BESS-디젤발전기 연계운전의 안정도 향상기법 비교 해석

조종민, 차한주
충남대학교 전기공학과

Comparative Analysis for Stability Improvement of BESS and Diesel Generator Operation

Jongmin Jo, Hanju Cha
Department of Electrical Engineering, Chungnam National University

ABSTRACT

본 논문은 독립형 마이크로그리드에서 BESS와 디젤발전기 연계운전 시, LCL 필터와 상호간섭에 의해 전류제어에 영향을 미치는 디젤발전기의 동기인덕턴스를 고려한 전류제어 안정도를 해석하고, 시뮬레이션과 실험을 통해 검증하였다. BESS-계통 연계, BESS-디젤발전기 연계 및 댐핑기법이 적용된 BESS-디젤발전기 연계에 대한 3가지 운전조건에서 이산시간 영역의 근궤적법을 이용한 전류제어 안정도를 비교하고 해석하였다. 50kW BESS와 디젤발전기로 구성된 시뮬레이션 및 실험을 통해 검증하였으며, 실험결과로부터 전류 THD는 2.2%로 안정한 전류제어를 수행하였다.

1. 서론

마이크로그리드는 에너지 효율성의 최적화 및 에너지 관리 신뢰성 향상 등과 같은 다양한 장점을 기반으로 현재 국 내외적으로 기존 전력망을 대체할 차세대 전력인프라 시스템으로써 각광받고 있다. 특히, 도서 지역에 적용되는 독립형 마이크로그리드는 기존 전력망과 분리된 소규모 분산전원 시스템으로써, BESS(Battery Energy Storage System)를 기반으로 태양광, 풍력 등 신재생에너지원을 이용해 수용가 부하에 전력을 공급한다. 또한, 신재생에너지는 기후나 날씨에 대한 의존도가 높아 발전량이 일정치 않으므로 디젤발전기 연계의 필요성이 요구된다. 상황에 따라 디젤발전기는 BESS를 대신해 주 전원으로 동작할 수 있으며, 배터리 뱅크의 SOC(State Of Charge)가 부족한 경우 이를 충전하는 전원 역할을 수행한다. 그러나, BESS와 디젤발전기가 연계운전을 하는 경우 디젤발전기의 큰 동기 인덕턴스는[1] 스위칭 주파수 리플저감 효과를 높이기 위해 적용된 LCL 필터와 상호간섭으로 인해 필터 공진주파수를 변화시킴으로써 전류제어를 불안정하게 만드는 요인이 될 수 있다. 따라서, 전류제어 안정도 향상을 위해서는 필터공진을 저감하기 위한 추가적인 댐핑기법[2] 및 전류제어의 안정도를 보장하기 위한 해석의 필요성이 요구된다.

2. BESS-디젤발전기 연계운전 및 안정도 해석

2.1 BESS-디젤발전기 연계운전 구성

그림 1은 독립형 마이크로그리드에서 BESS와 디젤발전기의 연계운전을 위한 구성을 보여준다. 디젤발전기는 배터리 뱅크의 SOC를 충전하기 위해 전압 및 주파수 제어를 수행하므로 동기 인덕턴스 L_{DG}를 포함하는 전압원으로 동작한다. BESS는 계통 측 전류 I_2 제어를 수행하고, 전류에 포함된 스위칭 주파수 리플저감 특성을 향상시키기 위해 LCL 필터를 적용하였다. 디젤발전기의 동기 인덕턴스 L_{DG}는 BESS와 연계운전을 하는 경우 LCL 필터 공진주파수를 낮은 주파수 영역으로 이동시키며, 전류제어의 불안정성을 야기하는 원인이 될 수 있으므로 필터 커패시터에 직렬저항(R_d)을 연결한 수동댐핑 기법을 적용하였다. 표 1은 시스템 파라미터를 보여준다. L_{DG}에 의해 LCL 필터 공진주파수는 2.05kHz에서 928Hz로 낮아진다.

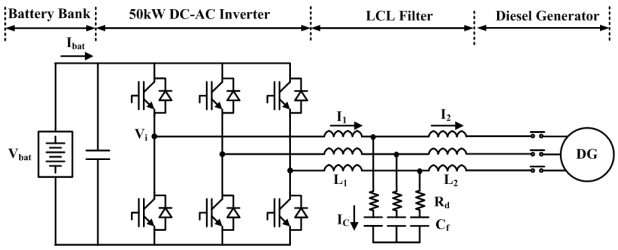


그림 1 BESS-디젤발전기 연계운전 구성
Fig. 1 Configuration of interconnected operation between BESS and diesel generator

표 1 시스템 파라미터
Table 1 System parameters

Parameter		Value
L_1	인버터 측 필터 인덕터	1.04mH
L_2	계통 측 필터 인덕터	0.23mH
C_f	필터 커패시터	32uF
L_{DG}	디젤발전기 동기 인덕터	7.66mH

2.2 BESS 전류제어 모델

그림 2는 디젤발전기의 동기 인덕턴스 L_{DG}를 고려한 경우 수동댐핑 기법을 적용한 BESS 전류제어 모델이다. 전류제어기 $G_c(s)$는 기본파 제어 및 6차 고조파를 보상하기 위해 PI+R 제어기가 적용되었으며, $G_d(s)$는 $1.5T_s$ 시스템 시지연을 나타내는 함수로써 각각 식 (1), (2)와 같다. 식 (3)은 L_{DG}를 고려할 때 수동댐핑을 적용하지 않은 경우 인버터 출력전압에 대한 계통 전류의 관계를 나타내는 LCL 필터 전달함수이며, 식 (4)는 수동댐핑을 적용한 LCL 필터 전달함수이다. 저항 R_d의 최소값은 식 (5)와 같으며, 저항에 의한 전력손실은 무시할 수 있다.

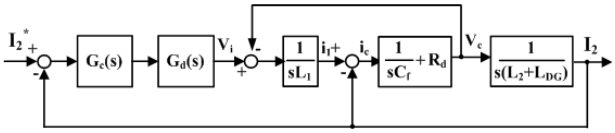


그림 2 디젤발전기 동기 인덕턴스를 고려한 전류제어 모델

Fig. 2 Current control modeling considering synchronous inductance of diesel generator

$$G_c(s) = K_p\left(\frac{s\,T_i+1}{s\,T_i}\right)+\frac{K_r\omega_c s}{s^2+2\omega_c s+(6\omega_0)^2} \quad (1)$$

$$G_d(s) = e^{-1.5T_s s} \quad (2)$$

$$G_{LCL} = \frac{1}{sL_1}\cdot\frac{z_{LC}^2}{s^2+\omega_{res}^2} \quad (3)$$

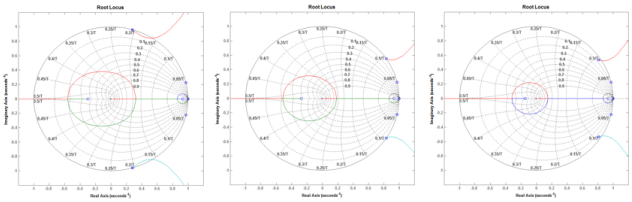
$$\omega_{res}=\sqrt{\frac{L_1+L_2+L_{DG}}{C_f L_1(L_2+L_{DG})}},\ z_{LC}=\sqrt{\frac{1}{C_f(L_2+L_{DG})}}$$

$$G_{LCL_PD} = \frac{1}{sL_1}\cdot\frac{\frac{R_d}{(L_2+L_{DG})}s+z_{LC}^2}{s^2+C_f R_d\omega_{res}^2 s+\omega_{res}^2} \quad (4)$$

$$R_{dmin}=\frac{L_2 f_s}{12\pi^2 L_1 C_f f_{res}^2} \quad (5)$$

2.3 BESS-디젤발전기 연계 전류제어 안정도 해석

그림 3은 근궤적을 이용한 BESS 전류제어 안정도 해석 결과이다. 주파수 영역 전달함수인 식 (1)~(4)를 Tustin, Zero Order Hold 방식을 이용해 이산시간 전달함수로 변환하고, 제어기 이득변화에 대한 특성방정식의 극점변화를 통해 전류제어의 안정도를 판별하였다. 그림 3(a)는 디젤발전기를 고려하지 않은 BESS-계통 운전조건으로, K_p 이득 변화에 대한 안정도 결과이다. LCL 필터 공진주파수는 2.05kHz이며, 안정한 전류제어가 가능한 영역이 존재한다. 그러나, 그림 3(b)와 같이 BESS-디젤발전기 연계운전 조건의 경우에는 L_{DG}의 영향에 의해 공진주파수는 928Hz로 낮아지고, 공진극점은 K_p 이득변화에 관계없이 단위원 밖에 존재하므로 불안정한 전류제어 특성을 갖는 것을 확인할 수 있다. 그림 3(b)에서 전류제어 안정도를 향상시키기 위해 수동댐핑 기법을 적용한 그림 3(c)의 경우에는 L_{DG}가 고려되었음에도 필터 공진댐핑을 위한 저항 R_d 때문에 초기 공진극점의 위치를 단위원 안으로 이동시키며, 안정한 전류제어가 가능한 영역이 존재하는 것을 알 수 있다.



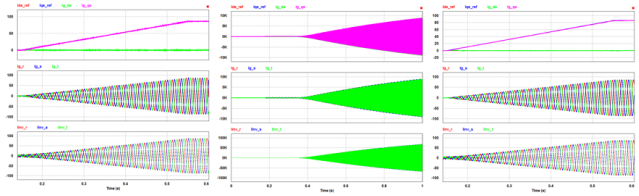
(a) (b) (c)

그림 4 Root locus를 이용한 전류제어 안정도 해석

Fig. 3 Analysis of current control stability using root locus

2.4 시뮬레이션 및 실험결과

그림 4는 Psim을 이용한 BESS 전류제어 시뮬레이션 결과파형이다. 그림 4(a)는 BESS-계통 연계운전 조건으로, 공진주파수는 2.05kHz이며, 안정도 해석과 동일하게 40kW 용량 전류제어 수행 시 수동댐핑 없이 60Hz 주파수를 갖는 안정한 전류제어가 수행됨을 확인할 수 있다. 그림 4(b)는 BESS-디젤발전기 연계운전 시뮬레이션 결과로써 928Hz의 공진주파수로 3상 전류는 발산함에 따라 불안정한 전류제어가 수행됨을 알 수 있다. 그림 4(c)는 BESS-디젤발전기 연계운전 시, 수동댐핑 기법을 적용한 시뮬레이션 결과파형이다. 그림 4(b)와 달리 60Hz 주파수를 갖는 안정한 전류제어를 수행함으로써 근궤적을 이용한 안정도 해석과 동일한 결과를 얻음을 알 수 있다.



(a) (b) (c)

그림 4 디젤발전기 동기 인덕턴스를 고려한 전류제어 모델

Fig. 4 Configuration of interconnected operation between BESS and diesel generator

그림 5는 BESS-디젤발전기 연계운전 시, 수동댐핑을 적용한 3상 전류 실험결과 파형이다. L_{DG}의 영향에 의해 공진주파수가 928Hz임에도 불구하고 과도상태 구간에서 공진영향 없이 정상상태까지 안정하게 증가하고 있으며, 정상상태 구간에서도 60Hz 주파수를 갖는 안정한 전류제어가 수행되고 있음을 확인할 수 있다. 전류 THD는 2.2%이다. 전류제어 안정도 해석 및 시뮬레이션과 동일한 실험결과 파형을 도출하였다.

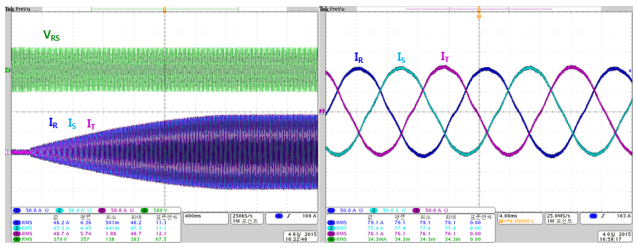


그림 5 수동댐핑이 적용된 BESS-디젤발전기 연계운전 실험결과

Fig. 5 Experimental result of operation between BESS and diesel generator with passive damping

3. 결론

본 논문은 독립형 마이크로그리드에서 BESS와 디젤발전기 연계운전 시, 디젤발전기의 동기 인덕턴스가 LCL 필터공진에 미치는 영향을 고려한 전류제어 안정도를 이산시간 영역에서 해석하였다. BESS-계통 연계, BESS-디젤발전기 연계 및 댐핑 기법이 적용된 BESS -디젤발전기 연계에 대한 3가지 운전조건에서 전류제어 안정도를 비교하고 해석하였다. 50kW BESS와 디젤발전기로 구성된 시뮬레이션 및 실험을 통해 안정도 해석과 동일한 결과를 도출하였으며, 실험결과로부터 전류 THD는 2.2%로 안정한 전류제어를 수행하였다.

참 고 문 헌

[1] 이우종, 이학주, 차한주, “50kW 계통연계형 디젤발전기의 모델링 및 실험”, 전기학회논문지, 제63권, 제10호, 1347-1353, 2014. 10

[2] R. P. Alzola, M. Liserre, F. Blaabjerg, R. Sebastian, J. Dannehl, and F. W. Fuchs. “Analysis of the Passive Damping Losses in LCL-Filter-Based Grid Converters”, IEEE Trans. Power Electronics, vol. 28, no. 6, pp. 2642-2646, June. 2013