

단상 가상 동기기의 성능 개선을 위한 외란 관측기 기반 가상 임피던스 설계

허건, 박용순
광주과학기술원

Design of Disturbance Observer Based Virtual Impedance to Improve Performances of Single-Phase Virtual Synchronous Machine

Geon Heo, Yongsoon Park
Gwangju Institute of Science and Technology

ABSTRACT

The performances of a virtual synchronous machine (VSM) are determined not only by its inherent parameters such as the inertia and droop coefficients but also by the output impedance of the inverter. If the output impedance of the inverter is insufficient, the output power of the VSM may have oscillatory behaviors. This paper proposes a method to implement virtual impedance based on a disturbance observer (DOB) for a single-phase VSM. The proposed method can adjust the output impedance of the inverter by using a simple frequency domain DOB. In addition, an output voltage distortion due to nonlinearities of the inverter is also compensated by the DOB. The basic principle and design method of the proposed DOB for implementing virtual impedance are explained in this paper. The effectiveness of the proposed method is validated with the hardware-in-the-loop-simulation (HILS).

1. 서론

기후 위기에 직면한 오늘날, 전 세계적으로 탄소중립을 실천하기 위하여 태양광, 풍력 등 재생에너지 기반 발전을 확대하기 위한 노력이 활발히 이루어지고 있다. 재생에너지 기반 발전원들은 주로 직류 전압을 교류 전압으로 변환해주는 인버터를 통해 계통에 연계된다. 이러한 인버터 기반의 발전원들은 기존의 전력 계통에서 주 발전원 역할을 담당해왔던 대형 동기발전기를 기반으로 하는 화력 발전소들의 자리를 점진적으로 대체하고 있다. 이와 같은 전력 계통의 변화 속에서 발생하고 있는 한 가지 문제는, 계통 주파수를 유지하는 동기발전기의 감소로 인한 계통 관성의 감소이다. 동기발전기의 회전자가 가지고 있는 관성 에너지는 계통 내 발전량 및 부하의 변동으로 인한 계통 주파수의 변화를 억제하는 역할을 수행한다. 그러나, 인버터 기반의 발전원들은 본질적으로 기계적 회전 관성을 지니고 있지 않으며, 전통적으로 MPPT(Maximum Power Point Tracking)와 같은 제어 목적에 따라 계통 조건과 무관하게 출력이 제어되기 때문에 이들의 비중이 확대됨에 따라 계통 주파수의 안정도는 오히려 악화할 수 있다.

위와 같은 문제에 대응하기 위해 주로 연구되고 있는 방법은 계통 주파수의 변화에 반응하여 출력을 능동적으로 제어할

수 있는 제어기법을 인버터 기반 발전원에 적용하는 것이다. 현재 활발히 연구되고 있는 기법들 중 하나는 동기발전기의 기계적 회전 동작 및 제어 방식 등을 모사하는 가상 동기기 기술이다.^[1] 가상 동기기의 출력은 발전기의 관성 반응을 모사하는 스윙 방정식과 부하 분담을 수행하는 드롭 제어에 의해 결정된다. 가상 동기기의 과도 및 정상 상태 응답은 관성과 드롭 상수에 의해 주로 결정되지만, 인버터의 출력단 임피던스 또한 가상 동기기의 응답 특성에 영향을 미친다. 따라서, 가상 동기기들이 동일한 관성 및 드롭 상수를 갖는 경우에도 출력단 임피던스의 크기에 따라 각각의 응답 특성이 달라질 수 있으며, 출력단 임피던스의 크기가 너무 작은 경우에는 안정도에도 영향을 미칠 수 있다. 가상 동기기의 출력단 임피던스의 조정은 가상의 임피던스 모델로부터 계산되는 전압을 전향 보상하여 임피던스 조정 효과를 얻는 가상 임피던스 기술을 통해 이루어질 수 있다.

본 논문에서는 단상 가상 동기기의 성능 개선을 위한 외란 관측기 기반의 가상 임피던스 설계 방법을 제안하고자 한다. 제안하는 방법은 주파수 영역에서 설계되는 간단한 구조의 외란 관측기를 통해 인버터의 출력단 임피던스를 원하는 값으로 조정하는 효과를 얻을 수 있다. 또한, 인버터의 비선형성에 의한 왜곡 전압을 함께 보상하여 정확한 가상 임피던스 구현과 더불어 가상 동기기의 성능을 개선할 수 있다. 외란 관측기의 기본적인 특성과 이를 활용한 가상 임피던스 구현 원리를 설명하고, 그 효과를 HILS(Hardware-In-the-Loop-Simulation) 결과를 통해 검증한다.

2. 외란 관측기 기반 가상 임피던스

2.1 단상 가상 동기기의 응답 특성

그림 1은 단상 가상 동기기의 제어 블록도 및 회로도를 보여준다. 가상 동기기의 주파수 ω_r 및 위상각 θ_r 은 스윙 방정식 및 주파수 드롭 제어에 의해 생성된다. 드롭 상수 D_p 는 정격 주파수 ω_n 과 ω_r 의 차이에 따라 정상 상태에서 출력 유효전력 P_e 를 변화시킴과 동시에 과도 상태에서 댐핑의 역할을 수행한다. 출력 교류 전압 지령 e_r^* 의 진폭 E_r 는 무효 전력 및 전압 드롭 제어에 의해 계산된다. 최종 전압 지령 e^* 는 가상 임피던스 구현을 위해 제안하는 외란 관측기로부터 추정된 외란 \hat{d}_i 이 보상된 후 결정된다.

PWM(Pulse-Width Modulation)을 통한 전압 합성이 이상적

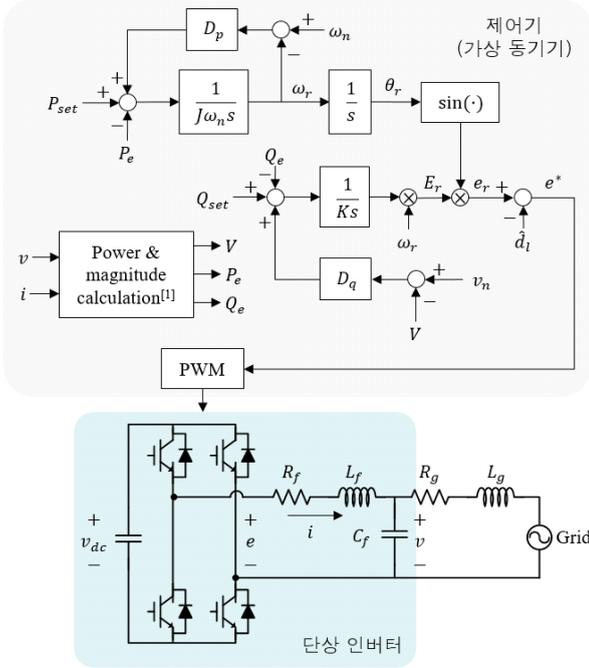


그림 1 단상 가상 동기기의 제어 블록도 및 회로도
Fig. 1 A control block diagram and a circuit diagram of the single-phase virtual synchronous machine

이라 가정고 외란의 영향을 생략하면 인버터의 출력 전압 e 는 전압 지령 e_r 과 같다. 인버터 출력단의 L필터의 저항 성분 R_f 를 무시하고 출력단 임피던스를 $X \approx \omega_n L_f$ 로 근사하면, 단상 가상 동기기의 출력 유효 전력은 다음과 나타낼 수 있다.

$$P_e = \frac{E_r V (\theta_r - \theta_g)}{2X} \quad (1)$$

여기서, V 는 인버터의 연계점 전압 v 의 진폭, θ_g 는 v 의 위상각을 나타낸다. 이때, 가상 동기기의 유효 전력 제어 및 계통 주파수 ω_g 에 대한 동기화 특성을 나타내는 전달함수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$G(s) = \frac{\Delta P_e(s)}{\Delta P_{set}(s)} = \frac{\Delta \omega_r(s)}{\Delta \omega_g(s)} = \frac{\frac{E_r V}{2X J \omega_n}}{s^2 + \frac{D_p}{J \omega_n} s + \frac{E_r V}{2X J \omega_n}} \quad (2)$$

가상 임피던스를 적용하지 않는 경우, 전달함수의 과도 상태 응답 설계를 위해 설정할 수 있는 변수는 식(2)에서 드롭 상수 D_p 와 관성 J 이다. 그러나, D_p 는 정상 상태에서 주파수 편차에 대한 출력 변화를 우선적으로 고려하여 설계될 수 있기 때문에, 이러한 경우 J 만으로는 전달함수의 극점을 자유롭게 배치할 수 없다. 따라서, 가상 임피던스를 통해 X 의 값을 변경할 수 있다면 극점 배치 관점에서 설계 자유도를 확보할 수 있게 된다.

2.2 외란 관측기 기반 가상 임피던스 설계

외란 관측기는 간단한 구조와 강인성으로 인해 여러 응용 분야에서 널리 적용되고 있다. 외란 관측기는 파라미터 오차를 포함한 외란을 추정하여 보상함으로써 제어하고자 하는 플랜트의

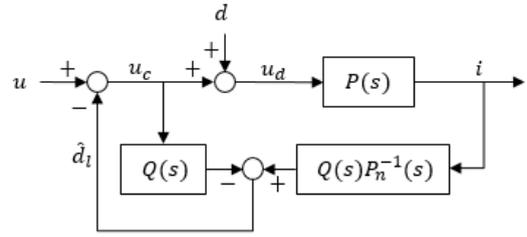


그림 2 가상 임피던스 구현을 위한 외란 관측기 블록도
Fig. 2 A block diagram of the disturbance observer for the implementation of virtual impedance

모델이 설정한 공칭 모델을 추종하도록 한다.^[2] 그림 2는 가상 임피던스 구현을 위한 외란 관측기의 블록도를 보여준다. 그림에서, u 는 L필터에 인가하고자 하는 전위차로 $e_r - v$ 와 같으며, i 는 L필터를 통해 흐르는 인버터의 출력 전류, d 는 외란을 나타낸다. 단상 가상 동기기에서 플랜트 모델은 그림1에 도시된 L필터를 기반으로 다음과 같은 전달함수로 나타낼 수 있다.

$$P(s) = \frac{1}{L_f s + R_f} \quad (3)$$

공칭 모델 $P_n(s)$ 는 실제 임피던스와 가상으로 추가되는 값을 포함하여 목표로 하는 최종 저항 R_{fn} 및 인덕턴스 L_{fn} 에 의해 다음과 같이 결정된다.

$$P_n(s) = \frac{1}{L_{fn} s + R_{fn}} \quad (4)$$

외란 관측기의 외란 추정 성능은 그림 2에서 $Q(s)$ 로 나타낸 Q-필터에 의해 다음과 같이 결정된다.

$$\hat{d}_i(s) = Q(s)d_i(s) \quad (5)$$

일반적으로, 공칭 플랜트 모델의 역 $P_n^{-1}(s)$ 이 improper한 전달 함수로 나타나기 때문에 Q-필터의 차수는 $Q(s)P_n^{-1}(s)$ 가 proper하도록 결정되어야 한다.

외란 관측기를 통해 추정하고자 하는 외란 d_i 는 실제 플랜트 모델과 공칭 모델의 파라미터 오차로 인한 성분과 PWM 과정에서 발생하는 인버터의 비선형성에 의한 왜곡 전압, 그리고 모델링 되지 않은 기타 외란 등을 모두 포함한다. 시간 영역에서 d_i 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$d_i = (R_f - R_{fn})i + (L_f - L_{fn})p i + d \quad (6)$$

여기서, d 는 파라미터 오차에 의한 외란 성분을 제외한 나머지 외란 성분, p 는 미분 연산자를 나타낸다. 출력 전류 i 가 정격 주파수의 정현파이고, d 의 주 성분이 인버터의 비선형성에 의한 왜곡 전압이라 가정하면 d 의 기본파 성분도 정격 주파수에 해당하기 때문에^[3] d_i 의 주 성분 또한 정격 주파수의 정현파로 나타내게 된다. 따라서, 정확한 외란 추정 성능을 확보하고 $Q(s)P_n^{-1}(s)$ 를 proper하도록 하기 위해 Q-필터는 다음과 같이 중심 주파수가 정격 주파수 ω_n 인 2차 대역 통과 필터로 설계될 수 있다.

$$Q(s) = \frac{2\zeta\omega_n s}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (7)$$

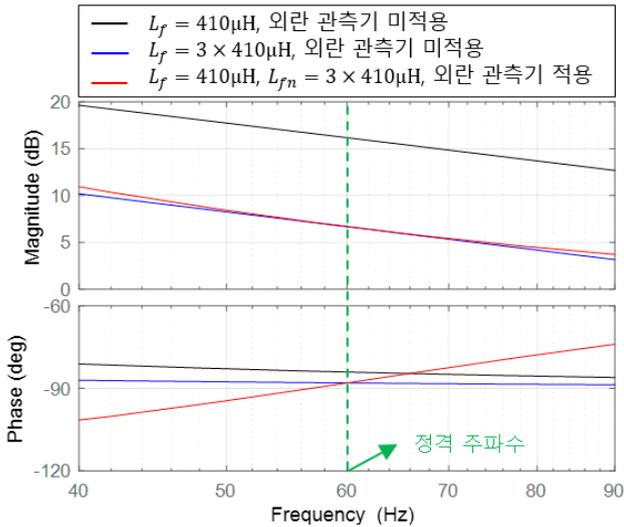


그림 4 가상 임피던스 적용에 따른 플랜트 모델 보드 선도
 Fig. 4 Bode-plots of plant models depending on the application of the proposed virtual impedance

그림 4는 L필터의 인덕턴스 값과 제안된 방법을 통한 가상 임피던스 적용 여부에 따른 플랜트 모델의 보드 선도를 보여준다. 먼저, 가상 임피던스 적용 전 실제 L필터의 값이 $L_f = 410\mu\text{H}$ 에서 $L_f = 3 \times 410\mu\text{H}$ 로 변경되는 경우 정격 주파수에서 플랜트 모델의 이득과 위상이 감소하게 된다. 실제 L필터의 값이 $L_f = 410\mu\text{H}$ 인 경우에 공칭 인덕턴스를 $L_{fn} = 3 \times 410\mu\text{H}$ 로 설정하여 외란 관측기를 적용하는 경우 플랜트 모델은 실제로 $L_f = 3 \times 410\mu\text{H}$ 로 설정한 경우와 정격 주파수에서 동일한 이득 및 위상을 가지게 된다.

3. HILS 결과

그림 5의 HILS 시스템을 사용하여 제안된 가상 동기기의 성능 검증을 수행하였다. 그림 1에 도시된 회로 모델이 실시간 시뮬레이터를 통해 구현되고 제어 알고리즘은 DSP기반의 제어보드에 탑재되어 실시간 시뮬레이션 모델 내의 단상 인버터를 제어한다. 스위칭 주파수는 7.5kHz, 데드-타임은 $2\mu\text{s}$ 로 설정되었다. 가상 동기기의 관성과 드롭 상수는 각각 $J = 0.2\text{kg} \cdot \text{m}^2$, $D_p = S_{rate}/(0.04\omega_n)$ 로 설정하였다. S_{rate} 는 인버터의 정격 전력으로 11.43kVA이며, 계통 전압은 220V/60Hz로 설정하였다.

그림 6(a)는 L필터의 값을 $410\mu\text{H}$ 로 설정한 경우 계통 주파수가 0.2Hz 하락 시 가상 동기기의 출력 유효 전력 파형을 보여준다. L_{fn} 또한 $410\mu\text{H}$ 로 설정되었고, 이 경우 외란 관측기는 비선형성 보상을 수행한다. 출력단 임피던스가 작은 상황에서 인버터의 비선형성에 의한 전압 왜곡의 영향으로 다소 불안정한 출력 특성이 외란 관측기의 적용으로 안정화되는 것을 볼 수 있다. 그림 6(b)는 가상 임피던스 적용을 위해 $L_f = 410\mu\text{H}$, $L_{fn} = 3 \times 410\mu\text{H}$ 으로 설정한 경우와 실제로 $L_f = 3 \times 410\mu\text{H}$ 로 설정한 경우의 유효 전력 비교 결과를 보여준다. 가상 임피던스 적용 시 유효 전력 출력이 실제 L필터의 인덕턴스가 $3 \times 410\mu\text{H}$ 로 설정된 경우와 동일한 파형을 보이므로 제안된 방법을 통해 단상 가상 동기기의 출력단 임피던스를 조정할 수 있음을 확인할 수 있다.



그림 5 Hardware-In-the-Loop-Simulation 시스템
 Fig. 5 A Hardware-In-the-Loop-Simulation system

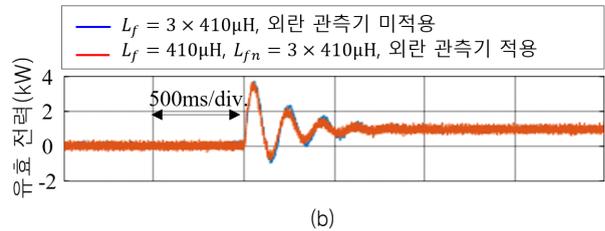
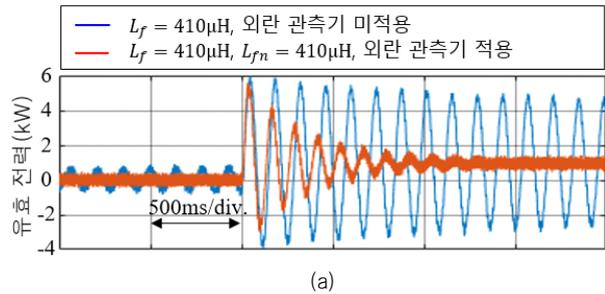


그림 6 계통 주파수 하락 시 단상 가상 동기기 유효 전력 파형 비교:
 (a) 비선형성 보상에 따른 비교, (b) 가상 임피던스 적용에 따른 비교
 Fig. 6 Active power waveforms of single-phase virtual synchronous machine when the grid frequency drop:(a) Comparison of active power waveforms according to inverter nonlinearity compensation Comparison, (b) according to application of virtual impedance

4. 결론

본 논문에서는 외란 관측기를 기반으로 단상 가상 동기기의 출력단 임피던스를 조정할 수 있는 가상 임피던스 설계 방법이 제안되었다. 제안된 방법은 플랜트 모델이 외란 관측기에 사용되는 공칭 모델을 따르도록 함으로써 인버터의 출력단 임피던스를 조정함과 동시에 인버터의 비선형성 보상을 통해 가상 동기기의 성능을 개선할 수 있었다. 제안된 방법의 효과는 HILS를 기반으로 계통 주파수 하락에 대한 가상 동기기의 출력 유효 전력 파형 비교를 통해 검증되었다.

참고 문헌

- [1] J. A. Suul, S. D'Arco and G. Guidi, "Virtual synchronous machine-based control of a single-phase bi-directional battery charger for providing vehicle-to-grid services", IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 52, no. 4, pp. 3234-3244, 2016, Jul./Aug.
- [2] H. Shim, G. Park, Y. Joo, J. Back and N. Jo, "Yet another tutorial of disturbance observer: robust stabilization and recovery of nominal performance", Control Theory Technol., vol. 14, no. 4, pp. 237-249, 2016.
- [3] J.-H. Lee and S.-K. Sul, "Inverter nonlinearity compensation through deadtime effect estimation", IEEE Trans. Power Electron., vol. 36, no. 9, pp. 10684-10694, 2021, Sep.