

슬라이딩 모드 기반의 직접전력제어를 이용한 계통연계 인버터의 성능개선

이상혁, 정해광, 이교범
아주대학교

Performance Improvement of Grid-Connected Inverters Using a Sliding-Mode Based Direct Power Control

Sang Hyouk Lee, Hea Gwang Jung, and Kyo Beum Lee
Ajou University

ABSTRACT

본 논문은 계통연계형 인버터의 성능 개선을 위한 슬라이딩 모드 기반의 직접전력제어기법을 제안한다. 제안하는 제어기법은 전류의 축변환 없이 시스템의 유효, 무효 전력을 직접 제어함으로써 계통사고 시 빠른 응답특성을 가지고, 불평형 사고 시 계통주파수의 2배에 해당하는 전력 리플이 발생하지 않으므로 계통연계형 인버터 제어에 적합하다. 시뮬레이션 결과를 통해 제안하는 제어기법의 타당성과 강인성을 확인한다.

1. 서론

신재생 에너지가 단지화, 대용량화 되는 추세에서 시스템의 계통연계 기술에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다^[1]. 특히 각국에서 계통연계 규정을 마련함에 따라 계통 사고 발생 시 시스템이 안정적으로 동작하면서 계통의 추가적인 사고를 방지하는 LVRT기술이 중요한 문제로 대두되고 있다. 신재생 에너지 시스템 설비는 보통 계통전압의 사고가 자주 발생하는 약계통에 설치되어 LVRT기술이 필수적이다. 계통사고 발생 시 급변하는 계통의 상황에 맞춘 출력을 제어하기 위하여 빠른 응답특성이 요구되고 불평형 사고 시 유연한 불평형 제어가 요구된다. 계통연계형 인버터를 제어하는 방법은 일반적으로 벡터 제어(VC)와 직접전력제어(DPC)가 있는데 벡터 제어는 직접전력 제어에 비하여 과도응답이 느리고 불평형 제어를 위하여 측정된 계통의 전압, 전류로부터 정상분과 역상분을 분리하고 두개의 제어기를 통해 각각 제어하여 제어기법이 복잡하고 과도응답이 좋지 않다^[3].

본 논문에서는 계통사고 상황에서 빠른 과도응답 특성을 가지고 불평형 제어 성능이 우수한 슬라이딩 모드 기반의 직접전력제어를 제안하고 시뮬레이션을 통해 타당성을 검증한다.

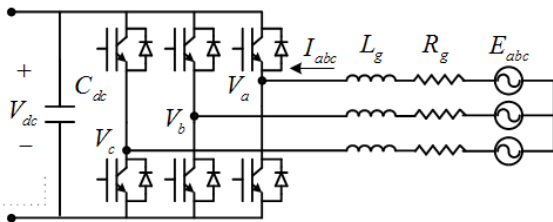


그림 1 계통연계 시스템 구성
Fig 1 Construction of grid connected System

2. 슬라이딩 모드를 이용한 직접전력제어

2.1 계통연계 시스템 모델링

그림 1은 3상의 일반적인 계통연계 시스템을 나타낸다. 그림 1로부터 계통연계 시스템의 전압, 전류 관계식을 d-q 고정좌표계로 나타내면 식 (1)과 같다.

$$e_{dq_s} = Ri_{dq_s} + L \frac{di_{dq_s}}{dt} + v_{dq_s} \quad (1)$$

계통의 불평형 시 슬라이딩 모드 기반의 전력 제어를 위해서 필요한 유효전력 및 무효전력성분의 미분값은 식 (2)와 같이 표현되고 불평형 계통전압의 미분값은 식 (3)과 같다.

$$\begin{cases} \frac{dP}{dt} = -1.5(i_{ds} \frac{de_{ds}}{dt} + i_{qs} \frac{de_{qs}}{dt} + e_{ds} \frac{di_{ds}}{dt} + e_{qs} \frac{di_{qs}}{dt}) \\ \frac{dQ}{dt} = -1.5(i_{ds} \frac{de_{qs}}{dt} - i_{qs} \frac{de_{ds}}{dt} + e_{qs} \frac{di_{ds}}{dt} - e_{ds} \frac{di_{qs}}{dt}) \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} \frac{de_{ds}}{dt} = \frac{de_{dsp}}{dt} + \frac{de_{dsn}}{dt} = -\omega_s e_{qs} \\ \frac{de_{qs}}{dt} = \frac{de_{qsp}}{dt} + \frac{de_{qsn}}{dt} = \omega_s e_{ds} \end{cases} \quad (3)$$

식 (1)과 식 (3)을 전력의 미분식에 대입하여 정리하면 식 (4)와 같이 나타낸다.

$$\begin{cases} \frac{dP}{dt} = -\frac{3}{2L} [\{ |E_s|^2 - (e_{ds}v_{ds} + e_{qs}v_{qs}) \}] - \frac{R}{L}P - \omega_s Q \\ \frac{dQ}{dt} = -\frac{3}{2L} (e_{ds}v_{qs} - e_{qs}v_{ds}) - \frac{R}{L}Q + \omega_s P \end{cases} \quad (4)$$

2.2 슬라이딩 모드를 이용한 전력제어기법

슬라이딩 평면은 식 (5)와 같이 유효, 무효전력의 오차와 오차의 적분 형태의 함으로 구성된다^[2]. 슬라이딩 평면은 미분값이 0이 될 때 시스템의 무효전력 및 유효전력의 궤적이 슬라이딩 표면에 일치한다.

$$\begin{cases} s_d = e_p + K_d \int e_p dt + e_p(0) \\ s_q = e_q + K_q \int e_q dt + e_q(0) \end{cases} \quad (5)$$

여기서 $e_p = P^* - P$, $e_q = Q^* - Q$ 이다.

식 (6)은 슬라이딩 평면의 미분값을 나타낸다. 2.1절에서 언급한 전력의 미분식을 식 (6)에 대입하여 정리하면 식 (7)과 같다.

$$\frac{ds_d}{dt} = \frac{de_p}{dt} + K_d e_p = -\frac{dP}{dt} + K_d(P^* - P) \quad (6)$$

$$\frac{ds_q}{dt} = \frac{de_q}{dt} + K_q e_q = -\frac{dQ}{dt} + K_q(Q^* - Q)$$

$$\begin{bmatrix} \frac{ds_d}{dt} \\ \frac{ds_q}{dt} \end{bmatrix} = \frac{3}{2L} \begin{bmatrix} -e_{ds} & -e_{qs} \\ e_{qs} & -e_{ds} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{ds} \\ v_{qs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \end{bmatrix} \quad (7)$$

여기서 $\begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{3}{2L} |E_s|^2 + \frac{R}{L} P + \omega_s Q + K_d e_p \\ \frac{R}{L} Q - \omega_s P + K_q e_q \end{bmatrix}$ 이다.

슬라이딩 모드 제어 설계에서 Lyapunov 함수는 양정부호가 되도록 식 (8)과 같이 2차 함수 형태로 설정하고 함수가 영행렬이 아닐 때 그 미분값이 음정부호가 되도록 제어입력을 선정하여 식 (9)와 같이 안정한 시스템을 설계한다.

$$W = \frac{1}{2} s^T s \geq 0 \quad (8)$$

$$V^* = -\frac{2L}{3} U^{-1} (F + K_s \text{sat}(s)) \quad (9)$$

여기서 $U = \begin{bmatrix} -e_{ds} & -e_{qs} \\ e_{qs} & -e_{ds} \end{bmatrix}$, $F = \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \end{bmatrix}$, $K_s = \begin{bmatrix} K_\alpha & 0 \\ 0 & K_\beta \end{bmatrix}$ 이다.

식 (9)에서 안정한 시스템을 위해 $K_d, K_q, K_\alpha, K_\beta$ 는 모두 양의 이득 값을 가지도록 설계한다. 본 논문에서는 $K_d = 8000$, $K_q = 8000$, $K_\alpha = 5000$, $K_\beta = 5000$ 으로 사용하였다.

3. 시뮬레이션

슬라이딩 모드 기반의 직접전력제어기법의 성능을 확인하기 위하여 10kW급 시뮬레이션을 진행하였다. 일반적 전류제어를 하는 경우 그림 2와 같이 유효전력 및 무효전력에 계통 불평형 전압에 의한 리플성분이 존재하지만 그림 3과 같이 직접전력제어를 하는 경우 불평형 전압에 의한 2차 리플성분이 제거된다. 시뮬레이션으로 불평형에 의한 리플을 분석한 결과 유효전력은 약 96%, 무효전력은 약 92% 정도 감소하는 것을 확인하였다.

표 1 10kW급 시뮬레이션 파라미터
Table 1 Simulation parameter of the 10kW wind system

| 계통 측 | |
|------------|--------------|
| 파라미터 | 값 |
| 정격 전력 | 10 [kW] |
| 계통 선간 전압 | 380 [Vrms] |
| DC-link 전압 | 600 [V] |
| 정격 전류 | 15.19 [Arms] |
| 스위칭 주파수 | 2 [Khz] |
| 계통 주파수 | 60 [Hz] |

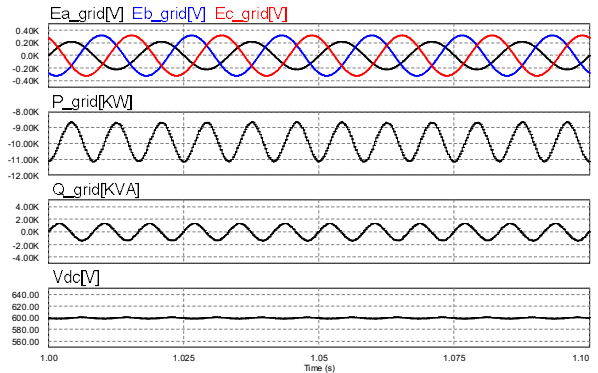


그림 2 일반적인 전류제어기법
Fig 2 General current control method

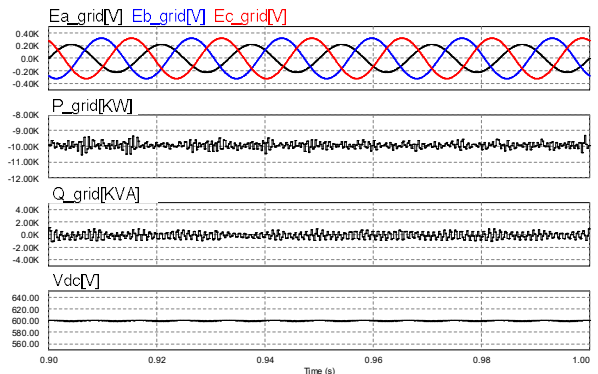


그림 3 직접전력제어기법
Fig 3 Direct power control method

4. 결론

본 논문에서는 계통 불평형 상황에서 슬라이딩 모드 기반의 직접전력제어를 이용한 불평형 제어 기법을 제안하였다. 제안된 제어 기법은 시스템의 전력을 직접 제어하여 동기좌표계 변환없이 빠른 응답특성을 가지며 불평형 제어 성능이 우수하다. 10kW급 계통연계 인버터의 모의 시뮬레이션을 통하여 제안하는 제어기법의 성능을 검증하였다.

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 20100011933).

참고문헌

- [1] V. I. Utkin, "Sliding mode control design principles and applications to electric drives," *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 40, no. 1, pp. 23-36, Feb. 1993.
- [2] 김원상, 심경훈, 이교범, 정병창, 송승호, "슬라이딩 모드 기반의 이중역자 유도형 풍력발전 시스템의 직접전력 제어기법," *전력전자학회 논문지*, 제13권, 제2호, pp.152-162, 2008. 4.
- [3] R. Datta and V. T. Ranganathan, "Direct Power Control of Grid-Connected Wound Rotor Induction Machine Without Rotor Position Sensors," *IEEE Trans. on Power Electronics*, Vol. 16, No. 3, pp. 390-399, May 2001.