joongho Song)

요 약

교류 전기철도 시스템은 비선형 단상 부하인 차량의 부하특성으로 인해 고조파 왜곡, 무효전력 발생, 3상 불평형과 같은 전기품질 문제를 가지고 있다. 이 같은 전기품질 문제는 철도 시스템뿐만 아니라 철도와 연계된 다른 건전한 계통에도 악영향을 미치게 된다. 따라서 본 논문에서는 이와 같은 전기철도 급전시스템의 전기품질 문제를 보상하기 위해 철도용 전기품질 보상장치(RPQC; railway power quality conditioner)를 적용하고, SRF(synchronous-reference-frame) 제어를 이용한 RPQC의 제어방법을 제안한다. 제안하는 제어방법을 통해 RPQC는 고조파 왜곡, 무효전력, 부하 불평형과 같은 전기품질 문제를 순시적으로 보상할 수 있으며, 시뮬레이션을 통해 이를 검증한다. 시뮬레이션 결과는 제안한 RPQC 제어방법의 타당성을 보여주고 있다.

Abstract

The AC electrified railway systems have the power quality problems such as the harmonic distortion, the reactive power and the three-phase imbalance because of the electrical load characteristics of locomotives, which are non-linear single-phase. These power quality problems have a bad effect on not only AC electrified railway systems but also other electric systems connected together. The RPQC (railway power quality conditioner) can compensate such power quality problems in the AC electrified railway systems. In this paper, a novel RPQC control method based on SRF (synchronous-reference-frame) control is proposed. The proposed RPQC control method can compensate effectively the harmonic currents, the reactive power and the load imbalance. The validity and the effectiveness of the proposed RPQC control method are illustrated through the simulations.

Key Words : Electrified Railway, Power Quality, Railway Power Quality Conditioner

* 주저자 : 서울산업대학교 철도전문대학원 박사과정

** 교신저자 : 서울산업대학교 전기공학과 교수

Tel : 02-970-6415, Fax : 02-978-2754, E-mail : joongho@snut.ac.kr

접수일자 : 2010년 3월 22일, 1차심사 : 2010년 3월 23일, 심사완료 : 2010년 4월 28일

1. 서 론

교류 전기철도 시스템은 단상이며 이동 부하인 특성으로 인해 무효전력의 발생 및 불평형 문제를 가지고 있다. 또한 전력변환기기의 사용으로 인한 고조파 문제를 포함하고 있고, 이 같은 문제들은 전기철도 급전 시스템의 전기품질뿐만 아니라 철도와 연계되어 있는 건전한 계통에도 악영향을 미치게 된다. 따라서 전기철도 급전시스템은 일정 수준의 전기품질을 유지해야 하는 의무를 부여 받는다.

최근에는 능동형 전기품질 보상장치를 이용하여 전기철도의 전기품질을 향상시키기 위한 연구가 많이 이루어졌다. 특히 전력용 반도체 소자의 발전에 따라 인버터를 이용한 능동 전력필터에 관한 연구가 많이 이루어졌다[1]. 또 대용량인 전기철도의 특성에 따라 수동 전력필터와 결합된 하이브리드(hybrid) 능동 전력필터에 관한 연구도 이루어졌다[2]. 이러한 능동 전력필터는 대부분 Scott 변압기 M상과 T상에 각각 병렬로 연결되는 형태로 고조파 보상과 무효전력의 보상은 가능하지만 부하 불평형을 보상할 수 없는 한계를 지닌다. 따라서 불평형 보상을 위한 전기품질 보상장치에 관한 연구가 이루어졌는데 3상 입력단에서 3상 능동 전력필터를 통해 무효전력 및 고조파, 부하 불평형을 보상하는 방법이 제안되었다[3]. 그러나 3상 입력단에서 전기품질을 보상하는 방법은 높은 전압레벨로 인한 문제를 가지고 있다. 또 다른 방법으로는 3상 인버터에 Scott 변압기를 연결하여 급전 Scott 변압기 M상과 T상에 연결하는 방법의 능동형 전기품질 보상장치에 관한 연구가 이루어졌다[4]. 그러나 이러한 방법은 추가적인 Scott 변압기가 필요한 단점이 존재한다. 한편으로는 DC-link 커패시터를 공유하는 단상 인버터를 back-to-back으로 연결한 전기품질 보상장치에 관한 연구가 이루어졌다[5]. 이러한 형태의 전기품질 보상장치를 본 논문에서는 RPQC로 정의한다. RPQC는 3상 입력단보다 전압 레벨이 낮은 25[kV] 레벨에서 보상이 이루어지고 추가적인 Scott 변압기가 필요하지 않으므로 3상 인버터를 이용한 전기품질 보상장치에 비해 유리한 점을 지닌다. 그러나 RPQC에 관한 연구, 특별히 RPQC의 제어방법에 관한 연구는 부족한 편이다. 본 논

문에서는 DC-link 커패시터를 공유하는 단상 인버터 두 대로 구성된 RPQC를 전기철도 급전시스템에 적용하고 RPQC의 제어를 위해 새로운 RPQC 제어방법을 제안한다. 기존의 RPQC 제어방법은 natural-frame 상에서 제어가 이루어지므로 교류 신호를 그대로 다루기 때문에 위상의 지연이나 정상상태 오차와 같은 문제가 발생할 수 있고, 전력을 제어하기 위해 유효전력과 무효전력을 계산해야 하는 문제를 가지고 있었다. 그러나 제안한 RPQC 제어방법은 기존의 제어방법과는 달리 SRF 상에서 제어가 이루어지므로 위상지연이나 정상상태 오차와 같은 문제가 없고, d-q 전류를 각각 제어함으로써 유효전력과 무효전력의 계산 없이 전력제어가 가능한 장점을 가지고 있다. 제안한 제어방법 기반의 RPQC는 차량으로 인해 발생할 수 있는 무효전력과 고조파 전류를 보상하고 유효전력의 흐름을 제어하여 부하 불평형을 보상하는 역할을 수행한다. 시뮬레이션을 통해 이러한 RPQC의 보상 성능을 검증하고 제안한 RPQC 제어방법의 타당성과 효율성을 증명한다.

2. RPQC

2.1 RPQC의 구성

그림 1은 RPQC가 설치된 전기철도 급전 계통을 보이고 있다. 전기철도의 급전 주변압기는 Scott 변압기로서 3상 교류를 90°의 위상차를 가진 2상, 즉 M상과 T상으로 변환하는 역할을 하게 된다. Scott 변압기는 다른 방식에 비해 불평형이 적은 장점을 가지고 있어 일반적으로 많이 사용되고 있다. RPQC는 Scott 변압기의 2차측 M상과 T상에 각각 연결되며 DC-link 커패시터를 공유하는 back-to-back 형태로 연결된다. RPQC 제어기의 입력으로는 DC-link 커패시터의 전압을 제어하기 위한 DC-link 전압, 인버터의 출력을 제어하기 위한 M상과 T상의 인버터 전류, 고조파 전류를 추출하기 위한 M상과 T상의 부하전류가 필요하다. RPQC를 구성하는 인버터는 마치 능동 전력필터와 같이 고조파 전류를 보상하고 더불어 무효전력을 보상한다. 또한 DC-link 커패시터를 통해 서로 유효전력을 수수해 부하 불평형을 보상한다.

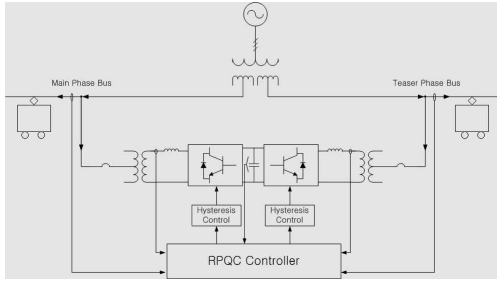


그림 1. RPQC의 구성
Fig. 1. Configuration of RPQC system

2.2 RPQC 제어기

그림 1의 M상과 T상의 공급전압은 90[°]의 위상차를 제외하면 모두 같기 때문에 M상과 T상의 제어기는 기본적으로 동일한 구조를 지닌다. 다만 DC-link 전압 제어 루프는 M상 또는 T상 제어기에 하나만 존재하면 되기 때문에 본 논문에서는 그림 2와 같이 T상 제어기에 전압 제어 루프를 추가하였다. 또한 M상과 T상의 위상정보를 얻기 위해 M상과 T상에 단상 PLL이 각각 추가된다.

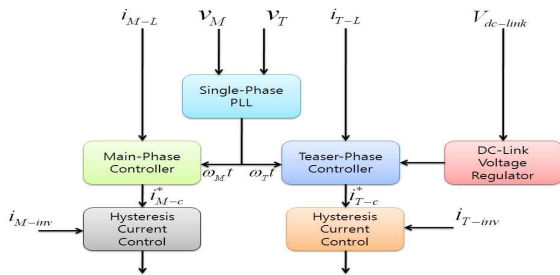


그림 2. RPQC 제어기
Fig. 2. RPQC controller

2.2.1 고조파 보상 알고리즘

M상을 기준으로 차량으로 유입되는 전류, 즉 부하 전류 i_{M-L} 은 다음과 같다.

$$i_{M-L} = I_{M-L} \cos(\omega t - \phi) \quad (1)$$

여기서 I_{M-L} 은 최댓값을 의미한다. 식 (1)과 같은 부하전류를 SRF로 좌표변환 하게 되면 다음과 같은 d-q 성분으로 나누어 생각할 수 있다.

$$I_{M-Ld} = \overline{I_{M-Ld}} + \widetilde{I_{M-Ld}} \quad (2)$$

$$I_{M-Lq} = \overline{I_{M-Lq}} + \widetilde{I_{M-Lq}} \quad (3)$$

여기서 $\overline{I_{M-Ld}}$ 와 $\overline{I_{M-Lq}}$ 는 I_{M-Ld} 와 I_{M-Lq} 의 dc 성분을 의미하고, $\widetilde{I_{M-Ld}}$ 와 $\widetilde{I_{M-Lq}}$ 는 ac 성분을 의미한다. 이 ac 성분이 곧 고조파 성분에 기인하는 것으로 LPF(low pass filter)를 이용하여 dc 성분만을 필터링하여 원 신호에서 빼주게 되면 쉽게 고조파 성분만을 얻을 수 있다. 고조파 추출 알고리즘의 블럭 다이어그램은 다음과 같다.

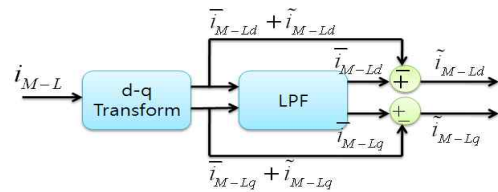


그림 3. 고조파 추출 알고리즘
Fig. 3. Harmonic compensation algorithm

2.2.2 무효전력 보상 알고리즘

M상의 부하전압 v_{M-L} 은 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다. 식 (1)을 식 (2), 식 (3)의 d-q 성분으로 표현하면 식 (5)와 같이 생각할 수 있다[6].

$$v_{M-L} = V_{M-Ld} \cos \omega t \quad (4)$$

$$i_{M-L} = I_{M-Ld} \cos \omega t - I_{M-Lq} \sin \omega t \quad (5)$$

$$= I_{M-L} \cos \phi \cos \omega t + I_{M-L} \sin \phi \sin \omega t$$

여기서 V_{M-Ld} 는 M상 부하전압 v_{M-L} 의 d축 성분 즉, 최댓값을 의미한다. 따라서 식 (4), 식 (5)를 통해 단상 순시전력을 다음과 같이 나타낼 수 있다. $p_M(t)$ 는 M상의 단상 순시 유효전력, $q_M(t)$ 는 M상의 단상 순시 무효전력을 의미한다.

$$p_M(t) = v_{M-L} \cdot I_{M-Ld} \cos \omega t \quad (6)$$

$$= V_{M-Ld} \cos \omega t \cdot I_{M-Ld} \cos \omega t$$

$$= \frac{1}{2} V_{M-Ld} I_{M-Ld} [1 + \cos(2\omega t)]$$

$$= V_{M-Lrms} I_{M-Lrms} \cos \phi [1 + \cos(2\omega t)]$$

$$\begin{aligned}
 q_M(t) &= v_{M-L} \cdot I_{M-Lq} \sin \omega t & (7) \\
 &= -V_{M-Ld} \cos \omega t \cdot I_{M-Lq} \sin \omega t \\
 &= -\frac{1}{2} V_{M-Ld} I_{M-Lq} \sin(2\omega t) \\
 &= V_{M-Lrms} I_{M-Lrms} \sin \phi \sin(2\omega t)
 \end{aligned}$$

여기서 V_{M-Lrms} 는 v_{M-L} 의 실효치, I_{M-Lrms} 는 i_{M-L} 의 실효치를 각각 의미한다. 식 (6), 식 (7)을 통해 단상 유효전력은 부하전류의 d축 성분 에 의해 결정되고, 단상 무효전력은 q축 성분 에 의해 결정됨을 알 수 있다. 따라서 RPQC를 통해 부하전류의 q축 성분을 보상해 공급전류의 q축 성분이 0이 되도록 제어한다면 무효전력을 보상할 수 있음을 알 수 있다. 공급전류는 그림 4 와 같이 별도의 전류센서 없이 계산할 수 있다. 무효전력 보상 알고리즘의 블록 다이어그램은 다음과 같다.

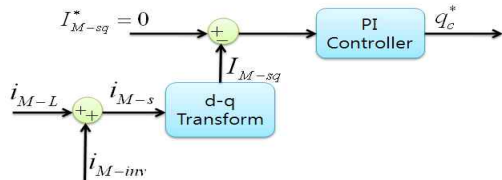


그림 4. 무효전력 보상 알고리즘
Fig. 4. Reactive power compensation algorithm

2.2.3 부하 불평형 보상 알고리즘

식 (6), 식 (7)을 통해 d축 성분을 제어함으로써 결과적으로는 유효전력을 제어할 수 있음을 알 수 있다. 고조파 전류 보상 알고리즘과 무효전력 보상 알고리즘을 통해 고조파 전류와 무효전력의 적절한 보상이 이루어졌다면 3상의 불평형은 부하가 소비하는 유효전력의 차이에 원인이 있다. 예를 들어 T상의 부하보다 M상의 부하가 더 크다면 M상으로 더 많은 전류가 흐르게 되고 이는 3상에서의 불평형으로 나타나게 된다. 이 때 SRF 상으로 전류 좌표를 변환하게 되면, 유효전류의 크기는 d축 성분으로 나타나게 된다. 즉 T상의 d축 성분보다 M상의 d축 성분이 크게 나타나게 된다. 그러나 만일 두 상의 d축 성분이 같다면 그것은 결과적으로 3상의 평형을 의미한다. 따라서 M상과 T상의 d축 성분이 같도록 제어한다면

불평형을 보상할 수 있다. 불평형 보상 알고리즘은 그림 5와 같다. 여기서 I_{T-sd} , I_{M-sd} 는 T상과 M상 입력전류의 d축 성분을 의미한다. 그림 5에서와 같이 RPQC에서 각 상 공급전류의 d축 성분의 차가 0이 되도록 제어한다면 T상의 부하보다 M상의 부하가 클 때의 예에서 유효전력은 RPQC 회로를 통해 T상에서 M상으로 흐르게 된다. 즉 M상과 T상의 유효전력의 크기가 같아지도록 T상에서 M상으로 흐르는 유효전력의 크기가 제어된다.

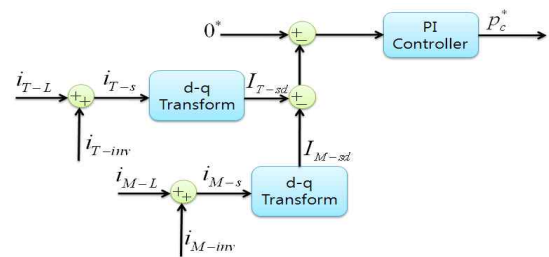


그림 5. 부하 불평형 보상 알고리즘
Fig. 5. Load imbalance compensation algorithm

2.2.4 DC-link 전압 제어 알고리즘

DC-link 전압 제어기는 DC-link 커패시터 전압을 일정한 값으로 제어하는 역할과 더불어 RPQC의 유효전력 손실분을 보상하는 역할을 수행한다. 본 논문에서는 DC-link 커패시터의 기준전압을 공급전압의 약 1.4배로 설정하였다.

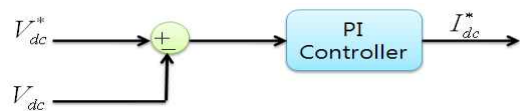


그림 6. DC-link 전압 제어 알고리즘
Fig. 6. DC-link voltage regulation algorithm

2.2.5 RPQC 제어기의 구성

RPQC 제어기의 전체 구성은 다음과 같다. RPQC 제어기는 그림 2와 같이 M상 제어기와 T상 제어기를 포함한다. 기본적으로 M상과 T상 제어기의 구조는 동일하다. 차이점은 DC-link 전압 제어 루프의 유무인데, DC-link 전압 제어 루프는 M상 또는 T상에 더해질 수 있으나 본 논문에서는 그림 7과 같이 T상에

서 담당하는 것으로 한다. 또 본 논문에서는 유효전력의 흐름을 T상에서 M상으로 기준을 잡았기 때문에 각 상의 제어기에서 불평형 보상 루프의 출력이 T상에서는 더해지고 M상에서는 빼지는 차이가 있다. 각 상의 제어기는 고조파 보상 루프와 무효전력 보상 루프, 부하 불평형 보상 루프로 구성된다. DC-link 전압 제어와 불평형 보상은 d축 상에서, 무효전력 보상은 q축 상에서 이루어지고 고조파 전류에 대한 보상은 d-q축 모두에서 이루어진다. 각 상에서 d축과 q축의 제어 출력들은 각각 더해지고, 역변환을 통해 SRF 상에서 stationary-reference-frame 상으로 변환된다. 변환된 $\alpha-\beta$ 성분 중 물리적인 의미를 갖는 α 축 성분이 전류 제어기의 기준전류(reference current)로 주어진다. 고조파 전류를 보상하는 RPQC의 특성에 따라 전류 제어기로는 히스테리시스 제어기를 적용한다.

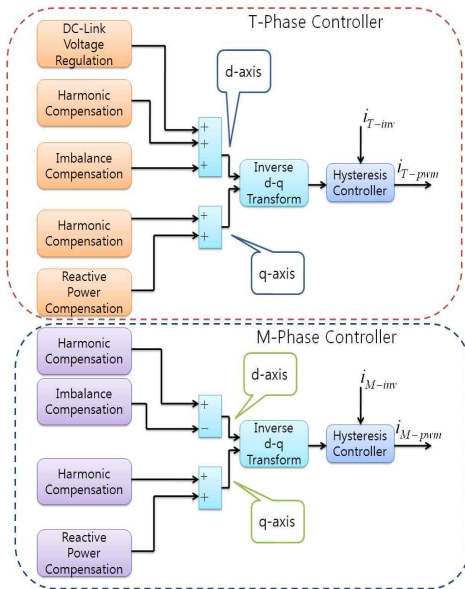


그림 7. RPQC 제어기의 구성
Fig. 7. Structure of RPQC controller

3. 시뮬레이션 결과

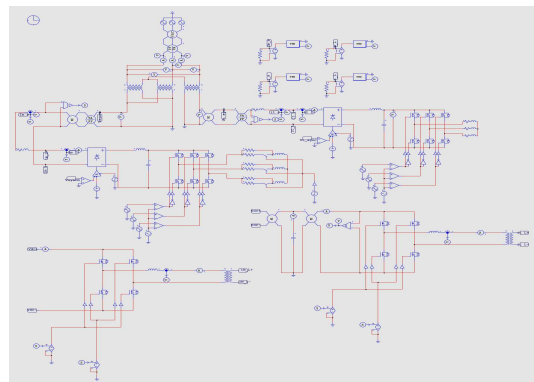
3.1 RPQC의 구성

시뮬레이션을 위해 그림 8과 같이 교류 전기철도 급전시스템을 3상 전원과 Scott 변압기로 모델링하

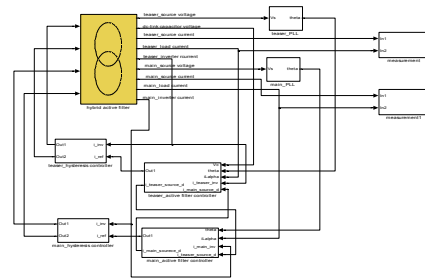
고 차량의 전기시스템을 SCR 정류기와 인버터, 부하로 구성된 비선형 부하로 모델링한다. RPQC는 H-브리지 형태의 단상 인버터 두 대가 DC-link 커패시터를 공유하며 back-to-back으로 연결된 형태로 구성하고 각 출력단에 주입변압기와 L 필터를 추가한다. 시뮬레이션을 위한 시스템 파라미터는 표 1과 같다.

표 1. 시뮬레이션 파라미터
Table 1. Simulation parameters

3 ϕ source voltage	250[V], 60[Hz]
RPQC filter inductor	2[mH]
DC-link capacitor	6000[uF], 500[V]
T-phase RL series load	1[Ω], 5[mH]
M-phase RL series load	8[Ω], 5[mH]



(a)



(b)

그림 8. 시뮬레이션 회로의 구성

(a) RPQC 전력단 (b) RPQC 제어기

Fig. 8. Simulation structure of RPQC system
(a) RPQC power stage (b) RPQC control block

3.2 Case A(without RPQC)

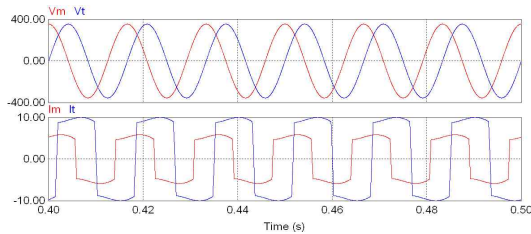


그림 9. Case A의 시뮬레이션 파형 (top) M상 및 T상 전압 (bottom) M상 및 T 상 입력전류
 Fig. 9. Case A(without RPQC) (top) M-phase and T-phase voltage (bottom) M-phase and T-phase source current

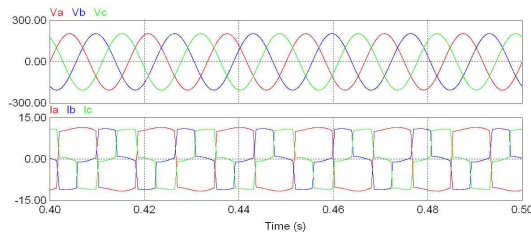


그림 10. Case A의 시뮬레이션 파형 (top) 3상 입력전류 (bottom) 3상 입력전압
 Fig. 10. Case A(without RPQC) (top) 3 ϕ source voltage (bottom) 3 ϕ source current

RPQC가 없는 경우, 회로의 시뮬레이션 파형은 그림 9와 같다. 차량의 비선형 특성으로 인해 M상과 T상의 전류에 고조파가 포함되어 있는 것을 알 수 있고, 무효 전력이 발생하고 있음을 전압과의 위상차와 역률을 통해 예상할 수 있다. 또한 그림 10을 통해 M상과 T상의 부하 불평형으로 인해 부하전류의 크기가 틀려지게 되고 이는 3상 입력단의 불평형으로 나타남을 알 수 있다.

비선형 부하로 인한 고조파 때문에 M상과 T상 전류 THD는 매우 높게 나타나고, 따라서 이는 표 2와 같이 역률의 저하를 야기한다.

표 2. Case A의 THD 및 역률
 Table 2. Case A; THD and power factor

THD for M-phase source current	44.56[%]
THD for T-phase source current	44.9[%]
displacement power factor at 3 ϕ source	0.78
total power factor at 3 ϕ source	0.72

3.3 Case B(with RPQC)

RPQC가 있는 경우의 시뮬레이션 파형은 그림 11과 같다. M상과 T상의 부하전류 파형에는 고조파를 포함하고 있으나 공급전류에서는 M상과 T상 모두 RPQC에 의한 고조파 전류 보상으로 인해 정현파 형태의 보상된 전류가 나타남을 볼 수 있다. 또한 그림 12를 통해 RPQC가 적절하게 부하의 불평형을 보상하고 있음을 확인할 수 있다. 표 3의 THD와 역률 측정 결과를 통해서도 무효전력 보상을 포함한 RPQC의 보상 성능을 확인할 수 있다.

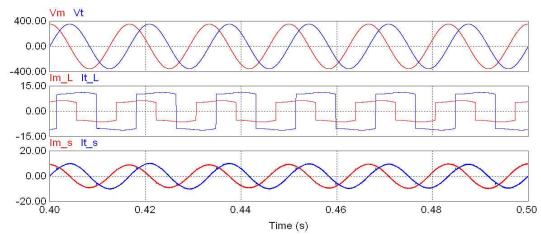


그림 11. Case B의 시뮬레이션 파형 (top) M상 및 T상 전압 (middle) M상 및 T상 부하전류 (bottom) M상 및 T 상 입력전류
 Fig. 11. Case B(with RPQC) (top) M-phase and T-phase voltage (middle) M-phase and T-phase load current (b) M-phase and T-phase source current

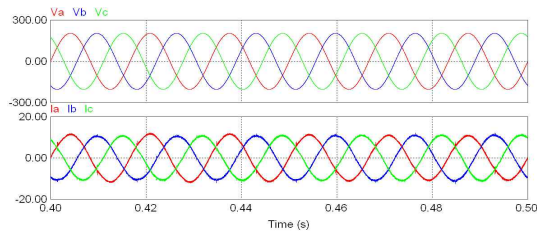


그림 12. Case B의 시뮬레이션 파형 (top) 3상 입력전류 (bottom) 3상 입력전압
 Fig. 12. Case B(with RPQC) (top) 3 ϕ source voltage (bottom) 3 ϕ source current

표 3. Case B의 THD 및 역률
 Table 3. Case B; THD and power factor

THD for M-phase source current	2.61[%]
THD for T-phase source current	2.48[%]
displacement power factor at 3 ϕ source	1
total power factor at 3 ϕ source	0.99

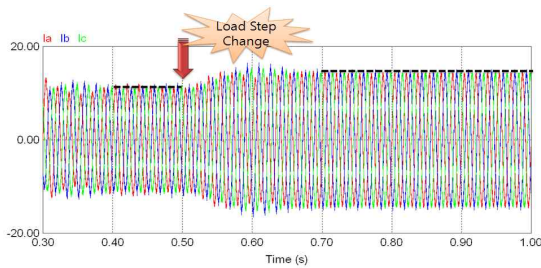


그림 13. 부하변동시 Case B의 3상 입력전류
Fig. 13. Case B(with RPQC); 3 ϕ source current when load is changed

그림 13은 부하가 변동하는 경우의 시뮬레이션 결과로 0.5[s]에서 M상의 부하 임피던스가 원래의 53[%]로 줄어들어 부하전류가 늘어나는 경우에도 RPQC는 약 0.2[s] 이내에 부하의 불평형을 보상하고 있음을 보이고 있다. 약 0.7[s] 이후 3상 입력전류는 평형을 유지하고 있는 것을 그림 13을 통해 확인할 수 있다.

4. 결 론

교류 전기철도는 단상 비선형 부하인 차량의 고유한 전기적 특성으로 인해 고조파 왜곡, 무효전력 발생, 불평형과 같은 전기품질 문제를 가지고 있다. 이는 교류 전기철도 급전시스템과 연계된 건전한 일반 계통에까지 악영향을 미칠 수 있으므로 전기품질 향상을 위한 적절한 대책이 필요하다. 본 논문은 교류 전기철도 시스템의 전기품질 향상을 위한 RPQC의 제어방법을 제안한다. 시뮬레이션 결과를 통해 제안한 RPQC의 제어방법은 고조파 전류, 무효전력, 부하 불평형 문제를 적절히 보상할 수 있음을 확인하고 있다.

References

[1] T. Komrska, J. Zak and Z. Peroutka, "Reactive power and harmonic currents compensation in traction systems using active power filter with DFT-based current reference generator", IEEE EPE Proceedings, pp. 1-10, 2009.
[2] P. Tan, P. Loh, and D. Holmes, "Optimal impedance termination of 25-kV electrified railway systems for improved power quality", IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 20, no. 2, pp. 1703-1710, 2005.
[3] S. Senini, and P. Wolfs, "Hybrid active filter for harmonically unbalanced three phase three wire railway

traction loads", IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 15, no. 4, pp. 702-710, 2000.

[4] N. Ishikura, E. Hiraki and T. Tanaka, "A constant dc voltage control based strategy for an active power quality compensator used in electrified railways with improved response", IEEE IECON Proceedings, pp. 3199-3204, 2009.
[5] Y. Wei, Q. Jiang and X. Zhang, "An optimal control strategy for power capacity based on railway power static conditioner", IEEE APCCAS Proceedings, pp. 236-239, 2008.
[6] 박한얼, 강옥구, 장우진, 송화창, 송중호, "동기좌표계를 이용한 교류 전기철도용 단상 UPQC", 한국철도학회논문집, 제12권 제5호, pp.694-699, 2009.

◇ 저자소개 ◇



박한얼 (朴한얼)

1980년 5월 5일생. 2006년 서울산업대학교 전기공학과 졸업. 2008년 서울산업대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사) 2008년 ~ 현재 서울산업대학교 철도전문대학원 박사과정.
E-mail: haneol@snut.ac.kr



송중호 (宋重鎬)

1957년 1월 30일생. 1980년 서울대 공과대학 전기공학과 졸업. 1982년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1993년 한국과학기술원 전기및전자공학과 졸업(박사). 1995~1996년 미국 위스콘신대 초빙연구원. 1982~1985년 이화전기 기술개발부. 1985~2002년 한국과학기술원 지능제어연구센터 책임연구원. 2002년~현재 서울산업대학교 공과대학 전기공학과 부교수.
E-mail: joongho@snut.ac.kr