

# 회전자 속도와 주파수 편차에 따라 변하는 가변게인을 이용한 플라이휠 에너지 저장장치의 주파수 제어

이혜원\*, 나운기\*\*, 김종훈\*  
충남대학교\*, 캘리포니아 주립대학교\*\*

## Frequency control of flywheel energy storage system based on a variable gain depending on the rotor speed and frequency deviation

Hyewon Lee\*\*, Woonki Na\*\*, Jonghoon Kim\*  
Chungnam National University\*, California State University\*\*

### ABSTRACT

Flywheel energy storage system (FESS) operates motor or generator by utilizing the stored kinetic energy in the rotating mass. Thus, the FESS can support the frequency control of the power system. However, the FESS is disabled when the rotor speed reaches to its minimum value. Thus, the second frequency dip occurs in the power system. This paper proposes the frequency control scheme of FESS based on a variable gain depending on the rotor speed and frequency deviation. The proposed scheme prevents the second frequency dip because the variable gain decreases depending on the stored in the FESS. The performance of the proposed scheme is investigated for the IEEE 14 bus system.

### 1. 서론

신재생에너지의 수용률이 증가함에 따라 전력망의 안정도 향상을 위해 다양한 종류의 에너지저장장치들의 계통에 연계되어 전력망 주파수제어에 참여하고 있다.

에너지저장장치는 크게 화학 기반의 저장장치와 기계식 기반의 저장장치로 나뉜다. 리튬 이온 배터리 또는 납축전지와 같은 화학기반의 저장장치의 경우 빠른 충전/방전 특성을 가지고 있어 신재생에너지원의 출력변동 시 발생하는 주파수 변동을 제어하는데 용이하다. 하지만 SOC(State of Charge) 추정 성능에 따라 BMS(Battery Management System) 성능이 달라지고 충전/방전 횟수가 증가할수록 배터리 수명이 단축되며 자가 방전률이 높다는 단점이 있다. 반면 플라이휠의 경우 기계식 기반의 저장장치로써 기존의 화학기반의 배터리와 달리 수명이 길고 낮은 자가 방전을 가지며, 회전자속도를 측정함으로써 SOC를 추정할 수 있다는 장점이 있다<sup>[1]</sup>.

플라이휠 에너지 저장장치(Flywheel Energy Storage System, FESS)를 이용한 기존 주파수 제어 방법은 고정게인을 이용한 드롭제어로써 능동적으로 주파수 제어에 참여하지 못한다는 단점이 있다. 또한 회전자 속도가 최저 회전자속도 이하로 감소하면 제어 기능을 멈춰야하기 때문에 2차 주파수 하락이 발생할 수 있다. 본 논문에서는 기존의 주파수 제어 방법이 갖고 있는 단점들을 극복하기 위해 FESS의 회전자속도에 따라 변하는 가변게인을 이용한 주파수 제어 방법을 제안하였다. 제안한 방법의 성능검증을 위해 PSCAD/EMTDC를 이용한

IEEE 14 bus 시스템을 모델링하였고, 다양한 외란(발전기 탈락, 부하변동)이 발생하는 조건에서 검증하였다.

### 2. FESS의 구조 및 제어모드

#### 2.1 FESS의 구조

그림 1은 FESS의 구조를 나타낸다. FESS는 회전체인 디스크와 제어를 담당하는 MSC(Machine Side Converter), GSC(Grid Side Converter)로 구성되어 있다. 회전체에 저장되는 운동에너지( $E$ )는 식 (1)과 같다.

$$E = \frac{1}{2} J \omega_r^2 \quad (1)$$

$J$ 는 관성 모멘트이고  $\omega_r$ 은 회전자 속도로 FESS에 저장되는 운동에너지는  $\omega_r$ 의 제곱에 비례한다.

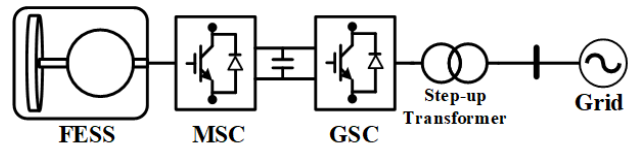


그림 1 플라이휠 에너지 저장장치  
Fig. 1 Flywheel Energy Storage System

#### 2.2 FESS의 제어 모드

FESS는 3 가지의 제어모드(정출력, 정토크, 드롭제어)로 동작한다. 정출력 제어모드는 FESS의 정격출력으로 유효전력을 계통에 공급한다. 정토크 제어모드는 FESS의 토크를 정격토크로 유지한다. 드롭제어는 도기기의 드롭제어와 유사한 방식으로 고정된 기율기를 갖고 전력망의 주파수 편차를 입력받아 출력을 제어한다. FESS의 출력 및 토크를 제어할 때 최저회전자속도 이하로 회전자 속도가 감소할 경우 출력을 0으로 제어한다. 이는 전력망 입장에서 2차 외란으로 받아들여 질 수 있다.

외란이 발생할 때 전력망의 주파수 안정도를 유지하기 위해서는 주파수 변동에 따라 출력을 제어해야 한다. 뿐만 아니라 전력망의 주파수가 회복되기 전까지 2차 주파수 하락이 발생하지 않도록 FESS의 회전자 속도를 고려한 제어가 필요하다.

### 3. 제안한 FESS의 주파수 제어 방법

본 논문에서는 2차 주파수 하락 방지를 위해 드롭제어의 개념을 FESS의 회전자 속도와 전력망 주파수 편차( $\Delta f$ )에 따라 달라지는 변동계인을 적용한 주파수 제어 방법을 제안한다. 제안한 방법에 따라 산정되는 출력 기준값( $P_{ref}$ )은 식 (2)와 같다.

$$P_{ref} = \begin{cases} (20\Delta f + 5.6) \left( \frac{\omega_r - \omega_{min}}{\omega_{max} - \omega_{min}} \right) & (\Delta f \geq 0.02 \text{ Hz}) \\ P_{rated} & (\Delta f < 0.02 \text{ Hz}) \end{cases} \quad (2)$$

$\omega_{min}$ 과  $\omega_{max}$ 는 각각 최저/최대 회전자 속도이고  $P_{rated}$ 는 FESS의 정격출력이다.

제안한 방법은 외란발생 후 주파수가 하락하는 초기( $\Delta f < 0.02 \text{ Hz}$ )에 정격으로 출력함으로써 주파수의 하락을 방지한다. 그리고  $\Delta f$ 가 0.02 Hz 이상 일 때에는 회전자 속도와  $\Delta f$ 에 따라 변하는 출력을 갖게 함으로써 2차 주파수 하락을 방지한다. 따라서 회전자 속도가 최저 회전자 속도에 도달하기 전까지 지속적으로 유효전력을 출력하고 최저 회전자 속도에 도달하였을 때  $P_{ref}$ 를 0으로 산정함으로써 2차 주파수 하락을 방지한다.

### 4. 모델시스템

제안한 방법의 성능검증을 위해 그림 2와 같은 IEEE 14 bus 모델시스템을 PSCAD/EMTDC를 이용하여 구현하였다. FESS는 Bus 2에 연계하였고 정격용량은 6 MW이다. Bus 1은 Slack bus이고 동기조상기는 Bus 3, 6, 8에 연계하였다.

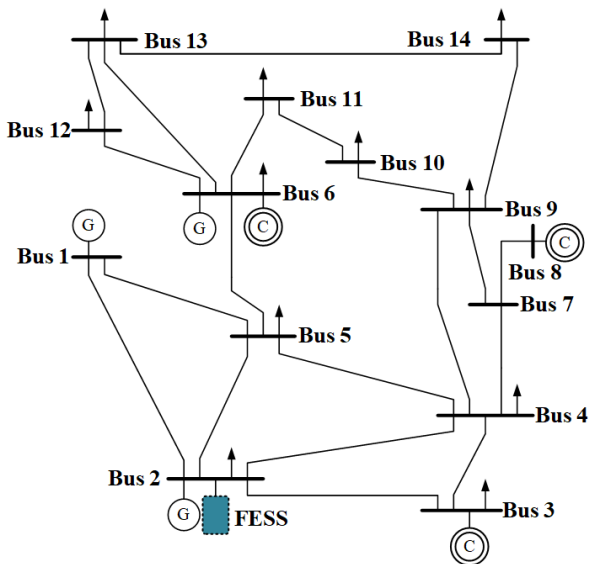
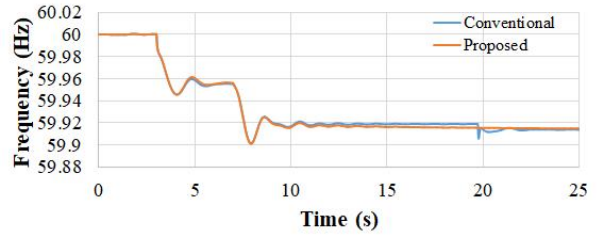


그림 2 IEEE 14-bus 모델시스템  
Fig. 2 IEEE 14-bus Model System

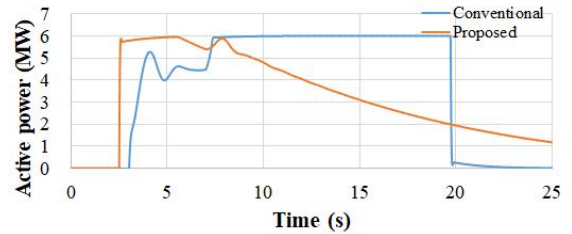
### 5. 사례연구

제안한 방법의 성능 검증을 위해 3 초에 Bus 2에 접속되어 있는 동기(50 MW)가 탈락하고 7 초에 부하(45 MW)가 계통에 연계되는 사례를 구성하였다. 3 가지 제어모드와 제안한 방법의 주파수 제어 성능을 비교하였다.

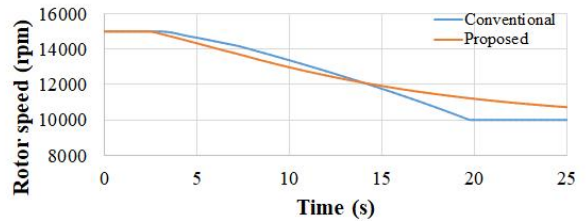
그림 3은 사례연구 결과를 나타낸다. 그림 3(a)는 주파수를 나타낸다. 3 초, 7 초에 외란이 발생하여 주파수가 하락하였다. 주파수 하락을 방지하기 위해 기존 방법과 제안한 방법은 그림 3(b)와 같이 유효전력을 출력하였다. 제안한 방법의 경우 주파수 하락 초기에 정격으로 출력하고 일정 주파수 편차 이후 출력이 감소하였다. 반면에 기존 방법은 지속적으로 큰 출력을 방출하였다. 이에 따라 그림 3(c)의 기존 방법의 회전자 속도가 20 초에 최저 회전자 속도에 도달하여 2차 주파수 하락을 유발하였다. 제안한 방법의 경우 회전자 속도가 감소함에 따라 출력을 감소시키기 때문에 2차 주파수 하락이 발생하지 않았다.



(a) 주파수



(b) 출력



(c) 회전자 속도

그림 3 사례연구 결과

Fig. 3 Results for Case Study

### 6. 결론

본 논문은 2차 주파수 하락을 방지하기 위해 FESS의 출력을 회전자 속도와 주파수 편차에 따라 다르게 산정하는 주파수 제어 방법을 제안하였다. 제안한 주파수 제어방법은 외란 발생 이후 출력 기준값을 회전체에 저장되어 있는 운동에너지를 고려하여 산정함으로써 2차 주파수 하락을 방지하였다.

본 연구는 한국전력공사의 2016년 선정 기초연구개발과제 연구비에 의해 지원되었음 (과제번호 R17XA05 55)

### 참고 문헌

[1] A. A. K. Arani, H. Karami, G. B. Gharehpetian, and M. S. A. Hejazi, "Review of Flywheel Energy Storage Systems structures and applications in power systems and microgrids", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 69, pp. 9 18, 2017