

전기철도 급전시스템의 전기품질 향상을 위한 동기좌표계를 이용한 단상 UPQC의 제어

A Synchronous-Reference-Frame-Based Control of Single-Phase UPQC for Improving Power Quality of AC Electrified Railway Systems

박한얼*
Han-Eol Park

송중호†
Joong-Ho Song

ABSTRACT

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

1. 서 론

전기철도 시스템은 일반적인 전력계통 시스템과는 달리 단상 대용량 집중 부하인 전기철도의 특성으로 인해 전압강하, 전압불평형, 고조파 왜곡과 같은 전기품질(power quality)의 문제를 가지고 있다. 또한, 급변하는 부하특성에 의해 무효전력이 불규칙하고 크게 나타나며 이는 계통효율을 저하시킨다. 이러한 문제들은 전기철도 시스템과 연결된 기존의 전력계통의 전기품질에도 영향을 미치게 되므로 전기철도 시스템에는 일정 수준의 전기품질을 유지하기 위한 전기품질 보상설비가 필요하다. 이러한 전기품질 보상설비로 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] 단상 시스템인 철도의 특성에 의해 불가피한 불평형 문제를 보상하기 위한 연구도 이루어지고 있다. 3상 인버터로 구성된 전기품질 보상장치의 출력을 스코트 변압기를 통해 2상으로 변환하여 무효전력과 고조파, 역상분 전류를 보상하는 방법이 중국에서 연구되었다.[3] 또한, 2상 인버터로 구성된 전기품질 보상설비를 이용하여 부하 전압의 안정과 역률 개선, 불평형 문제를 해결하려는 연구도 이루어졌다.[4] 본 논문에서는 전기철도 시스템의 전기품질 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. 시뮬레이션을 통해 제안한 단상 UPQC 제어 방법의 타당성을 검증한다.

† 책임저자 : 비회원, 서울산업대학교 전기공학과 부교수
E-mail : joongho@snut.ac.kr
TEL : (02)970-6415 FAX : (02)978-2754
* 정회원, 서울산업대학교 철도전문대학원 박사과정

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 거쳐 차량으로 유입되는 전류를 보상한다. 고차 고조파를 제거하기 위한 수동 필터 회로가 직렬 인버터와 병렬 인버터에 각각 추가된다.

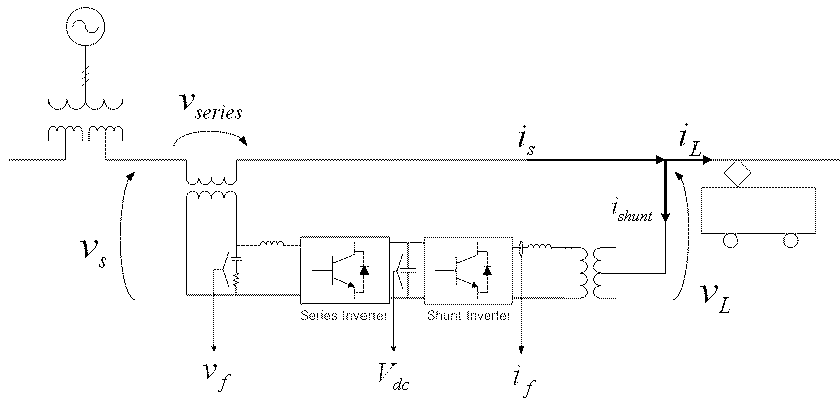


그림1. 전기철도용 단상 UPQC

3. UPQC 제어기

UPQC 제어기는 크게 단상 PLL(Phase-Locked Loop), 직렬 인버터 제어기, 병렬 인버터 제어기, dc-link 전압 제어기로 나누어진다. UPQC 제어기의 블록 다이어그램은 그림 2와 같다.

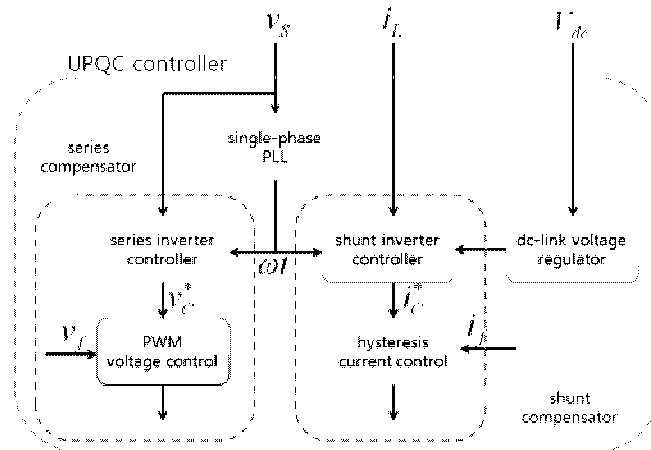


그림2. UPQC 제어기의 블록 다이어그램

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 제공한다. 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. 직렬 인버터의 보상전압은 주입 변압기를 통해 공급전압을 보상한다. 병렬 인버터 제어기는 PLL로부터 얻어지는 위상 정보와 부하전류 i_L 로부터 부하전류의 고조파 성분과 무효전력 성분을 검출하고 병렬 인버터의 전류 i_f 를 피드백 받아 히스테리시스 전류 제어를 통해 이를 보상한다. 더불어 병렬 인버터 제어기는 dc-link 전압 제어기의 제어 출력을 받아 dc-link 전압을 조절하는 역할을 수행한다.

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 부합하는 동기 좌표계를 기반으로 하는 단상 PLL을 적용한다.[5] 단상 PLL의 구조는 그림 3과 같이 크게 세 부분으로 나누어진다. 첫 번째는 phase detector로써 park 변환 부분이 이에 해당한다. park 변환을 통해 검출된 값 v_{sq} 는 정상상태에서 PLL의 출력 ωt 가 공급전압 v_s 의 위상과 일치한다면 0이므로 v_{sq} 의 reference v_{sq}^* 는 0이 된다. 두 번째는 LPF(Low Pass Filter) 또는 PI 제어기의 형태로 구현되는 loop filter(LF)로써 저역 통과 특성을 가진다. 세 번째는 voltage controlled oscillator(VCO)로 ac 출력을 발생한다. $\omega_c (= 2\pi f_s)$ 에서 f_s 는 v_s 의 공칭주파수로 설정한다.

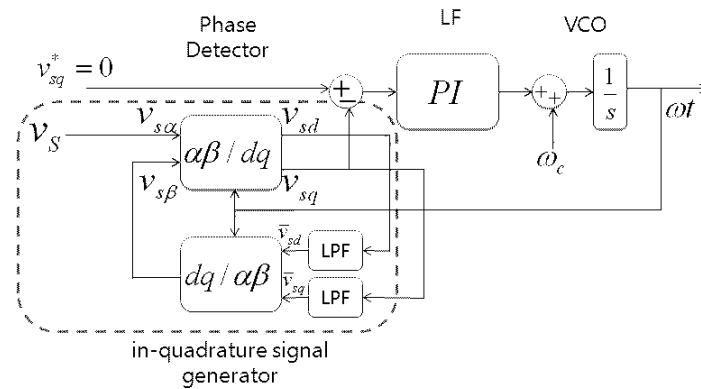


그림3. 단상 PLL의 구조

3.2 직렬 인버터 제어기

직렬 인버터는 공급전압의 왜곡과 전압 sag을 보상해 주는 역할을 담당한다. 그림 1을 바탕으로 KVL을 적용하면 직렬 인버터의 보상전압은 다음 식 (1)과 같다.

$$v_{series} = v_L - v_s \tag{1}$$

여기서, v_{series} 는 직렬 인버터의 보상전압, v_L 은 부하전압을 의미한다. 직렬 인버터가 공급전압의 왜곡을 적절하게 보상하여 만일 부하전압이 기본파 성분 v_s' 만을 가지고 있다고 한다면 즉, $v_L = v_s'$ 을 가정한다면, 식 (1)은 다음과 같이 생각할 수 있다.

$$v_{series} = v_s' - v_s \tag{2}$$

직렬 인버터의 보상전압 v_{series} 가 식 (2)와 같다면, 부하의 전압은 기본파 성분만을 가진 순수한 정현파형이 될 수 있음을 알 수 있다. 따라서 식 (2)에서 v_{series} 는 v_s 의 고조파 성분 v_{sh} 를 의미한다. 공급전압의 sag을 보상하기 위해 공급전압 v_s 에 sag을 가정한다면 sag으로 인해 직렬 인버터에서 보상해주어야 할 전압 v_{sag} 은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$v_{sag} = v_{rated} - v_s' \tag{3}$$

여기서 v_{rated} 는 기준전압을 의미한다. 식 (2)와 식 (3)을 통해 공급전압에 sag이 생길 경우의 직렬 인버터의 보상전압을 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$v_{series} = (v_s' - v_s) + (v_{rated} - v_s') = v_{sh} + v_{sag} = v_{rated} - v_s \quad (4)$$

식 (4)의 v_{series} 는 전압 sag로 인한 보상전압과 공급전원의 고조파 전압을 모두 포함한다. 따라서 식 (4)의 v_{series} 가 직렬 인버터의 보상전압 reference v_c^* 로 주어진다.

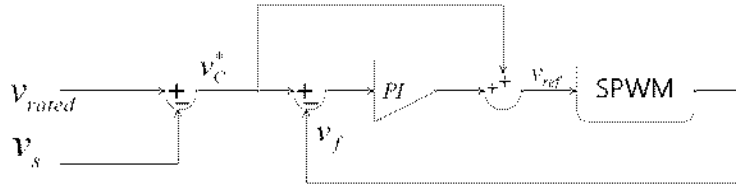


그림4. 직렬 인버터의 제어기

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 4와 같이 피드포워드 (feed-forward) 루프를 추가한다.

3.3 병렬 인버터 제어기와 dc-link 전압 제어기

병렬 인버터는 비선형 부하인 차량에 의한 고조파 전류를 보상하는 역할과 더불어 무효전력 성분을 보상하는 역할을 수행한다. 부하전류는 식 (5)와 같다.

$$i_L = I_L \cos(\omega t - \phi) \quad (5)$$

여기서 I_L 은 i_L 의 최대치를 의미한다. 전류 i_L 과 부하 전압 v_L 을 그림 5와 같은 벡터로 생각할 수 있다. 전류 벡터로부터 실제 시스템에서 물리적인 의미를 갖는 α 축 성분을 식 (6), 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

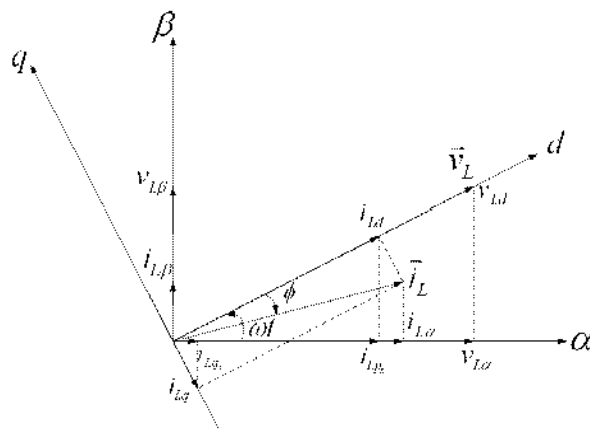


그림5. 부하전압과 부하전류의 벡터도

$$v_{L\alpha} = v_{Ld} \cos \omega t \quad (6)$$

$$i_{L\alpha} = i_{Ld} \cos \omega t - i_{Lq} \sin \omega t = I_L \cos \phi \cos \omega t + I_L \sin \phi \sin \omega t \quad (7)$$

식 (7)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.[6]

$$i_{Lp_s} = i_{Ld} \cos \omega t \quad (8)$$

$$i_{Lq_s} = -i_{Lq} \sin \omega t \quad (9)$$

식 (8), 식 (9)를 이용해 단상 순시전력을 다음과 같이 나타낼 수 있다. $p_s(t)$ 는 단상 유효전력, $q_s(t)$ 는 단상 무효전력을 의미한다.

$$\begin{aligned} p_s(t) &= v_{L\alpha} \cdot i_{Lp_s} \\ &= v_{Ld} \cos \omega t \cdot i_{Ld} \cos \omega t \\ &= \frac{1}{2} v_{Ld} i_{Ld} [1 + \cos(2\omega t)] \\ &= V_{Lrms} I_{Lrms} \cos \phi [1 + \cos(2\omega t)] \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} q_s(t) &= v_{L\alpha} \cdot i_{Lq_s} \\ &= -v_{Ld} \cos \omega t \cdot i_{Lq} \sin \omega t \\ &= -\frac{1}{2} v_{Ld} i_{Lq} \sin(2\omega t) \\ &= V_{Lrms} I_{Lrms} \sin \phi \sin(2\omega t) \end{aligned} \quad (11)$$

V_{Lrms} 는 v_L 의 실효치, I_{Lrms} 는 i_L 의 실효치를 각각 의미한다. 식 (10), 식 (11)에서 알 수 있듯이 단상 유효전력은 i_{Ld} 에 의해 결정되고, 단상 무효전력은 i_{Lq} 에 의해서 결정된다. 따라서 부하전류의 d-q 성분인 i_{Ld} , i_{Lq} 를 제어함으로써 단상 순시전력을 제어할 수 있음을 알 수 있다. 또한, i_{Ld} , i_{Lq} 는 다음과 같이 생각할 수 있다.

$$i_{Ld} = \overline{i_{Ld}} + \widetilde{i_{Ld}} \quad (12)$$

$$i_{Lq} = \overline{i_{Lq}} + \widetilde{i_{Lq}} \quad (13)$$

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 (14)와 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.

$$i_{dc}^* = k_{pdc} (V_{dc}^* - V_{dc}) + k_{idc} \int (V_{dc}^* - V_{dc}) dt \quad (14)$$

그림 6은 병렬 인버터 제어기의 구성을 보인다. 단상 유효 전류 i_{Lp_s} 에 관계하는 i_{Ld} 는 LPF를 통과

하여 \bar{i}_{Ld} 만을 남기고 \tilde{i}_{Ld} 와 i_{Ld} 와의 차를 통해 \tilde{i}_{Ld} 가 얻어진다. 여기에, dc-link 커패시터의 전압을 제어하기 위한 voltage regulator의 제어 신호 i_{dc}^* 를 추가한다. \tilde{i}_{Ld} 와 i_{dc}^* 의 제어는 유효전력의 제어를 의미하며, 이와 더불어 무효전력을 보상하기 위해서는 \tilde{i}_{Lq} 와 \tilde{i}_{Lq} 모두를 보상할 필요가 있다. 전류의 방향에 따라 -1의 이득이 i_{Lq} 에 직접 곱해진다. 동기좌표계인 보상전류 reference는 inverse-park 변환을 통해 정지좌표계 reference i_{ref} 로 변환된다. 부하의 고조파 전류를 보상하는 병렬 인버터의 특성에 따라 전류 제어기에는 히스테리시스 전류 제어기를 적용한다.

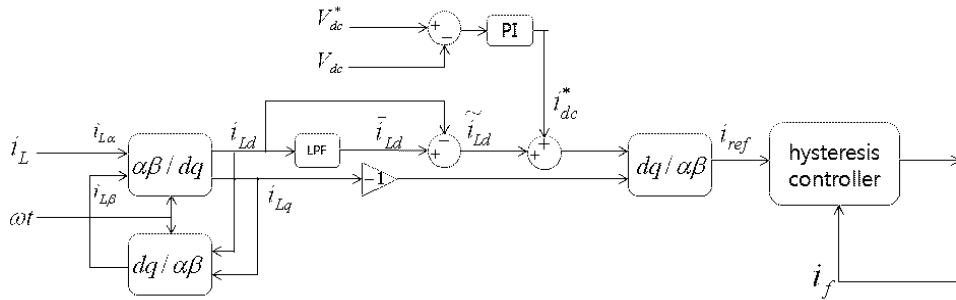


그림6. 병렬 인버터의 제어기

4. 시뮬레이션

단상 UPQC 시스템의 시뮬레이션을 위해 전기철도 급전시스템을 그림 7과 같이 모델링한다. 차량의 비선형 특성을 반영하여 부하는 정류기 회로로 가정한다. PSIM을 통하여 UPQC 시스템의 전력회로 및 급전시스템을 모델링하고, Matlab/Simulink를 이용하여 UPQC 제어기를 구현한다.

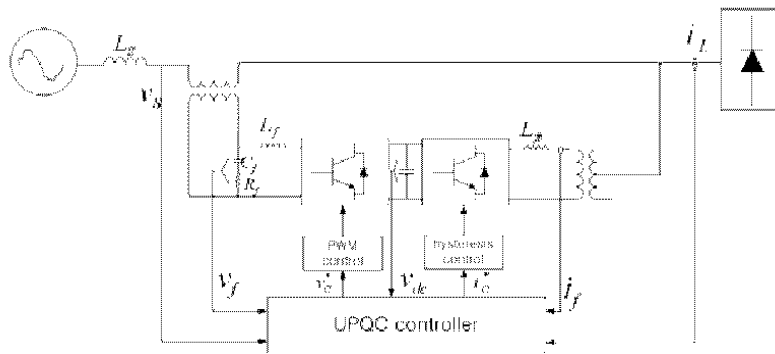


그림7. UPQC 시스템의 시뮬레이션 모델

시뮬레이션을 위한 UPQC 시스템 파라미터는 표 1과 같다.

표 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	50000[uF]
	reference voltage	500[V]

그림 8의 시뮬레이션 결과에서 공급전압의 왜곡을 직렬 인버터에서 적절하게 보상하고 있음을 부하전압을 통해 확인할 수 있다. 또한, 0.3-0.4초 구간에 50[Vrms]만큼의 전압 sag이 일어나고 있으나 직렬 인버터에 의해 전압 sag의 보상이 이루어져 부하전압은 sag의 영향을 받지 않고 있다. 더불어 비선형 부하로 인한 부하전류의 고조파를 병렬 인버터에서 적절히 보상하여 공급전류의 파형이 개선되었음을 확인할 수 있다.

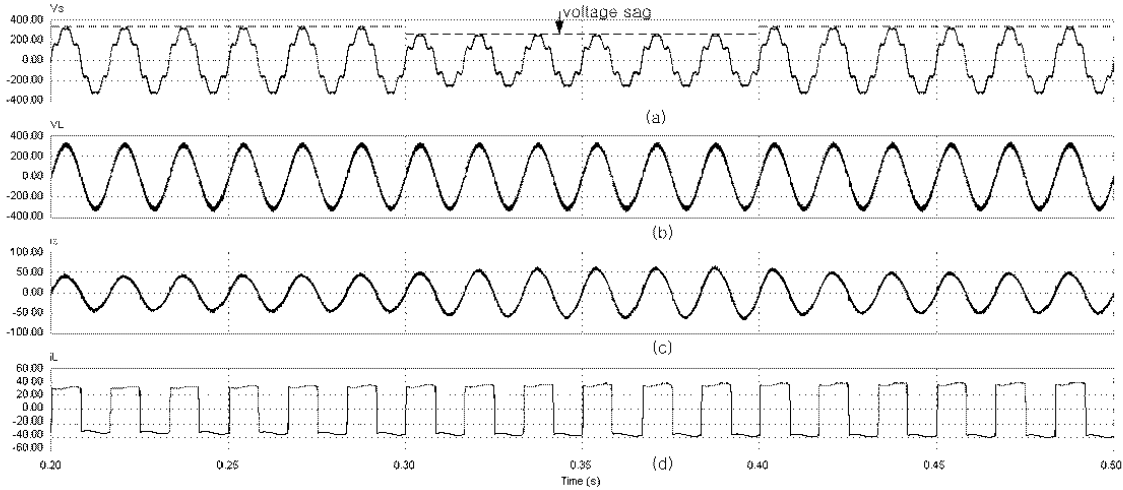


그림 8. 전압 sag이 있는 경우 (a)공급전압 (b)부하전압 (c)공급전류 (d)부하전류

부하가 변하는 경우에도 UPQC는 적절하게 보상 기능을 수행하고 있음을 그림 9를 통해 확인할 수 있다. 부하가 25%에서 100%로 증가한 경우에도 부하전압이 적절하게 보상되고 있으며, 동시에 부하 고조파 전류 역시 적절하게 보상되고 있다.

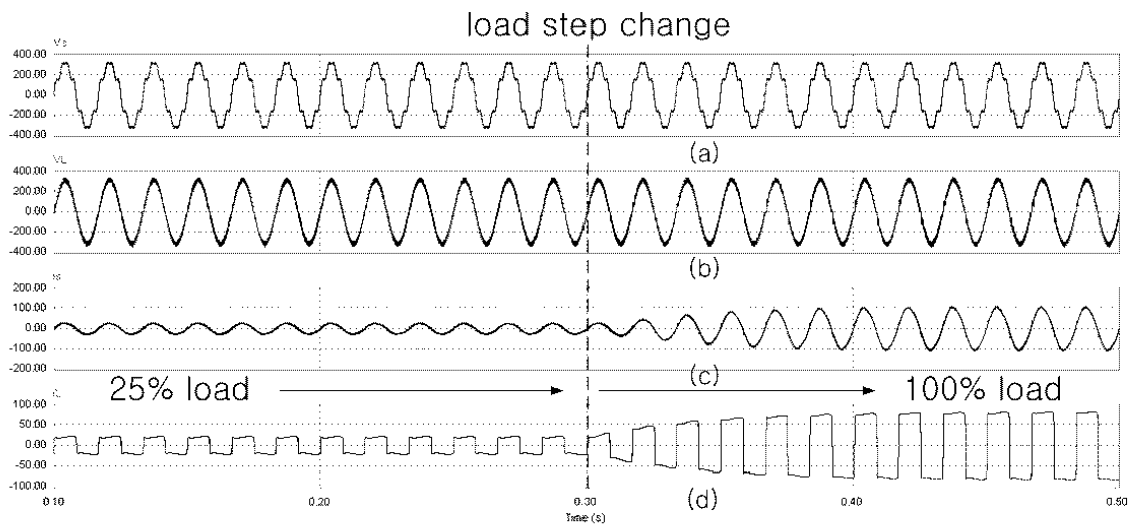


그림 9. 부하가 변하는 경우 (a)공급전압 (b)부하전압 (c)공급전류 (d)부하전류

무효전력 보상 성능을 검증하기 위해 무효전력을 발생하는 부하의 경우 UPQC가 없는 경우의 무효전력을 살펴보면 25% 부하에서 약 170[Var]의 무효전력이 발생하고 부하가 100%로 증가하면 무효전력이 21[kVar]로 급격히 증가하는 것을 그림 10의 시뮬레이션 결과를 통해 살펴볼 수 있다. 그러나 UPQC를 통해 보상이 이루어지는 경우에는 부하의 변동에도 불구하고 무효전력이 0에 근접한 것을 확인할 수 있다. 이를 통해 UPQC에 의해 무효전력이 적절하게 보상되고 있음을 확인할 수 있다.

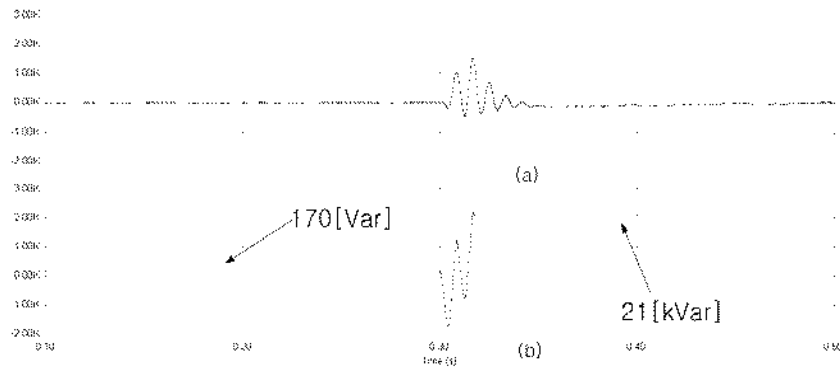


그림 10. 보상된 무효전력 (a)UPQC가 있는 경우 (b)UPQC가 없는 경우

시뮬레이션 결과를 통해 제안한 동기좌표계 기반의 단상 UPQC 제어 방법이 공급전압의 왜곡과 sag, 부하전류의 고조파 및 무효전력을 적절하게 보상하고 있음을 확인할 수 있다.

5. 결 론

전기철도는 그 고유한 특성에 따라 여러 가지 전기품질 문제를 야기한다. 먼저 단상인 부하의 특성에 의해 불평형 문제를 야기하며, 공급전압의 왜곡 문제를 가지고 있다. 또한, 비선형인 부하 특성에 따라 많은 고조파 전류를 발생하며, 급변하는 부하특성에 따라 급격한 무효전력의 변동을 야기한다. 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 공급전압의 왜곡과 sag 및 고조파 전류, 무효전력의 보상이 가능함을 증명한다. 시뮬레이션 결과는 제안한 동기좌표계를 이용한 단상 UPQC의 제어 방법이 타당함을 보여주고 있다.

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

참고문헌

1. S. Senini and P. Wolfs, "Hybrid Active Filter for Harmonically Unbalanced Three Phase Three Wire Railway Traction Loads", IBBE Transactions on Power Electronics, vol. 15, no. 4, pp. 702-710, 2000
2. H. Morimoto, M. Ando, Y. Mochinaga, T. Kato, J. Yoshizawa, T. Gomi, T. Miyashita, S. Funahashi, M. Nishitoba and S. Oozeki, "Development of Railway Static Power Conditioner used at Substation for Shinkansen", IBBE Power Conversion Conference Proceedings, pp. 1108-1111, 2002
3. Z. Sun, X. Jiang, D. Zhu and G. Zhang, "A Novel Active Power Quality Compensator Topology for Electrified Railway", IBBE Transactions on Power Electronics, vol. 19, no. 4, pp. 1036-1042, 2004
4. L. Battistelli, D. Lauria and D. Proto, "Two-Phase Controlled Compensator for Alternating Current Quality improvement of Electrified Railway Systems", IET Transactions on Power Applications, vol. 153, no. 2, 2006
5. S. Silva, B. Lopes, B. Cardoso, R. Campana and W. Boaventura, "Performance Evaluation of PLL Algorithms for Single-phase Grid-connected Systems", IBBE Industry Applications Conference Proceedings, pp. 2259-2263, 2004
6. M. Saitou, N. Matusi and T. Shimizu, "A Control Strategy of Single-phase Active Filter Using A Novel d-q transformation", IBBE Industry Applications Conference Proceedings, pp. 1222-1227, 2003