

불평형 전압과 계통 임피던스 변화에 강인한 계통연계 인버터의 전류제어 기법

김현수, 김경화[†]
서울과학기술대학교

Robust Current Control Scheme of a Grid-connected Inverter under Unbalanced Voltage and Grid Impedance Variation

Hyun-Sou Kim, Kyeong-Hwa Kim
Seoul National University of Science and Technology

ABSTRACT

분산전원을 계통에 연계하여 운영하는 경우 계통연계 인버터가 사용되며 계통에 주입되는 유효전력과 무효전력의 크기를 조절하기 위해 인버터의 출력전류를 제어하게 된다. 그러나 계통전압이 불평형 상태이거나 계통 임피던스에 변동이 있을 경우 계통연계 인버터의 출력전류 제어 성능이 떨어지는 문제가 발생한다. 본 논문에서는 계통전압의 불평형 상태와 계통 임피던스 변동에 강인한 계통연계 인버터의 새로운 전류제어 기법을 제안한다. 제안된 기법은 외란관측기 기반 제어기를 사용하여 계통전압의 불평형 혹은 계통 임피던스 변화와 같은 외란의 영향을 보상한다. 제안된 기법의 강인성과 성능이 시뮬레이션을 통해 입증된다.

1. 서 론

신재생 에너지를 이용하는 분산전원과 에너지 저장 시스템의 수가 증가하면서 계통연계 인버터가 계통에 연계되는 경우가 빈번해지고 있다. 계통연계 인버터가 계통에 주입하는 전력의 양을 조절하기 위해서는 인버터의 출력전류를 동기좌표계 상에서 제어하게 된다.

그러나 부하의 불평형이나 전력계통의 고장으로 인해 계통전압에 불평형이 나타나는 경우 계통연계 인버터의 출력전류는 제어성능이 저하되는 문제가 발생하며 이러한 문제를 해결하기 위해 계통연계 인버터의 강인한 출력전류 제어 기법이 요구된다^[1]. 또한 계통 임피던스의 변동 역시 계통연계 인버터의 출력전류에 직접적 영향을 주어 이러한 외란의 영향을 제거하기 위한 전류 제어 기법이 요구된다^[2].

최근 시스템에 작용하는 외란의 영향을 제거하기 위해 외란관측기 기반의 제어기를 적용하는 제어기법이 많이 연구되고 있다^[3]. 외란관측기 기반 제어기는 시스템에 입력되는 제어명령과 시스템의 출력 정보를 이용하여 외란을 관측하며 시스템의 출력이 외란으로 인해 왜곡되지 않도록 한다. 계통전압의 불평형과 계통 임피던스의 변동 역시 시스템에 외란으로 작용하며 외란관측기 기반 제어기를 이용하면 계통연계 인버터의 제어에서 그 영향을 효과적으로 제거할 수 있다.

본 논문에서는 계통전압의 불평형과 계통 임피던스의 변동에 대해 강인한 인버터의 전류제어 성능을 달성하기 위해 외란

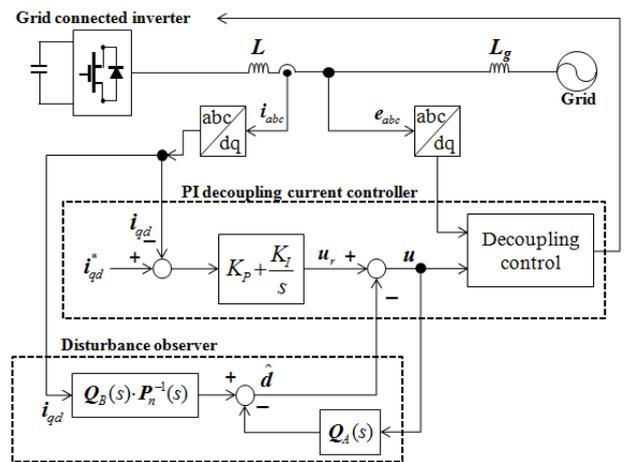


그림 1 제안된 기법의 블록선도

Fig. 1 The block diagram of the proposed control scheme.

관측기 기반의 전류 제어 기법을 제안한다. 제안된 기법의 유용성과 강인성이 시뮬레이션을 통해 입증된다.

2. 제안된 전류제어 기법

그림 1은 제안된 기법의 블록선도를 나타낸다. 계통연계 인버터는 필터를 통해 계통에 전류를 주입하며 이 때 계통의 임피던스에 의해 출력 전류가 왜곡된다. 계통 임피던스는 일반적으로 유도성이며 L_g 는 계통 임피던스에 대응하는 인덕턴스이다^[2]. 출력 상전류 i_a, i_b 및 i_c 와 계통전압 e_a, e_b 및 e_c 를 이용하여 동기좌표계 상에서의 출력전류 $i_{qd} = [i_{qs} \ i_{ds}]^T$ 와 계통전압 $e_{qd} = [e_{qs} \ e_{ds}]^T$ 가 계산된다. i_{qd} 와 출력전류 명령치 $i_{qd}^* = [i_{qs}^* \ i_{ds}^*]^T$ 의 차는 PI 제어기에 입력되어 공칭 제어명령 $u_r = [u_{rq} \ u_{rd}]^T$ 이 계산된다. 공칭 제어명령 u_r 과 외란 관측기로 관측된 외란 $\hat{d}_{qd} = [\hat{d}_q \ \hat{d}_d]^T$ 의 합 $u_{qd} = [u_q \ u_d]$ 은 최종 제어명령이 된다. 최종적으로 제어명령 u_{qd} 에 비결합 제어 입력항을 추가하여 계통연계 인버터의 출력전압 $v_{qd} = [v_{qs} \ v_{ds}]^T$ 가 다음과 같이 구해진다.

[†] 교신저자

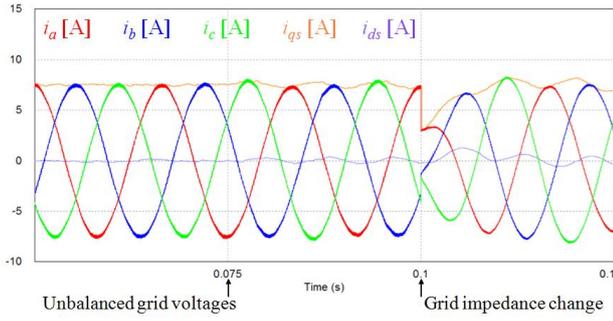


그림 2 기존 제어 기법을 이용한 계통연계 인버터의 출력 전류 파형

Fig. 2 Output currents of the grid-connected inverter with the conventional control scheme

$$v_{qd} = u_{qd} + \begin{bmatrix} 0 & \omega L \\ -\omega L & 0 \end{bmatrix} i_{qd} + e_{qd} \quad (1)$$

여기서 R 과 L 은 각각 필터의 저항과 인덕턴스를 나타낸다.

외란관측기는 계통연계 인버터의 출력전류 정보 i_{qd} 와 제어명령 정보 u_{qd} 를 이용하여 외란 \hat{d}_{qd} 를 추정하며 외란관측기 내부변수 $u^+ = [u_q^+ \ u_d^+]^T$, $\hat{u}_p = [\hat{u}_{p,q} \ \hat{u}_{p,d}]^T$ 와 i_{qd} , u_{qd} 의 관계는 다음과 같다.

$$u^+(s) = Q_A(s)u_{qd}(s) \quad (2)$$

$$\hat{u}_p(s) = Q_B(s)P_n^{-1}(s)i_{qd}(s) \quad (3)$$

여기서 $Q_A(s)$ 와 $Q_B(s)$ 는 대역폭이 ω_B 인 저역통과필터, $P_n(s) = i_{qd}(s)/u_{qd}(s)$ 는 시스템의 모델이다. u^+ , \hat{u}_p 와 \hat{d}_{qd} 의 관계는 다음과 같다.

$$\hat{d}_{qd} = u^+ - \hat{u}_p \quad (4)$$

3. 시뮬레이션 결과

제안된 기법의 성능을 입증하기 위해 계통전압의 변동 및 계통 임피던스의 변화 시 시뮬레이션이 수행되었다. 그림 2와 그림 3은 각각 기존의 방식과 제안된 방식에서의 계통연계 인버터의 출력전류 파형을 나타낸다. q 축 전류명령은 7.5[A], 계통 상전압의 크기는 180[V_{rms}], 계통의 주파수는 60[Hz]이다. 75[ms] 이전의 계통전압은 왜곡되지 않았으나 75[ms] 이후 c 상 전압의 크기는 80%로 감소하였다. 또한 계통 임피던스 변동 시의 출력전류 성능을 확인하기 위해 L_g 의 값을 100[ms]에 3[mH]에서 10[mH]로 증가시켰다. 계통연계 인버터 필터의 저항 크기는 500[m Ω], 인덕턴스는 7[mH]이다.

그림 2는 기존의 제어 기법을 이용한 출력전류 파형을 나타낸다. 75[ms]에 계통전압 불평형이 발생함에 따라 인버터 출력전류가 왜곡된다. 또한 100[ms]에 계통 임피던스가 증가한 경우 전류의 왜곡이 심화되며 순간적으로 전류가 제어되지 않음을 확인할 수 있다.

그림 3은 제안된 기법을 적용한 계통연계 인버터의 출력전

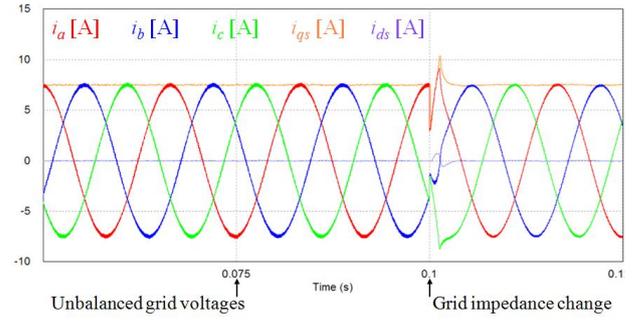


그림 3 제안된 기법이 적용된 계통연계 인버터의 출력전류 파형

Fig. 3 Output currents of the grid-connected inverter with the proposed control scheme

류 파형을 나타낸다. 75[ms]에 계통전압에 불평형이 발생하고 100[ms]에 계통전압의 임피던스가 증가한 경우에도 그림 2의 결과와 달리 인버터의 출력전류에 왜곡 없이 제어가 신속히 이루어짐을 확인할 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 불평형 계통전압 및 계통 임피던스 변동 하에서도 계통연계 인버터의 출력전류를 강인하게 제어할 수 있는 새로운 전류제어 기법을 제시하였다. 제안된 기법은 외란관측기를 기반으로 하여 계통전압의 불평형과 계통 임피던스 변화로 인해 발생하는 외란을 신속히 제거할 수 있다. 시뮬레이션을 통해 제안된 방식이 계통의 외란에 대해 강인한 특성을 가짐을 입증하였다.

이 논문은 2014년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임 (NRF 2012R1A1A2042759).

References

- [1] J. K. Kim, J. H. Lee, H. G. Jeong, and K. B. Lee, "Improvement of Grid Connected Inverter Systems with PR Controllers under the Unbalanced and Distorted Grid Voltage," IEEE Power Electronics and Motion Control Conference, Vol. 2, pp. 1183-1187, Jun. 2012.
- [2] M. Cespedes, and J. Sun, "Adaptive Control of Grid Connected Inverters Based on Online Grid Impedance Measurements," IEEE Transactions on Sustainable Energy, Vol. 5, No. 2, pp. 516-523, Apr. 2014.
- [3] J. Back, and H. Shim, "Adding Robustness to Nominal Output Feedback Controllers for Uncertain Nonlinear Systems: A Nonlinear Version of Disturbance Observer," Automatica, Vol. 44, No. 10, pp. 2528-2537, Oct. 2008.