

반복제어기를 적용한 단상 계통연계형 인버터의 전력품질 개선

김제한, 목형수, 최규하, 이진우*, 정교범**, 이정민***, 조영훈****
건국대, *두원공대, **홍익대, ***(주)효성, ****(주)현대모비스

Improvement of Power Quality of Single-phase Utility Interactive Inverter using Repetitive Controller

J.H Kim, H.S Mok, G.H Choe, J.W Lee*, G.B Chung**, J.M Lee***, Y.H Cho****
Konkuk Univ., *Doowon Technical College, **Hongik Univ., ***Hyosung Corp., Hyundai MOBIS Corp.

ABSTRACT

In recent years, installation of the new and renewable energy system is rapidly increasing. Because the new and renewable energy system is a practical distributed generation system to save energy resources and to keep environments clean. Conventional single-phase utility interactive inverter controls output current by using PI current controller. However, this method is insufficient to suppress harmonic current resulted from nonlinear loads in grid line. In this paper, in order to suppress periodic waveform distortion and improve THD(Total Harmonic Distortion), new type current controller added a parallel repetitive controller is proposed and then performance of the proposed controller was verified with computer simulation.

1. 서론

에너지 보존과 환경보호 등의 이유로 신·재생에너지 시스템의 보급이 빠른 속도로 늘어나고 있다. 이들 신·재생에너지 시스템의 구성은 그림 1과 같다. Solar Cell이나 연료전지 등에서 발생된 직류의 전력은 교류로 변환되어 계통에 연계된다. 계통연계형 인버터의 제어에는 주로 PI 제어기법이 사용된다. 그러나 PI 전류제어기만으로는 계통에 존재하는 고조파 성분을 제거하기 힘들다^[1].

본 논문에서는 선로에 연결된 비선형부하가 주원인인 고조파 성분을 제거하여 THD(Total Harmonic Distortion)를 개선하기 위한 방안으로 반복제어기의 사용하고자 한다. 기존의 d-q모델을 적용한 계통연계형 인버터의 PI 전류제어기에 반복제어기를 병렬로 부가함으로써 계통에 존재하는 주기적인 외란을 제거하여 전력의 품질을 향상시킬 수 있는 전류제어시스템을 제안하였으며 컴퓨터 시뮬레이션의 결과를 통해 제안한 단상 계통연계형 전류제어 인버터의 효용성을 확인하였다.

2. 신·재생 에너지 관련 현황

2.1 신·재생 에너지

신·재생 에너지는 기존의 화석연료를 변환시켜 이용하거나 햇빛, 물, 지열, 강수, 생물유기체 등을 포함하는 재생이 가능한

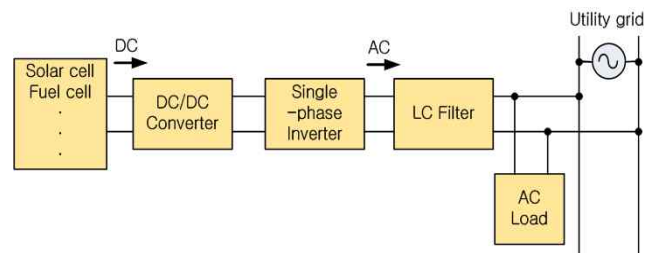


그림 1 신·재생에너지 시스템의 구성
Fig. 1 Configuration of new and renewable energy system

에너지를 변환시켜 이용하는 에너지를 말한다. 신에너지의 연료전지, 석탄액화가스화, 수소에너지의 3개 분야와 재생에너지의 태양열, 태양광발전, 풍력, 소수력, 바이오매스, 지열, 해양에너지, 폐기물에너지의 8개 분야를 합하여 총 11가지의 분야를 신재생 에너지라 칭한다.

신·재생 에너지를 보급하기 위하여 국외에서는 '신·재생 에너지발전 의무비율 할당제(Renewable Portfolio Standards)'를 제정하였다. 이는 발전사업자의 총발전량, 판매사업자의 총판매량의 일정비율을 신·재생 에너지원으로 공급 또는 판매하도록 의무화하는 제도로써 2010~2012년도의 보급 목표를 5~20%로 하고 있다.

또한 국내에서는 '신·재생 에너지 공급 참여 협약식(Renewable Portfolio Agreement)'을 통하여 환경친화적 에너지 공급체계를 수립하고 국제유가의 급등과 '교토의정서'의 발효에 대응하려 하였으며, 대형에너지 공급사들을 대상으로 중장기 신·재생 에너지 개발·공급 계획을 수립하였다. 2006년~2008년도까지 344[MW]의 신·재생 에너지의 보급을 목표로 하였다. '신·재생 에너지 공급참여 협약식' 이외에도 공공기관의 신·재생 에너지 이용을 의무화하여 연면적 3000[m²] 이상의 신축 건축물에는 건축공사비의 5% 이상을 신·재생 에너지 설비를 갖추는데 사용하도록 하였으며, 신·재생 에너지자원을 더욱 확보하여 2011년에는 1차 에너지소비량의 5%를 공급할 수 있도록 노력하고 있다.

2.2 전력계통연계 및 전력품질규제

신·재생 에너지 분산발전 시스템을 계통에 연계할 때 전력품질(전압, 주파수, 고조파, 역률 등)과 공급신뢰도(정정시간 및 정전횟수)의 확보가 필요하며, 각국은 이를 법규로 규정하고 있다. 표 1과 표 2는 각각 'IEEE Std. 519-1992 (Harmonic Control and Reactive Compensation of Static Power

Converter)'와 'EN50160(유럽연합의 전력품질 관련 표준, Harmonic Voltage Limits)'이다.

표 1 'IEEE Std. 519-1992'의 표 10.3
Table 1 Table 10.3 of 'IEEE Std. 519-1992'

Maximum Harmonic Current Distortion in Percent of I_L						
Individual Harmonic Order (Odd Harmonics)						
I_{sc}/I_L	$h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	TDD $= I_{TH}/I_L$
~ 20	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
$20 \sim 50$	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
$50 \sim 100$	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
$100 \sim 1000$	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
$1000 \sim$	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

I_{sc} = Maximum short-circuit current at PCC
 I_L = Maximum demand load current(fundamental frequency component) at PCC
 I_h : h_{th} order harmonic current

표 2 'EN50160'의 harmonic voltage limits 규정
Table 2 Standard of Harmonic voltage limits of 'EN50160'

차수	기본파에 대한 크기[%]	차수	기본파에 대한 크기[%]
3	5	15	0.5
5	6	17	2
7	5	19	1.5
9	1.5	21	0.5
11	3.5	23	1.5
13	3	25	1.5

3. 단상 계통연계형 인버터의 제어기법

3.1 기존의 계통연계형 인버터의 제어방식

그림 2는 기존의 d-q모델을 이용한 전류형 단상 인버터의 구성도이다. d-q모델을 단상 계통연계형 인버터 시스템에 적용하면 유효전력과 무효전력의 제어를 용이하게 할 수 있고 PLL 등 3상 시스템에 적용되는 알고리즘을 그대로 단상 시스템에 적용할 수 있는 장점이 있다^[2]. 기존의 제어기는 d-q 모델링 통해 유효전류와 무효전류를 각각 동기좌표계의 d-q축의 전류로 변환하며 PI전류제어기를 이용하여 이를 제어한다.

3.2 반복제어기^[3]

반복제어기를 이해하기 위한 기본 원리는 Internal Model Principle^[4]이다. Internal Model Principle이란 다음의 두 조건이 성립될 때 시스템의 정상상태 오차가 0으로 되는 것을 말한다.

- (조건1) 페루프 시스템이 점진적으로 안정하다.
- (조건2) 시스템의 개루프 전달함수가 기준 입력의 수학적인 모델을 포함한다.

여기서 (조건2)에 대해 간략히 설명하면 다음과 같다. 어떠한 페루프 시스템의 계단 입력에 대한 오차를 0으로 만들기 위해서는 계단 입력 모델이 시스템 자체에 들어가야 한다. 즉 계단 입력 모델인 $\frac{1}{s}$ 가 개루프 전달함수에 들어있어야 함을 의미한다.

그림 3 (a)는 주기신호 발생기를 나타낸다. 제어 시스템 내에서 반복되는 입력과 오차를 모델링하기 위해서 주기신호 발생기가 필요로 하며, 모든 반복제어기는 주기신호 발생기를 근간으로 설계되고 있으므로 매우 중요하다. 주기신호 발생기의 전달함수는 식(1)과 같다.

$$G_r(s) = \frac{e^{-sL}}{1 - e^{-sL}} \quad (1)$$

그림 3 (b)는 본 논문에서 사용한 플러그인 타입 반복제어기를 나타내며 전달함수는 식(2)와 같다.

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{G(s) + G_r(s)G(s)}{1 + G_r(s)G(s)} \quad (2)$$

여기서 R(s)와 Y(s)는 각각 시스템의 입력과 출력의 함수를 나타내며, $G_r(s)$ 는 반복제어기의 함수를 나타낸다. 오차 전달함수 E(s)는 아래의 식(3)과 같으며 0으로 수렴하게 된다.

$$\begin{aligned} E(s) &= R(s) - Y(s) \\ &= R(s) - \frac{G(s) + G_c(s)G(s)}{1 + G_c(s)G(s)} R(s) \\ &= \frac{1 - G(s) - e^{-sL} + e^{-sL}G(s)}{1 - (1 - G(s))e^{-sL}} R(s) \end{aligned} \quad (3)$$

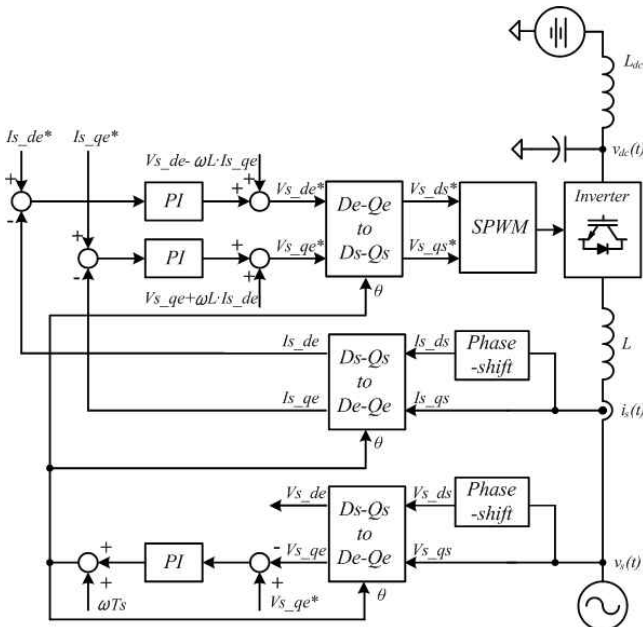
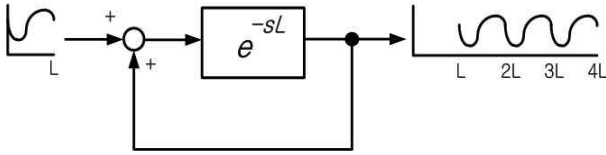
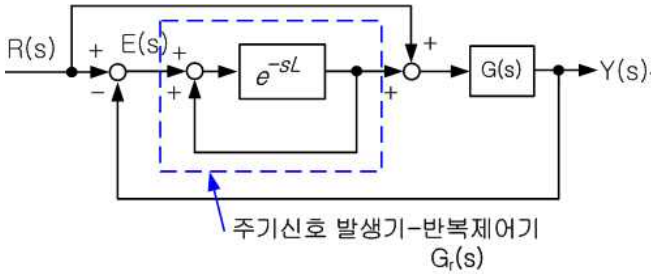


그림 2 기존의 계통연계형 인버터 시스템 구성
Fig. 2 Configuration of conventional system of utility interactive inverter



(a) 주기신호 발생기
(a) Periodic signal generator

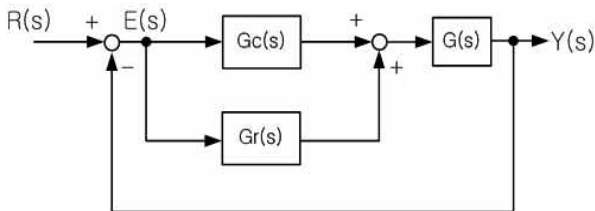


(b) 직결형 반복제어기
(b) Cascade type repetitive controller

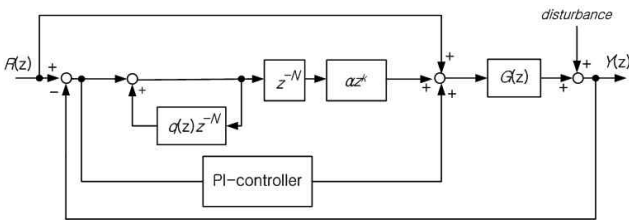
그림 3 주기신호 발생기와 플러그인 타입 반복제어기
Fig. 3 Periodic signal generator and plug-in type repetitive controller

3.3 제안하는 계통연계형 인버터의 제어 방식^[9]

본 논문에서는 그림 4와 같이 PI제어기에 병렬로 반복제어기를 갖는 제어시스템을 제안하였다. (a)는 s-도메인의 블록선도이다. 여기서 R(s)와 Y(s)는 각각 시스템의 입력과 출력의 함수를 나타내고 E(s)는 입력과 출력의 오차이다. 또한, G_c(s)는 전류제어기, G_r(s)는 반복제어기의 함수를 나타내며 전달함수는 식(4)과 같이 구할 수 있다.



(a) s-도메인에서의 블록다이아그램
(a) block diagram in s-domain



(b) z-도메인에서의 블록다이아그램
(b) block diagram in z-domain

그림 4 제안하는 전류제어기
Fig. 4 Proposed current controller

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{G_c(s)G(s) + G_r(s)G(s)}{1 + G_c(s)G(s) + G_r(s)G(s)} \quad (4)$$

그림 4(a)의 블록다이아그램을 디지털 컨트롤러로 구현하기 위해 z-변환하면 (b)와 같이 나타낼 수 있다. 디지털 반복제어기의 설계는 제어 대상에 따라 달라지는 q(z), a, k의 값을 구하는 것이라 할 수 있다.

q(z)는 초기의 반복 제어기에는 없었으나 안정도 향상을 위하여 후에 추가된 개념의 보상기이다. 이것은 일반적으로 1보다 작은 상수나 저역 통과 필터로 구성하여 고주파 성분의 파형을 걸러내거나 시스템의 공진점에서 파형을 상쇄하여 지령치에 공진점 근처의 값이 나가지 않도록 한다.

k는 시스템 전체의 시지연 요소를 보상하는 값이며, a는 반복제어기의 이득을 결정하는 값이다. 이 값이 클수록 빠른 보상이 가능하나 안정도는 낮아지게 된다. 반면에 이 값이 낮을 경우 안정성은 높아지나 보상이 늦어지고 정상상태 오차가 남을 수 있다. 본 논문에서는 q(z), a, k를 각각 0.9, 7, 1로 선정하였다.

4. 시뮬레이션 결과

제안한 단상 계통연계형 인버터의 제어기의 타당성을 검증하기 위하여 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션은 그림 5와 같이 PSIM을 이용하여 수행하였다. 설계한 제어기를 검증하기 위해 계통에는 기본파에 대비하여 20[%] 크기의 3고조파와 5[%] 크기의 5고조파를 주입하였으며, PSIM의 DLL 기능을 이용하여 디지털 컨트롤러를 구현하였다.

그림 6은 d-축과 q-축의 전류지령치와 출력전류간 오차의 시뮬레이션 파형이며, 반복제어기가 투입되어 과도상태를 거친 이후 오차가 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 또한 그림 7의 출력전류의 비교를 통하여 제안된 전류제어기를 이용한 출력전류의 파형이 기존제어기의 출력전류의 파형보다 왜곡이 없는 것을 알 수 있으며, 그림 8의 FFT 분석을 통해 제안된 제어기를 사용함으로 인하여 5고조파 성분이 줄어드는 것을 확인할 수 있다.

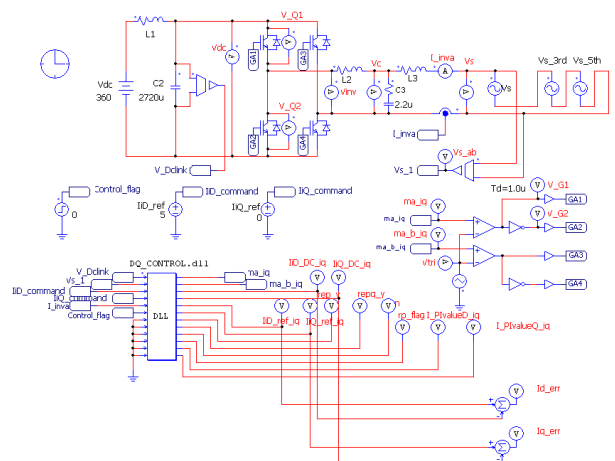


그림 5 PSIM을 이용한 시뮬레이션 회로
Fig. 5 Simulation circuit using PSIM

5. 결론

기존의 신·재생 에너지 시스템을 위한 단상 계통연계형 인버터는 주로 PI 전류제어기를 사용한다. 본 논문에서는 기존의 제어기로는 보상하기 힘든 계통에 발생하는 주기적인 고조파 성분을 제거시키기 위하여 PI 전류제어기에 병렬로 반복제어기를 추가하였다.

제안된 제어기법을 적용해 시뮬레이션을 수행하여 그 효용성을 확인한 결과 고조파 성분이 감소하여 전력의 품질이 개선됨을 확인할 수 있었다.

이 논문은 산업자원부 전력IT기술개발사업 (R-2005-1-396-001)의 지원으로 연구되었음

참고 문헌

- [1] K.Toyama, H.Ohtake, S.Matsuda, S.Kobayashi, M.Morimoto, and H.Sugimoto, "Repetitive Control of Current for Residential Photovoltaic Generation System", *Ind. Elec. Soc., Conf of IEEE*, Vol. 2, pp. 741-745, 2000.
- [2] 최시영, 김래영, 권형남, 송중환, "DQ 모델을 이용한 단상 계통연계 인버터의 제어," *전력전자학술대회 논문집*, pp. 602-605, 2003.
- [3] 조영훈, "전력 품질 향상을 위한 동적 전압 보상기용 반복 제어기의 설계," *서울대학교 공과대학 전기 컴퓨터 공학부 석사학위 논문*, 2004.
- [4] S.Fukuda, T.Yoda, "A Novel Current-Tracking Method for Active Filters based on a Sinusoidal Internal Model," *IEEE Trans. on Ind. Appl.*, Vol. 37, No. 3, pp. 888-895, 2001.

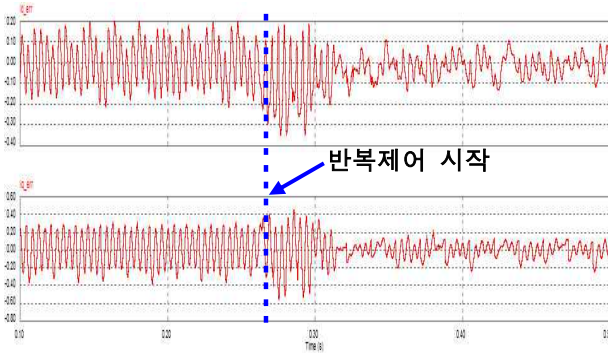


그림 6 d-축과 q-축의 전류지령치와 출력전류간 오차의 시뮬레이션 파형 (상 : d-축, 하 : q-축)
Fig. 6 Simulation waveform of error between iref and iout of d and q-axis (upper : d-axis, lower : q-axis)

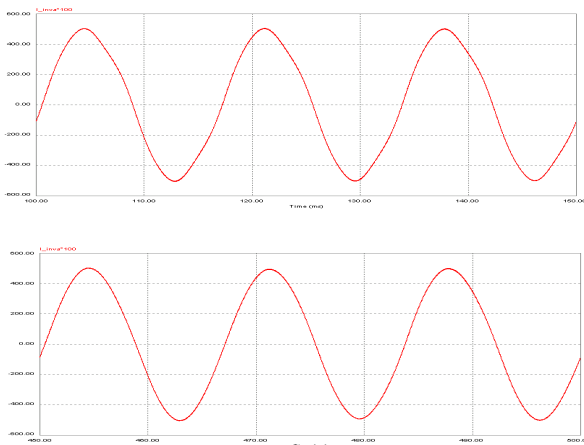


그림 7 기존제어기와 제안된 제어기의 출력전류 시뮬레이션 파형 (상 : 기존제어기, 하 : 제안된 제어기)
Fig. 7 Simulation waveform of output current using Conventional controller and proposed controller (upper : conventional controller, lower : proposed controller)

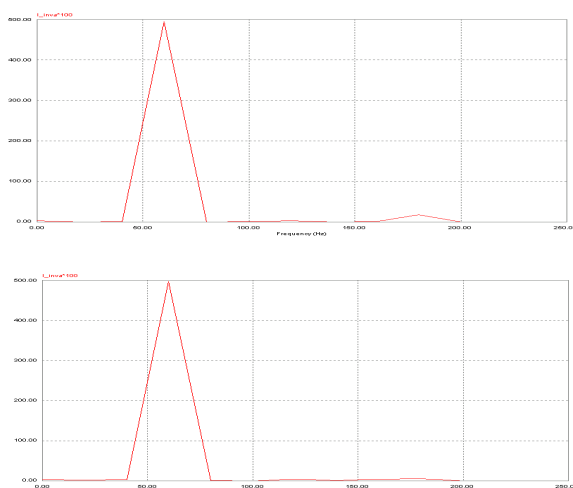


그림 8 기존제어기와 제안된 제어기의 출력전류의 FFT 분석파형 (상 : 기존제어기, 하 : 제안된 제어기)
Fig. 8 FFT analysis of output current using Conventional controller and proposed controller (upper : conventional controller, lower : proposed controller)