

무정전전원장치의 전압품질 향상을 위한 디지털 홀수고조파 반복제어기 설계

여시준, 조영훈
건국대학교

A design of digital odd harmonic repetitive controller for UPS to improve voltage regulation performance

Si Jun Yeo, Younghoon Cho
Konkuk Univ.

ABSTRACT

본 논문은 무정전전원장치의 전압품질 향상을 위한 디지털 홀수고조파 반복제어기 설계기법에 대해 기술한다. 반복제어기의 설계를 위해 전체 제어시스템을 설계하고, 반복제어기가 안정하기 위한 기준을 제시한다. 비선형 부하에 대해 반복제어기를 적용함으로써, 인버터 출력전압의 홀수고조파 성분을 효과적으로 보상할 수 있으며, 이를 모의실험 및 실험으로 확인한다.

1. 서론

무정전전원장치는 순간적인, 혹은 지속되는 전원단의 문제로부터 중요부하를 보호하기 위해 사용되며, 이를 위해 낮은 THD를 가지는 정현파 전압을 항상 출력하여야 한다.^[1] 무정전전원장치의 정현파 출력전압의 왜곡은 보통 주기적이기 때문에, Internal model principle(IMP)에 근거한 반복제어기의 적용은 출력전압의 THD 저감을 위한 좋은 해결책이 될 수 있다. 또한, 정현파 제어에서의 지령 또는 외란 요소는 홀수 고조파에 대해서만 발생하기 때문에 기존의 전 고조파 반복제어기 대신 홀수 고조파 성분만 보상하는 홀수고조파 반복제어기^[2]를 적용한다.

2. 제어기 설계

표 1과 그림 1은 본 논문에서 다루는 무정전전원장치의 인버터 파라미터와 회로를 나타낸다. 인버터 회로는 3레벨 T형 인버터로 선정하였다. 인버터부는 V_{dc} 를 직류전원으로 하며 4개의 스위치 소자, 출력 LC 필터로 구성된다.

표 1 인버터 파라미터
Table 1 Parameters of inverter

Input filter inductance	900uH
Output capacitance	100uF
DC-link voltage	700V
Output RMS voltage	220V
Switching frequency	7.5kHz
Sampling frequency	15kHz

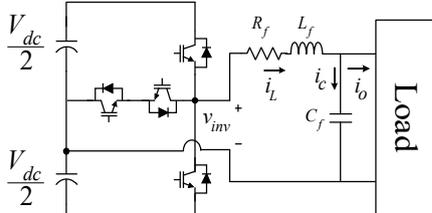


그림 1 단상 3레벨 T-type 인버터 회로구조
Fig. 1 Single phase 3-level T-type inverter topology

전체 제어기는 커패시터 전류제어기를 내부루프로 하는 커패시터 전압제어기로 구성되어 있으며, 각각 PI제어기와 공진제어기, 홀수 고조파 반복제어기로 구성된다. 제어기의 설계는 디지털 구현을 고려하여 모두 z 도메인 상에서 설계를 진행하였고,

제어시스템에서 부하전류 i_o 는 외란으로 간주한다.

전류제어기의 대역폭은 스위칭 주파수의 약 1/8로 선정하였으며 위상여유와 이득여유를 충분히 확보하도록 설계하였다.

그림 2는 전체 제어기 블록을 등가화 시킨 단일 루프 형태의 전압제어기 블록도를 나타낸다. $G_{iv}(z)$ 는 전류제어기를 포함하는 인버터 플랜트 모델이며, $G_{cv}(z)$, $G_{rp}(z)$ 는 각각 공진제어기와 홀수 고조파 반복제어기를 나타낸다. 반복제어기를 구성하는 $q(z)$, N , L , k_{rp} 는 각각 안정화 필터, 오차 주기에 따른 샘플 수, 디지털 시 지연 보상 샘플 수, 그리고 반복제어기의 이득을 나타낸다. 본 논문에서는 안정화 필터에 대해 일반적으로 많이 쓰이는 형태인 식 (1)로 선정하였다.^[3]

$$q(z) = \frac{z+2+z^{-1}}{4} \quad (1)$$

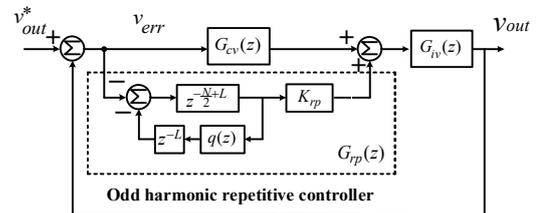


그림 2 단일루프 전압제어기로 등가화 된 전체 제어시스템

Fig. 2 Single loop voltage control block equivalent to overall control system

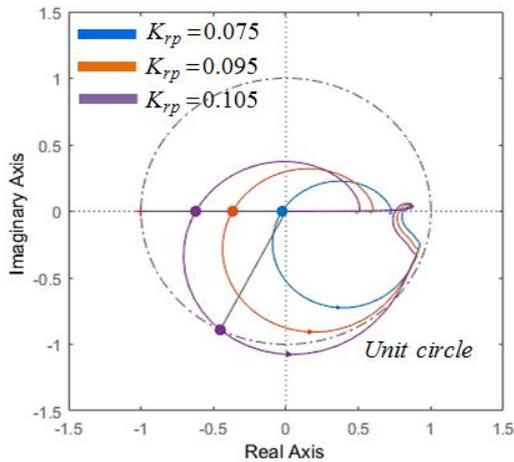
공진제어기 $G_{cv}(z)$ 의 설계의 경우, 전류제어기의 대역폭의 약 1/8로 대역폭을 선정하였다. 그림 2를 통해 반복제어기 $G_{rp}(z)$ 를 유도하면 식 (2)와 같고, 전압 지령에 대한 출력전압 오차에 관한 전달함수 $G_e(z) = \frac{v_{err}}{v_{out}}$ 을 정의하면 식 (3)과 같다. 단, $T_{iv}(z)$ 는 공진제어기만을 포함하는 전압제어기의 개루프 이득 전달함수이다.

$$G_{rp}(z) = -k_{rp} \frac{z^{-L}}{z^{N/2} + q(z)} \quad (2)$$

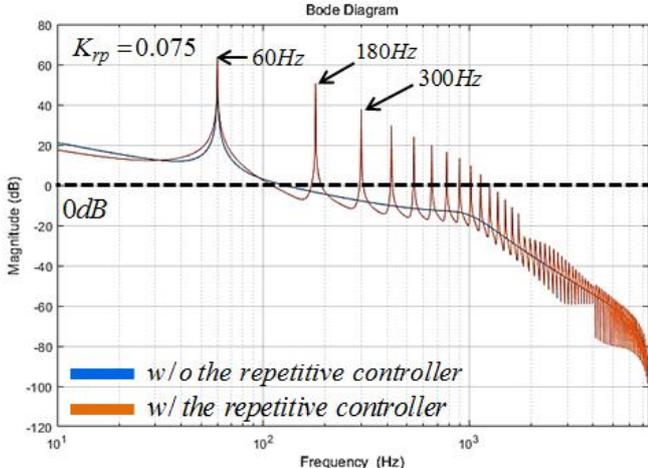
$$G_e(z) = \frac{1}{1 + T_{iv}(z) \frac{z^{N/2} + q(z)}{z^{N/2} + q(z)} + k_{rp} z^L (G_{iv}(z)/(1 + T_{iv}(z)))} \quad (3)$$

z 도메인 상에서 $G_e(z)$ 의 모든 극점이 단위원 내에 존재하고 모든 근의 크기가 1보다 작으면 $G_e(z)$ 는 안정하다고 판단할 수 있다. $1/(1 + T_{iv}(z))$ 의 근은 $T_{iv}(z)$ 의 페루프 이득 전달함수의 근과 동일하기 때문에, $T_{iv}(z)$ 의 안정도가 보장되면 $1/(1 + T_{iv}(z))$ 의 근은 단위원내에 존재한다고 볼 수 있다. 따라서 식 (4)에 정의된 $H(z)$ 의 근이 모두 단위원 내에 존재한다면, $G_e(z)$ 는 안정하다고 판단할 수 있다.^[4]

$$H(z) \equiv q(z) + k_{rp} z^L \frac{G_{iv}(z)}{1 + T_{iv}(z)} \quad (4)$$



(a) $H(z)$ 의 근궤적



(b) 반복제어기 유무에 따른 전체 제어기 보드선도

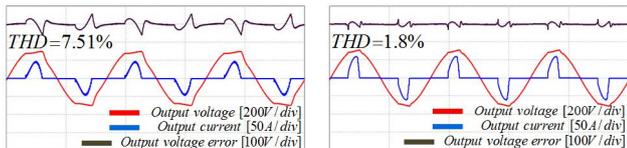
그림 3 반복제어기 이득에 따른 $H(z)$ 의 근궤적과 전체 제어기의 보드선도

Fig. 3 Trajectories for the roots of $H(z)$ and bode plot of entire control system

그림 3의 (a)는 반복제어기의 이득값에 따른 $H(z)$ 의 근궤적을 나타낸다. 근궤적을 참고하면 반복제어기의 이득이 0.105일 때 근이 단위원 밖에 존재하는 영역이 생기며, $G_e(z)$ 는 불안정해진다. 본 논문에서는 반복제어기가 안정도 영역에 존재하게 하는 이득 0.075를 선정하여 반복제어기 설계를 마친다. 그림 3의 (b)는 반복제어기의 유무에 따른 전체 제어 시스템의 개루프 이득 전달함수를 나타낸다. 설계된 반복제어기는 홀수고조파에 대해서만 보상하는 것을 확인할 수 있다.

3. 시뮬레이션 및 실험결과

시뮬레이션 툴 PSIM을 이용하여 모의실험을 진행하였다. 표 1의 파라미터를 가지는 그림 1의 회로를 구성하였으며, 다이오드 정류기를 이용하여 비선형부하에 대해 모의실험을 진행하였다. 그림 4는 반복제어기를 적용하기 전과 후의 인버터 출력 전압파형을 나타낸다. 홀수고조파 반복제어기를 적용한 후, 출력전압의 THD가 개선됨을 모의실험을 통해 확인할 수 있다.

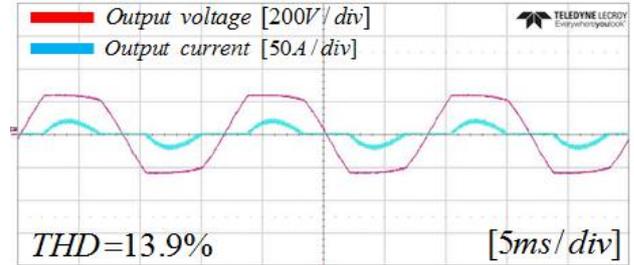


(a) 반복제어기 적용 전

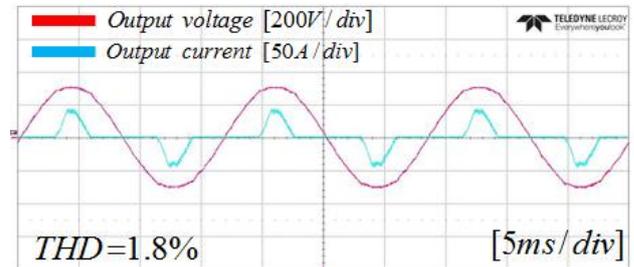
(b) 반복제어기 적용 후

그림 4 비선형 부하에 대한 인버터 출력전압 모의실험 파형
Fig. 4 Simulation waveform of inverter output voltage for non-linear load

그림 5는 홀수고조파 반복제어기를 적용하기 전과 후의 인버터 출력전압 파형을 나타낸다. 전압제어기를 공진제어기만으로 구성하였을 때, 인버터 출력전압의 THD는 13.9%로 나타났다. 그림 6은 출력전압 지령에 대한 출력전압 오차를 나타낸다. 반복제어기를 적용함과 동시에 오차가 줄어들기 시작하며, 출력전압 THD는 1.8%로 감소하는 것을 확인할 수 있다.



(a) 반복제어기 적용 전, THD = 13.9%



(a) 반복제어기 적용 후, THD = 1.8%

그림 5 비선형 부하에 대한 인버터 출력전압 파형

Fig. 5 waveform of output voltage for non-linear load

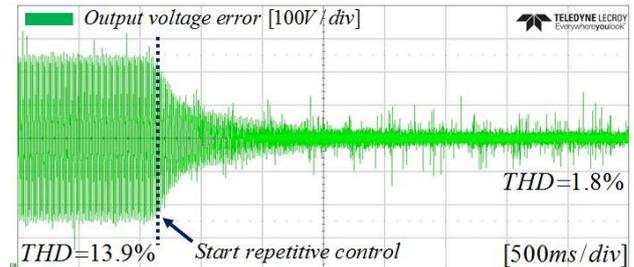


그림 6 비선형 부하에 대한 인버터 출력전압 오차

Fig. 6 waveform of output voltage error for non-linear load

4. 결론

본 논문에서는 무정전전원장치의 전압품질 향상을 위한 홀수고조파 반복제어기를 설계하고, 모의실험과 실험을 통해 반복제어기의 성능을 확인하였다. 모의실험과 실험 모두 반복제어기를 통한 출력전압 THD의 저감이 이루어졌으며, 정상상태에서 출력전압 지령에 대한 출력전압 오차가 현저히 감소한 것을 확인하였다.

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No.20174030201660).

참고 문헌

- [1] Ji, J. K.; Ku, D. K.; Lim, S. B. Low cost and high performance single phase ups using a single loop robust voltage controller. J. Power Electron. 2015, 15, 695-701.
- [2] R. Griñó, R. Costa Castelló, Digital repetitive plug in controller for odd harmonic periodic references and disturbances, Automatica 41 (2005)153-157.[31] C. Lee, S.M.
- [3] K. Zhou and D. Wang, "Digital repetitive controlled three phase PWMrectifier," IEEE Trans. Power Electron., vol. 18, no. 1, pp. 309-316, Jan.2003.
- [4] Y. Cho and J. S. Lai, "Digital Plug In Repetitive Controller for Single Phase Bridgeless PFC Converters," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 28, no. 1, pp.165-175, Jan. 2013.