http://dx.doi.org/10.6113/TKPE.2012.17.1.41

위상변이를 이용한 배전용 정지형 보상기의 전류 지령 계산

홍성민[1], 최종우†

Current Reference Calculation for Distribution Static Compensator using Phase Shift

Sung-Min Hong[1], and Jong-Woo Choi†

Abstract - This paper proposes a calculation of compensation current using phase shift to eliminate ripple components of instantaneous active power under unbalanced or non-linear loads condition. The proposed phase shift method instead of existing method(LPF; Low Pass Filter) to remove ripple components and this proposed method improves performances of transient and steady state response. To compare proposed method with existing method, experiments have been done for calculating an average active power at load side. Their results show that transient response and steady state response of proposed method is improved.

Keywords : DSTATCOM, Instantaneous active power, LPF(Low Pass Filter), Custom Power Devices

1. 서 론

전력품질에 영향을 주는 현상들은 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 첫 번째는 전력의 공급신뢰성에 영향을 주는 정전이고, 두 번째는 공급되는 전력의 질을 저하시키는 고조파(harmonics), 순간 전압 상승/강하(voltage swell/sag), 전압 또는 전류의 불평형(unbalance), 전압변동과 플리커(voltage fluctuation/flicker) 그리고 전압 노치(voltage notch) 등이 있다. 이러한 현상들은 아주 짧은 시간동안 발생하더라도 병원의 생명유지 장치나 기타 의료장비, 반도체나 제철공장 등의 연속 제조 공정기기, 중요한 자료를 보관하는 데이터 백업센터(Data backup center)의 전산기기와 같은 전력품질에 민감한 기기에 치명적인 결과를 초래한다. 이러한 막대한 피해를 끼치는 전력품질에 영향을 주는 현상들은 여러 가지 원인에 의해 발생되는데 낙뢰, 강풍 혹은 사람의 실수에 의한 송·배전 선로사고가 그 첫 번째 원인이고, 두 번째 원인으로는 급격한 산업화와 정보화를 들 수 있다. 최근 급격한 산업화와 정보화로 산업기기, 정보통신기기 사용이 증가하였는데 이러한 기기들 중 전기철도나 전기로와 같은 대용량 단상 부하나 거의 모든 정보통신기기의 전원장치로 사용되는 전력전자 기술을 바탕으로 한 전력변환 장치들은 고조파, 노치 등을 발생하여 전력품질을 저하시키는 원인이 되기도 한다[1-2]. 이런 상황으로 인해 수용가들은 좀 더 좋은 품질의 전력을 공급받기를 원하였고, 또 자신의 기기들에 의해 계통전원의 전력품질이 저하되지 않도록 규제를 받았다. 이러한 이유에서 전력품질의 이상으로 발생하는 문제를 해결하기 위한 기기의 연구와 개발이 진행 되었다.

전력품질 개선용 전력전자 기기들은 유연 송전 시스템(flexible AC transmission system)이라 불리는 송전용 기기들과 주문형 전력 기기라 불리는 배전용 기기들로 나눈다. 송전용 기기는 정격전압과 정격전류의 제한으로 인해 발전 속도가 상대적으로 더딘 반면 배전용 기기들은 전력 전자기술의 발전과 더불어 활발한 연구가 진행되고 있다[3].

배전용 정지형 보상기는 대용량 변동 부하, 비선형 부하로 인한 고조파 전류와 불평형 전류가 계통으로 유입되는 것을 보상함으로써 배전선로를 보호한다. 이러한 배전용 정지형 보상기에 관한 연구는 최근 들어 활발히 진행되고 있는데, 이 연구들은 크게 전원 측과 부하 측의 전압, 전류로부터 배전용 정지형 보상기의 전류 지령를 계산하는 부분에 대한 연구[4-6]와 실제전류제어를 수행하는 부분[7-9]에 관한 연구로 나누어 진행된다.

본 논문에서는 3상 3선식 계통의 불평형 부하와 비선형 부하에서 위상변이 방법을 이용하여 맥동성분의 보상

† Paper number : TKPE-2012-17-1-7
† Corresponding Author : jwchoi@ee.knu.ac.kr, College of IT Engineering, Kyungpook National University
[1] Electro-Mechanical Research Institute, Hyundai Heavy Industries CO., LTD.
Manuscript received Oct. 5, 2011; revised Dec. 5, 2011

전류 지령치를 만들어 전원 측의 전류가 보상됨을 MATLAB Simulink 를 통한 모의실험과 실제실험결과를 통해 비교, 분석하여 성능이 향상됨을 검증한다.

2. 기존의 전류 지령치 계산 방법

배전용 정지형 보상기의 회로 구성도를 그림 1에 나타내었다. 그림 2는 배전용 정지형 보상기의 전류지령 계산 블록도이다. 3상의 전압과 전류를 읽어 p-q 이론을 통하여 변환한 α-β축의 전류와 전압을 가지고 부하 측의 유효전력과 무효 전력을 구한다. 기존의 부하 측 평균 유효전력을 구하고, 이를 이용하여 맥동성분을 걸러낸다.

그리고 순시 유효전력의 맥동성분을 보상하기 위해서는 부하 측의 순시 유효전력(p_L)에서 평균 유효전력($\overline{p}_L$)을 제외한 맥동성분의 부호가 반대인 $-\tilde{p}_L$ 을 계통으로 주입하면 된다.

부하 측 순시 유효전력으로부터 평균 유효전력을 구하기 위해 저역 통과 필터가 사용되는데, 1차 저역 통과 필터를 사용할 경우 순시 유효전력의 맥동성분인 $\tilde{p}_L$ 는 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

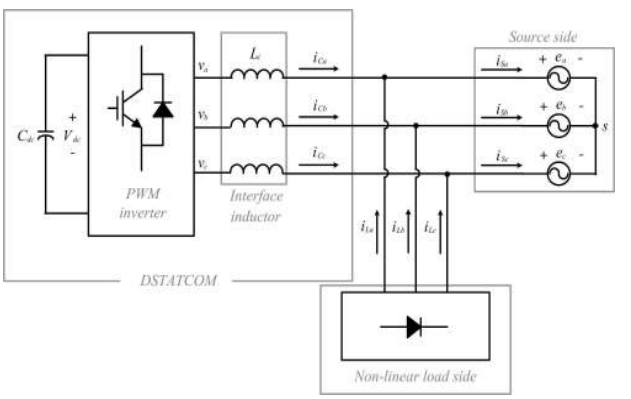

그림 1 배전계통과 배전용 정지형 보상기의 회로 구성
Fig. 1 Circuit diagram of distribute power system and DSTATCOM

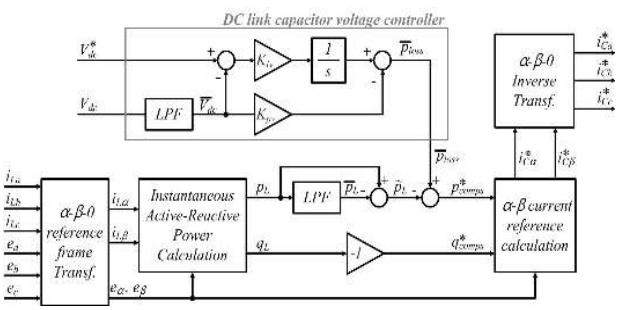

그림 2 배전용 정지형 보상기의 전류지령 계산 블록도
Fig. 2 Block diagram of current reference calculation for DSTATCOM

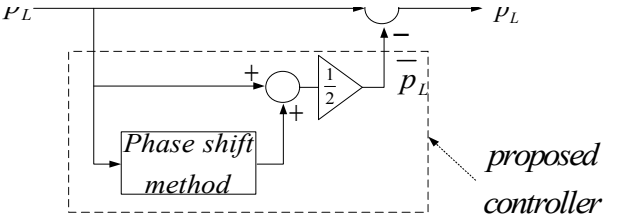

그림 3 위상변이 블록도
Fig. 3 Block diagram of Phase shift

$$\tilde{p}_L(s) = p_L(s) - \overline{p}_L(s) = \left(1 - \frac{\omega_{cp_LPF}}{s+\omega_{cp_LPF}}\right) p_L(s) = \left(\frac{s}{s+\omega_{cp_LPF}}\right) p_L(s) \quad (1)$$

이 때, 저역 통과 필터는 과도상태의 응답속도와 정상상태의 안정도 면에서 반비례하는 특성을 지니고 있다.

3. 제안한 위상변이를 이용한 순시 유효 전력 보상 방법

부하의 순시 유효전력은 직류성분과 맥동성분의 합으로 이루어져있는 점에서 그림 3과 같이 적절한 위상변이를 통한다면 직류성분만을 계산이 가능하다.

고조파가 포함되지 않은 전원이라고 가정할 때, 식(2)와 같은 순시 유효전력의 값을 가진다.

$$\begin{aligned} e(t) &= e_1 \cos\omega t \\ i(t) &= i_1 \cos\omega t + i_5 \cos 5\omega t + i_7 \cos 7\omega t + i_{11} \cos 11\omega t + \mathrm{L} \\ p(t) &= e(t)\cdot i(t) \\ &= \frac{1}{2}(e_1\cdot i_1 + e_1\cdot i_1 \cos 2\omega t + e_1\cdot i_5 \cos 4\omega t + e_1\cdot i_5 \cos 6\omega t \\ &\quad + e_1\cdot i_7 \cos 6\omega t + e_1\cdot i_7 \cos 8\omega t \\ &\quad + e_1\cdot i_{11} \cos 10\omega t + e_1\cdot i_{11} \cos 12\omega t) \end{aligned} \quad (2)$$

이 때 구해진 순시 유효전력은 직류 성분과 짝수 차수의 맥동 성분의 합으로 이루어져 있다. 순시 유효전력의 맥동 성분을 보상하기 위하여 식 (3)과 같이 순시 유효전력의 각각의 주파수에 해당하는 위상변이를 통하여, 기존의 순시 유효전력과의 합을 한다면 일정 부분의 맥동성분을 규칙적으로 상쇄할 수 있다.

$$\begin{aligned} p_L &= p_{L_DC} + p_{L_2\omega} + p_{L_4\omega} + \mathrm{L} \\ p_{L_2\omega\ shift} &= p_{L_DC} + p_{L_2\omega\ shift} + p_{L_4\omega\ shift} + \mathrm{L} \end{aligned} \quad (3)$$

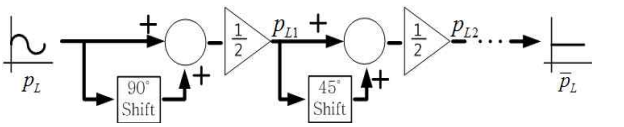

그림 4 제안한 평균 유효 전력 계산 방법
Fig. 4 Proposed calculation method of average active power

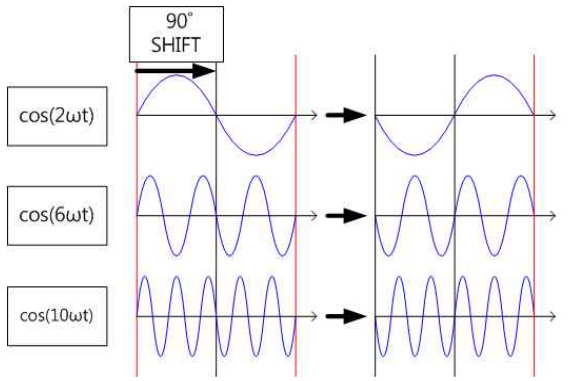

그림 5 첫번째 위상변이
Fig. 5 First phase shift.

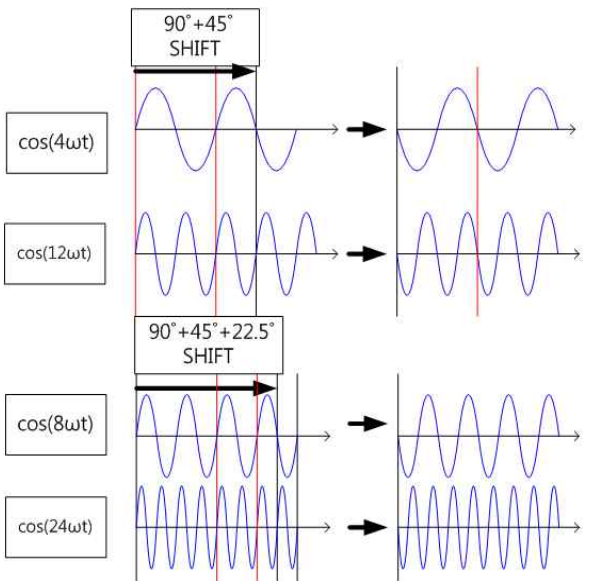

그림 6 추가적인 위상변이
Fig. 6 Additional phase shift

그림 4은 제안한 위상변이를 통한 방법을 직렬로 구성한 것이다.

그림 5는 2ω 주파수의 반주기에 해당하는 90도를 위상변이 시킨 파형과 기존의 파형을 더할 때, 2ω 성분의 순시 유효전력 외에 6ω, 10ω 와 같은 주파수의 순시 유효전력 성분도 상쇄됨을 보여준다.

이 때 없어지지 않은 짝수 주파수 4ω, 8ω, 12ω, 16ω, 20ω,… 대해서는 추가적으로 4ω 주파수의 반주기에 해당하는 45도의 위상변이 직렬로 구성한다. 그림 6에서는 추가적인 위상변이를 구성하였을 때의 결과이다. 처음의 위상변이로 사라지지 않았던 주파수 중 4ω, 12ω 등과 같은 주파수가 사라짐을 알 수 있다. 추가적으로 3번째 위상변이를 직렬로 구성할 경우는 8ω, 24ω 성분의 순시 유효전력이 사라짐을 확인할 수 있다.

이러한 상쇄되는 순시 유효전력은 위상변이를 추가적으로 구성할 때, 일정한 규칙을 가진다. 첫번째 위상변이를 통하여 2ω×1×(2n-1)의 주파수 성분의 순시 유효전력이 상쇄되었고, 두번째 위상변이를 통하여 2ω×2×(2n-1)의 주파수 성분의 순시 유효전력이 상쇄되었다. 표 1에는 추가적인 규칙을 정리하였다. 이러한 방법으로 직렬로 4번의 위상변이를 구성할 경우, 20차 이하의 짝수 주파수의 순시 유효전력 성분을 상쇄시키는 결과를 가지게 된다.

표 1 위상변이 횟수와 주파수 성분
Table 1 The number of phase shift and frequency

위상변이 횟수	주파수
1	2ω×1×(2n-1)
2	2ω×2×(2n-1)
3	2ω×4×(2n-1)
4	2ω×8×(2n-1)

실제 실험에서는 사용된 CPU의 메모리에 저장된 각각의 데이터를 이용하여 위상변이를 구현하였다.

4. 모의실험 및 실험

모의실험은 MATLAB Simulink를 사용하였다. 실제 실험은 TI사의 TMS320F2812를 사용하여 진행하였고, 일정한 시간 후, 부하의 급격한 변화를 주어서 특성을 확인하였다. 전체 시스템에서 전류 지령치 계산 과정 중 평균 유효전력 계산 부분에서 기존 방법과 제안한 방법으로 불평형 부하와 비선형 부하 실험 조건에서 과도상태와 정상상태 성능을 비교하였다.

4.1 불평형 부하 실험

불평형 부하 실험 조건은 표 2와 같다.

표 2 불평형 부하의 모의실험 및 실험 조건
Table 2 Simulation and experiment parameters of unbalance load

	실험조건
스위칭주파수(f_s)	10 kHz
전원의 선간전압	220 V, 60 Hz
직류단 커패시터 전압 지령(V_{dc}^*)	350 V
직류단 커패시터(C_{dc})용량	2.82 mF
결합인덕터(L_i)용량	3 mH
전압제어기 대역폭(ω_{cv})	60 rad/s
전류제어기 대역폭(ω_{cc})	3,000 rad/s
3상 인덕터-저항 부하 변경 전/후	10 mH - 15 Ω 15 Ω 50 Ω / 10 mH, 6.8 Ω 6.8 Ω 25 Ω

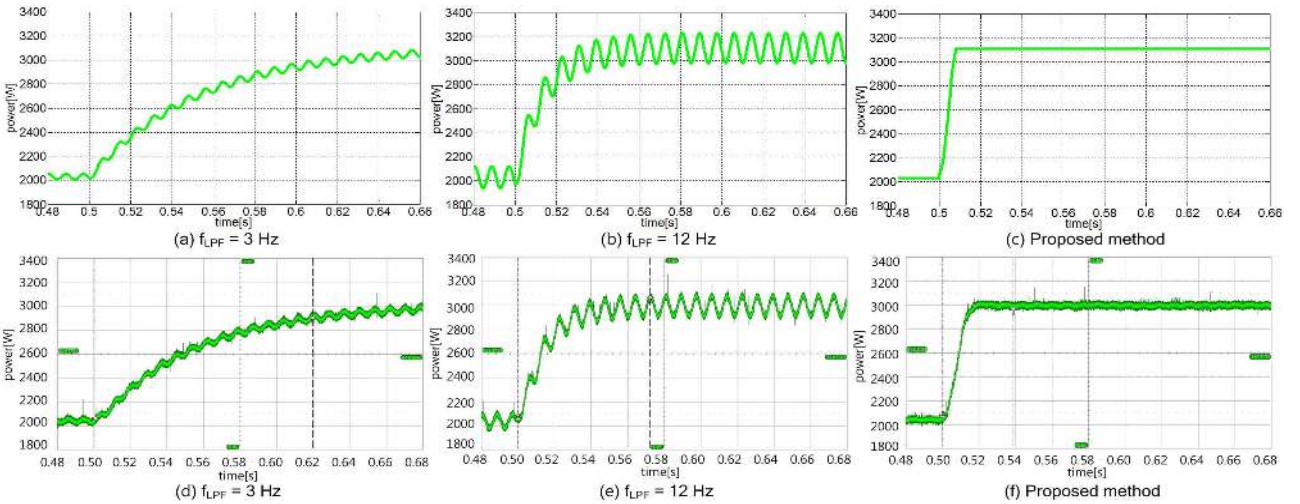

그림 7 불평형 부하 실험의 평균 유효전력(200W/div)
모의실험 : (a)$f_{cut-off}$: 3Hz, (b)$f_{cut-off}$: 12Hz, (c)$f_{cut-off}$: 제안한 방법,
실험결과 : (d)$f_{cut-off}$: 3Hz, (e)$f_{cut-off}$: 12Hz, (f)$f_{cut-off}$: 제안한 방법

Fig. 7 The average active power in unbalanced
Simulation : (a)fcut-off: 3Hz, (b)fcut-off: 12Hz, (c)fcut-off: Proposed method,
Experiment : (d)fcut-off: 3Hz, (e)fcut-off: 12Hz, (f)fcut-off: Proposed method

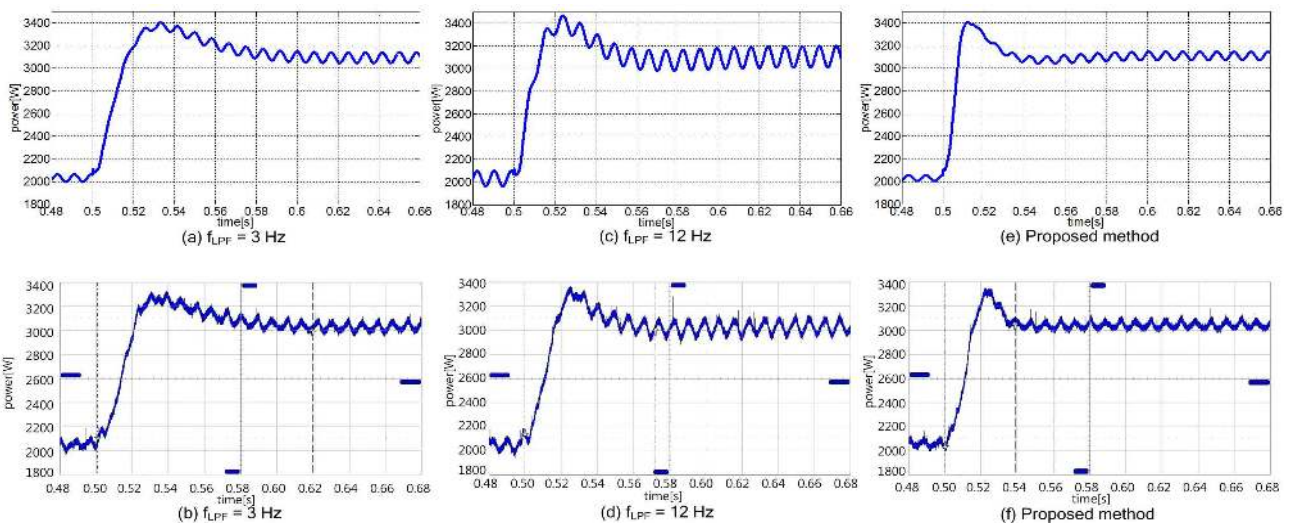

그림 8 불평형 부하 실험의 보상된 유효전력(200W/div)
모의실험 : (a)$f_{cut-off}$: 3Hz, (b)$f_{cut-off}$: 12Hz, (c)$f_{cut-off}$: 제안한 방법,
실험결과 : (d)$f_{cut-off}$: 3Hz, (e)$f_{cut-off}$: 12Hz, (f)$f_{cut-off}$: 제안한 방법

Fig. 8 The compensated active power in unbalanced load
Simulation : (a)fcut-off: 3Hz, (b)fcut-off: 12Hz, (c)fcut-off: Proposed method,
Experiment : (d)fcut-off: 3Hz, (e)fcut-off: 12Hz, (f)fcut-off: Proposed method

표 3 주파수 분석 비교
Table 3 Frequency analysis comparison

구분	THD(%)
LPF(12Hz)	2.40
LPF(3Hz)	1.19
제안한 방법	0.93

표 3은 불평형 부하의 조건에서 전원 측 전류 기본파 60 Hz 성분에 대한 보상된 전원 측 전류의 주파수 분석을 비교한 것이다. 기존의 방법보다 보상된 전원 측 전류의 고조파가 제안한 방법이 적음을 확인하였다.

그림 7에서, 제안한 방법이 기존의 방법보다 부하의 변경 때, 순시 유효 전력의 평균값을 계산과정에서 차단 주파수를 12 Hz 로 설정한 기존의 방법을 기준으로 약

50 % 정도 속도 면에서 개선된 성능을 보였다. 평균값도 제안한 방법이 기존의 방법보다 더 정확한 값을 계산하기 때문에 맥동의 크기도 작음을 모의실험과 실제실험을 통하여 확인하였다.

그림 8은 불평형 부하 실험 조건에서의 보상된 유효전력 파형을 비교한 것이다. 부하 측 순시 유효전력의 평균값을 빠르게 계산하기 때문에, 전원 측의 보상된 순시 유효전력도 과도상태가 줄어들었다.

모의실험과 실제실험으로 비교한 파형에서 유사한 결과를 보이고 기존의 방법보다 맥동의 크기가 12 Hz 차단주파수의 기존의 방법과 비교하였을 때, 약 50 %의 개선된 성능을 보임을 모의실험을 통하여 확인하였다. 정상상태와 과도상태 응답 특성에서 제안한 방법이 기존의 방법보다 우수한 특성을 보였다.

표 3과 그림 8을 비교하면 주파수 분석과도 실제 실험이 유사한 응답 특성을 보임을 확인할 수 있다.

4.2 비선형 부하 실험

비선형 부하 실험 조건은 아래 표 4와 같다. 불평형 부하 실험 조건과는 다르게 비선형 부하에서는 병렬 구조로 전파 정류기와 3상 평형 부하를 구성하였다.

표 5는 비선형 부하 실험 조건에서 보상된 전원 측 전류의 기본파 60 Hz 성분에 대한 주파수 분석을 한 것이다. 부하전류는 18.36% 의 총고조파 왜율 (THD)의 수치를 나타내는 것에 비해 제안한 방법은 기존의 저역통과 필터와 유사한 결과를 보이고 있다.

표 4 비선형 부하의 모의실험 및 실험 조건
Table 4 Simulation and experiment parameters of nonlinear load

	실험조건
스위칭주파수(f_s)	10 kHz
전원의 선간전압	220 V, 60 Hz
직류단 커패시터 전압 지령(V_{dc}^*)	350 V
직류단 커패시터(C_{dc})용량	2.82 mF
결합인덕터(L_i)용량	3 mH
전압제어기 대역폭(ω_{cv})	30 rad/s
전류제어기 대역폭(ω_{cc})	3,000 rad/s
3상 인덕터-저항 부하 변경 전/후	10 mH - 50 Ω / 10 mH, 25 Ω
단상 병렬 커패시터-저항 부하	470㎌ ,60Ω

표 5 주파수 분석 비교
Table 5 Frequency analysis comparison

구분	THD(%)
부하전류	18.36
LPF(12Hz)	4.59
LPF(3Hz)	4.58
제안한 방법	4.58

그림 9는 비선형 부하 조건에서 평균 유효전력을 모의실험과 실제실험을 통하여 비교하였다. 기존의 저역통과 필터를 이용하였을 때를 보면, 차단주파수가 낮으면 정확한 맥동의 크기가 작은 정확한 계산이 되지만, 과도상태의 응답 속도가 느리고, 반대로 차단주파수를 높게 설정하면 빠른 응답 속도를 보이지만, 맥동이 보이는 것을 확인할 수 있다. 하지만 제안한 방법에서는 저역 통과 필터의 차단주파수를 12 Hz 로 설정하였을 때와 비교하여 정상상태 도달 시간 면에서 50 % 의 개선된 과도 상태 응답 속도와 함께 맥동의 크기가 작은 3 Hz 의 차단주파수로 설정한 기존의 방법과 유사한 정상상태 특성도 보이는 것을 모의실험과 실제실험을 통하여 확인하였다.

그림 10에서는 비선형 부하 조건에서의 보상된 유효전력, 즉 전원 측의 유효전력을 비교한 파형이다. 순시 유효전력의 평균값을 제안한 방법이 빠르고 정확하게 계산하기 때문에, 전원 측의 유효전력도 제안한 방법에서 기존의 방법의 두 조건보다 더 빠르고 더 정확하게 되는 것을 그림 10의 파형과 표 5의 주파수 분석으로 비교하여 성능을 확인하였다. 따라서 제안한 방법이 기존의 저역 통과 필터보다 부하 측의 순시 유효전력을 보상할 때, 과도상태에서는 빠른 응답특성을 보이고, 정상상태에서는 맥동이 크지 않은 안정성을 가진다.

5. 결 론

본 논문은 불평형 및 비선형 부하에 의해 많은 고조파를 포함한 부하전류로 인한 순시 유효전력의 맥동성분을 제거 하는 부분에서 기존의 저역 통과 필터 방법과 제안한 위상변이를 이용한 방법을 비교하였다. 기존의 저역 통과 필터 기법은 차단주파수에 따라 필터 성능과 응답속도의 반비례특성의 문제점을 가지고 있다. 차단 주파수를 낮게 설정하면, 고조파를 걸러내는 필터 성능이 좋지만, 정상상태로 수렴하는 응답속도가 느린 단점을 가지고 있고, 차단주파수를 높게 설정하면 반대의 특성을 보인다. 또한 전체 시스템의 속도에도 저역통과 필터의 속도가 중요한 만큼, 제약을 가할 수 있다는 단점이 있다.

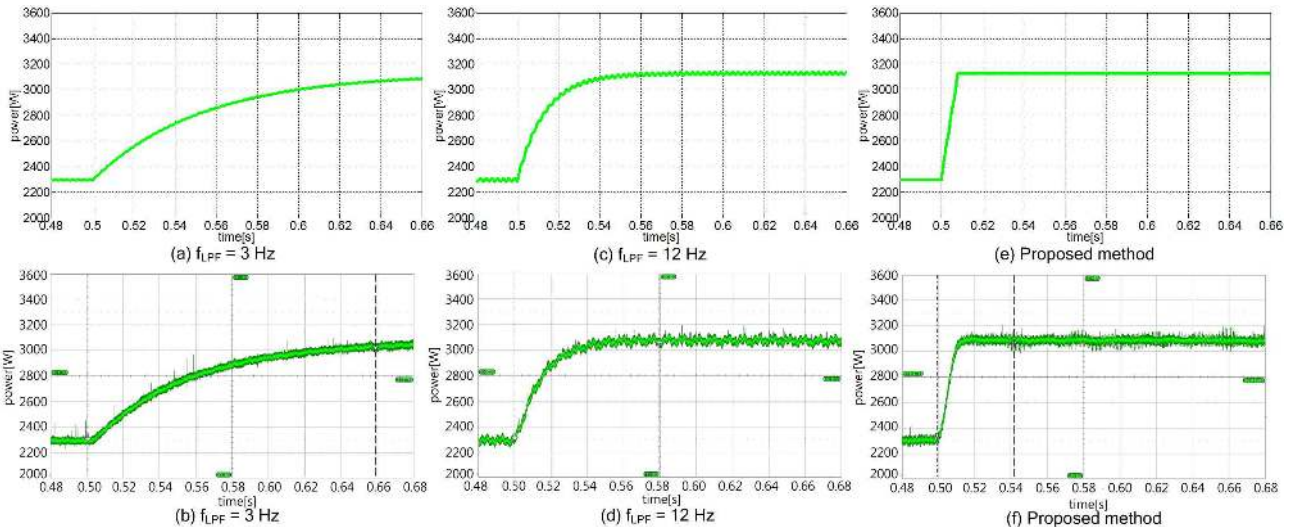

그림 9 비선형 부하 실험의 평균 유효전력(200W/div)
모의실험 : (a)$f_{cut-off}$: 3Hz, (b)$f_{cut-off}$: 12Hz, (c)$f_{cut-off}$: 제안한 방법,
실험결과 : (d)$f_{cut-off}$: 3Hz, (e)$f_{cut-off}$: 12Hz, (f)$f_{cut-off}$: 제안한 방법
Fig. 9 The average active power in non-linear load
Simulation : (a)fcut-off: 3Hz, (b)fcut-off: 12Hz, (c)fcut-off: Proposed method,
Experiment : (d)fcut-off: 3Hz, (e)fcut-off: 12Hz, (f)fcut-off: Proposed method

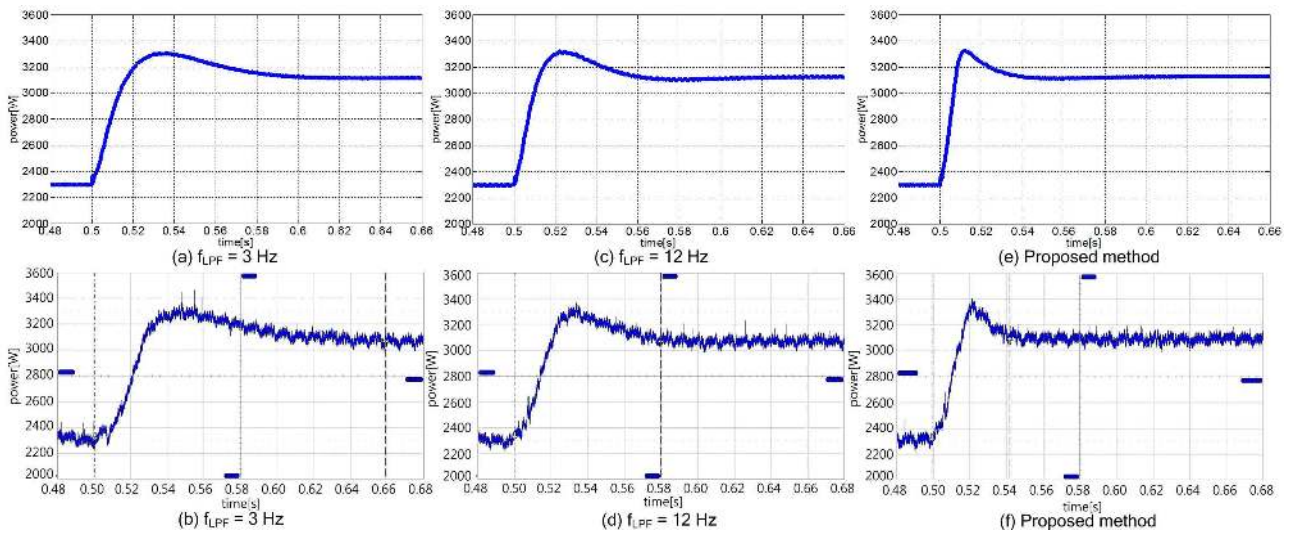

그림 10 비선형 부하 실험의 보상된 유효전력(200W/div)
모의실험 : (a)$f_{cut-off}$: 3Hz, (b)$f_{cut-off}$: 12Hz, (c)$f_{cut-off}$: 제안한 방법,
실험결과 : (d)$f_{cut-off}$: 3Hz, (e)$f_{cut-off}$: 12Hz, (f)$f_{cut-off}$: 제안한 방법
Fig. 10 The compensated active power in non-linear load
Simulation : (a)fcut-off: 3Hz, (b)fcut-off: 12Hz, (c)fcut-off: Proposed method,
Experiment : (d)fcut-off: 3Hz, (e)fcut-off: 12Hz, (f)fcut-off: Proposed method

본 논문에서 제안한 위상 변이를 이용한 순시 유효전력 보상 기법은 기존의 저역 통과필터를 이용하여 고조파가 섞인 유효전력성분을 필터하는 것이 아니라, 직류성분과 맥동성분의 합으로 이루어진 점에서 착안하여, 맥동성분을 상쇄시켜 정확한 평균값인 직류 성분을 구하는 방법이다. 정확한 평균값을 구하기 때문에 맥동성분에 해당하는 보상전류를 정확하게 계산을

표 6 기존의 방법(LPF) 대비, 제안한 방법의 개선 정도
Table 6 Improvement of proposed method comparing to existing method (LPF)

	과도상태 (%)	정상상태 (%)
3Hz	66.67	21.80
12Hz	33.33	61.25

가능하게 한다.

제안한 방법이 차단주파수를 3 Hz 설정한 저역 통과 필터에 비해, 불평형 부하, 비선형 부하 실험 조건에서 과도상태의 응답시간이 약 1/3 로 줄고, 약 66.67% 개선된 성능을 보이고, 정상상태는 불평형 부하실험 조건에서 보상된 전원 측 전류의 총고조파 왜율을 비교하면, 약 21.80% 개선된 성능을 보였다.

차단주파수를 12 Hz 로 설정한 기존의 방법과 비교도, 3 Hz 로 설정한 기존의 방법 비교와 동일하게 진행하여 표 6에 정리하였다.

제안한 방법이 기존의 저역 통과 필터를 사용하였을 때와 비교하여, 과도상태의 속응성과 정상상태의 안정성 면에서 개선된 성능을 보임을 확인하였다.

참 고 문 헌

[1] M. McGranaghan, "Overview of Power Quality Standards", *PQ Network Internet Site*, http://www.pqnet.electrotek.com/pqnet.

[2] 이상준, 순간 전압 강하 보상용 직렬 보상기를 위한 새로운 PLL 및 전압 제어기에 관한 연구, 서울대학교 대학원 전기·컴퓨터 공학부 공학박사 학위논문, 2003.

[3] N. Hingorani, "Introducing Custom Power", *IEEE Spectrum*, Vol. 32, No. 6, pp. 41-45, 1995.

[4] H. Akagi, Y. Kanazawa and A. Nabae, "Instantaneous reactive power compensators comprising switching devices without energy storage components", *IEEE Trans. Ind. AppL*, Vol. 20, pp. 625-630, 1984, May/June.

[5] F. Peng, J. Lai, "Generalized Instantaneous Reactive Power Theory for Three-Phase Power Systems", *IEEE Trans. Instrumentation and Measurement*, Vol. 45, No. 1, pp. 293-297, 1996, Feb.

[6] F. Peng, G. Ott, D. Adams, "Harmonic and Reactive Power Compensation Based on the Generalized Instantaneous Reactive Power Theory for 3-Phase 4-Wire Systems", *Conf. Rec. IEEE - PESC Annu. Meeting*, pp. 1089-1095, 1997.

[7] S. Buso, L. Malesani, P. Mattavelli, "Comparison of Current Control Techniques for Active Filter Applications", *IEEE Trans. Ind. Electron.*, Vol. 45, No. 5, pp. 722-729, 1998, Oct.

[8] Sang-Joon Lee, Seung-Ki Sul, "A Harmonic Reference Frame Based Current Controller for Active Filter", Conf. Rec. *IEEE-APEC Annu. Meeting*, pp. 1073-1078, 2000.

[9] 김동근, 최종우. "비선형 부하를 고려한 배전용 정지형 보상기의 순시 전력 보상", *경북대학교 석사 학위 논문*, 2008. 10.

홍성민(洪誠敏)

1984년 2월 18일생. 2009년 경북대 전자전기컴퓨터학부 졸업. 2011년 동 대학원 전자전기컴퓨터학부 졸업(석사). 2011년～현재 현대중공업 기계전기연구소 연구원.

최종우(崔鐘宇)

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