

동기좌표계를 이용한 교류 전기철도용 단상 UPQC

A Synchronous-Reference-Frame-Based Single-Phase UPQC for AC Electrified Railway Systems

박한일* · 강옥구* · 장우진** · 송화창** · 송중호[†]

Han-Eol Park · Ok-Ku Kang · Woo-Jin Jang · Hwa-Chang Song · Joong-Ho Song

Abstract This paper presents a synchronous-reference-frame-based control of single-phase UPQC(Unified Power Quality Conditioner) to improve power quality in ac electrified railway systems. The proposed synchronous-reference-frame-based UPQC can compensate the voltage distortion, the voltage sag, the harmonic currents, and the reactive power instantaneously. The simulation results show that the UPQC can compensate the harmonic supply voltages, the voltage sag, the harmonic load currents, and the reactive power in electrified railway systems. Validity and effectiveness of the proposed UPQC control method based on the synchronous-reference-frame is illustrated through the simulation results.

Keywords : UPQC, power quality, AC electrified railway

요 지 교류 전기철도 급전시스템의 전압, 전류의 왜곡 및 전압 sag과 무효전력을 보상하기 위한 단상 UPQC의 동기좌표계를 이용한 제어 방법을 제안한다. 단상 UPQC의 동기좌표계를 이용한 제어를 통해 단상인버터 형태인 UPQC의 직렬보상기와 병렬보상기를 순시적으로 제어한다. 시뮬레이션을 통해 단상 UPQC를 이용하여 비선형 단상 부하인 차량으로 인해 급전시스템에 생길 수 있는 전압, 전류의 왜곡 및 전압 sag과 무효전력의 보상이 가능함을 증명하고, 단상 UPQC의 동기좌표계를 이용한 제어 방법이 타당함을 확인한다.

주 요 어 : 전기품질, 전기철도 급전시스템, 전력품질 보상기

1. 서 론

전기철도 시스템은 일반적인 전력계통 시스템과는 달리 단상 대용량 집중 부하인 전기철도의 특성으로 인해 전압 강하, 전압불평형, 고조파 왜곡과 같은 전기품질(power quality)의 문제를 가지고 있다. 또한, 급변하는 부하특성에 의해 무효전력이 불규칙하고 크게 나타나며 이는 계통효율을 떨어뜨려 계통용량의 증대를 야기한다. 이러한 문제들은 전기철도 시스템과 연결된 기존의 전력계통의 전기품질에도 영향을 미치게 되므로 전기철도 시스템에는 일정수준의 전기품질을 유지하기 위한 전기품질 보상설비가 필요하

다. 현재는 전력 반도체 소자 등의 고성능, 고기능화 같은 진보 및 발전에 따라 대전력 제어가 가능해짐으로써 이러한 전기품질 보상설비로 Dynamic Voltage Restorer(DVR), Static Synchronous Compensator(STATCOM), Series-/Shunt Active Power Filter(APF) 등의 응용이 많이 연구되고 있다. 전기철도 시스템의 경우에는 대용량인 철도 시스템의 특성에 따라 수동 필터 회로가 조합된 Hybrid APF의 적용에 관한 연구가 많이 이루어졌다[1]. 또한, 두 대의 STATCOM이 dc-link 커패시터를 공유하며 스코트(scott) 변압기의 M상과 T상에 각각 연결되는 형태의 Railway Static Power Conditioner(RPC)에 관한 연구가 일본에서 이루어졌다[2]. 그러나 APF의 경우 그 목적이 고조파 보상에 초점을 두고 있고 RPC의 경우에는 무효전력의 보상에 초점을 맞추고 있어 종합적이고 포괄적인 전기품질의 보상에 있어 부족함을 가진다. 따라서 본 논문에서는 전기철도 시스템의 전기

[†] 책임저자 : 정회원, 서울산업대학교 전기공학과 교수
E-mail : joongho@snut.ac.kr

TEL : (02)970-6415 FAX : (02)978-2754

* 정회원, 서울산업대학교 철도전문대학원

** 서울산업대학교 전기공학과 교수

품질 향상을 위해 고조파 전압과 전류, 무효전력, 전압 sag를 보상할 수 있는 단상 UPQC를 전기철도 급전시스템에 적용한다. 또한, 이를 위해 동기좌표계를 기반으로 하는 단상 UPQC의 제어 방법을 제안한다. 동기좌표계를 이용한 방법은 순시적인 전기품질의 보상이 가능하고, 교류 형태의 변수를 직류 형태의 변수로 다룰 수 있기 때문에 위상 지연과 같은 문제에 강한 장점을 가지고 있다. 시뮬레이션을 통해 제안한 단상 UPQC 제어 방법의 타당성을 검증한다.

2. 단상 UPQC

단상 UPQC가 적용된 전기철도 급전시스템은 그림 1과 같다. 직렬 인버터와 병렬 인버터는 에너지 저장과 수수를 위한 소자로 dc-link 커패시터를 공유하며 직렬 인버터는 주입 변압기를 통해 전차선 전압을 보상하고, 병렬 인버터는 절연을 위한 변압기를 통해 차량으로 유입되는 전류를 보상한다. 고차 고조파를 제거하기 위한 수동 필터 회로가 직렬 인버터와 병렬 인버터에 각각 추가된다.

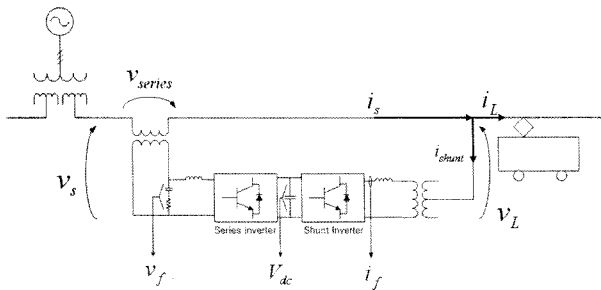


그림 1. 전기철도용 단상 UPQC

3. UPQC 제어기

UPQC 제어기는 크게 단상 PLL(Phase-Locked Loop), 직렬 보상 제어기, 병렬 보상 제어기, dc-link 전압 제어기 블록으로 나뉘어진다. UPQC 제어기의 블록 다이어그램은 그림 2와 같다. 제어기의 입력으로는 전차선의 공급전압 v_s , 차량으로 유입되는 부하전류 i_L , dc-link 커패시터의 전압 V_{dc} 를 필요로 한다. 단상 PLL은 공급전압 v_s 로부터 위상 ωt 를 검출하여 직렬 인버터 제어기와 병렬 인버터 제어기에 제공 한다. 직렬 인버터 제어기는 PLL로부터 얻어진 위상 정보와 전차선의 공급전압 v_s 로부터 공급전압의 고조파 성분과 전압 변동분을 검출하고, 직렬 인버터의 전압 v_f 를 피드백 받아 SPWM 제어를 통해 보상전압을 발생한다. 한편, 병렬 보상은 역시 PLL로부터 얻어지는 위상 정보와 부하전류 i_L 로부터 부하전류의 고조파 성분과 무효전력

성분을 추출하고 병렬 인버터의 전류 i_f 를 피드백 받아 히스테리시스 전류 제어를 통해 이를 보상한다. 더불어 병렬 보상은 dc-link 전압 제어기의 제어 입력을 받아 dc-link 커패시터의 전압을 조절하는 역할을 수행한다.

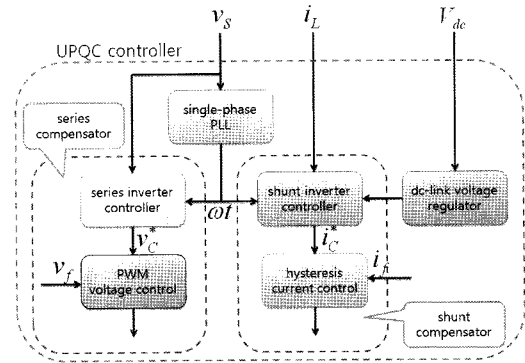


그림 2. UPQC 제어기의 구조

3.1 단상 PLL

단상 PLL은 인버터의 동작 기준점을 찾기 위한 역할과 더불어 좌표변환을 위한 위상 정보를 제공하는 역할도 담당한다. 본 논문에서는 동기 좌표계를 기반으로 하는 UPQC 제어기의 특성과 부합하기 위해 동기 좌표계를 기반으로 하는 단상 modern-PLL을 적용한다[3].

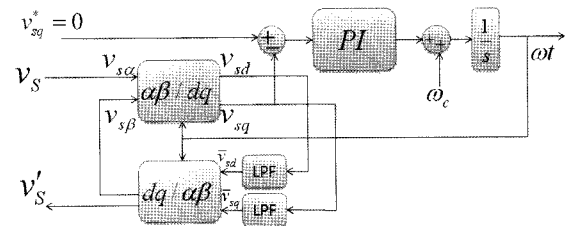


그림 3. 단상 modern-PLL

단상 PLL의 구조는 그림 3과 같다. f_s 는 v_s 의 공칭주파수로 설정한다.

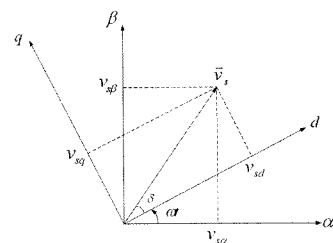


그림 4. 정지좌표계와 동기좌표계

그림 4에서 정지좌표계인 $\alpha-\beta$ 축에서 회전좌표계인 d-q 동기좌표계로의 변환은 park 변환을 통해 이루어지며 park

변환을 통해 얻어진 v_s 의 d-q 성분은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} v_{sd} \\ v_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_s \cos \delta \\ V_s \sin \delta \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서, 만일 δ 가 0이라고 가정하면, 즉, PLL에서 출력된 위상 ωt 가 실제 공급전압의 위상과 일치한다면 park 변환을 통해 얻어지는 v_s 의 d-q 성분은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} v_{sd} \\ v_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_s \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

식 (2)에서 알 수 있는 것처럼 \vec{v}_s 와 동기속도로 회전하고 있는 d축 성분은 dc로 나타나게 되고 q축 성분은 0이 된다. 따라서 \vec{v}_s 의 q축 성분이 0이 되는 위상을 찾는다면 그것은 실제 공급전압의 위상이 된다. 또한, d축 성분을 통해서 v_s 의 크기 V_s 만을 얻을 수 있다. phase detector의 park 변환을 위한 입력으로 $v_{s\alpha}, v_{s\beta}$ 두 개의 입력을 필요로 하는데, $v_{s\beta}$ 의 경우에는 회로에서 실제 얻을 수 없는 가상의 성분으로 PLL 내부에서 반복적인 park 변환의 inverse-park 변환을 통해 얻어지게 된다. 그러나 v_s 에 왜곡이 있는 경우에는 park 변환의 출력에 원하지 않는 고조파 성분이 포함될 수 있으므로 inverse-park 변환의 입력측에 LPF가 추가된다.

3.2 직렬 인버터 제어기

직렬 인버터는 공급전압의 왜곡과 전압 sag을 보상해 주는 역할을 담당한다. UPQC의 직렬 인버터 연결부의 등가 모델은 그림 5와 같다.

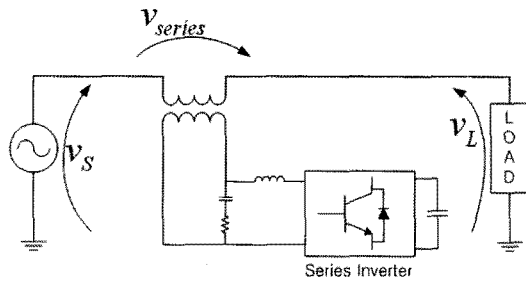


그림 5. 직렬 보상기의 등가회로

그림 5를 바탕으로 KVL을 적용하면 직렬 인버터의 보상 전압은 다음 식 (3)과 같다.

$$v_{series} = v_L - v_s \quad (3)$$

여기서, v_{series} 는 직렬 인버터의 보상전압, v_L 은 부하전압

을 의미한다. 직렬 인버터가 전압의 왜곡을 적절하게 보상하여 만일 부하의 전압이 기본파 성분만을 가지고 있다고 한다면 즉, $v_L = v_s'$ 을 가정한다면, 식 (3)은 다음과 같이 생각할 수 있다.

$$v_{series} = v_s' - v_s \quad (4)$$

직렬 인버터의 보상전압 v_{series} 가 식 (4)와 같다면, 부하의 전압은 기본파 성분만을 가진 순수한 정현 파형이 될 수 있음을 알 수 있다. 공급전압의 sag을 보상하기 위해 공급 전압 v_s 에 전압 sag을 가정한다면 sag으로 인해 직렬 인버터에서 보상해 주어야 할 전압 v_{sag} 은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$v_{sag} = v_{rated} - v_s' \quad (5)$$

여기서 v_{rated} 는 기준전압을 의미한다. 식 (4)와 식 (5)를 통해 공급전압에 sag이 생길 경우의 직렬 인버터의 보상전압을 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} v_{series} &= (v_s' - v_s) + (v_{rated} - v_s') \\ &= v_{sh} + v_{sag} = v_{rated} - v_s \end{aligned} \quad (6)$$

식 (6)의 v_{series} 는 전압 sag로 인한 보상전압과 공급전원의 고조파 전압을 모두 포함하므로 식 (6)의 v_{series} 가 직렬 인버터의 보상전압 reference v_c^* 로 주어진다.

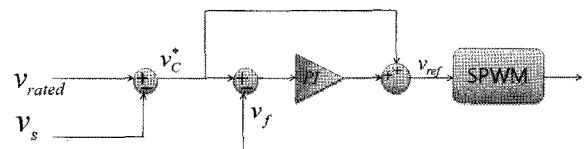


그림 6. 직렬 인버터의 제어기

v_c^* 는 단순한 정현파 형태가 아닌 고조파를 포함한 형태이므로 일반적인 PWM 제어의 경우에는 정상상태 오차를 동반할 수 있다. 따라서 시스템의 동특성을 강화하기 위해 그림 6과 같이 피드포워드(feed-forward) 루프를 추가한다.

3.3 병렬 인버터 제어기

병렬 인버터는 비선형 부하로 모델링 되는 차량에 의한 고조파 전류를 보상하는 역할과 더불어 무효전력 성분을 보상하는 역할을 수행한다. 또한, UPQC 시스템의 에너지 저장 및 수수를 위한 dc-link 커패시터의 전압을 유지하는 기능을 갖는다.

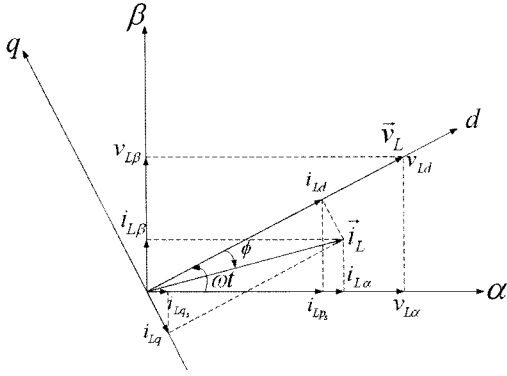


그림 7. 부하 전압, 전류의 벡터

차량으로 유입되는 전류, 즉, 부하전류는 식 (7)와 같다.

$$i_L = I_L \cos(\omega t - \phi) \quad (7)$$

여기서 I_L 은 i_L 의 최대치를 의미한다. 전류 i_L 과 부하전압 v_L 을 그림 7과 같은 벡터로 생각할 수 있다. 전류 벡터로부터 실제 시스템에서 물리적인 의미를 갖는 α 축 성분을 식 (8), 식 (9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$v_{L\alpha} = v_{Ld} \cos \omega t \quad (8)$$

$$i_{L\alpha} = i_{Ld} \cos \omega t - i_{Lq} \sin \omega t \\ = I_L \cos \phi \cos \omega t + I_L \sin \phi \sin \omega t \quad (9)$$

식 (9)에서 알 수 있듯이 $i_{L\alpha}$ 는 $v_{L\alpha}$ 와 동상인 성분과 $v_{L\alpha}$ 에 정확히 90° 뒤진 성분으로 나누어짐을 알 수 있다. 따라서 단상 유효 전류 i_{Lp_s} 와 무효 전류 i_{Lq_s} 가 다음과 같이 정의된다[4].

$$i_{Lp_s} = i_{Ld} \cos \omega t \quad (10)$$

$$i_{Lq_s} = -i_{Lq} \sin \omega t \quad (11)$$

식 (10), 식 (11)을 통해 단상 순시전력을 다음과 같이 나타낼 수 있다. $p_s(t)$ 는 단상 유효전력, $q_s(t)$ 는 단상 무효전력을 의미한다.

$$p_s(t) = v_{L\alpha} \cdot i_{Lp_s} \\ = v_{Ld} \cos \omega t \cdot i_{Ld} \cos \omega t \\ = \frac{1}{2} v_{Ld} i_{Ld} [1 + \cos(2\omega t)] \\ = V_{Lrms} I_{Lrms} \cos \phi [1 + \cos(2\omega t)] \quad (12)$$

$$q_s(t) = v_{L\alpha} \cdot i_{Lq_s} \\ = -v_{Ld} \cos \omega t \cdot i_{Lq} \sin \omega t \\ = -\frac{1}{2} v_{Ld} i_{Lq} \sin(2\omega t) \\ = V_{Lrms} I_{Lrms} \sin \phi \sin(2\omega t) \quad (13)$$

V_{Lrms} 는 v_L 의 실효치, I_{Lrms} 는 i_L 의 실효치를 각각 의미한다. 식 (12), 식 (13)에서 알 수 있듯이 단상 유효전력은 i_{Ld} 에 의해 결정되고, 단상 무효전력은 i_{Lq} 에 의해서 결정된다. 따라서 부하전류의 q축 성분인 i_{Lq} 를 보상함으로써 단상 무효전력을 순시적으로 보상할 수 있음을 알 수 있다. 또한, i_{Ld} , i_{Lq} 는 다음과 같이 두 성분으로 나누어 생각할 수 있다.

$$i_{Ld} = \overline{i_{Ld}} + \widetilde{i_{Ld}} \quad (14)$$

$$i_{Lq} = \overline{i_{Lq}} + \widetilde{i_{Lq}} \quad (15)$$

여기서, $\overline{i_{Ld}}$ 와 $\overline{i_{Lq}}$ 는 i_{Ld} 와 i_{Lq} 의 dc 성분을 의미하고, $\widetilde{i_{Ld}}$ 와 $\widetilde{i_{Lq}}$ 는 ac 성분을 의미한다. 이 ac 성분은 곧 부하전류 i_L 의 고조파 성분에 기인한다. 따라서 부하전류의 $\widetilde{i_{Ld}}$ 와 $\widetilde{i_{Lq}}$ 를 병렬 인버터에서 보상함으로써 부하전류의 고조파 성분을 보상할 수 있다. UPQC 시스템의 에너지 저장 및 수수를 위한 dc-link 커패시터의 전압을 유지하기 위한 dc-link voltage regulator의 제어 출력은 식 (16)과 같다. dc-link 전압 reference V_{dc}^* 는 반드시 공급전압보다 큰 값이어야만 한다. k_{pdc} 는 PI 제어기의 비례 이득, k_{idc} 는 적분 계수를 의미한다.

$$i_{dc}^* = k_{pdc} (V_{dc}^* - V_{dc}) + k_{idc} \int (V_{dc}^* - V_{dc}) dt \quad (16)$$

그림 8은 병렬 인버터 제어기의 구성을 보인다. 부하의 고조파 전류를 보상하는 병렬 보상기의 특성에 따라 전류 제어기에는 히스테리시스 전류 제어기를 적용한다.

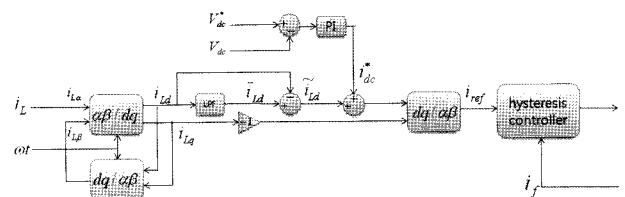


그림 8. 병렬 인버터의 제어기

4. 시뮬레이션 결과

단상 UPQC 시스템의 시뮬레이션을 위해 전기철도 급전 시스템을 그림 9와 같이 모델링한다. 차량 전기시스템의 비선형 특성을 반영하여 부하는 정류기 회로로 가정한다. PSIM을 통하여 UPQC 시스템의 전력회로 및 급전시스템을 모델링하고, Matlab/Simulink를 이용하여 UPQC 제어기를 구현한다.

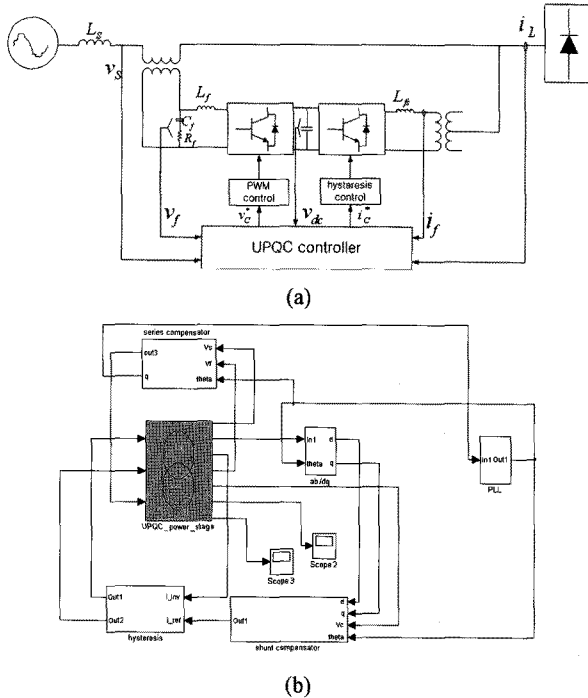


그림 9. UPQC 시스템의 시뮬레이션, (a) 모델과 (b) Simulink 블록도

Table 1. UPQC 시스템 파라미터

series inverter	L_f	1[mH]
	C_f	25[uF]
	R_f	2[Ω]
	switching frequency	18[kHz]
shunt inverter	L_{fs}	1[mH]
dc-link capacitor	capacitance	5000[uF]
	reference voltage	500[V]

시뮬레이션을 위한 UPQC 시스템 파라미터는 표 1과 같고, 시뮬레이션 결과는 다음과 같다. 그림 10을 통해 공급전원은 주파수가 기본파 주파수의 5배와 7배인 고조파를 각각 10% 포함하고 있는 것을 알 수 있고, 이를 직렬 인버터에서 보상하고 있음을 그림 11의 부하전압을 통해 확인할 수 있다. 그 결과로 공급전압의 고조파 왜곡에 의한

THD는 그림 12와 같이 15%로 나타나나, 보상에 의해 부하전압의 THD가 5%로 개선되었다. 또한 그림 11의 공급전압 파형을 보면 150-200ms 구간에서 30% 전압 sag이 있으나 직렬 인버터에 의해 전압 sag의 보상이 이루어져 부하전압은 sag의 영향을 받지 않고 있다. 비선형 부하로 인한 부하전류의 고조파 역시 병렬 인버터에서 적절히 보상하여, 공급전류의 파형이 개선되었음을 확인할 수 있다. 그림 12의 결과와 같이 부하전류의 THD는 45%이나 공급전류의 THD는 8%로 보상되었다.

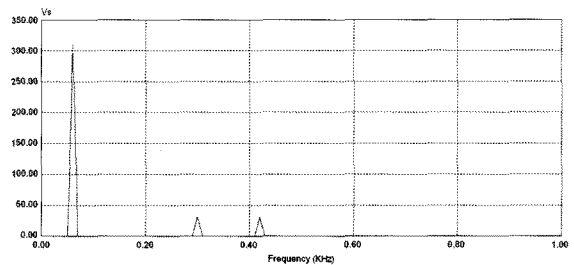


그림 10. 공급전압의 FFT 결과

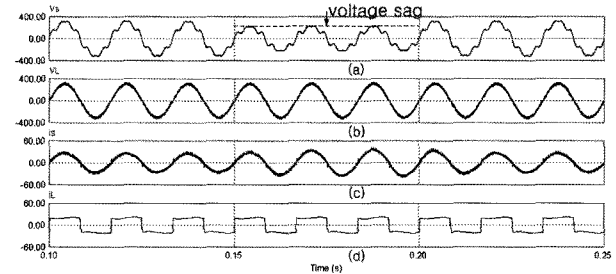


그림 11. 전압 sag이 있는 경우의 UPQC 보상 파형, (a) 공급전압, (b) 부하전압, (c) 공급전류, (d) 부하전류

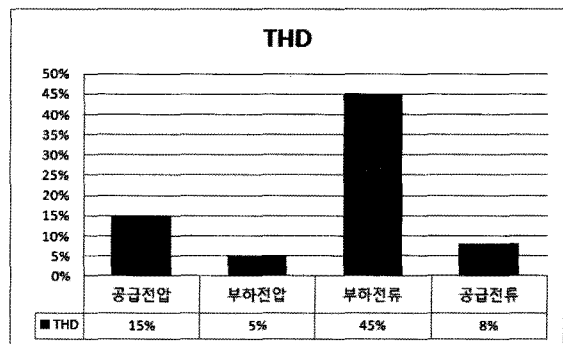


그림 12. 각 파형의 THD

부하가 변하는 경우에도 UPQC는 적절하게 보상 기능을 수행하고 있음을 그림 13을 통해 확인할 수 있다. 부하가 4배 증가한 경우에도 부하전압은 적절하게 보상되어 있으며, 마찬가지로 병렬 인버터 역시 부하전류의 고조파를 우수하게 보상하고 있다.

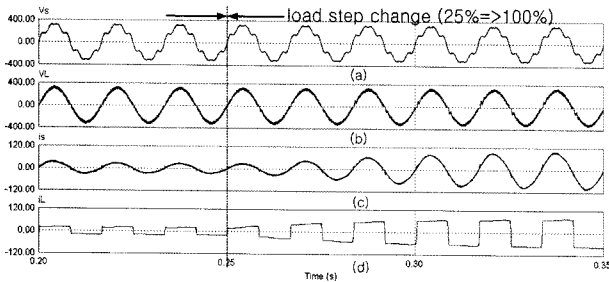


그림 13. 부하가 변할 경우의 UPQC 보상 파형, (a) 공급전압, (b) 부하전압, (c) 공급전류, (d) 부하전류

무효전력 보상 성능을 검증하기 위해 UPQC가 없는 경우의 전원에서 공급하는 무효전력을 살펴보면, 25% 부하에서 약 170[Var]의 무효전력이 발생하고 100% 부하에서 무효전력이 21[kVar]로 급격히 증가하는 것을 그림 14의 시뮬레이션 결과를 통해 살펴볼 수 있다. UPQC가 있는 경우와 비교해 보면 UPQC가 있는 경우에는 부하의 변동에도 불구하고 무효전력이 0에 근접한 것을 확인할 수 있다. 이를 통해 UPQC에 의해 무효전력이 적절하게 보상되고 있음을 확인할 수 있다. 시뮬레이션 결과를 토대로 제안한 동기좌표계 기반의 단상 UPQC 제어 방법이 공급전압의 왜곡과 전압 sag, 부하전류의 고조파 및 무효전력을 적절하게 보상하고 있음을 확인할 수 있다.

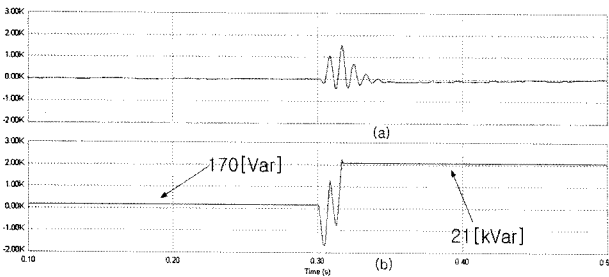


그림 14. 보상된 무효전력, (a) UPQC가 있는 경우, (b) UPQC가 없는 경우

5. 결론

전기철도는 그 고유한 특성에 따라 여러 가지 전기품질

문제를 야기한다. 이는 전기철도 시스템이 연결된 계통에도 악영향을 미쳐 전기품질 저하로 인한 여러 문제를 불러 일으키게 된다. 따라서 전기철도 시스템에는 전기품질 보상설비가 요구된다. 본 논문에서는 전기철도 급전시스템의 전기품질 향상을 위해 단상 UPQC 시스템을 적용하고, 동기좌표계를 이용한 UPQC 제어 방법을 제안한다. 시뮬레이션을 통해 제안한 UPQC가 비선형 단상 부하인 차량으로 인해 급전시스템에 생길 수 있는 전압 왜곡과 전압 sag 및 고조파 전류, 무효전력의 보상이 가능함을 증명한다. 시뮬레이션 결과는 제안한 동기좌표계를 이용한 단상 UPQC의 제어 방법이 타당함을 보여주고 있다.

후 기

본 과제(결과물)는 지식경제부의 지원으로 수행한 에너지자원인력양성사업의 연구결과입니다.

참 고 문 헌

1. S. Senini and P. Wolfs(2000), "Hybrid Active Filter for Harmonically Unbalanced Three Phase Three Wire Railway Traction Loads," IEEE Trans. on Power Electronics, vol. 15, no. 4, pp. 702-710.
2. H. Morimoto, M. Ando, Y. Mochinaga, T. Kato, J. Yoshizawa, T. Gomi, T. Miyashita, S. Funahashi, M. Nishitoba and S. Oozeki (2002), "Development of Railway Static Power Conditioner used at Substation for Shinkansen", IEEE PCC Proceedings, pp. 1108-1111.
3. S. Silva, B. Lopes, B. Cardoso, R. Campana and W. Boaventura (2004), "Performance Evaluation of PLL Algorithms for Single-phase Grid-connected Systems," IEEE IAC Proceedings, pp. 2259-2263.
4. M. Saitou, N. Matusi and T. Shimizu(2003), "A Control Strategy of Single-phase Active Filter Using A Novel d-q transformation," IEEE IAC Proceedings, pp. 1222-1227.

접수일(2009년 6월 2일), 수정일(2009년 9월 2일),
 게재확정일(2009년 9월 25일)