

독립형 AC 마이크로그리드의 주파수 안정화를 위한 모델예측제어 연구

김대진*, 유경상*, 김찬수*, 남양현*, 윤승진*, 최미곤*, 김병기*

*한국에너지기술연구원 전력시스템연구실

e-mail: djk@kier.re.kr

Model Predictive Control for Frequency Stabilization of islanded AC Microgrids

Dae-Jin Kim*, Kyung-Sang Ryu*, Yang-Hyun Nam*, Seong-Jin Yoon*,

Chan-Soo Kim*, Mi-Gon Choi, Byungki Kim*

Korea Institute of Energy Research*

요 약

탄소 저감을 위해 재생에너지를 연계한 독립형 AC 마이크로그리드가 각광받고 있지만, 디젤 발전기를 중심으로 한 기존 전력 시스템에 비해 주파수 안정성이 낮다는 한계가 있다. 본 연구에서는 재생에너지 출력과 부하의 변동을 외란 관측기(DOB)로 실시간 추정하고, 이를 모델 예측 제어(MPC)의 입력으로 활용해 순간적인 전력 변동 상황에서도 독립형 마이크로그리드의 주파수를 안정적으로 유지하는 기법을 제안한다. 외란 관측기와 MPC는 선형 행렬 부등식(LMI)을 이용해 최적 설계했으며, MATLAB/Simulink 시뮬레이션을 통해 제안 방법의 우수한 주파수 응답과 안정성 향상을 검증하였

1. 서론

환경 개선을 위한 탄소 저감에 대한 인식 확산과 배터리를 포함한 전기 분야의 급속한 성장에 따라 다양한 산업군에서 전기화(Electrification)가 빠르게 진행되고 있다. 이에 따라 전력 수요 증가와 재생에너지 보급 확대가 기존 전력 시스템의 복잡성을 심화시키고 있다. 특히, 독립형 마이크로그리드의 경우, 기존 디젤발전기 중심의 안정적인 에너지 공급 체계에 변동성이 큰 재생에너지가 연계되면서, 전력 시스템의 안정성 유지가 한층 더 어려워지고 있다 [1]. 전력 시스템 내 주파수는 전력 품질과 직결될 뿐만 아니라 전체 시스템 안정성에도 중대한 영향을 미치므로, 반드시 일정 범위 내에서 유지되어야 한다. 그러나 독립형 마이크로그리드는 재생에너지의 불규칙한 출력과 부하의 변동 등 외부 및 내부 요인에 민감하게 반응할 수 있어, 주파수 변동성이 크게 증가할 수 있어, 전력계통의 안정성이 저하될 수 있다. 본 연구에서는 외란 관측기(Disturbance Observer, DOB) 기반 모델 예측 제어(Model Predictive Control, MPC)를 적용하여, 순간적인 발전기 탈락이나 부하 급증 상황에서도 독립형 마이크로그리드의 주파수를 안정적으로 유지하는 제어 기법을 제안한다. 특히, 변동성이 큰 재생에너지 발전량과 부하량을 외란 관측기를 통해 실시간 추정하고, 이를 MPC의 입력으로 활용한다. 또한, 기존 디젤발전기의 드롭 제어(Droop Control)와의 협조 운전을 통해 시스템 안정성을 높이는 방안도 함께 제시한다. 제안한 방법의 유효성은 MATLAB/Simulink를 이용한 시

뮬레이션을 통해 검증하였다.

2. 본론

2.1 시스템 모델링

동기발전기 기반 전력 시스템의 동적 특성은 일반적으로 스윙 방정식(Swing Equation)으로 간략하게 표현할 수 있으며, 이는 식(1)과 같이 간략하게 나타낼 수 있다 [2]. 여기서, J 는 관성계수이고, w 는 회전속도(i.e. 주파수), 그리고 P_m 과 P_e 는 각각 기계적 및 전기적인 출력 값이다. 이것은 기계적 및 전기적 출력 값의 차이의 적분 값이 회전속도를 결정하고, 식(2)와 같이 정리할 수 있다. 전력시스템이 안정된 상태의 초기속도 w_0 의 조건에서, 발전기의 기계적 및 전기적 출력 값 ΔP 가 있다면, Δw 가 추가된 식 (3)으로 표현할 수 있다. 식(1)-(3)을 통해, 전력시스템내의 발전 전력과 소비 전력의 차이가 발생한다면, 주파수를 변화가 발생할 수 있다는 것을 유추할 수 있다.

$$J \frac{dw}{dt} = P_m - P_e \quad (1)$$

$$\Delta P = P_m - P_e, \omega = \int \Delta P dt \quad (2)$$

$$\omega_0 + \Delta \omega = \int \Delta P dt \quad (3)$$

본 연구에서는 독립형 AC 마이크로그리드의 주파수안정화

를 위한 목적으로, 그림 1과 같은 시스템의 구성에 풍력발전기를 추가한다. 따라서, 시스템을 구성하는 각 설비의 미소 구간(Δ)에 대한 출력량 차이에 따른 합을 식(4)와 같이 나타낼 수 있다. 여기서, ΔPM 은 제안하는 방법이 적용될 ESS의 출력량이다. 디젤 발전기의 속도를 조절하는 Speed governor의 이득 K_i 를 포함한 시스템 모델을 식 (5)와 같이 표현하고, 발전기의 로터 시스템 모델을 식 (6)으로 나타낸다. 여기서, 's'는 라플라스 연산자이고, J_r 과 D_r 은 발전기의 과라미터이다.

$$\Delta P = \Delta P_{DG} + \Delta P_{PV} + \Delta P_{WT} + \Delta P_{LOAD} + \Delta P_M \quad (4)$$

$$\Delta P_{SG} = \frac{1}{T_i s + 1} K_i \Delta \omega \quad (5)$$

$$\Delta P_{DG} = \frac{1}{J_r s + D_r} \Delta P_{SG} \quad (6)$$

$$d := \Delta P_{PV} + \Delta P_{WT} + \Delta P_{LOAD} \quad (7)$$

$$G_p(s) = \frac{1}{2Hs + D} \quad (8)$$

변동성이 큰 재생에너지의 발전량과 부하량은 식 (7)과 같이, 외란으로 정의한다. 마지막으로, 독립형 마이크로그리드는 1차 시스템으로 식(8)로 나타낸다 [3]. 식(5)–(8)을 시간 t 에 대해 변환을 통해 식 (9)–(11)로 정리할 수 있다.

$$\frac{d}{dt} \Delta \omega = -\frac{D}{2H} \Delta \omega + \frac{1}{2H} (\Delta P_{DG} + d + \Delta P_M) \quad (9)$$

$$\frac{d}{dt} \Delta P_{SG} = -\frac{1}{T_i} \Delta P_{SG} + \frac{K_i}{T_i} \Delta \omega \quad (10)$$

$$\frac{d}{dt} \Delta P_{DG} = -\frac{D_r}{J_r} \Delta P_{DG} + \frac{1}{J_r} \Delta P_{SG} \quad (11)$$

식(9)–(11)을 이용해서 아래의 식(12)–(13)과 같이 연속시간에 대한 상태공간모델로 나타낼 수 있고, Euler approximation을 활용하여 이산시간에 대한 상태공간모델로 변환할 수 있다.

$$\hat{\mathbf{x}}(k+1) = \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}}(k) + \mathbf{B}\mathbf{u}(k) + \mathbf{B}_d \mathbf{d}(k) \quad (12)$$

$$\mathbf{y}(k) = \mathbf{C}\hat{\mathbf{x}}(k) \quad (13)$$

2.2 외란관측기 설계

외란으로 정의한 변동성이 큰 재생에너지의 발전량과 부하량을 다음의 식 (14)와 같이 상수라고 가정하고, 외란의 추정값을 식 (15)와 같이 출력 추정치의 차이에 따른 외란관측기의 이득의 형태로 나타낸다. 또한, 상태 벡터 $\mathbf{x}$ 의 추정 벡터는 외란의 추정치를 활용하여 식 (16)과 같이 나타내고, 상태 추정 값과 외

란 추정 값의 각각 오차에 대해 식 (17)과 같이 Augmented model로 유도한다.

$$\mathbf{d}(k+1) = \mathbf{d}(k) \quad (14)$$

$$\hat{\mathbf{d}}(k+1) = \hat{\mathbf{d}}(k) + \mathbf{L}_2(\mathbf{y}(k) - \hat{\mathbf{y}}(k)) \quad (15)$$

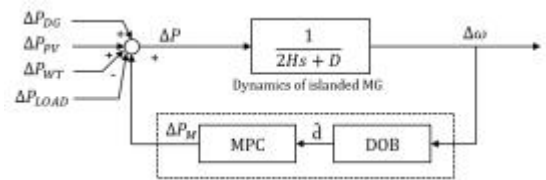
$$\hat{\mathbf{x}}(k+1) = \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}}(k) + \mathbf{B}\mathbf{u}(k) + \mathbf{L}_1(\mathbf{y} - \mathbf{C}\hat{\mathbf{x}}) + \mathbf{B}_d \hat{\mathbf{d}}(k) \quad (16)$$

$$\mathbf{g}(k+1) = [\mathbf{A}_e - \mathbf{L}\mathbf{C}_e]\mathbf{g}(k) \quad (17)$$

$$\mathbf{g}(k) := \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{x}}(k) \\ \hat{\mathbf{d}}(k) \end{bmatrix}, \mathbf{A}_e = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{B}_d \\ \mathbf{0} & \mathbf{I} \end{bmatrix}, \mathbf{L} := \begin{bmatrix} \mathbf{L}_1 \\ \mathbf{L}_2 \end{bmatrix}, \mathbf{C}_e = [\mathbf{C} \quad \mathbf{0}]$$

2.3 모델예측제어기 설계

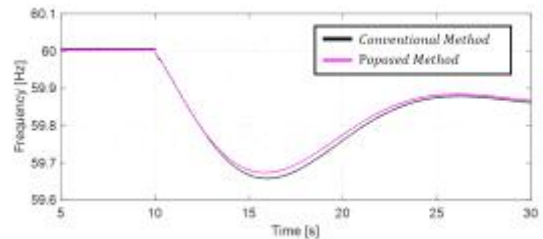
앞장에서 설계한 관측기를 활용하여, 주파수 변화가 없는 정상상태의 x_0 와 정상상태의 제어입력 u_0 를 기준으로 현재 상태 $\mathbf{x}$ 와 제어입력 $\mathbf{u}$ 의 차이가 최소화 되도록 비용함수를 설정하고, 2.2의 외란관측기 설계방법으로 모델예측제어기를 설계한다. 본 연구에서 제안하는 방법을 그림 1와 같이 표현할 수 있다.



<그림 1> 제안하는 외란관측기 기반의 모델예측제어

3. 시뮬레이션 결과

제안하는 방법에 대한 유효성을 검증하기 위해서 MATLAB/SIMUINK를 활용하여 시뮬레이션을 수행한 결과, 디젤발전기 단독으로 전력변동에 대응하는 것 보다 제안하는 방법과 연동하여 운영할 경우, 상대적은 더 낮은 ROCOF를 특성을 확인하였고, 최저주파수(NADIR)도 더 높은 것을 확인할 수 있었다.



<그림 2> 발전량의 급격한 변화에 따른 주파수 변동 결과

4. 결론

본 연구에서는 변동성이 큰 재생에너지가 연계된 독립형 AC 마이크로그리드에서 주파수 안정화를 위한 외란 관측기 기반 모델 예측 제어 기법을 제안하였다. 재생에너지 발전량과 부하 변동을 외란 관측기를 통해 추정하고, 이를 모델 예측 제어의 입력으로 활용하여 순간적인 전력 변동 상황에서도 독립형 마이크로그리드의 주파수를 안정적으로 유지하는 성능을 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

감사의 글

본 연구는 한국에너지기술연구원(KIER)의 기본사업(C5-2421) 및 한국에너지기술평가원(KETEP)의 에너지기술개발사업(RS-2024-00509239)으로 수행한 연구과제의 결과입니다.

참고문헌

- [1] T. Heins, M. Joševski, S. Karthik Gurumurthy and A. Monti, "Centralized Model Predictive Control for Transient Frequency Control in Islanded Inverter-Based Microgrids," in IEEE Transactions on Power Systems, vol. 38, no. 3, pp. 2641–2652, May 2023
- [2] X. He and H. Geng, "Transient Stability of Power Systems Integrated With Inverter-Based Generation," in IEEE Transactions on Power Systems, vol. 36, no. 1, pp. 553–556, Jan. 2021
- [3] T. Kerdphol, F. S. Rahman, Y. Mitani, M. Watanabe and S. K. Küfeoğlu, "Robust Virtual Inertia Control of an Islanded Microgrid Considering High Penetration of Renewable Energy," in IEEE Access, vol. 6, pp. 625–636, 2018