그리드포밍 ESS의 가변이득 가상관성제어

강길현*,**, 김기훈*,**, 고희상*, 강경수*, 좌은진*, 정남조*, 정윤철*, 최영준**
한국에너지기술연구원*, 제주대학교**

Variable Virtual Inertia Control of Grid Forming ESS

Gil-Hyeon Kang*,**, Gi-Hoon Kim*,**, Hee-Sang Ko*, Kyoung-Soo Kang*, Eunjin Jwa*,
Namjo Jeong*, Yoon-Cheul Jeung*, Yeong-Jun Choi**
Korea Institute of Energy Research*, Jeju National University**

ABSTRACT

본 논문에서는 마이크로그리드의 관성을 보상하기 위한 에너지 저장장치의 그리드포밍 제어 기법을 제안한다. 시뮬레이션을 통해 신재생에너지원 출력에 따라 변동하는 관성으로 인한 부하 변동 시 주파수의 응동을 분석하고, 제안하는 기법의 타당성을 검증한다.

1. 서 론

신재생에너지 발전원의 비중이 증가함에 따라, 분산전원에 동기발전기와 같이 전압과 주파수 유지에 기여하는 그리드포밍 기반의 가상 관성을 적용하는 연구들이 주목받고 있다.

그리드포밍에 기여하는 신재생에너지원의 출력 변동에 따라 마이크로그리드의 관성이 증감된다. 마이크로그리드의 관성이 감소되면 부하 변동 시 주파수는 규정된 범위를 벗어날 수 있으며, 증가되면 주파수가 진동하고, 유효전력의 응답성이 나빠진다. 따라서, 관성 상수는 적정한 값으로 선정되어야 할 필요가 있다[1].

본 논문에서는 마이크로그리드의 신재생에너지원 출력 변동에도 불구하고, 주파수 변동을 규정 이내로 유지하면서 에너지 저장장치(ESS, Energy Storage System)의 수수되는 에너지의 양을 절감하기 위한 그리드포밍 제어 기법을 제안하며, PLECS 시뮬레이션을 통해 제안하는 기법을 검증한다.

2. 마이크로그리드 구성 및 동작

그림 1에 본 논문에서 고려한 마이크로그리드 구성도를 보인다. 마이크로그리드는 동기발전기, 태양광 발전, ESS, 부하로 구성된다. 태양광 발전과 ESS는 그리드포밍 제어를 수행하고, 각 구성 요소들은 전력선 임피던스를 통해 PCC로 연계된다. 표 1에 마이크로그리드 파라미터를 보인다.

그리드포밍으로 동작하는 태양광은 일사량에 따라 발전되는 출력이 변하므로 마이크로그리드의 관성에 기여하는 비중 또한 변한다. 이에 따라, ESS는 저장된 에너지를 효율적으로 사용하는 동시에 주파수가 규정 이내로 유지되도록 제어된다.

3. ESS 그리드포밍 제어

3.1 ESS의 그리드포밍 제어

ESS의 주파수와 출력되는 전력의 관계는 식 (1)과 같다[2].

$$P_{ESS}^{*} - P_{ESS} = 2H\frac{d\Delta f}{dt} + D\Delta f \quad (1)$$

여기서, P_{ESS}^{*}은 전력 지령, P_{ESS}는 출력 전력, H는 관성 상수, Δf는 주파수 변화량, D는 부하 댐핑 계수이다. 그리드포밍 제어를 위해서는 전압과 주파수를 동시에 제어해야 한다. 수식 (1)을 바탕으로 그림 2와 같이 ESS의 그리드포밍 제어를 구성할 수 있다. 주파수 제어는 Δf를 0으로 유지하는 주파수 제어(Frequency controller), 동기발전기 특성을 모사하는 가상 관성 제어(Virtual inertia controller)로 구성된다. 전압을 생성하기 위한 제어는 전압 제어기, 전류 제어기로 구성된다. 본 논문에서는 가상 관성 제어의 상수를 가변한다. 전압을 생성하기 위한 제어는 전압 제어기, 전류 제어기로 구성된다.

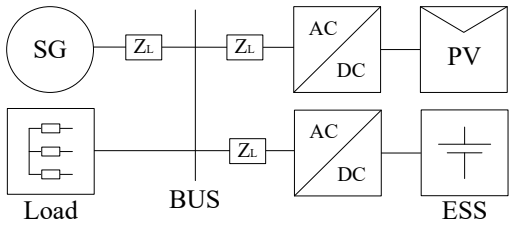

그림 1 마이크로그리드 구성
Fig. 1 Configuration of microgrid

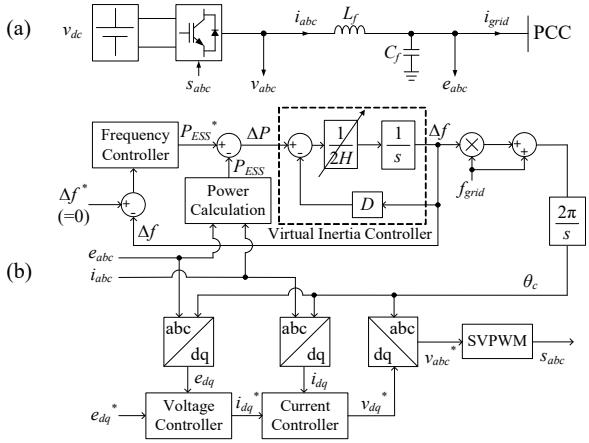

그림 2 그리드포밍 ESS 구성도 (a) ESS 회로도, (b) 제안하는 가변 가상 관성 제어 블록 다이어그램
Fig. 2 Configuration of grid-forming ESS

표 1 마이크로그리드 파라미터
Table 1 Parameters of Microgrid

구분	용량
동기발전기	100 [kW]
태양광 발전	200 [kW]
에너지저장장치	100 [kW]
부하	최대: 200[kW], 최대 변동: 100 [kW]
전력선 임피던스	0.019 [Ω]

3.2 제안하는 가변 이득 가상 관성 제어

전력시스템에서 부하 변동에 대한 주파수의 전달함수는 식 (2)와 같다. 식 (2)에서 부하 변동을 계단 함수로 가정하고, 2차 시스템의 표준형을 고려하면 계통 주파수의 최저점 f_{nadir}를 식 (3)과 같이 구할 수 있다.

$$\frac{\Delta f(s)}{P_d} = -\frac{1}{k_i}\frac{\frac{k_i}{2H_{grid}}s}{s^2+\frac{D+k_p}{2H_{grid}}s+\frac{k_i}{2H_{grid}}} \quad (2)$$

$$f_{nadir} = 60\left(1-\frac{1}{k_i}\omega_n e^{-\frac{\zeta}{\beta}cos^{-1}\zeta}\right) \quad (3)$$

여기서 P_d, H_{grid}, k_p, k_i는 각각 부하 변동, 계통의 관성 상수, 주파수 제어기의 비례 이득, 적분 이득이며, $\omega_n = \sqrt{k_i/2H_{grid}}$, $\zeta = (D+k_p)/(2\sqrt{2H_{grid}k_i})$, $\beta = \sqrt{1-\zeta^2}$ 이다.

식 (3)을 통해 원하는 f_{nadir}를 만족하는 H_{grid}를 구할 수 있다. 본 논문에서는 목표 f_{nadir}를 59.83 [Hz]로 선정하였다. 관성에 기여하는 발전원이 여러 대 있는 경우 H_{grid}는 식 (4)와 같이 정의된다[3].

$$H_{grid} = \frac{\sum H_n S_n}{\sum S_n} \quad (4)$$

여기서 H_n은 n번째 전원의 관성 상수이고, S_n은 n번째 전원의 정격 용량이다.

태양광발전의 출력이 일사량에 따라 변화할 때, 식 (4)를 이용하여 마이크로그리드에서 ESS에 요구되는 관성 상수의 값을 구할 수 있다.

4. 시뮬레이션

그림 3은 일사량이 0.2 [kW/m²]일 때의 응답이다. 그림 3(A)에 보이듯이 제안하는 기법 적용 전에는 부하 변동 시 주파수가 규정을 벗어나는 응답을 보인다. 제안하는 기법 적용 시 주파수 강하는 59.827 [Hz]에 도달 후 회복되는 것을 그림 3(B)에서 확인할 수 있다.

그림 4에 일사량 및 ESS 관성 상수 변화에 따른 계통 주파수의 응답을 보인다. 그림 4(a)와 (b)는 ESS의 관성 상수 H_{ESS}가 각각 2와 21.6으로 고정된 상태의 결과이다. H_{ESS} = 2인 경우 일사량이 작을 때 주파수가 규정치를 벗어나는 모습을 보이며, H_{ESS} = 21.6인 경우 주파수는 규정 범위 내에서 동작하였다. 하지만, 그림 4(d)에서 보이는 바와 같이 제안하는 가변이득 가상 관성 제어를 적용할 경우 에너지 소비량이 각각 7.7, 8.2, 8.7, 7.4, 4.5 [kJ] 절감되었다.

5. 결론

본 논문에서는 마이크로그리드에서 그리드포밍에 기여하는 신재생에너지 발전원의 출력이 변동함에 따라 변화하는 계통의 관성을 보상하기 위해 ESS의 가변이득 가상관성 제어 방법을 제안하였다. 제안하는 기법 적용 시 수수되는 ESS의 에너지가 절감 되고 마이크로그리드의 주파수가 원하는 응답으로 동작하는 것을 시뮬레이션을 통해 확인하였다.

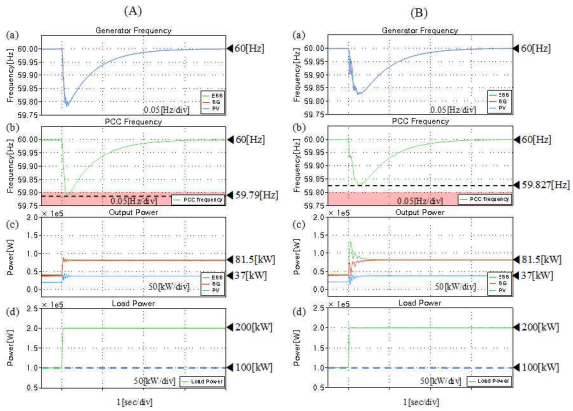

그림 3 부하 변동 시 마이크로그리드의 응답 (일사량: 0.2[kW/m²]) (A) 제안하는 기법 적용 전, (B) 제안하는 기법 적용 후
(a) 발전원 출력 전압 주파수, (b) 계통 주파수,
(c) 발전원 출력 전력, (d) 부하 전력
Fig. 3 Response of microgrid with load change (irradiation: 0.2[kW/m²])

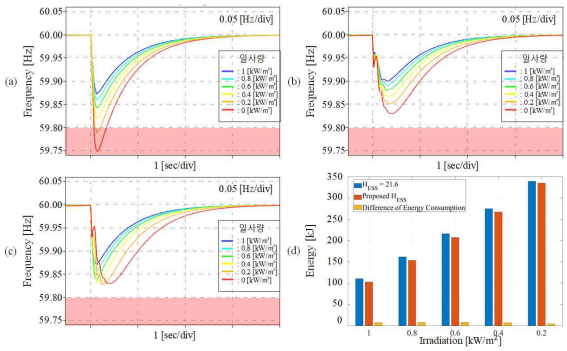

그림 4 일사량 변화에 따른 계통 주파수의 응답
(a) H_{ESS} = 2, (b) H_{ESS} = 21.6, (c) H_{ESS} 가변,
(d) 에너지 소비량
Fig. 4 Response of grid frequency with irradiation variation

이 논문은 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2023-00234707)

참 고 문 헌

[1] M. Li, W. Huang, N. Tai, L. Yang, D. Duan, and Z. Ma, “A Dual-Adaptivity Inertia Control Strategy for Virtual Synchronous Generator”, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 35, No. 1, pp. 594-604, 2020, January.

[2] B. Shakerighadi, N. Johansson, R. Eriksson, P. Mitra, A. Bolzoni, A. Clark, and H. P. Nee, “An Overview of Stability Challenges for Power-Electronic-Dominated Power Systems: The Grid-Forming Approach”, IET Generation, Transmission & Distribution, Vol. 17, Issue 2, pp. 284-306, 2023, January.

[3] T. Kerdphol, F. S. Rahman, M. Watanabe, and Y. Mitani, Virtual Inertia Synthesis and Control: First Edition, Springer Cham, pp. 13-59, 2020.