

BESS-디젤발전기 연계 전류제어의 안정화를 위한 전향보상 성능 검증

조종민, 조현식, 차한주
충남대학교

Performance of Feedforward for Stabilization of Current Control between BESS and Diesel Generator

Jongmin Jo, Hyunsik Jo, Hanju Cha
Chungnam National University

ABSTRACT

본 논문은 BESS 디젤발전기 연계운전 조건에서 BESS의 안정한 전류제어를 수행하기 위해 전향보상 성분을 고려하여 디지털 이론 기반의 전류제어 안정도를 해석하고, 시뮬레이션 및 실험을 통해 검증하였다. 디젤발전기의 동기 인덕턴스가 LCL 필터에 미치는 상호간섭 공진문제를 해석하였으며, 불안정한 전류제어의 안정도 향상을 위해 적절한 이득을 갖는 전향보상을 고려하였다. 또한, BESS 디젤발전기 연계운전 실험을 통해 전향보상 이득이 0.4인 경우 안정한 전류제어가 수행됨에 따라 안정도 해석의 타당성을 검증하였다.

1. 서론

친환경 에너지로써 주목받는 신재생 에너지원과 더불어 배터리 저장장치를 기반으로 하는 BESS(Battery Energy Storage System)로 구성된 분산전원 시스템이 전 세계적으로 확대, 보급됨에 따라 ESS의 안정한 운전기술 개발의 필요성이 크게 부각되고 있다. 독립형 마이크로그리드의 경우, 기본 구성 요소인 BESS와 디젤발전기가 병렬운전을 수행하는 경우에도 안정한 전류제어를 수행해야 한다. 그러나, 스위칭 주파수 리플 저감 효과를 향상시키기 위해 BESS에 적용된 LCL 필터는 디젤발전기의 동기 인덕턴스와의 상호간섭에 의해 필터공진 문제를 악화시키고, 전류제어의 불안정성을 야기할 수 있다. LCL 필터의 공진점에 따라 추가적인 댐핑기법 없이 BESS의 안정한 전류제어를 수행하기 위한 중요 주파수 간의 관계가 존재한다^[1]. 그러나, 동기 인덕턴스에 의해 필터 공진점이 변함에 따라 BESS는 불안정한 제어가 수행될 수 있다. 이와 같은 경우 수동 댐핑이나 능동 댐핑을 통해 공진특성을 저감하는 것이 가능하지만 추가적인 전력손실이 발생하거나 제어 알고리즘의 복잡성이 증가한다. 따라서 기존에 제어기 과도응답특성 향상 및 전원의 백 그라운드 고조파 성분 보상을^[2] 위해 적용된 전향보상 성분이 공진을 저감시키기 위한 역할을 수행할 수 있다.

2. 본문

2.1 BESS 구성 및 디젤발전기 영향

BESS는 그림 1과 같이 에너지를 저장하기 위한 배터리뱅크와 3상 PWM 인버터, 스위칭 주파수 리플 저감을 위한 LCL 필터로 구성되며, 디젤발전기와 연계 운전을 수행한다. 디젤발

전기는 CVCF(Constant Voltage Constant Frequency) 제어를 통해 전압원으로 동작하며, BESS는 전류제어를 통해 배터리뱅크의 SOC(State of Charge)를 충전하는 계통연계형 인버터와 같은 역할로 동작한다.

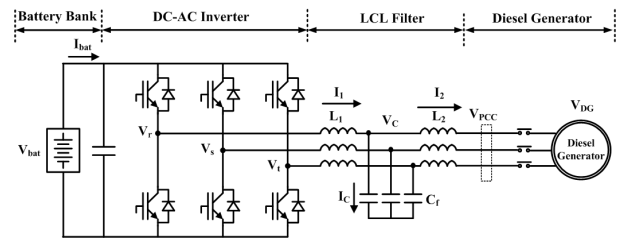


그림 1 BESS 구성 및 디젤발전기 연계운전

Fig. 1 Configuration of BESS and interconnection with diesel generator

표 1에서 L_1 , L_2 , C_f 는 BESS가 포함하는 LCL 필터 파라미터이며, L_{DG} 는 디젤발전기가 포함하는 동기 인덕턴스이다. 식 (1)과 같이 L_{DG} 가 고려되지 않은 경우 필터 공진 주파수는 2.05kHz이지만, L_{DG} 가 고려되어 상호간섭이 발생한 경우에는 928Hz로 공진점이 변하는 것을 알 수 있다.

표 1 시스템 파라미터 및 동기 인덕턴스 유무에 따른 공진 주파수

Table 1 System parameters and resonant frequency with/without synchronous inductance

Parameter	Value	f_{res}	
L_1	1.04mH	2.05kHz	928Hz
L_2	0.23mH		
C_f	32uF		
L_{DG}	7.66mH		

$$f_{res} = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{L_1 + L_2 + L_{DG}}{L_1(L_2 + L_{DG})C_f}} \quad (1)$$

2.2 전향보상을 고려한 BESS 전류제어

그림 2는 전향보상을 고려한 BESS의 전류제어 블록도이며, LCL 필터와 디젤발전기의 동기 인덕턴스를 포함한다. 일반적으로 전향보상은 전류제어의 과도응답속도 향상 및 전원의 백 그라운드 고조파 성분을 보상하기 위해 적용한다. PCC(Point of Common Coupling) 전압이 전향보상 성분으로 적용되는데 동기 인덕턴스 값이 디젤발전기 측 필터 인덕턴스보다 매우 크기 때문에 ($L_{DG} \gg L_2$) 식 (2)의 관계를 적용하면 PCC 전압

은 V_c 전압으로 근사화 될 수 있다. 식 (3)은 시스템 시지연 함수로 디지털 프로세서 및 PWM 모듈레이터에 의한 지연 특성을 포함하며, 식 (4)는 동기 인덕턴스의 상호간섭을 고려한 LCL 필터의 전달함수이다. 전향보상은 이득 K_{FF} 를 적절하게 선정함으로써 전류제어의 안정도를 향상시킬 수 있다. 전류제어는 PI 제어기를 적용하였다.

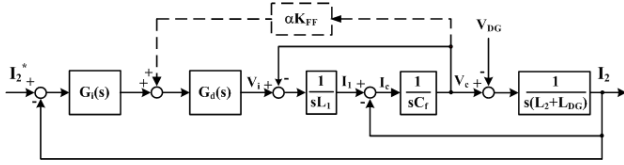


그림 2 전향보상을 고려한 BESS 전류제어 블록도
Fig. 2 Block diagram of current control considering feedforward

$$\alpha = \frac{L_{DG}}{L_2 + L_{DG}} \quad (2)$$

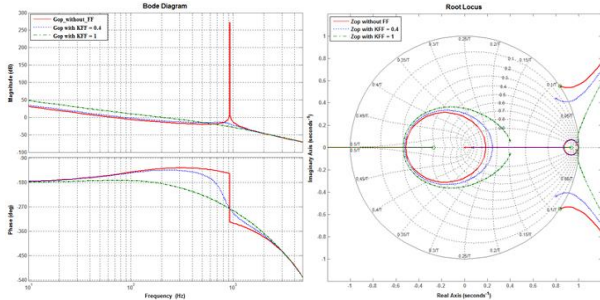
$$G_d = e^{-15T_s s} \quad (3)$$

$$G_{LCL} = \frac{1}{sL_1} \cdot \frac{z_{LC}^2}{s^2 + \omega_{res}^2} \quad (4)$$

$$\omega_{res} = \sqrt{\frac{L_1 + L_2 + L_{DG}}{C_f L_1 (L_2 + L_{DG})}}, z_{LC} = \sqrt{\frac{1}{C_f (L_2 + L_{DG})}}$$

2.3 전향보상 이득 K_{FF} 에 따른 BESS 전류제어

그림 3은 디젤발전기 연계 시 전향보상을 고려한 BESS 전류제어 안정도 해석 결과이다. 그림 3(a)는 주파수 응답특성으로 전향보상이 고려되지 않은 경우로 공진주파수 928Hz에서 이득여유가 없기 때문에 불안정한 전류제어가 수행된다. 전향보상 이득 K_{FF} 가 0.4일 때 위상여유는 33°, 이득여유는 14.5dB로 안정한 전류제어가 가능하지만 K_{FF} 가 1인 경우에는 위상여유와 이득여유가 존재하기 않기 때문에 불안정한 전류제어가 수행된다. 그림 3(b)는 이산시간 응답특성으로 K_{FF} 가 0.4인 경우 K_p 이득이 10.7까지는 단위원 내에 극점이 존재하기 때문에 안정한 전류제어가 가능하지만 전향보상이 고려되지 않거나 K_{FF} 가 1인 경우에는 단위원 내에 극점이 존재하지 않기 때문에 불안정한 시스템이 됨을 알 수 있다.



(a) 주파수 응답특성 (b) 이산시간 응답특성

그림 3 전향보상 이득 K_{FF} 에 따른 전류제어 안정도
Fig. 3 Stability of current control according to feedforward gain K_{FF}

2.4 시뮬레이션 및 실험

그림 4는 전향보상 이득에 따른 BESS 전류제어 Psim 시뮬레이션 결과이다. 그림 4(a)는 전향보상 이득 K_{FF} 가 0.4인 경우이며, 3상전류가 안정하게 제어되고 있음을 알 수 있다. 그림 4(b)는 K_{FF} 가 1인 경우로 3상전류의 왜곡이 심하며 불안정한

전류제어가 수행되며, PCC 지점의 전압도 왜곡이 발생함을 알 수 있다. 전류제어 안정도 해석과 동일한 시뮬레이션 결과를 확인할 수 있다.

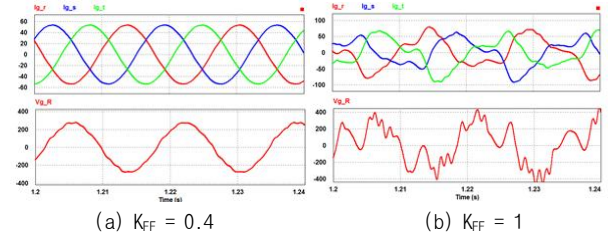


그림 4 전향보상 이득에 따른 전류제어 시뮬레이션
Fig. 4 Simulation of current control according to feedforward gain K_{FF}

그림 5는 전향보상 이득에 따른 BESS 디젤발전기 연계운전 실험결과 파형이다. 그림 5(a)는 K_{FF} 가 0.4일 때 실험결과로써 시뮬레이션과 동일하게 안정한 전류제어가 수행됨을 확인할 수 있다. 그러나, 그림 5(b)와 같이 K_{FF} 가 1인 경우에는 전류의 왜곡이 심하고 불안정한 전류제어가 수행되며 PCC 지점의 전압 또한 왜곡됨을 알 수 있다. 전향보상 이득에 따른 전류제어 안정도 해석과 동일한 실험결과를 도출하였다.

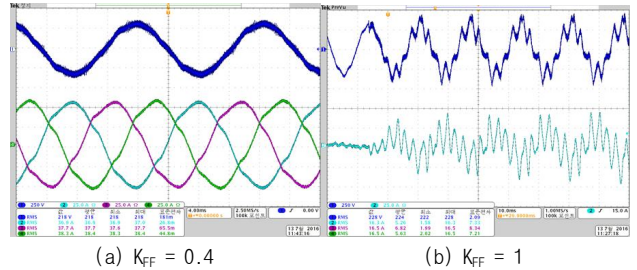


그림 5 전향보상 이득에 따른 전류제어 실험
Fig. 5 Experiments of current control according to feedforward gain K_{FF}

3. 결론

본 논문은 BESS 디젤발전기 연계운전 조건에서 BESS의 안정한 전류제어를 수행하기 위해 전향보상 성분을 고려하여 전류제어 안정도를 해석하고, 시뮬레이션 및 실험을 통해 검증하였다. 디젤발전기의 동기 인덕턴스는 LCL 필터와의 상호간섭으로 인해 불안정한 전류제어를 야기하였으며, 적절한 이득 K_{FF} 를 갖는 전향보상으로 전류제어 안정도가 향상될 수 있음을 해석하였다. 또한, 전향보상 이득 K_{FF} 가 0.4인 경우 전류제어 안정도가 향상되는 해석 결과를 기반으로 BESS 디젤발전기 연계운전 시뮬레이션 및 실험을 통해 검증하였다.

참고 문헌

- [1] 조종민, 이태진, 윤동현, 차한주, "LCL 필터를 사용하는 계통연계형 인버터의 동기좌표계 PI 전류제어 안정도 해석", 전력전자학회 논문지, 제21권, 제2호, 168-174, 2016. 4
- [2] X. Wang, X. Ruan, S. Liu, C. K. Tse, "Full Feedforward of Grid Voltage for Grid Connected Inverter With LCL Filter to Suppress Current Distortion Due to Grid Voltage Harmonics", IEEE Trans., Power Electronics, vol. 25, No. 12, pp 3119-3127, Dec. 2010.