

평균 위상 지연 반복제어기의 부분 분수 지연 보상 방법

이정용, 김봉국, 신상혁, 조영훈
 건국대학교 전력전자연구소

Method of Compensate Fractional Delay for Average Periodic Delay-Based Repetitive Control

Jung-yong Lee, Bong-gook Kim, Sanghyuk Shin, Younghoon Cho
 Power Electronics Lab., Konkuk Univ.

ABSTRACT

일반적인 반복 제어기는 샘플링 주파수마다 오차 성분을 학습하여 고정된 기본파의 고조파 성분에 대해 높은 이득을 제공한다. 그러나 기준 주파수의 변동이 발생하면, 고조파에 대한 이득이 크게 감소한다. 본 논문에서 제안하는 평균 위상 지연 반복 제어기법은 양자화 및 일반화 처리 과정을 통해 주파수 변동 시에도 고조파 이득을 효과적으로 유지할 수 있다. 이 방법은 정수화된 위상이 변경될 때마다 오차 성분을 샘플링한다. 다만, 디지털 제어가 이산 시간에서 이루어지므로 부분 분수 지연이 불가피하게 발생하며, 이는 제어 성능을 저하시킬 수 있다. 본 논문에서는 평균 위상 지연 반복 제어기에 IIR(Infinite Impulse Response) 필터를 적용하여 부분 분수 지연을 보상함으로써 제어 성능을 개선하였다. 본 논문에서 제안하는 제어구조는 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

1. 서론

계통 연계형 전력 변환 장치는 신재생 에너지 발전 시스템의 핵심적인 구성 요소이다. 계통 연계형 인버터는 신재생 에너지로부터 생성된 직류 전원을 계통으로 보내거나 계통 품질 개선을 위한 능동 전력 필터로 사용된다.

계통 연계 인버터의 계통 전류 제어 시 반드시 계통 연계 기준을 충족해야 한다. 높은 총 고조파 왜곡(THD) 전류는 계통 전압 품질저하를 야기시키며, 다른 전력 변환 장치의 오작동 원인이 된다. 따라서 계통 연계 기준인 IEEE-519와 IEEE-1547에서는 계통 연계형 인버터의 전류 THD 수준을 제한하고 있다.^{[1][2]}

계통 연계 기준을 만족하는 전류 제어를 위해 고조파 성분들에 대한 이득을 갖도록 전류제어기를 설계한다. 고조파 성분들에 대한 높은 이득을 갖는 제어기는 홀수 차수에 대한 공진제어기를 병렬로 구성한 비례공진 제어기와 반복제어기가 있다. 공진제어기의 병렬 구성은 연산량이 증가하며 구현이 복잡해지는 단점이 있어 반복제어기를 사용한다.

반복제어기는 특정 기본파 주파수의 고조파 성분들에 대해 높은 이득을 갖지만 주파수가 변경될 경우 이득이 급격하게 감소한다. 따라서 종래의 연구에서는 위상의 변화에 동기화하여 전류 오차를 학습하는 평균 위상 지연 반복제어기 혹은 기본파의 변화에 따라 샘플링 수를 변경하는 반복제어기가 제안되었다.^{[3][4]}

본 논문에서는 위상의 변화에 동기화하여 오차를 샘플링하는

평균 위상 지연 반복제어기법을 채택하여 전류제어기를 구성하였다. 평균 위상 지연 반복제어기에 대한 자세한 설명은 본문에서 설명한다.

샘플링 주기마다 제어 연산을 수행하는 디지털 제어 특성상 반복제어기의 샘플링 수를 정수의 형태로 표현할 수 있으며, 반올림되는 소수점이 반영되지 못해 부분 분수 지연이 발생하게 된다. 예를 들어 샘플링 주파수 f_{smp} 가 20kHz로 설정되어 있을 때, 기본파 주파수 60Hz에 대한 반복제어기 샘플링 수는 하기 식을 통해 333.333으로 계산되며, 디지털 제어기에서는 333으로 정의한다.

$$N = f_{smp} / f_g \quad (1)$$

그림 1 은 반복제어기 25차 고조파에 대한 주파수 응답을 확대한 이득 곡선이다. 부분분수 지연을 보상할 경우 60Hz의 25차 고조파인 1.5kHz에서 13dB의 높은 이득을 갖지만 보상이 없을 경우 이득은 -0.1dB로 급격하게 감소하여 해당 고조파 성분에 대한 제어 성능이 감소함을 알 수 있다.

본 논문에서는 위상 지연 반복제어기에 발생하는 부분분수 지연을 디지털 필터를 이용해 보상하는 방법을 제안하며, 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

2. 부분분수 지연을 보상한 평균 위상 지연 반복제어기

2.1 평균 위상 지연 반복제어기

일정한 주기마다 제어기 오차 성분을 샘플링 하는 일반적인 반복제어기와 달리 평균 위상 지연 반복제어기는 PLL(Phase Locked Loop)를 통해 추종한 위상이 변경될 때 오차 성분을 샘플링한다. 계통 전압의 위상에 따라 샘플링을 수행하므로 계통 주파수 성분이 변경되어도 샘플링 수를 변경하지 않고 변경된 주파수에 대한 고조파 이득을 확보할 수 있다.

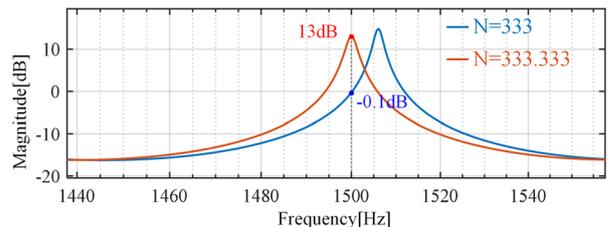


그림1 부분분수 지연에 의한 제어기 이득 변화.

Fig.1 Controller gain variation due to the fractional delay error in bode plot.

그림 2는 평균 위상 지연 반복제어기 구조를 보여준다. 일반적인 반복제어기와 달리 위상의 변화에 따라 샘플링을 수행할 수 있도록 계통 위상을 일반화(normalization)와 양자화(quantization)을 거쳐 0부터 $N-1$ 사이의 값을 가지는 정수로 변환한다. 이때 양자화된 정수 위상 값이 변동될 때 제어기 오차 성분을 샘플링 한다.

일반화는 0부터 2π 사이의 값을 가지는 계통 위상 θ_g 를 0부터 N 사이의 값으로 확장하는 과정을 의미하며, 양자화는 실수로 표현된 θ_N 을 정수로 변경하는 과정이다. 그리고 반복제어기의 총 샘플링 수 N 은 하기 수식을 기반으로 선정하며,

$$N = f_{\text{snap}} / (2 \cdot f_{g_max}) \quad (2)$$

여기서 f_{snap} , f_{g_max} 는 각각 샘플링 주파수, 계통 주파수의 최대값을 의미한다. $q(z)$ 는 안정화 필터로 제어기가 샘플링 주파수에 의해 제어하지 못하는 고주파 영역의 이득을 낮추는 위상지연이 없는 저역 통과 필터이다.

$$q(z) = (z + 2 + z^{-1}) / 4 \quad (3)$$

디지털 제어 시 PWM 업데이트 및 ADC 지연에 의해 $1.5 T_{\text{snap}}$ 의 시지연이 발생한다. 따라서 반복제어기에서 두 주기 앞선 오차값을 이용해 제어하도록 L 을 2로 선정하였다.

그림 3은 평균 위상 지연 반복제어기의 입력주파수 변동 시 주파수 특성을 보여준다. f_{snap} 는 20kHz, f_{g_max} 는 63Hz로 선정하여 N 은 158로 계산된다. 입력 주파수가 변경됨에 따라 반복제어기의 목표 주파수가 변경됨을 확인할 수 있으나 부분분수 지연에 의해 정확한 주파수에 대한 이득을 갖지 못함을 알 수 있다.

2.2 부분분수 지연 보상

FIR(Finite Impulse Response)필터와 IIR필터는 이산시간에서 구현이 불가능한 부분분수 지연을 보상하기 위한 디지털 필터이다. FIR필터는 대표적으로 라그랑주(Lagrange)보간법이 있다. 반복제어기의 샘플링 수 N 을 정수 N_i 와 소수 d 로 나누어 표현할 때 라그랑주 보간법을 이용해 부분분수 지연(Fractional delay)은 아래 수식과 같이 표현할 수 있다.

$$z^{-d} = G_{\text{Lag}} \approx \sum_{k=0}^n A_k z^{-k}, \left[A_k = \prod_{i=0}^n \frac{d-i}{k-i}; k, i = 0, 1, 2, \dots, n \right] \quad (4)$$

라그랑주 보간법의 차수 n 이 클수록 고주파 성분에 대한 정확한 보상이 가능하므로 2차 이상으로 사용한다. 하지만 2차 이상의 라그랑주 보간법을 이용해 부분분수 지연을 보상할 경우 계수 연산 부하량이 증가하기 때문에 상대적으로 연산 부하가 적으며

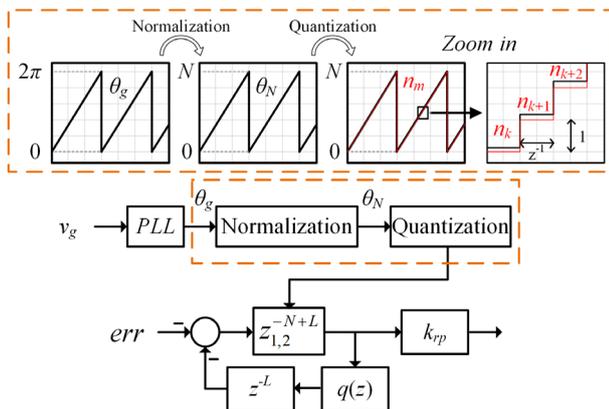


그림2 평균 위상 지연 홀수 고조파 반복제어기 구조.
Fig.2 Structure of average periodic delay based odd-harmonic repetitive controller.

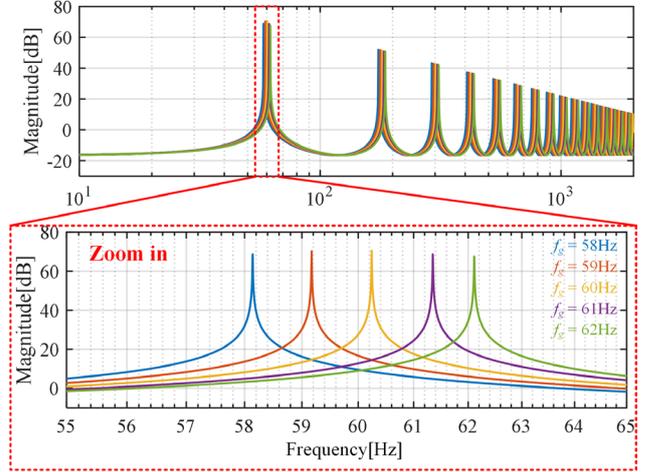


그림3 주파수 변화에 따른 위상 평균 위상 지연 반복제어기 주파수 특성.
Fig.3 Frequency characteristics of the average periodic delay based repetitive controller due to frequency variation.

구현이 간단한 IIR 필터 기반의 thiran 필터 채택하였다.

Thiran 필터는 FIR 필터와 달리 모든 주파수 영역에서 크기가 1로 유지되어 향상된 부분분수 지연 보상 효과를 제공한다. n 차 IIR 필터 부분분수 지연 전달함수는 식 (5)와 같다.

$$z^{-d} \approx F(z) = \frac{a_n + a_{n-1}z^{-1} + \dots + a_1 z^{-(M-1)} + z^{-M}}{1 + a_1 z^{-1} + \dots + a_{n-1} z^{-(M-1)} + a_n z^{-M}} \quad (5)$$

여기서 계수 $a_k(k=1,2,\dots,n)$ 는 Thiran 공식에 의해 식 (6)과 같이 정의된다.

$$a_k = (-1)^k \binom{M}{k} \prod_{m=0}^M \frac{d-M+m}{d-M+k+m}, (k=0,1,\dots,M) \quad (6)$$

Thiran 필터의 차수 n 이 높을수록 더 정확한 보상효과를 제공하며, 선형성이 향상된다. 하지만 전류 제어기의 대역폭 내에서 부분분수 지연에 대한 보상은 1차 Thiran 필터를 적용하여 FIR 필터와 동일한 효과를 얻을 수 있다.

2.3 부분분수 지연 보상을 적용한 평균 위상 지연 반복제어기

그림 4는 평균 위상 지연 반복제어기의 부분분수 지연을 보상하기 위해 1차 Thiran 필터를 적용한 제어구조이다. 1차 Thiran 필터 전달함수 $G_{TR}(z)$ 는 식 (7)과 같이 표현된다.

$$G_{TR}(z) = \frac{a_1 + z^{-1}}{1 + a_1 z^{-1}}, \left[a_1 = \frac{1-d}{1+d} \right] \quad (7)$$

반복제어기 샘플링 수 N 은 계통 위상이 변경됨에 따라 변경되지만 Thiran 필터의 계수는 현재 추종된 주파수 정보에 따라 계수 정보가 지속적으로 업데이트되어야 한다. 그림 5는 Thiran

표 1 Thiran 필터의 차수에 따른 계수 공식

Table 1 Coefficients formula based on the order of the Thiran filter.

Order	a_1	a_2	a_3
$M = 1$	$\frac{1-d}{1+d}$	-	-
$M = 2$	$\frac{-2(d-2)}{1+d}$	$\frac{(d-1)(d-2)}{(d+1)(d+2)}$	-
$M = 3$	$\frac{-3(d-3)}{d+1}$	$\frac{3(d-2)(d-3)}{(d+1)(d+2)}$	$\frac{-(d-1)(d-2)(d-3)}{(d+1)(d+2)(d+3)}$

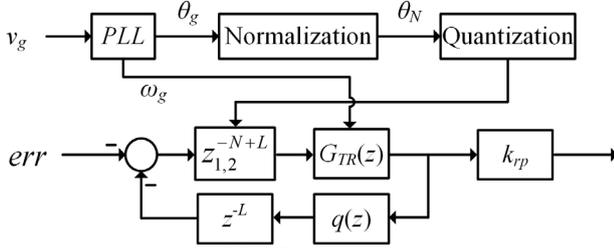


그림4 Thiran 필터를 적용한 평균 위상 지연 반복제어기 구조.
Fig.4 Structure of average periodic delay based odd-harmonic repetitive controller with Thiran filter.

필터를 적용한 반복제어기의 주파수 응답특성곡선을 보여준다. 부분분수 지연이 보상됨에 따라, 목표 주파수에서 높은 이득을 가지도록 주파수 응답이 변경되는 것을 확인할 수 있다.

3. 시뮬레이션

본 논문에서 제안하는 제어기법의 성능을 검증하기 위해 시뮬레이션 툴 PSIM을 이용하였다. 시뮬레이션은 계통 전압의 주파수가 57Hz, 60Hz, 63Hz인 조건에서 평균위상 지연 반복제어기에 Thiran 필터의 적용 유무에 따라 계통 전류의 THD를 비교하였다.

시뮬레이션에 사용된 토폴로지는 단상 T-type 하프브릿지 PFC 컨버터이며, 정격 3kW 조건에서 수행하였다. 스위칭 주파수 및 샘플링 주파수는 20kHz로 동일하다. 실제 계통을 모사하기 위해 계통 전압에 5차, 11차 고조파 전압성분을 추가하여 왜곡이 포함된 계통 전압 조건에서 시뮬레이션을 수행하였다.

계통 주파수 대역별 샘플링 수의 d 값은 각각 57Hz에서 0.44, 60Hz에서 0.666, 63Hz에서 0.73로 개선된다. 시뮬레이션 결과 57Hz, 60Hz, 63Hz에서 Thiran 필터의 유무에 따라 1.24%, 2.11%, 2.01%의 THD개선 효과를 확인하였다.

4. 결론

본 논문에서는 부분분수 지연을 보상하기 위해 1차 Thiran 필터를 적용한 평균 위상 지연 반복제어기법을 제안한다. 평균 위상 반복 제어기는 시스템의 위상정보를 활용하여 샘플링 주파수 및 총 샘플링 수의 변경 없이 광범위한 주파수 영역에서

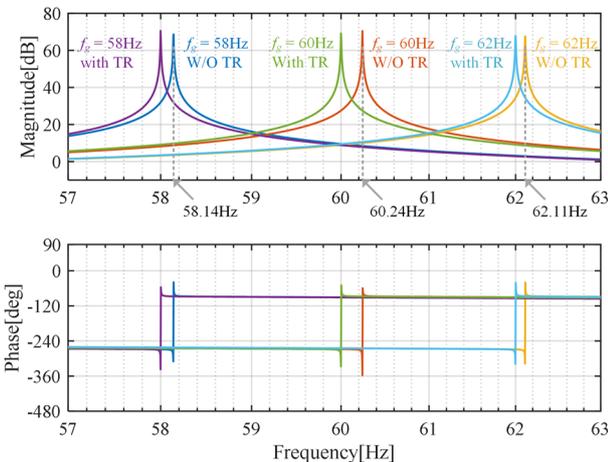


그림5 Thiran 필터 유무에 따른 제어기 주파수 특성.
Fig.5 Frequency characteristics of the controller with and without the Thiran(TR) filter.

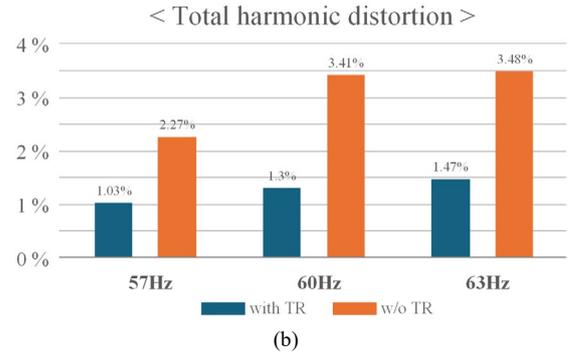
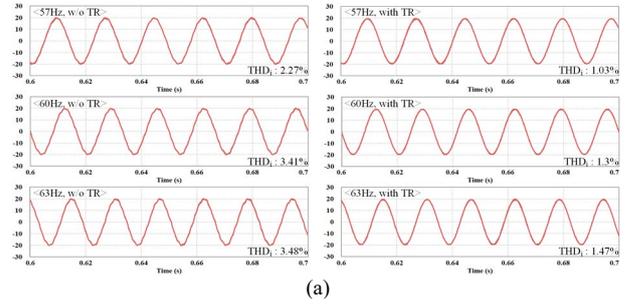


그림6 계통 전압 57Hz, 60Hz, 63Hz 조건Thiran 필터 유무에 따른 계통 전류 THD 시뮬레이션 결과 (a) 파형. (b) THD 그래프.

Fig.6 Simulation results of grid current THD under grid voltage conditions of 57Hz, 60Hz and 63Hz, with and w/o the Thiran(TR) filter (a) waveforms. (b) graph of THD.

반복 제어기의 성능을 확보할 수 있는 제어 기법이다. 그러나 디지털 제어의 특성상 계산된 샘플링 수는 반올림 되어 정수로 변환되며, 이는 목표 주파수에서 제어기 이득의 감소를 초래한다. 이는 단점을 보완하기 위해 IIR 필터를 활용하여 부분분수 지연을 보상하였으며, 시뮬레이션을 통해 그 효과를 검증하였다.

이 논문은 2021년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국연구재단의 지원(No.2021R1A5A1031868)과 2023년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (RS-2023-00252883, 하이브리드 추진선박 10MW급 직류배전 기술 개발)

참고 문헌

- [1] IEEE. IEEE Standard 519 IEEE recommended practices and requirements for harmonic control in electric power systems. IEEE;2022.
- [2] Photovoltaics, Distributed Generation, and Energy Storage. "IEEE standard for interconnection and interoperability of distributed energy resources with associated electric power systems interfaces." IEEE std 1547 (2018): 1547–2018.
- [3] Baek, Seunghoon, Younghoon Cho, and Jih-Sheng Lai. "Average periodic delay-based frequency adaptable repetitive control with a fixed sampling rate and memory of single-phase PFC converters." IEEE Transactions on Power Electronics 36.6 (2020): 6572–6585.
- [4] Zhao, Qiangsong, et al. "Novel fractional-order repetitive controller based on Thiran IIR filter for grid-connected inverters." IEEE Access 10 (2022): 82015–82024.