Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers (2013) 27(1) : 76~84
http://dx.doi.org/10.5207/JIEIE.2013.27.1.076 ISSN 1229-4691(Print) ISSN 2287-5034(Online)

논문 27-1-10

계통 연계형 컨버터의 능동 댐핑을 위한 공진주파수 추정 기능에 관한 연구

(A Study on the Estimation of the Resonance Frequency for an Active Damping Technique of Grid Connected Converters)

박일우* · 이우철**
(Il-Woo Park · Woo-Cheol Lee)

Abstract

The renewable energy sources is raising for use of grid connected systems, for which higher power quality requirements are being issued. A grid connected converter requires a LC-filter stage, this one is lightly damped for efficiency constraints. Hence, it is subject to resonance if excited by the converter current harmonics or pre-exciting grid voltage harmonics. In this paper, an active damping technique employing notch filter for damping of the resonance frequency is introduced. This technique doesn't need to additional sensors. In addition, it is simple to apply for various systems. Monitoring of the resonance frequency ensures the stable operation of the proper connection and disconnection of the grid. This paper proposes the estimating method of a resonant frequency to determine the cut-off frequency of the notch filter. This method is validated by both simulation and experimental results.

Key Words : Grid Connected, Active Damping, Resonance Frequency

* 주저자 : 삼성중공업
** 교신저자 : 한경대학교 전기전자제어공학과 부교수
IT융합연구소
* Main author : Samsung Heavy Industries
** Corresponding author : Hankyong National University Dept. of Electrical Electronic & Control Engineering Associate Professor Institute for information technology convergence
Tel : 031-670-5323, Fax : 031-670-5329
E-mail : iloop78@hotmail.com, woocheol@hknu.ac.kr
접수일자 : 2012년 10월 24일
1차심사 : 2012년 10월 26일
심사완료 : 2012년 12월 13일

1. 서 론

계통 연계형 태양광 컨버터 또는 소용량 풍력 발전용 컨버터는 계통 연계와 관련된 규정을 만족해야만 한다. 또한 기본적으로 컨버터의 제어기는 출력 전류를 정현파로 제어하고, 고립 운전에 대한 적절한 반응이 필요로 된다[1].

IEEE1547 [2], EN61000-3-2 [3], National Electrical Code (NEC)[4] 등은 대표적인 계통 연계 규정으로, 다음의 표 1과 같이 요구사항을 요약할 수 있다[5].

Copyright ⓒ 2013 KIIEE All right's reserved

표 1. 계통 연계형 태양광 컨버터의 규격 요약[5]
Table 1. A summery of standard for grid-tied PV applications[5]

<table>
<tr><td>규격</td><td>IEC61727</td><td>IEEE1547</td><td>EN61000-3-2</td></tr>
<tr><td>Nominal Power</td><td>10 kW</td><td>30 kW</td><td>16 A x 230 V = 3.7 kW</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Harmonic currents (Order-h) Limits</td><td>(3-9) 4.0 %
(11-15) 2.0 %
(17-21) 1.5 %
(22-33) 0.6 %</td><td>(2-10) 4.0 %
(11-16) 2.0 %
(17-22) 1.5 %
(>35) 0.3 %</td><td>(3) 2.30 A
(5) 1.14 A
(7) 0.77 A
(9) 0.40 A
(11) 0.33 A
(13) 0.21 A
(15-39) 2.25/h</td></tr>
<tr><td colspan="2">Even harmonics in these ranges shall be less than 25 % of the odd harmonic limits listed.</td><td>Approximately 30 % of the odd harmonic-see standard.</td></tr>
<tr><td>Maximum current THD</td><td colspan="2">5.0 %</td><td>-</td></tr>
<tr><td>Power factor at 50% of rated power</td><td>0.90</td><td colspan="2">-</td></tr>
<tr><td>DC current injection</td><td>Less than 1.0% of rated output current.</td><td>Less than 0.5% of rated output current.</td><td>< 0.22 A - corresponds to a 50 W half-wave rectifier</td></tr>
<tr><td>Voltage range for normal operation</td><td>85 % - 110 %
(196 V - 253 V)</td><td>88 % - 110 %
(97 V - 121 V)</td><td>-</td></tr>
<tr><td>Frequency range for normal operation</td><td>50 ± 1 Hz</td><td>59.3 Hz to 60.5 Hz</td><td>-</td></tr>
</table>

계통 연계된 컨버터는 고조파 규제를 만족시키기 위해 LC-filter를 필요로 한다. LC-filter는 컨버터 전류 고조파에 의해서 또는 이로 인한 계통 전압의 고조파, 발전 전력의 갑작스런 변동에 의하여 공진 현상이 발생할 수 있으며, 이는 컨버터의 발전 제어의 안정도를 저하시키게 된다.

LC-filter에 의해 야기되는 공진 현상을 저감시키기 위한 여러 방법들이 제시되었으며, 수동 댐핑과 능동 댐핑 기술로 크게 분류된다.

능동적인 안정화 기술은 불안정 요인을 완화시키기 위하여 임피던스 매칭 또는 궤환 신호에 대한 필터링 등의 방법이 사용된다.

반면 수동적인 안정화 기술은 추가적인 저항 댐핑 회로가 필요로 되며. 이는 불필요한 시스템 무게 및 사이즈, 비용의 증가를 가져올 수 있다. 또한 적절치 않은 저항 값은 시스템 성능 측면에서 필터의 성능 및 효율 저하를 야기할 수 있다[6].

능동 댐핑 기술은 제어 기술에 의해 수동 댐핑 회로의 효과와 비교될 수 있다. 능동 댐핑은 입력 필터를 가진 전압형 컨버터를 안정적으로 제어하기 위해 개발되었고, “가상 저항” 개념이 제안되었다[7-8]. 결국 수동 댐핑의 전력 손실을 피하는 것이 핵심이 되었다. 그러나 시스템의 안정도 요구 사항을 만족시키기 위해 제어를 개선하는 것은 제어의 동특성을 저하시킬 수도 있으며, 완벽한 안정화를 위해 추가적인 수동 댐핑 회로가 필요로 될 수도 있다[9].

능동 댐핑 기술은 컨버터의 제어기에 lead-lag 보상 제어기를 추가하여 안정도 향상을 꾀한 방법과 컨버터 제어기에 디지털필터를 직렬로 적용하여 공진 성분을 상쇄시키는 방법이 제안 되었다[10-11].

제어기에 직렬로 연결된 필터를 적용한 능동 댐핑 제어를 수행하기 위해서는 계통 임피던스 변동에 따른 공진주파수 변동을 추정할 수 있어야 한다.

계통의 인덕턴스를 추정하기 위해 계통에 무효전력을 주입하여 전압의 변화에 따른 전류의 변동폭으로 계산하는 방법과 강제로 공진 현상을 발생시켜 계통 임피던스를 추정하는 방법이 제안되었다[12-13].

본 논문에서는 계통에 공진 현상을 임의로 발생시켜 공진주파수를 추정한다. 추정된 주파수 대역폭이 적용된 노치필터를 컨버터의 전류 제어기 출력과 직렬로 연결한 능동 댐핑 기술 및 제어 전류 제어 이득 결정을 위한 계통 임피던스 보상이 적용된 방법을 제안하고자 한다.

2. 시스템 모델링

계통과 연계되어 발전되는 컨버터는 PCC (Point of Common Coupling)와 승압용 변압기를 통해 연결되

어 진다. 승압용 변압기의 1차에서 정격 역률이 유지되기 위해서는 변압기의 누설 인덕턴스를 고려하여 컨버터가 제어 되어야 한다.

그림 1은 계통과 연계된 컨버터 시스템을 보여준다. 3상의 컨버터와 LC 필터, 계통으로 구성된다. 여기서, L_c, C는 컨버터의 LC 필터, R_g, L_g는 컨버터 측에서 바라본 계통 측의 임피던스 성분이 된다.

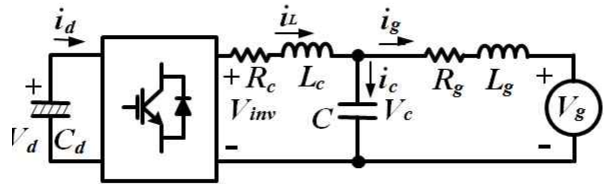


그림 1. 계통과 연계된 컨버터 시스템
Fig. 1. A Grid-tied converter system

그림 1에 의해서 LC 필터를 갖는 컨버터의 상태 방정식은 다음과 같이 정리할 수 있다[14].

$$v_{inv} = L_c \frac{di_L}{dt} + R_c i_L + v_c \quad (1)$$

$$C\frac{dv_c}{dt} = i_L - i_g \quad (2)$$

$$i_L = i_c + i_g \quad (3)$$

$$v_c = L_g \frac{di_g}{dt} + R_g i_g + v_g \quad (4)$$

상태 변수에서 초기치 값이 0이라고 가정하면 식 (1)~(4)를 라플라스 변환을 아래와 같이 할 수 있다.

$$V_{inv}(s) = sL_c I_L(s) + R_c I_L(s) + V_c(s) \quad (5)$$

$$sCV_c(s) = I_L(s) - I_g(s) \quad (6)$$

$$I_L(s) = I_c(s) + I_g(s) \quad (7)$$

$$V_c(s) = sL_g I_g(s) + R_g I_g(s) + V_g(s) \quad (8)$$

그림 2는 LC 필터를 갖는 컨버터의 제어 블록도로서, 전류 제어기 및 계통 플랜트가 함께 고려되었다.

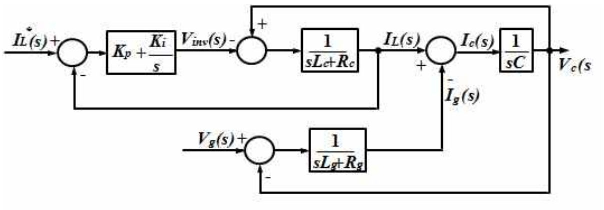


그림 2. LC 필터를 갖는 컨버터의 제어 블록도
Fig. 2. A control block diagram of the converter with LC filter

위의 제어 블록도를 전달함수로 표현할 경우,

$$G(s) = \frac{I_L(s)}{I_L^*(s)} = \frac{K_P s^3 + K_I s^2 + K_P z_{LC}^2 s + K_I z_{LC}^2}{L_1 s^4 + K_P s^3 + (K_I + L_1 w_{RES}^2) s^2 + K_P z_{LC}^2 s + K_I z_{LC}^2} \quad (9)$$

와 같다. 식 (9)를 제어기 응답특성을 해석하기 위해 그림 3과 같이 보드선도로 분석하였다.

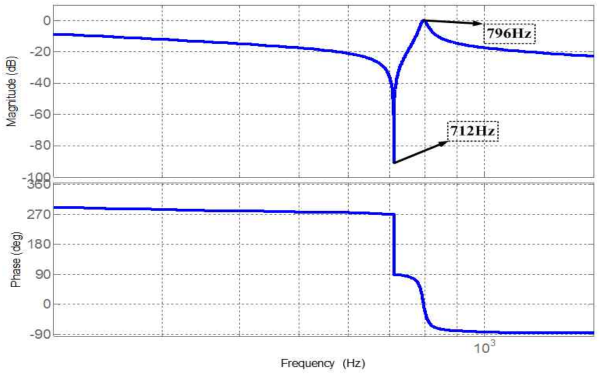


그림 3. LC필터는 갖는 제어기의 보드 선도
Fig. 3. Bode plot of the controller with LC filter

전류제어기와 계통 측 필터가 포함된 전달함수의 보드선도를 보면 2개의 공진점이 그대로 나타나는 것을 알 수 있고, 제어의 안정도를 위하여 적절히 회피 또는 제거되어야 함을 알 수 있다.

3. 수동 댐핑

시스템을 안정화시키기 위해 LC-filter에 수동 소자로 구성된 댐핑 회로가 적용될 수 있으나, 수동 소자에 의한 손실 때문에 전체 시스템의 효율 감소와 필터 성

능 저감이 발생할 수 있다. 그림 4와 표 2에서 수동 댐핑 회로와 특성이 비교되었다[15].

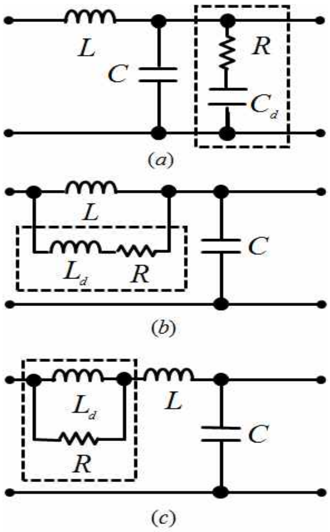


그림 4. 수동 댐핑 회로의 예
(a) RC 병렬 회로, (b) RL 병렬 회로, (c) RL 직렬 회로
Fig. 4. Examples of the passive damping circuit (a) RC parallel circuit, (b) RL parallel circuit, (c) RL series circuit

표 2. 수동 댐핑 특성 비교
Table 2. A characteristic comparison of passive filters

항목	특성 비교
부하 변동에 대한 댐핑의 안정 영역	RC 병렬 > RL 병렬 > RL 직렬
손실 비교 (동일한 댐핑 효과)	RL 직렬 > RC 병렬 > RL 병렬
체적 비교 (동일한 댐핑 효과)	RL 직렬 > RL 병렬 > RC 병렬

그림 5는 LCL 필터 자체의 주파수 응답 특성을 댐핑 전후를 비교하여 보여주기 위한 보드선도이다. 댐핑 회로가 적용될 시 2개의 공진점의 크기가 저감됨을 알 수 있다.

4. 능동 댐핑

컨버터에 의한 또는 계통에 의해 발생될 수 있는 공

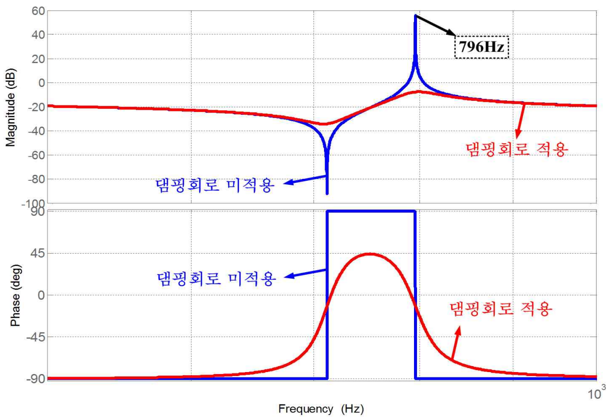


그림 5. LCL 필터의 주파수 응답 특성
Fig. 5. Bode plot of the LCL filter

진 현상을 저감하기 위해 별도의 센서가 필요 없고, 파라미터 설정이 비교적 용이한 전류 제어기와 직렬로 연결된 노치필터를 적용한 방법을 제안한다. 노치필터는 컨버터의 전류제어기의 출력 성분에 섞인 공진 주파수 성분만 필터링할 것이다.

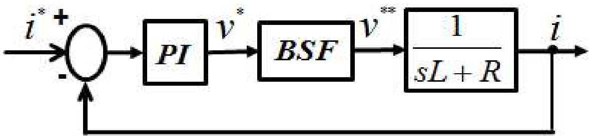


그림 6. 노치 필터를 적용한 close-loop 전류 제어 블록도
Fig. 6. A block diagram of a close-loop current control with notch filters

그림 6에서 노치필터는 전류제어기의 뒷단에 위치하여 출력 전압의 공진 성분을 상쇄할 것이다.

노치필터의 quality factor가 너무 크지 않게 선정되어야 하며, 차단주파수는 계통의 임피던스가 고려되어 미리 결정될 수 있다.

5. 공진 추정

노치필터를 적용하기 위해서는 공진 주파수 영역을 아는 것이 중요하다. 하지만 컨버터가 실제로 설치되어질 때 계통 환경에 따라 공진주파수는 변동될 수 있다. 공진주파수가 변동되는 원인은 컨버터 측에서 바라보는 계통 측의 임피던스가 계통 환경에 따라 변동

될 수 있기 때문이다. 이러한 임피던스의 변동은 컨버터 시스템의 전류 제어 특성 변화 및 공진의 발생을 일으킬 수 있다. 즉 컨버터의 계통 측 LC 필터 보다 큰 계통의 인덕턴스는 컨버터의 전류제어기 대역폭에 영향을 미칠 수 있으며, 계통과의 연계가 시작되는 과도 상태 또는 부하가 크게 변동되는 상황에서 제어의 안정도에 악영향을 줄 수 있다. 또한 LC 필터의 공진점 변동에 따라 노치필터를 적용한 능동 댐핑의 성능에 영향을 미칠 수 있다.

계통 임피던스 변동에 따른 안정적으로 컨버터의 제어가 되기 위해서는 컨버터 자체적으로 변동을 파악할 수 기능이 있어야 한다. 추정된 임피던스 또는 공진주파수를 이용하여 전류제어기의 보상 및 능동 댐핑의 성능을 유지할 수 있다.

계통의 공진주파수를 추정 하는 방법을 그림 7과 같이 간단히 나타내었다.

그림 7. 공진 주파수 추정 블록도
Fig. 7. A estimation block diagram of the resonant frequency

임의로 계통에 공진 현상을 발생시킨 후, 전류제어기 출력인 동기 좌표 전압을 대역통과 필터링 한다. 대역통과필터의 차단 컨버터의 LC or LCL 필터의 공진주파수를 기준으로 계통 기본파의 배수만큼 감소시킨다. 대역통과 필터링 한 출력 전압의 실효치를 계산한 후 샘플링 마다 크기를 비교하여 가장 크다고 판단되는 주파수를 계통의 임피던스와 연계되어 결정된 공진주파수 영역에 가장 근접하다고 추정한다. 추정된 공진주파수를 이용해 역으로 계통의 인덕턴스를 계산하여 전류제어기의 게인 보정을 할 수 있으며, 노치필터의 차단 주파수 계산에 적용 한다.

그림 8은 앞서 설명된 공진주파수의 근접한 영역을 추정하기 위한 방법을 적용한 시뮬레이션 결과를 소개한다. 시뮬레이션을 위해 계통의 임피던스가 고려되지 않은 LCL 필터의 공진주파수는 1340Hz이며 계통의 임피던스가 고려되었을 경우 1180Hz로 설계하였다. 또한 노치필터의 필터링 간격은 ± 60Hz로 설계하였다.

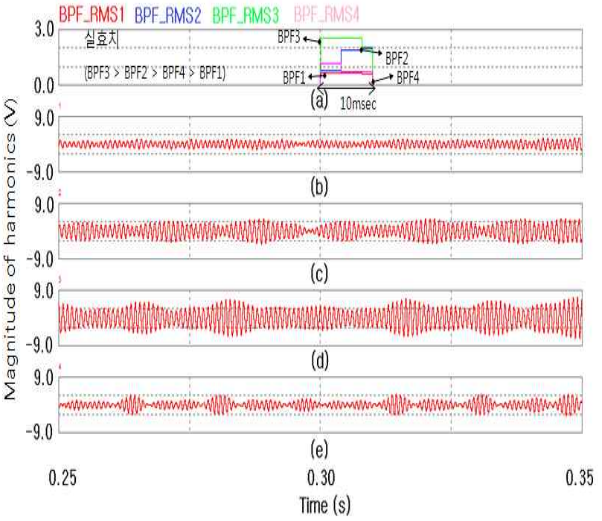


그림 8. 공진 주파수 추정의 시뮬레이션 결과
(a) 실효치 크기 비교, (b) BPF1 (960Hz), (c) BPF2 (1,080Hz), (d) BPF3 (1,200Hz), (e) BPF4 (1,320Hz)
Fig. 8. A simulation result of the resonant frequency estimation
(a) RMS magnitude comparison, (b) BPF1 (960Hz), (c) BPF2 (1,080Hz), (d) BPF3 (1,200Hz), (e) BPF4 (1,320Hz)

그림 8의 (b)-(e)는 입력된 신호를 각 주파수로 대역통과된 신호들로써, (b)부터 960Hz, 1,080Hz, 1,200Hz, 1,320Hz를 기준으로 얻어진 신호이다. 앞서 언급 하였듯이 계통의 공진주파수는 1,180Hz로써 공진주파수 영역 추정 시 BPF(Band Pass Filter)3 영역에 근접한다. 따라서 1,200Hz를 능동 댐핑을 위한 노치필터의 차단 주파수로 설정하여 적용할 것이다. 그림 (a)는 필터링 신호들의 실효치를 비교한 그림이며, 약 10msec 동안 200usec 샘플링 마다 약 50번 판단하여 가장 크기가 크다고 판단된 영역은 BPF3이다. 이 영역을 실제 저감되어야 할 공진주파수에 가장 근접한 영역이

라고 판단된다. 결과의 실효성을 높이기 위해 추정은 수차례 반복되어진다.

6. 시뮬레이션 및 실험 결과

노치필터 댐핑과 공진주파수 영역 추정 방법을 검증하기 위한 시험 장치는 그림 9와 같다. 시뮬레이션 회로 또한 시험장치와 유사하게 구성하여 진행하였다. 계통과 컨버터 사이에는 초기 전원 투입 시 돌입 전류를 방지하기 위한 DC-Link의 초기 충전을 위한 회로가 있고, 계통 연계를 위한 LC-Filter가 구성되어 있다. 계통 측 및 발전기 측에 설치된 전류 센서와 DC Link 전압과 계통의 선간 전압을 측정하기 위한 전압 센서, 영구자석 동기발전기의 회전자 축과 연결되어 속도를 측정하기 위한 증분형 엔코더로 구성되어 있다. 병렬로 운전되는 컨버터는 각각 전류 제어를 수행하며, 유효 전력 지령의 절반씩을 담당하게 된다.

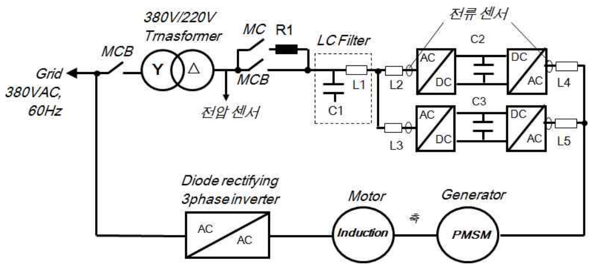


그림 9. 실험 장치 구성도
Fig. 9. A test system diagram

운전 시퀀스는 유도전동기를 일정한 속도로 제어할 때, 유도전동기가 회전하는 역방향으로 발전기에 토크를 인가하면 속도와 토크의 곱만큼 순시 에너지가 발전기 측 컨버터를 통해 DC-Link를 충전하며, 계통 측 컨버터는 DC Link 전압이 지령 전압으로 제어하도록 계통으로 흐르는 전류를 제어한다.

발전을 모의한 결과를 그림 10에 정리되었다. (a)는 발전기와 계통 측의 유효 전력량을 비교하였고, 발전기의 속도와 토크를 보여준다. (b)는 계통 측 상전압과 상전류를 비교하여 전류 제어 및 역률 제어의 동작성을 보여주며, 발전기 측 상전류, 유도전동기의 상전류

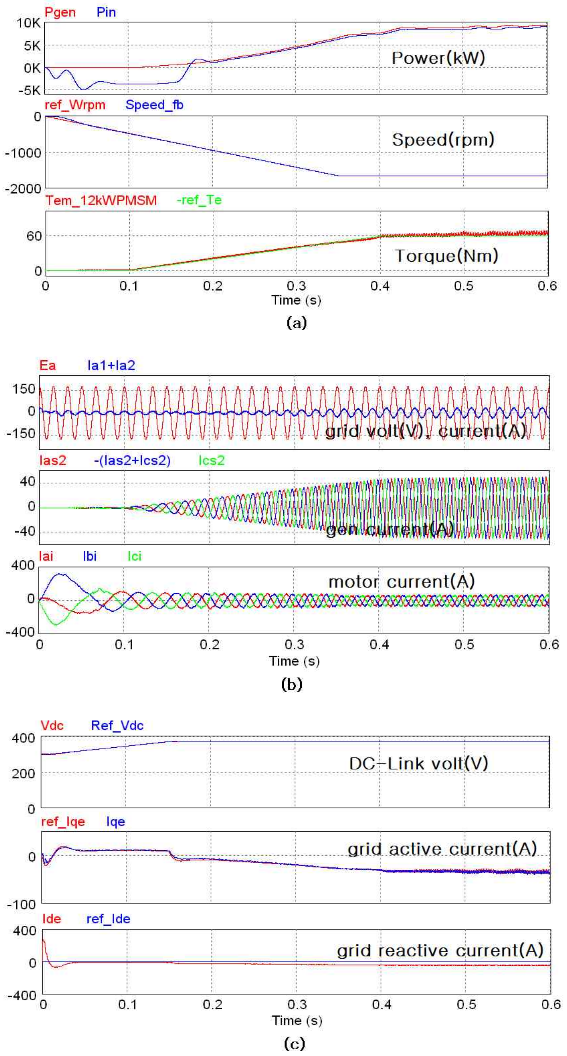


그림 10. 발전 시뮬레이션 결과
(a) 계통 및 발전기의 유효 전력, 발전기 속도 및 토크, (b) 계통 상전압 및 상전류, 발전기 및 유도 전동기의 상전류, (c) DC-link 전압과 계통 유효 및 무효 전력
Fig. 10. Simulation Results of the power generation
(a) Active power of the grid and the generator, the generator's speed, and torque, (b) Grid phase volt and current,, generator current and induction motor current, (c) DC-link volt and active power and reactive power of the grid

를 보여준다. (c)는 DC-link 전압 제어와 계통측 유효, 무효 전류의 제어 동작성을 보여준다. 전체적으로 약

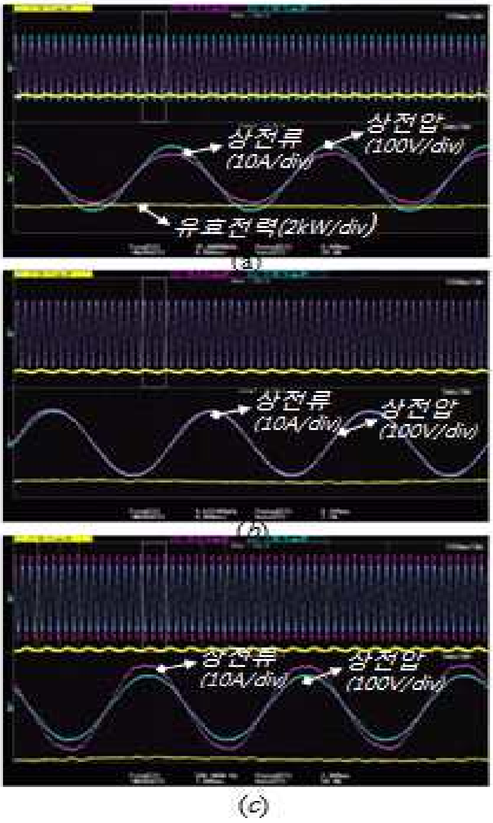


그림 11. 발전 운전 시험의 결과
(a) 4kW 발전 ;(b) 6kW 발전 ;(c) 8kW 발전
Fig. 11. Results of the power generation operating test
(a) 4kW generation ; (b) 6kW generation ; (c) 8kW generation

표 3. 계통 임피던스 변동에 따른 공진점 계산
Table 3. Resonance calculation per grid impedence variation

변압기용량 / 파라미터	CASE 1 30kVA	CASE 2 15kVA	CASE 3 15kVA	단
%Z	6	6	12	%
LC 필터 컨버터 L값	2	2	2	mH
LC 필터 C값	7	7	7	μF
LC 필터 계통 L값	1	1	1	mH
변압기 L값	0.25	0.51	1.02	mH
변압기 R값	32	64	64	mΩ
공진 주파수	1252	1184	1096	Hz

10kW의 유효 전력을 계통으로 발전하고 있으며, 축소 부하 장치의 시험을 위한 운전 시퀀스를 검증할 수 있

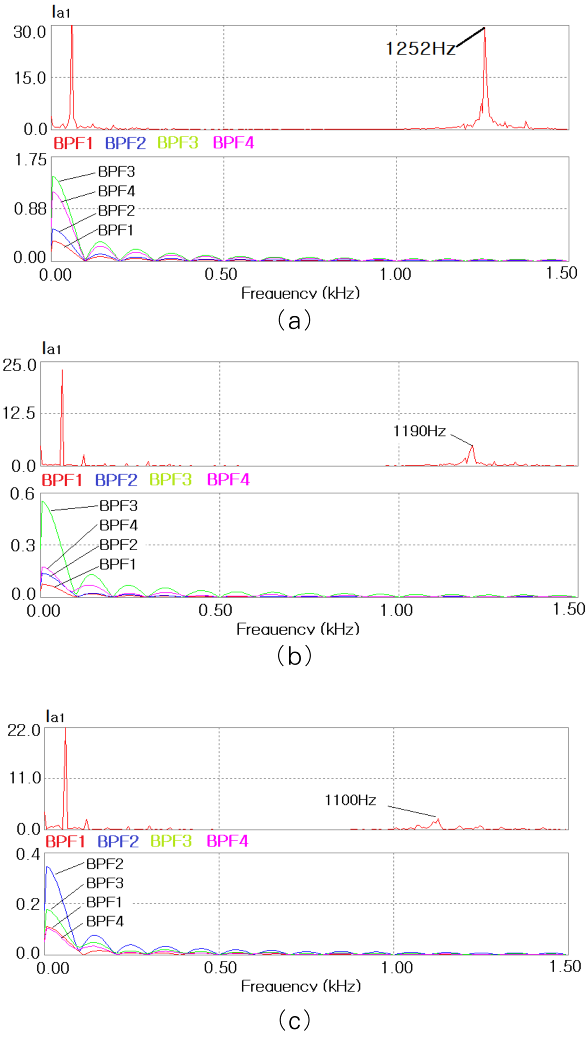


그림 12. 공진주파수 영역 추정
(a) %Z=6.0, 30kVA 변압기, (b) %Z=6.0, 15kVA 변압기, (c) %Z=12.0, 15kVA 변압기
Fig. 12. Area estimations of the resonance frequency
(a) %Z=6.0, 30kVA transformers, (b) %Z=6.0, 15kVA transformers, (c) %Z=12.0, 15kVA transformers

었다.

그림 11은 유효 전력의 계통으로 발전됨을 시험한 결과를 나타내었다. (a)~(c)는 각 4kW, 6kW, 8kW의 유효 전력을 계통으로 발전하고 있으며, 계통의 전압을 기준으로 전류의 제어가 정상적으로 이루어짐을 알 수 있다. 계통 측 전류와 전압은 LC 필터 후단에서

측정되었다.

공진주파수 추정 기능 검증을 위해, 계통 임피던스가 변동될 때 공진주파수 영역의 추정 기능을 시뮬레이션을 통해 검증하고자 한다.

시뮬레이션 파라미터의 조건은 계통 측 승압용 변압기를 고려하여 변압기 용량과 %Z의 변동에 따라 3가지 경우의 인덕턴스를 계산하였다, 각 인덕턴스에 따라 공진주파수의 변동을 목적으로 하였다. 상세 파라미터는 표 3에 정리되었다. 각각의 용량을 선정한 이유는 15kVA는 실험장치의 변압기 용량이며, 30kVA는 임피던스 변동을 비교하기 위해 2배의 용량을 임의 설정하였다.

시뮬레이션을 위한 대역통과필터의 차단주파수는 960±60Hz, 1.080±60Hz, 1.200±60Hz, 1.320±60Hz로 각각 BPF1-BPF4로 지정하였다. 시뮬레이션 결과는 그림 12와 같다.

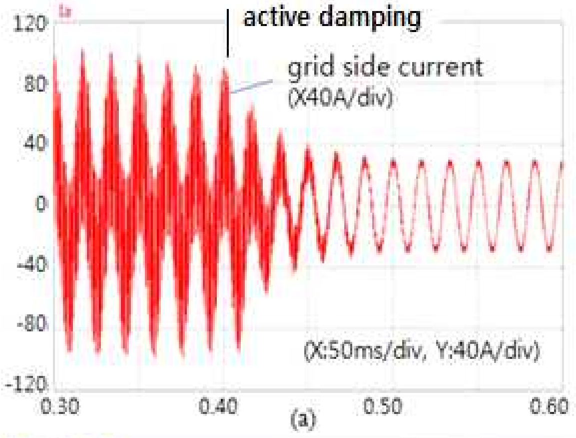
그림 12에서의 공진주파수 영역 추정 결과를 표 4과 같이 간단히 정리하였다.

표 4. 공진주파수 영역 추정 결과
Table 4. Area estimation results of the resonance frequency

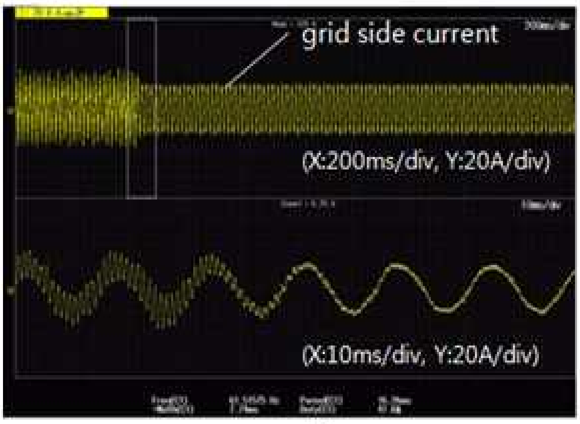
실험 조건 / 실험 결과	%Z=6.0, 30kVA	%Z=6.0, 30kVA	%Z=6.0, 30kVA
계산된 공진주파수	1252Hz	1184Hz	1100Hz
추정된 공진주파수 영역	1200±60Hz	1200±60Hz	1080±60Hz

컨버터에서 바라본 계통의 임피던스가 변동될 시에 공진주파수 영역을 추정 기능 동작을 확인할 수 있었다. 결과의 신뢰성을 높이도록 반복적으로 추정 기능 동작이 실행되어질 수 있다.

그림 13는 공진주파수 추정 기능이 적용되어진 능동 댐핑의 동작 전후 상황을 보여주기 위한 시뮬레이션 및 실험 결과이다. 공진을 임의로 발생시키기 위해 전류제어기의 비례 제어 게인을 변경시키거나, 계통의 임피던스 파라미터를 변경하여 계통의 공진을 모의하였다.



(a)



(b)

그림 13. 능동 댐핑 적용(전/후)
(a) 시뮬레이션 결과 ; (b) 시험 결과
Fig. 13. Application of the active damping (before/after)
(a) Simulation results ; (b) Test results

그림 13의 (a)는 능동 댐핑 동작 기능을 검증하기 위해 공진 발생 및 저감을 모의한 시뮬레이션 결과이다. 약 400msec에서 능동 댐핑을 동작시켜 계통 측 전류의 공진현상을 저감하였다. 전류제어기의 비례적분 제어기를 변동시켜 계통의 공진을 강제로 발생시켜 시뮬레이션을 진행하였다.

(b)는 약 3kW 발전을 하고 있을 때, 전류 제어기의 비례제어 게인을 임의로 크게 하여 공진을 강제로 발생 시켜 능동 댐핑의 동작성을 보여주었다. 그림은 계통 상전류를 측정한 것이며, 능동 댐핑의 동작에 의해 공진 성분이 상전류에서 제거됨을 알 수 있다.

7. 결 론

본 연구에서는 계통 연계형 컨버터의 LC 필터에 의해 발생할 수 있는 공진 현상을 저감하기 위한 능동 댐핑 소개와 공진주파수 영역의 추정 방법을 제안하였다. 능동 댐핑은 전류 제어기와 직렬로 노치 필터를 삽입하여 공진점을 안정적으로 저감함을 확인하였다.

또한 효과적인 노치필터의 동작을 위해 차단 주파수의 추정 방법이 제안되었다. 계통의 임피던스 변동 시 공진주파수 또한 변동됨을 확인할 수 있었고, 이를 대역통과필터를 이용하여 실효치로 변환하여 크기 비교를 통해 공진주파수 영역을 추정할 수 있었다. 추정된 공진주파수 영역은 능동 댐핑을 위한 노치필터의 차단 주파수로 사용되었다. 공진주파수 영역 추정의 기능을 검증하기 위해 변압기의 전력 용량과 %Z를 변경하며 시뮬레이션이 이용되었다.

본 연구의 결과는 풍력 또는 태양광 등 신재생 에너지원의 안정적인 계통 연계 시 적용이 가능한 기능이며, 다른 용도의 컨버터에서도 적용 가능하다.

본 연구는 경기도의 경기도지역협력연구센터(GRRC) 사업의 일환으로 수행하였음.
〔(GRRC한경2011-B04), 물류 자동화 시스템의 에너지 절약을 위한 전력변환 기술개발〕

References

〔1〕 Zhigang Liang, Xiaoohu Zhou, “Digital Controller Development for Grid-Tied Photovoltaic Inverter with Model Based Technique”, in Proceedings of IEEE APEC 2010, pp. 849-853. 2010.
〔2〕 IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems, IEEE Std. 1547, 2003.
〔3〕 Limits for Harmonic Current Emission (Equipment Input Current<16A per Phase), EN61000-3-2, 1995.
〔4〕 2005 National Electrical Code, National Fire Protection Association, Inc., QUINCY, ma, 2005.
〔5〕 Soeren Baekhoej Kjaer, John K. Pedersen, Frede Blaabjerg, “A review of single-phase grid-connected inverters for photovoltaic modules”, IEEE Transactions on Industru Applications, Volume. 41, No. 5, September.
〔6〕 R. W. Erickson, “Optimal single resistor damping of input filters,” in Proceedings of IEEE APEC'99, pp. 1072-1079, 1999.
〔7〕 V.Blasko and V.Kaura, “A novel control to actively damp resonance in input LC filter of a three-phase voltage source converter,” IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 33, no. 2, pp. 542-550, Mar.1997.
〔8〕 P.A.Dahono, “Damping of transient oscillations on the output LC filter of PWM inverters by using a virtual resistor,” in Proceedings of 4th IEEE International Conference on Power Electronics and Drive Systems, 2001, pp. 403-407.
〔9〕 X. Liu and A. J. Forsyth, “Comparative study of stabilizing controllers for brushless DC motor drive systems,” in Proceedings of 2005 IEEE International Conference on Electric Machines and Drives, 2005, pp.1725-1731.
〔10〕 V. Blasko, V. Kaura, “A novel control to actively damp resonance in input LC filter of a three phase voltage source converter,” in Proceedings of IEEE APEC'96, vol. 2, pp. 545-551, 1996.
〔11〕 M. Liserre, A. Dell'Aquila, F. Blaabjerg “Stability improvements of an LCL-filter based three-phase active rectifier”, n Proceedings of IEEE PESC 2002, Cairns, Australia, June 2002.
〔12〕 Arkadiusz Kulka, Tore Undeland, “Grid Inductance Estimation by Reactive Power Perturbation for Sensor-less Scheme Based on Virtual Flux”, NORPIE 2008.
〔13〕 M. Liserre, F. Blaabjerg, “Grid impedence detection via excitation of LCL-filter resonance”, IEEE 2005.
〔14〕 W-C Lee, T-K Lee, “A Design of a High Performance UPS with Capacitor Current Feedback for Nonlinear Loads”, Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, Vol. 26, No. 5, pp. 71-78 June 2012.
〔15〕 Mauricio Cespedes, Troy Beechner, Lei Xing and Jian Sun, “Stabilization of Constant-Power Loads by Passive Impedance Damping”, n Proceedings of IEEE APEC 2010, pp. 2174-2180 2010.

◇ 저자소개 ◇

박일우 (朴日雨)
1978년 5월 14일생. 2003년 홍익대학교 전기공학과 졸업. 2011년 한경대학교 전기공학과 대학원 졸업. 현재 삼성중공업 근무.

이우철 (李雨哲)
1964년 3월 24일생. 1987년 한양대학교 전기공학과 졸업. 1989년 한양대학교 대학원 전기공학과 졸업. 1988~1998년 효성중공업 기술연구소 책임연구원, 1995~2001년 한양대학교 대학원 전기공학과 졸업(박사). 2007~2009년 Virginia Polytechnic Institute and State University USA Visiting Professor, 현재 한경대학교 전기공학과 부교수. 2011년~현재 전력전자학회 학술위원. 2012년~현재 대한전기학회 편집위원.