

왜곡 계통 조건에서 계통연계 인버터의 과도응답을 개선하기 위한 이산시간 슬라이딩 모드

윤승진, 김경화[†]
서울과학기술대학교

A Discrete-time Sliding Mode Control Scheme to Improve Transients of Grid-connected Inverter under Distorted Grid

Seung-Jin Yoon, Kyeong-Hwa Kim[†]
Seoul National University of Science and Technology

ABSTRACT

최근 분산전원 시스템 개발로 인해 계통연계 인버터의 사용이 증가해 왔다. 계통연계 인버터의 주요한 역할은 계통연계 환경에서의 안정적인 운전과 계통 사고 시 중요 부하에 대한 연속적인 전력을 공급하기 위한 독립운전에 있다. 각 모드 전환시의 출력전압의 변동성과 과도응답 특성을 개선하기 위해 최근 다중 루프 및 간접 전류 제어 방식이 계통연계 인버터에 적용되었다. 하지만 이러한 제어 방식은 캐패시터 전압 및 인버터 전류의 측정이 요구되어 시스템의 비용 및 복잡성을 증가시키게 된다. 본 논문에서는 이산시간 상태공간에서의 전상태 관측기를 설계하여 무순단 절체 동작 시 제어가 요구하는 변수를 추정하고 이를 폐환신호로 사용하여 시스템의 설계 비용 및 복잡성을 줄인다. 또한 계통연계 시 계통유입 고조파 전류를 억제하기 위해 일반적으로 사용되는 기존 공진형 제어기의 과도 응답을 개선하기 위해 이산시간에서 슬라이딩 모드와 공진제어기가 결합된 새로운 제어기 구조를 제안한다. 제안된 기법의 타당성은 PSIM 시뮬레이션을 통하여 입증된다.

1. 서론

마이크로그리드 구성 및 신재생 에너지를 활용한 분산전원 발전량 증가로 인해 계통연계 장치의 수요가 크게 증가하고 있다. 계통연계 인버터의 주요 역할은 계통연계 환경에서의 안정적인 운전과 계통 사고 시 중요 부하에 연속적인 전력을 공급하기 위한 독립운전에 있다. 일반적으로 계통연계모드에서 인버터는 계통에 전력을 주입하기 위해 전류제어모드로 동작하지만 계통 사고시 인버터는 부하에 연속적 전력공급을 위해 전압제어로 동작모드를 전환한다^[1]. 모드 전환시의 출력전압의 변동성과 과도응답 특성을 개선하기 위해 최근 다중 루프 및 간접 전류 제어 방식이 계통연계 인버터에 적용되었다. 이러한 기법은 계통 전류, 캐패시터 전압 및 인버터 전류를 각각 별도로 제어하는 종속적인 구조를 지니게 되며 각 단계별 페루프 제어를 구성하기 위해서는 각 상태 정보가 필수적으로 측정될 필요가 있

어 과도한 센서 사용에 따른 시스템의 비용 및 복잡성을 증가시키게 된다. 또한 기존의 방식은 계통의 고조파 왜곡 시 고조파 보상 및 계통 주입전류의 고조파 특성에 대한 분석이 이루어 지지 않았다. 계통에 주입되는 전류의 고조파를 억제하기 위해 일반적으로 사용하는 공진형 제어기^[2]는 고조파 보상 효과는 뛰어나지만 응답성이 비교적 느리고 초기응답이 진동하는 특성을 가지고 있다. 본 논문에서는 왜곡 계통 하에서도 계통 주입전류의 고조파를 효과적으로 억제할 수 있을 뿐만 아니라 계통연계 인버터의 과도응답을 현저히 개선할 수 있는 방법으로 기존의 공진형 제어기와 슬라이딩모드 제어기를 결합한 새로운 제어기가 이산시간 영역에서 설계된다. 또한 기존 간접 전류 제어 방식에서의 과도한 센서 사용에 따른 시스템의 비용 및 복잡성을 줄이기 위해 이산시간에서 전상태 관측기를 설계하며 추정된 상태변수는 내부 루프 PI제어기의 폐환 신호로 사용된다. 제안된 제어기법의 타당성은 PSIM 시뮬레이션을 통해 검증된다.

2. 슬라이딩모드 제어기 설계

그림 1은 LCL 필터를 가지는 3상 계통연계 인버터를 나타낸다. 동기좌표계에서 계통전류의 상태방정식은 다음과 같다.

$$i_2^q = -\frac{R_2}{L_2}i_2^q - \omega i_2^d + \frac{1}{L_2}u_i^q - \frac{1}{L_2}v_q \quad (1)$$

$$i_2^d = -\frac{R_2}{L_2}i_2^d + \omega i_2^q + \frac{1}{L_2}u_i^d - \frac{1}{L_2}v_d$$

위 식에서 u_i 는 인버터 전압, v 는 계통전압, i_2 는 계통측 전류, ω 는 각주파수를 나타낸다. 식 (1)은 이산시간영역에서 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} x[k+1] &= Ax[k] + Bu[k] + Dv[k] \\ y[k+1] &= Cx[k] \end{aligned} \quad (2)$$

슬라이딩모드 제어를 위한 스위칭 평면은 계통측 전류 오차와 적분기를 추가하여 다음과 같이 정의한다.

$$s(t) = e(t) + \frac{K}{s} e(t) \quad (3)$$

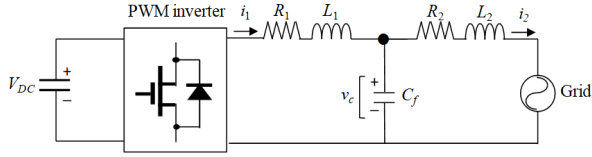


그림 1. LCL 필터를 가지는 계통연계 인버터

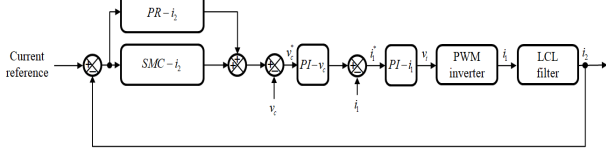


그림 2. 슬라이딩모드 제어가 사용된 간접전류 제어기

여기서 $e(t) = i_2^*(t) - i_2(t)$ 이며 계통측 전류 오차이다. 이산시간 슬라이딩모드 제어를 위해 Bilinear transformation에 의해 식 (3)을 다음과 같이 이산화할 수 있다.

$$s(k+1) - s(k) = e(k+1) - e(k) + \frac{KT_s}{2} e(k+1) + \frac{KT_s}{2} e(k) \quad (4)$$

계통측 전류 오차와 식 (2)를 이용하여 다음의 오차 방정식을 구할 수 있다.

$$e(k+1) = x^*(k) - Ax(k) + Bu(k) + Dv(k) \quad (5)$$

일반적으로 시스템의 동작이 슬라이딩 평면에 제한된 시간 내에 도달할 수 있도록 도달 조건을 만족하도록 제어입력을 다음과 같이 설계한다.

$$e(k+1) - e(k) + \frac{KT_s}{2} e(k+1) + \frac{KT_s}{2} e(k) = -qT_s s(k) - \varepsilon T_s \text{sgn}(s[k]) \quad (6)$$

식 (4) - (6)으로부터 이산시간 영역 슬라이딩모드 제어기의 제어 입력은 다음과 같이 구해진다.

$$u(k) = B^{-1} \left[\begin{array}{l} x^* - Ax(k) - Dv(k) + \left[(-1 + \frac{KT_s}{2}) / (1 + \frac{KT_s}{2}) \right] e(k) \\ + qT_s s(k) / (1 + \frac{KT_s}{2}) + \varepsilon T_s \text{sgn}(s(k)) / (1 + \frac{KT_s}{2}) \end{array} \right] \quad (7)$$

그림2는 슬라이딩모드 제어를 적용한 제안된 제어 시스템의 블록도이다. 내부 루프의 PI제어기를 위해 캐패시터 전압 및 인버터 전류는 관측기를 통한 추정치가 사용된다.

3. 시뮬레이션 결과

제안된 기법의 성능을 입증하기 위해 PSIM 기반 시뮬레이션 결과가 제시된다. 그림 3은 시뮬레이션에 사용된 왜곡된 계통전압 파형을 나타내며 그림 4와 그림 5는 제안된 제어기의 성능을, 그림 6은 공진형 제어기법의 제어성능을 나타낸다.

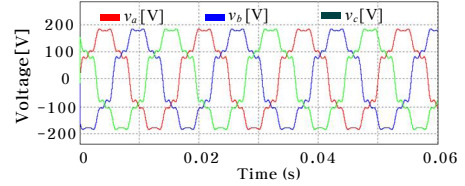


그림 3. 왜곡된 계통전압 파형

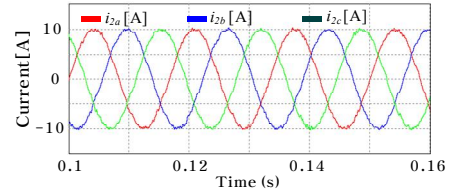


그림 4. 제안된 제어기의 3상 계통전류 파형

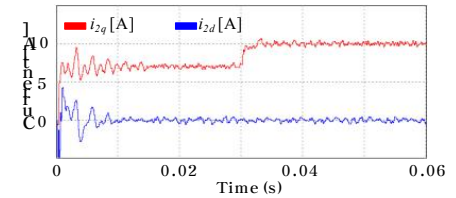


그림 5. 전류명령 변화 시 제안된 제어기의 과도응답 특성

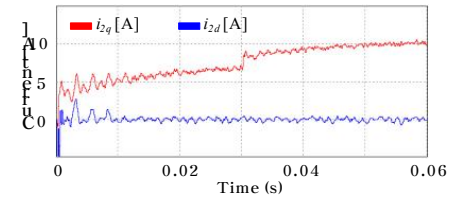


그림 6. 전류명령 변화 시 공진형 제어기의 과도응답 특성

4. 결론

본 논문에서는 왜곡계통에서 LCL필터를 사용하는 계통연계 인버터의 빠른 과도응답 및 고조파 억제를 위해 이산시간에서 슬라이딩모드 제어와 공진형 제어를 결합한 방식을 제안하였으며 간접전류 제어의 필요 센서 수를 줄이기 위해 전상태 관측기를 설계하였다.

이 논문은 2017년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(NRF-2016R1D1A1B03930975).

참고 문헌

- [1] H. S. Kim, T. S. Yu, and S. W. Choi, "Indirect Current Control Algorithm for Utility Interactive Inverters in Distributed Generation Systems." IEEE Trans. on Power Electr., Vol. 23, no. 3, pp.1342-1347, 2008, May.
- [2] N. B. Lai, and K. H. Kim, "Robust control scheme for three-phase grid-connected inverters with LCL-filter under unbalanced and distorted grid conditions." IEEE Trans. on Energy Conv., To be published