

맥동 전압 추출을 통한 배전용 정지형 보상기의 직류링크 전압제어

김호열¹, 최종우[†]

DC-Link Voltage Control of Distribution Static Compensator using Ripple Voltage Extraction

Ho-Yeol Kim¹, and Jong-Woo Choi[†]

Abstract - DSTATCOM is active filter that reduces nonlinear and unbalanced currents. Researches about DSTATCOM are mainly divided two parts, one is the reference value calculation of compensation current depending on the calculation of the load-side average active power and dc-link capacitor average voltage, the other part is actual current control depending on the reference value of compensation current. This paper proposes a calculation of dc-link capacitor average voltage ripple voltage extraction instead of conventional method using LPF. The utility of the proposed algorithm is verified through the theoretical analysis and the experiment under unbalance loads and non-linear load.

Keywords : DSTATCOM, dc-link capacitor average voltage, Current control

1. 서 론

최근 전력전자 소자의 사용이 급증함에 따라, 소자의 스위칭이나 전압의 정류과정으로 인한 고조파 발생으로 인해 역률저하, 전력품질 저하, 기기의 이상동작 및 산업의 피해가 유발되는 사례가 증가하고 있다.

불평형 및 비선형 부하에 의해 발생된 고조파 전류를 효과적으로 제거하기 위해 고안된 전력전자기기가 배전용 정지형 보상기이다. 배전용 정지형 보상기의 기능은 부하전류에 포함된 고조파와 크기가 같고 위상이 반대인 전류를 부하와 병렬로 주입하여 전원 측에서는 왜곡이 없는 기본파 성분에 해당하는 전류만 공급되도록 하는 것이다.

배전용 정지형 보상기에 관한 연구는 크게 전원측과 부하측의 전압, 전류로부터 배전용 정지형 보상기의 유효전력의 맥동치를 계산하는 연구와 직류단 커패시터의 평균전압을 계산 하는 연구^[1,2], 실제 전류 제어를 수행하는 부분에 관한 연구^[3,4,5]로 나누어 진행되고 있다. 부하측 유효전력의 맥동치 및 직류단 커패시터의 평균전

압을 계산하는 부분에서 맥동을 제거하기 위해 저역통과필터가 주로 사용되고 있지만 저역통과필터를 대신하여 과도상태와 정상상태의 보상능력을 개선하기 위한 방법이 연구되고 있고, 실제 전류 제어를 수행하는 부분에서는 비선형 부하에 의하여 생성된 고조파들을 제어하기 위해서 PR제어기가 주로 사용되었지만 최근에는 반복 제어기, 적응 제어기등을 이용하여 적절히 고조파들을 추종함으로써 배전용 정지형 보상기의 보상성능을 개선시키는 연구가 활발히 진행되고 있다.

이 중 직류단 커패시터의 평균 전압을 계산하는 부분에서 맥동전압을 제거하기 위해 사용되는 저역통과 필터는 차단 주파수가 낮아지면 맥동 제거 능력은 개선되지만, 차단주파수가 낮아짐에 따라 전압제어기의 대역폭도 같이 낮아져야 하고, 이는 저역 통과 필터의 차단주파수가 시스템의 동특성에 제약을 가해 시스템의 안정성을 보장하지 못하게 된다.

본 논문에서는 기존의 저역통과필터를 사용하여 평균전압의 계산방법이 가진 문제점을 개선하여 부하측 맥동 전력으로 부터의 평균전력을 계산하는 방법을 제안하고, 시뮬레이션과 실험을 통해 제안된 방법의 우수성을 검증하였다.

2. 배전용 정지형 보상기의 구조 및 제어기 구성

Paper number : TKPE-2012-17-1-2

[†] Corresponding Author : jwchoi@ee.knu.ac.kr, College of IT Dept, of Electrical Eng., Kyungpook National University

¹ Smart Grid Lab., LS Industrial System

Manuscript received Oct. 5, 2011; accepted Nov. 15, 2011

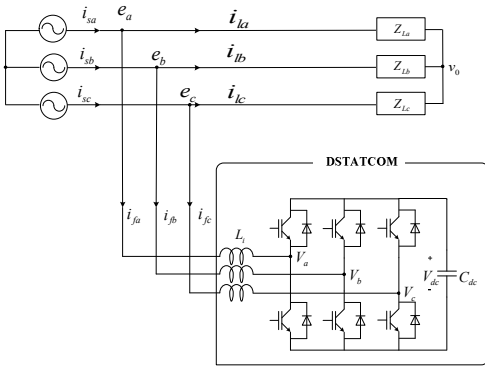


그림 1 배전계통과 배전용 정지형 보상기의 회로 구성
Fig. 1 Circuit diagram of distribute power system and DSTATCOM

그림 2는 본 논문에서 사용된 3상 3선식 배전계통에 설치된 배전용 정지형 보상기의 회로구성이다. 여기서 e_a, e_b, e_c 와 i_{sa}, i_{sb}, i_{sc} 는 배전계통의 전원측 abc 상전압, 상전류이고 i_{La}, i_{Lb}, i_{Lc} 는 부하측 전류이다. V_a, V_b, V_c 와 i_{fa}, i_{fb}, i_{fc} 는 배전용 정지형 보상기의 출력 전압, 입력전류이고, V_{dc}, C_{dc}, L_i 는 각각 직류단 커패시터 전압, 직류단 커패시터, 배전용 정지형 보상기 결합 인덕터이다. 배전용 정지형 보상기는 배전용 급전선로에 병렬로 연결되면 부하의 특성으로 인하여 발생하는 고조파를 효율적으로 경감시킬 수 있는 능동형 전력 필터(Active power filter)의 기능을 하며 선로 전압과 90도의 위상차를 가지는 전류의 유입을 통하여 무효전력을 제어함으로써 역률을 조정하는 기능을 한다.

배전용 정지형보상기의 제어기는 전압제어기와 전류지령기, 전류제어기로 구성되며 그림 2에 전체적인 제어블록을 나타내었다. 여기서 $V_{dc}^*, \bar{V}_{dc}, V_{dc}$ 는 전압제어기 지령치, 직류단 커패시터 평균전압, 실제전압이다. p_{cs}^* 와 q_{cs}^* 는 각각 보상 유효전력 지령, 보상 무효전력지령이고, i_{ca}^* 와 i_{cb}^* 는 각각 α 축 보상 전류지령, β 축 보상 전류지령이다. 여기서, 직류단 커패시터 전압의 평균값과 부하측 평균 유효전력을 구하기 위해 저역 통과 필터(Low Pass Filter)가 사용되었다.

3. 기존의 전압제어 방법의 문제점

배전용 정지형보상기의 경우 승압형 컨버터의 전압제어기와 같은 구조로 되어 있고 전원측에서 공급되는 입력전력이 부하에서 소비하는 출력전력 보다 클 경우에는 직류링크 전압이 증가하고, 반대의 경우에는 직류링크의 전압이 감소하므로 입력전력을 제어함으로써 직류링크 전압을 제어할 수 있다. 이는 곧 전력분 전류를 제어함으로써 직류링크 전압을 제어하는 것과 동일하다. 제한제어기로써 IP제어기를 사용하는 경우는 식(1)과 같다.

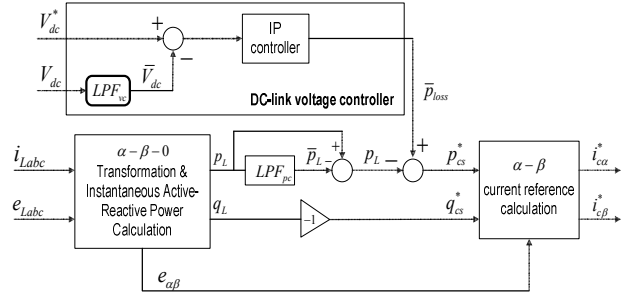


그림 2 배전용 정지형 보상기의 전류지령 연산 블록도
Fig. 2 Block diagram of reference current calculation for DSTATCOM

$$\bar{P}_{loss} = [-K_{vp} V_{dc} + K_{vi} \int (V_{dc}^* - V_{dc}) dt] \quad (1)$$

\bar{P}_{loss} 는 인버터의 손실, K_{vp}, K_{vi} 는 각각 전압제어기의 비례이득과 적분이득, V_{dc}^*, V_{dc} 는 직류링크 전압의 지령과 실제값이다. 직류링크 전압에 관한 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{C_{dc}}{2} \frac{dV_{dc}^2}{dt} = \bar{P}_{loss} \quad (2)$$

여기서 C_{dc} 는 직류링크 커패시턴스이고 전류제어가 완벽하면 식(1)과 (2)로부터 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\frac{C_{dc}}{2} \frac{dV_{dc}^2}{dt} = [-K_{vp} V_{dc} + K_{vi} \int (V_{dc}^* - V_{dc}) dt] \quad (3)$$

직류링크 전압의 동작점 V_{dc0} 에서 직류링크 전압의 제곱을 테일러 시리즈로 전개한 후, 2차이상을 무시하고 전달함수를 구하면 식(4)와 같다.

$$\frac{V_{dc}(s)}{V_{dc}^*(s)} = \frac{K_{vi}}{s^2 + \frac{K_{vp}}{CV_{dc0}}s + \frac{K_{vi}}{CV_{dc0}}} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n + \omega_n^2} \quad (4)$$

식(4)에서 ω_n 은 자연 비감쇠 주파수이고 ζ 는 감쇠비이다. IP 제어기의 비례이득과 적분이득은 주파수 영역에서의 해석을 통하여 식(5)와 같이 구할 수 있다.

$$K_{vp} = 2\zeta\omega_n CV_{dc0}, \quad K_{vi} = \omega_n^2 CV_{dc0} \quad (5)$$

배전용 정지형 보상기에서 부하측 유효전력의 맥동을 보상하게 되면 인버터의 직류단 커패시터 전압에도 전압맥동이 발생한다. 맥동이 발생한 직류단 커패시터 전

압을 제어기의 입력으로 그대로 사용하면 직류단 커패시터 전압을 일정하게 유지하기 위한 지령값과 유효전력의 맥동을 보상하기 위한 지령값이 서로 상쇄되어 유효전력의 맥동을 보상할 수 없게 된다. 따라서 저역 통과 필터를 사용해 맥동이 포함된 직류단 커패시터 전압으로부터 평균전압을 구해 이를 제어기 입력으로 사용한다. 하지만 저역통과필터에서 발생하는 시지연이 시스템의 안정도에 영향을 미치게 된다. 저역 통과 필터를 사용함에 따른 직류단 전압제어 시스템의 안정도에 대해 살펴보면, 직류단 커패시터 전압제어기 내부의 저역 통과 필터 차단주파수(cutoff frequency)를 ω_{vc-LPF} 라고 했을 때 저역 통과 필터가 추가된 직류단 커패시터 전압제어기의 전달함수는 식(6)과 같이 나타낼 수 있다. 여기서 Routh-Herwitz criterion을 이용해 직류단 커패시터 전압제어기가 안정할 조건을 구하면, 식(7)과 같다.

$$\frac{V_{dc}(s)}{V_{dc}^*(s)} = \frac{\frac{K_{vi}(s + \omega_{vc-LPF})}{C_{dc} V_{dc}^*}}{s^3 + \omega_{vc-LPF}s^2 + \frac{K_{vp}\omega_{vc-LPF}}{C_{dc} V_{dc}^*}s + \frac{K_{vi}\omega_{vc-LPF}}{C_{dc} V_{dc}^*}} \quad (6)$$

$$\omega_{vc-LPF} > \frac{K_{vi}}{K_{vp}} \quad (7)$$

식 (7)과 식(5)로부터 다음과 같은 관계식을 얻을 수 있다.

$$\omega_n < \left\{ 2\zeta \sqrt{(1-2\zeta^2) + \sqrt{4\zeta^4 - 4\zeta^2 + 2}} \right\} \omega_{vc-LPF} \quad (8)$$

저역 통과 필터가 맥동을 제거하는 능력은 차단주파수가 낮을수록 좋아진다. 하지만 차단주파수가 낮아짐에 따라 직류단 커패시터 전압제어기의 대역폭도 같이 낮아져야 하고, 이는 저역 통과 필터의 차단주파수가 시스템의 동특성에 영향을 주게 된다. 따라서 저역 통과 필터를 사용해 평균전압을 계산하는 방법은 시스템의 안정도와 동특성에 영향을 끼치는 문제점을 가지게 된다.

4. 맥동전압 추출을 통한 제안된 전압제어

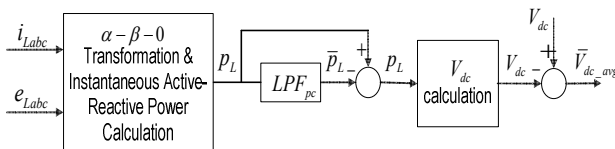


그림 3 제안된 직류단 커패시터 평균전압의 계산 블록도
Fig. 3 Calculation block diagram of proposed dc-link capacitor average voltage

부하전류가 불평형하거나 비선형일 경우 부하단 순시 유효전력의 맥동성분을 보상하게 되면 직류단 커패시터 전압은 보상하는 순시 유효전력의 맥동성분과 동일한 주파수로 맥동하게 된다. 따라서 직류단 커패시터 전압의 맥동치는 부하단 순시 유효전력의 맥동치를 이용하여 추출할 수 있다.

그림3은 제안된 직류단 커패시터 평균전압 계산 블록도이다. 그림에서와 같이 부하가 불평형할 경우나 비선형일 경우 부하의 유효전력은 순시 유효, 무효전력 이론에 의해 구하여 진다. 부하측 유효전력은 불평형일 경우에 2배의 전원주파수를 가지는 맥동이 생겨나고 비선형일 경우에 여러 고조파들의 합으로 맥동성분이 생겨난다. 이 맥동치만을 추출하기 위해서 부하측 유효전력을 저역 통과 필터로 평균값을 구한 후 이 평균값을 이용하여 유효전력의 맥동치만 추출할 수 있다. 부하측 유효전력의 맥동치로부터 식(9)와 같이 직류단 커패시터 전압의 맥동치를 알 수 있다.

$$\frac{C_{dc}}{2} \frac{d(\bar{V}_{dc} + \tilde{V}_{dc})^2}{dt} = \tilde{P}_L \quad (9)$$

식(9)를 \tilde{V}_{dc} 에 관하여 정리를 하면 식(10)과 같다.

$$\tilde{V}_{dc}(t) = \sqrt{\frac{2}{C_{dc}} \int \tilde{P}_L dt + (\bar{V}_{dc})^2} - \bar{V}_{dc} \quad (10)$$

여기서 C_{dc} 는 직류단 커패시터의 용량[F]이고, \bar{V}_{dc} 는 직류단 커패시터 평균전압인데 전압제어기 지령치의 값과 같다. 그림 4는 맥동 전압 계산 블록도 이다.

Bw 는 대역폭(bandwidth)이고 ω_B 는 대역중심(band center)이다.

대역 통과 필터(Band Pass Filter)는 오프셋(offset) 전압을 제거하기 위해 사용 되었다. 전압의 맥동치를 구하면 식(11)과 같이 실제 전압과 맥동치의 차이에 의해 평균전압을 구할 수 있다.

$$\bar{V}_{dc-avg} = V_{dc} - \tilde{V}_{dc} \quad (11)$$

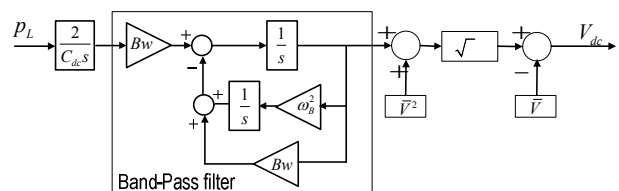


그림 4 맥동 전압 계산 블록도
Fig. 4 Ripple voltage calculation block diagram

표 1 불평형 부하와 비선형 부하시 모의실험 및 실험 조건

Table 1 Simulation and the experiment condition under unbalance loads and non-linear loads

Line voltage and frequency of Source	220 V, 60 Hz
Unbalance loads	$R_c=60\Omega, L_c=10mH$
	$R_a=R_b=25\ \Omega,$ $L_a=L_b=10mH$
Linear loads	$R=90\ \Omega, L=10\ mH$
Non-linear loads	3Phase full-wave rectifier, $C=47\mu F,$ $R=40\ \Omega$
Interface inductor (L_i)	3 mH
DC-link capacitor (C_{dc})	2.35 mF
DC-link capacitor voltage reference	350 V
Switching frequency	10 kHz

5. 모의실험 및 실험

제안한 방식의 효과를 검증하기 위하여 모의실험 및 실험을 행하였다. 모의실험은 기존방식의 배전용 정지형 보상기와 비교실험을 함으로써 제안한 방식의 성능을 검증하였고 불평형 부하와 비선형 부하로 나누어 모의 실험을 하였다. 모의실험은 실제 실험 시에 사용될 조건으로 하였으며, Matlab/Simulink상에서 구현되었다. 모의 실험에서 직류단 링크전압을 0.3초까지 서서히 증가시켜 직류단 링크 전압을 350 V가 유지되게 제어하고 0.4초가 되면 보상을 시작하였다. 그리고 0.8초에서 R_a, R_b 에 25 Ω 을 병렬로 추가하여 부하를 변동시키면서 과도상태 응답과 정상상태 응답 특성을 확인하였다. 실험에서도 모든 제어과정 및 조건을 모의실험과 동일하게 구성하였다.

DSP는 TI사의 TMS320F2812를 사용하였고 파워보드에 사용되는 IPM은 MITSUBISHI사의 PM30RSF060을 사용하였다.

5.1 불평형 부하

그림 5의 (a)와 (b)는 계산된 직류단 커패시터 전압의 맥동치의 모의실험과 실제실험 결과파형이고, (c)와 (d)는 실제 직류단 커패시터 전압의 맥동치의 모의실험과 실제실험 결과파형이다. 직류단 커패시터 전압은 부하측 유효전력이 맥동하는 주파수인 전원 주파수의 2배의 주파수로 맥동하고 실제 직류단 커패시터 전압의 맥동치를 논문의 방법으로 추출 할 수 있다는 것을 확인할 수 있다.

그림 6은 직류단 커패시터 실제전압이다. 기존방법은 차단주파수가 높을수록 과도상태의 성능이 우수하기

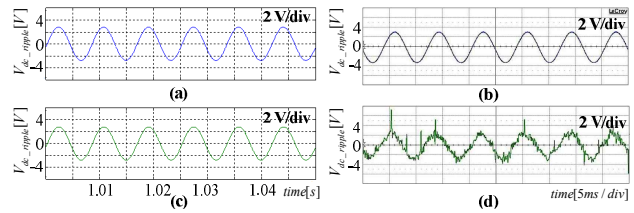


그림 5 직류단 커패시터 전압 맥동치

(a), (b) 계산된 직류단 커패시터 전압의 맥동치의 모의실험과 실험 파형
(c), (d) 실제 직류단 커패시터 전압의 맥동치의 모의실험과 실험 파형

Fig. 5 DC-link capacitor voltage ripple

(a), (b) Simulation and experimental results for calculated DC-link capacitor voltage ripple
(c), (d) Simulation and experimental results for real DC-link capacitor voltage ripple

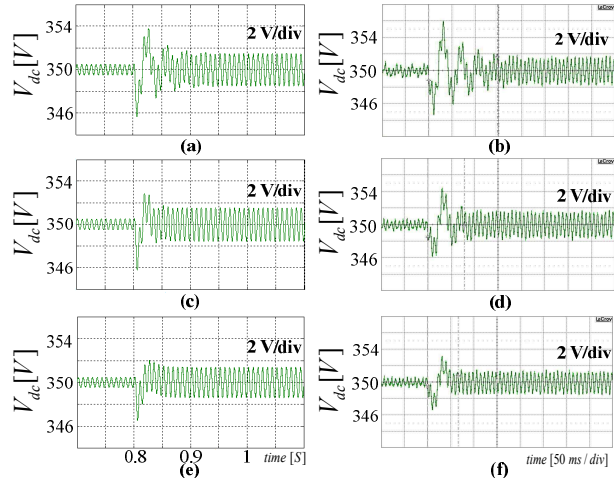


그림 6 직류단 커패시터 실제 전압

(a), (b) 기존 방법 $f_{vc-LPF}=40Hz$ 일 때 모의실험과 실험파형
(c), (d) 기존 방법 $f_{vc-LPF}=80Hz$ 일 때 모의실험과 실험파형
(e), (f) 제안된 방법일 때 모의실험과 실험파형

Fig. 6 DC-link capacitor real voltage

(a), (b) Simulation and experimental results for conventional method at $f_{vc-LPF}=40Hz$
(c), (d) Simulation and experimental results for conventional method at $f_{vc-LPF}=80Hz$
(e), (f) Simulation and experimental results for proposed method

때문에 차단주파수가 높은 80 Hz인 경우가 과도특성이 양호하다. 그러나, 제안한 방법과 비교해보면 제안한 방법은 오버슈트도 작고 응답속도가 50 ms정도로 기존방법보다 우수함을 확인할 수 있다.

그림 7은 부하측 순시 유효전력과 전원측 순시 유효전력 비교파형이다. 모의 실험에서 보상을 하지 않았을

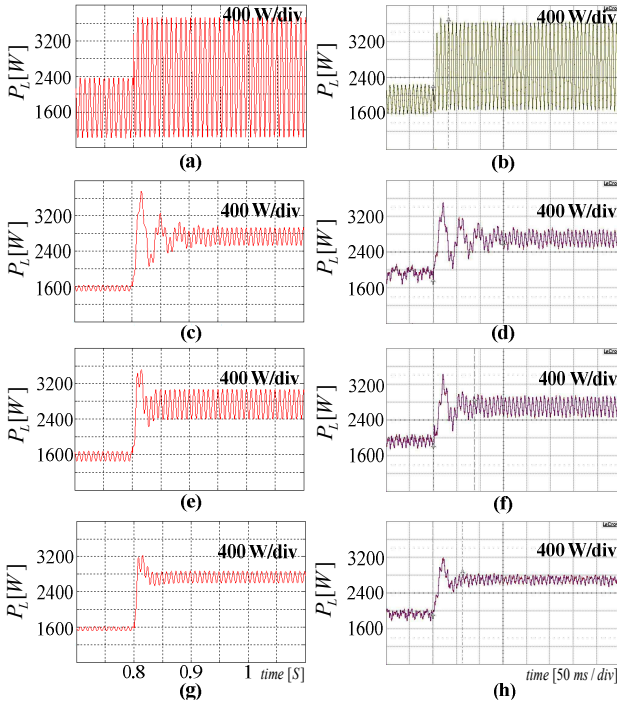


그림 7 부하측 과 전원측 순시 유효 전력
 (a), (b) 부하측 순시 유효 전력의 모의실험과 실험 파형
 (c), (d) 전원측 순시 유효 전력의 모의실험과 실험 파형 ($f_{vc-LPF} = 40Hz$)
 (e), (f) 전원측 순시 유효 전력의 모의실험과 실험 파형 ($f_{vc-LPF} = 80Hz$)
 (g), (h) 제안된 방법일 때 모의실험과 실험파형

Fig. 7 Instantaneously active power at load side and source side
 (a), (b) Simulation and experimental results for instantaneously active power at load side
 (c), (d) Simulation and experimental results for instantaneously active power at source side ($f_{vc-LPF} = 40Hz$)
 (e), (f) Simulation and experimental results for instantaneously active power at source side ($f_{vc-LPF} = 80Hz$)
 (g), (h) Simulation and experimental results for proposed method

때 순시 유효 전력이 0.8 초부터 2000 W정도 맥동하지만 보상을 하였을 때 400 W정도로 맥동이 많이 줄어든 것을 확인 할 수 있다. 전원측에서 봤을 때 맥동이 적을 수록 우수한 보상성능을 보인다고 볼 수 있다. 기존 방법은 차단주파수가 낮을 때 정상상태에서의 유효전력 맥동이 400 W정도로 우수하고 차단주파수가 높을 때 과도상태에서 응답속도가 50 ms로 우수한 성능을 보인다는 것을 알 수 있는데 제안된 방법은 정상상태에서 맥동이 200 W이고 과도상태에서 기존방법보다 오버슈트가 작고 우수한 성능을 보인다는 것을 확인할 수 있다.

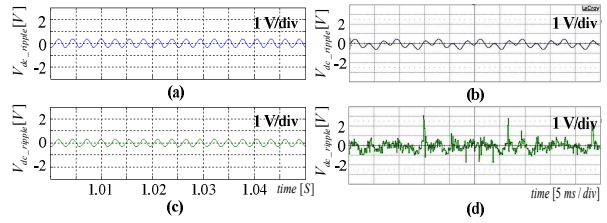


그림 8 직류단 커패시터 전압 맥동치
 (a), (b) 계산된 직류단 커패시터 전압의 맥동치의 모의실험과 실험 파형
 (c), (d) 실제 직류단 커패시터 전압의 맥동치의 모의실험과 실험 파형

Fig. 8 DC-link capacitor voltage ripple
 (a) and (b) Simulation and experimental results for calculated DC-link capacitor voltage ripple
 (c) and (d) Simulation and experimental results for real DC-link capacitor voltage ripple

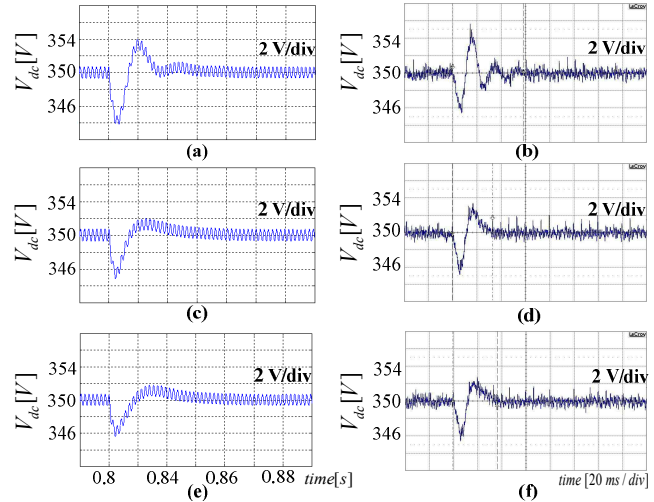


그림 9 직류단 커패시터 실제 전압
 (a), (b) 기존 방법 $f_{vc-LPF} = 40Hz$ 일 때 모의실험과 실험파형
 (c), (d) 기존 방법 $f_{vc-LPF} = 80Hz$ 일 때 모의실험과 실험파형
 (e), (f) 제안된 방법일 때 모의실험과 실험파형

Fig. 9 DC-link capacitor real voltage
 (a), (b) Simulation and experimental results for conventional method at $f_{vc-LPF} = 40Hz$
 (c), (d) Simulation and experimental results for conventional method at $f_{vc-LPF} = 80Hz$
 (e), (f) Simulation and experimental results for proposed method

5.2 비선형 부하

그림 8은 직류단 커패시터 전압 맥동치이다. 직류링크 전압의 맥동치가 클수록 보상성능이 좋지만 비선형 부하는 직류단 커패시터 전압의 맥동이 작다는 것을 확인할 수 있다.

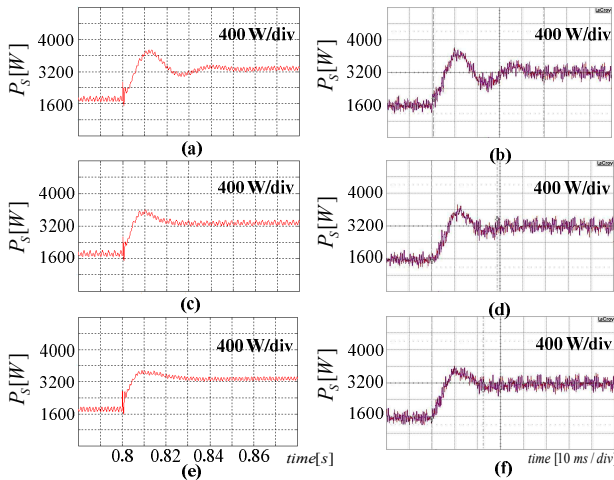


그림 10 전원측 순시 유효 전력
 (a), (b) 기존 방법 $f_{vc-LPF} = 40\text{Hz}$ 일 때 모의실험과 실험파형
 (c), (d) 기존 방법 $f_{vc-LPF} = 80\text{Hz}$ 일 때 모의실험과 실험파형
 (e), (f) 제안된 방법일 때 모의실험과 실험파형

Fig. 10 Instantaneously active power at source side
 (a), (b) Simulation and experimental results for conventional method at $f_{vc-LPF} = 40\text{Hz}$
 (c), (d) Simulation and experimental results for conventional method at $f_{vc-LPF} = 80\text{Hz}$
 (e), (f) Simulation and experimental results for proposed method

그림 9는 직류단 커패시터 실제 전압이다. 기존방법의 차단주파수가 40 Hz일 경우 응답속도가 60 ms로 느리고 오버슈트도 5 V로 크다는 것을 확인할 수 있다. 제안된 방법은 오버슈트가 줄어들고 과도상태가 개선됨을 확인할 수 있다.

그림 10은 전원측 순시 유효 전력이다. 제안된 방법이 정상상태에서는 기존 방법과 비슷한 성능을 가지지만 과도상태에서는 22 ms정도로 응답속도가 우수하다는 것을 확인할 수 있다.

6 결 론

배전용 정지형 보상기는 배전용 급진선에 병렬로 연결되어 부하의 특성에 기인하여 발생하는 고조파, 불평형 전류를 경감시켜 주는 능동형 전력필터의 기능을 하며 선로 전압과 90도의 위상차가 나는 전류의 유입을 통해 무효전력을 제어하여 역률을 조정하는 기능을 한다. 기존의 연구에서 맥동유효전력을 보상할 때 발생하는 직류단 커패시터의 전압의 맥동을 걸러내기 위해서 저역 통과 필터를 사용하였다. 하지만 이 때 사용되는 저역 통과 필터는 차단주파수에 따라 시스템의 동특성에 영향을 미치는 단점이 있다. 본 논문에서는 이러한 단점을 개선할 맥동 전압 추출을 통한 배전용 정지형

보상기의 전압제어 방법을 제안하였다. 부하측 유효전력 맥동치로부터 직류단 커패시터 맥동 전압을 추출하여 제어하였다.

본 논문은 직류링크 전압의 맥동치가 클수록 우수한 보상성능을 가지므로 맥동치가 큰 불평형 부하에서 과도 상태와 정상상태에서 모두 우수한 성능을 보였다. 직류 링크 전압의 맥동치가 작은 비선형 부하에서도 정상 상태와 과도상태에서 기존방법대비 동등 이상의 우수한 성능을 가지는 것을 실험을 통하여 확인하였다.

참 고 문 헌

- [1] Singh, B. Solanki, J. Verma, V, "Neural Network Based Control of DSTATCOM with Rating Reduction for Three-Phase Four-Wire System", *Power Electronics and Drives Systems, International Conference on*, pp. 920-925, 2005.
- [2] Vardhana, P.H. Kumar, B.K. Kumar, M. "A robust controller for DSTATCOM", *Power Engineering, Energy and Electrical Drives, International Conference on*, pp. 546-551, 2009.
- [3] Wu Yanfeng, Wu Zhengguo, Li Hua; Xia Li, "The Novel Detection Approach of Shunt Active Filter Based on Adaptive Inverse Control", *Power Electronics and Drives Systems, International Conference on*, pp. 538-541, 2005.
- [4] Sang-Joon Lee, Seung-Ki Sul, "A Harmonic Reference Frame Based Current Controller for Active Filter", *ConfRec.IEEE-APECAAnnu.Meeting*, pp. 1073-1078, 2000.
- [5] 김동근, 최종우, 김홍근, "비선형 부하를 고려한 배전용 정지형 보상기의 전류제어 기법," *대한전기학회 논문지*, pp. 1342-1348, 2009. 7.



김호열(金祐烈)

1983년 10월 17일생. 2009년 경북대 전자전 기컴퓨터학부 졸업. 2011년 동 대학원 전자 전기컴퓨터학부 졸업(석사). 2011년~현재 LS산전 Smart Grid 연구단 연구원



최종우(崔鐘宇)

1969년 2월 25일생. 1991년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 2001년~현재 경북대 IT대학 전기공학과 교수