

## ESS 도입에 의한 우도 전력계통 운영방안

An Operation Strategy of Udo Island Power System with the  
Introducing ESS이도현\* · 김일환\*\*† · 김호민\*\*\* · 오성보\*\*\*\* · 이승민\*\*\*\*\*  
DOHEON-LEE\*, Eel-Hwan Kim\*\*†, Ho Min Kim\*\*\*, Sung-Bo Oh\*\*\*\*  
and SEUNGMIN-LEE\*\*\*\*\*

Received 4 May 2015; accepted 22 June 2015

**Abstract :** This paper presents a solution by introducing energy storage system(ESS) to solve an annual blackout due to a typhoon or electrical failure in Udo Island. This island is now receiving electrical power through undersea cables from the Jeju Island. During blackout period, ESS will supply the electricity. And it is necessary to estimate the ESS capacity and control the transient state for the operation of stable power system. For the verification of proposed method, ESS capacities have been estimated according to base load and the minimum capacity of only home appliance in Udo Island. Also, in case of restoring from the fault, the algorithm for synchronization is proposed. Finally, the simulation results by using the PSCAD/EMTDC program will show the feasibility.

**Key Words :** 에너지저장시스템(Energy storage system), 동기화(Synchronization), 타당성(Feasibility)

## 1. 서 론

제주도의 동쪽 끝에 위치한 우도는 지난

1974년 12월부터 북제주군에서 한전의 발전기를 임대, 자체 발전으로 전력을 생산하여 공급하다가 1983년 정부의 도서지역 전화사업의

\*\*† 김일환(교신저자) : 제주대학교 전기공학과  
E-mail : ehkim@jejunu.ac.kr, Tel : 064-754-3674  
\*이도현 : 제주대학교 풍력공학부  
\*\*\*김호민 : 제주대학교 풍력공학부  
\*\*\*\*오성보 : 제주대학교 전기공학과  
\*\*\*\*\*이승민 : 제주대학교 풍력공학부

\*\*† Eel-Hwan Kim(corresponding author) : Department of Electrical Engineering, Jeju National University.  
E-mail : ehkim@jejunu.ac.kr, Tel : 064-754-3678  
\*DOHEON-LEE : Faculty of Wind Energy Engineering Graduate School, Jeju National University.  
\*\*\*Ho Min Kim : Faculty of Wind Energy Engineering Graduate School, Jeju National University.  
\*\*\*\*Sung-Bo Oh : Department of Electrical Engineering, Jeju National University.  
\*\*\*\*\*SEUNGMIN-LEE : Faculty of Wind Energy Engineering Graduate School, Jeju National University.

일환으로 시행한 북제주군 종달리~우도간 6.6kV 해저케이블 준공을 통해 한전의 전력을 공급받아 사용해 왔다. 하지만 최근 우도가 관광지로 부상하면서 전력부하가 크게 증가하게 되었고, 이에 따라 안정적인 전력공급 체계가 필요하게 되었다. 이에 한전은 2006년 기존의 6.6kV 선로에 비해 전력 공급 능력이 3배 이상 가능한 22.9kV 해저케이블을 완공하여 제주의 다른 지역과 동일한 고품질의 전기를 안정적으로 공급받을 수 있도록 하였다. 현재 우도는 제주지역의 도서 중에서 두 번째로 큰 부하를 가지고 있으며, 최대부하 1,180kW 평균부하 937kW로서 종달 D/L에서 22.9kV와 6.6kV 해저케이블을 통해 전력을 수전 받고 있다. 하지만 매년 제주지역을 관통하는 태풍은 종달~우도간 해저케이블의 안정적 동작을 저해하여 우도지역의 광역 정전사태를 야기하고 있다. 이는 우도가 국제적인 관광지로 발전하고 있는데 하나의 큰 장애요소가 되고 있어, 이를 해결하기 위한 방안이 시급히 요구되는 실정이다.<sup>1)</sup>

따라서 본 논문은 태풍 및 기기고장 등에 따른 종달~우도간 해저케이블의 전력공급 차단에 기인한 우도지역의 광역 정전에 대비하여 안정적인 전력을 공급할 수 있도록 에너지 저장장치 도입 방안을 제안하고자 한다.

## 2. 우도 전력계통

현재 우도는 4개의 리와 12개의 자연마을로 구성되어 있으며, 828세대의 수용가로 이루어진다. 그림 1에 나타난 것과 같이 우도 전력망은 제주시 종달 D/L로부터 22.9kV 및 6.6kV의 이중 해저케이블로 연계되어 있다. 이는 22.9kV선로 고장시 6.6kV선로를 예비로 사용하기 위함이다. 또한 우도지역 내의 선로 고장

으로 인한 문제를 최소화 하고자 남부와 북부로 계통을 나누어 운용 중에 있다. 우도지역 내의 관공서 및 소규모 양식장은 비상발전기를 보유하고 있어 태풍 및 기기고장 등으로 인해 전력공급이 차단될 때에도 정상적으로 전력공급이 가능하다. 2014년 기준 우도 계통내의 수용가 최대, 최소 부하량은 표 1과 같다.

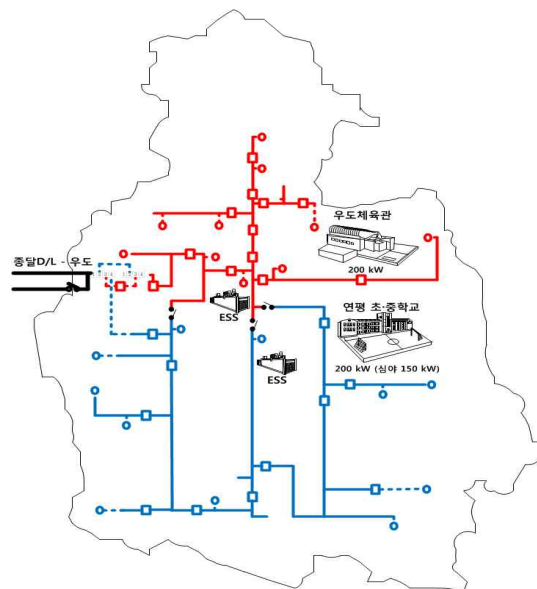


Fig. 1 Power grid in Udo-Island

Table. 1 Load of Udo Island by regional groups

| 리별  | 자연마을 | 가구수 | 부하량[kW] |       |
|-----|------|-----|---------|-------|
|     |      |     | 최대      | 최소    |
| 오봉리 | 주홀동  | 123 | 177     | 104.1 |
|     | 진홀동  | 6   | 8.3     | 4.86  |
|     | 삼양동  | 63  | 94.4    | 55.5  |
|     | 상고수동 | 22  | 35.4    | 20.8  |
|     | 하고수동 | 24  | 35.4    | 20.8  |
| 서광리 | 상우목동 | 51  | 70.8    | 41.6  |
|     | 하우목동 | 116 | 165.2   | 97.2  |
|     | 중앙동  | 60  | 86.1    | 50.7  |
| 천진리 | 동천진동 | 106 | 141.6   | 83.3  |
|     | 서천진동 | 53  | 82.6    | 48.6  |
| 조일리 | 비양동  | 129 | 177     | 104.1 |
|     | 영일동  | 75  | 106.2   | 62.4  |
| 합계  | -    | 828 | 1,180   | 694   |

그림 2는 2014년 우도지역의 계절별 24시간 동안의 평균부하를 나타낸다. 부하 변동량을 보면 관광객이 가장 많이 왕래하는 여름철 낮 시간대에 가장 많은 전력량을 소비하며 또한, 대체적으로 야간보다는 주간에 전력소비가 많음을 확인할 수 있다. 이는 우도지역 전력소비 패턴이 관광객이 많이 방문하는 계절과 시간대에 전력소비가 가장 많아, 제주계통의 해저케이블을 통한 전력공급의 중단시 우도 지역 관광산업에 크게 영향을 받을 수 있다.

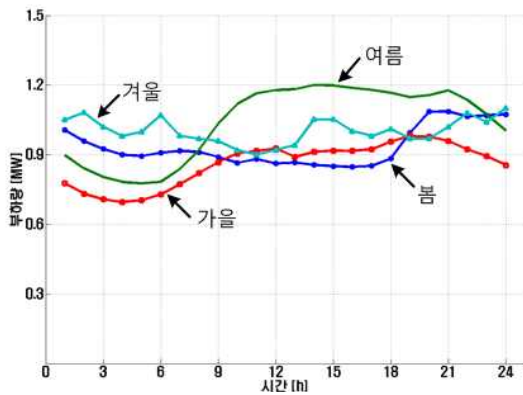


Fig. 2 Seasonal load in Udo Island

### 3. 우도 전력계통 모델링 및 제어

#### 3.1 우도 전력계통 모델링

##### (1) 우도 전력계통 모델링

우도 전력계통의 부하 모델링은 실제 계약 부하인 우도체육관 200kW, 초·중학교 200kW로 구성하였다. 이외의 우도 지역 내의 부하의 경우 실제 데이터를 Look-up table방식으로 나타냈다. 변압기 파라미터는 표 2와 같이 실제 데이터 값을 적용하였다.<sup>2)</sup> 선로정수의 경우 정상분, 영상분, 어드미턴스를 고려하여 실제 데이터를 적용하였다.

Table. 2 Parameters of electric transformer

| 구 분     | 정격전압[V]    | 변압기 정격용량[kVA] | 변압기 형식 |
|---------|------------|---------------|--------|
| 전흘 D/L  | 22,900/380 | 500           | 지중     |
| 삼양 D/L  | 22,900/380 | 300           | 지중     |
| 상고수 D/L | 22,900/380 | 300           | 지중     |
| 하우목 D/L | 22,900/380 | 300           | 지중     |
| 상우목 D/L | 22,900/380 | 150           | 지중     |
| 주홍 D/L  | 22,900/380 | 300           | 지중     |
| 하고수 D/L | 22,900/380 | 150           | 지중     |
| 중앙 D/L  | 22,900/380 | 500           | 지중     |
| 동천진 D/L | 22,900/380 | 300           | 지중     |
| 비양 D/L  | 22,900/380 | 150           | 지중     |
| 영일 D/L  | 22,900/380 | 150           | 지중     |
| 서천진 D/L | 22,900/380 | 500           | 지중     |

##### (2) ESS 모델링

ESS(Energy Storage System)는 Panasonic사의 정격 3.6V, 용량 830mAh인 CGR17500 리튬이온 배터리를 적용하였다. 리튬이온 배터리로 구성된 ESS를 수학적으로 나타내기 위해 Shepherd nonlinear battery model을 적용하였으며, 이는 단순한 가변 전압 소스와 저항으로 구성하여 모델링하였다.<sup>3)</sup> 그림 3, 4는 실제 배터리와 모델링된 배터리의 방전 곡선을 보여주고 있으며 전압, 전류의 곡선이 유사한 방전 특성을 보여주는 것을 알 수 있다.

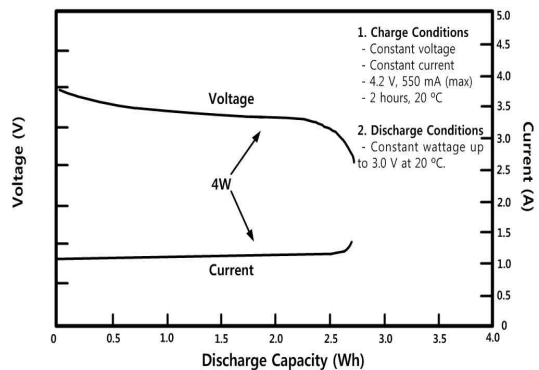


Fig. 3 Discharging curves of CGR17500

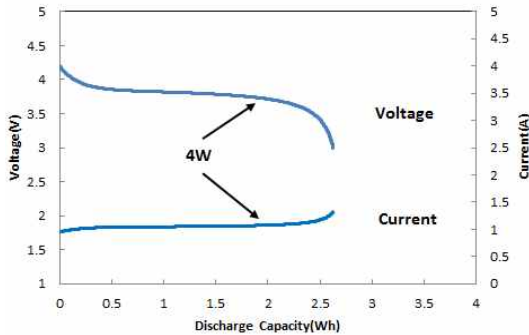


Fig. 4 Discharging curves of the battery model

### 3.2 ESS 제어

본 논문에서는 우도지역의 정전 및 기기 고장으로 인하여 종달 D/L로부터 전력공급이 어려울 경우 안정적으로 우도 계통을 유지하기 위한 목적으로 ESS를 적용하였다. ESS의 방전율(C-rate)은 용량을 고려하여 최대 2C로 제한하였다. 안정적인 전력공급을 위해 계통 연계 시 유·무효전력제어를 하였다.

태풍과 같은 기상악화의 징후가 예측될시 종달 D/L로부터 ESS를 충전하여 잔존용량을 최대로 유지시킨다. 기상악화 등으로 인해 종달 D/L에서 전력공급이 어려울 시 독립계통 운용으로 전환하여 전압제어와 지속적인 위상각 비교를 통한 동기화 제어를 병행한다. 우도 전력운용 제어 블록도는 그림 5와 같다.<sup>4)</sup>



Fig. 5 The flow chart of the power management in Udo Island

#### (1) 우도 - 종달 연계 시 제어

우도 전력계통의 종달 D/L과 연계 시 제주 지역이 전원 역할을 하여 우도계통의 ESS는 유·무효전력제어를 통해 최대부하이동을 담당하게 된다. 유·무효전력제어기는 수식 (1)에 근거하여 구성된다.

$$i_d^* = (K_p + \frac{K_i}{s})(Q^* - Q) / \frac{3}{2} v_q \quad (1)$$

$$i_q^* = (K_p + \frac{K_i}{s})(P^* - P) / \frac{3}{2} v_q$$

또한, 기상악화로 인한 사고를 고려하여 기상정보를 수집하여 잔존용량제어를 통해 태풍에 의한 문제에 대비한다. 그림 6은 잔존용량 제어(SOC)에 대한 블록도를 나타낸다.

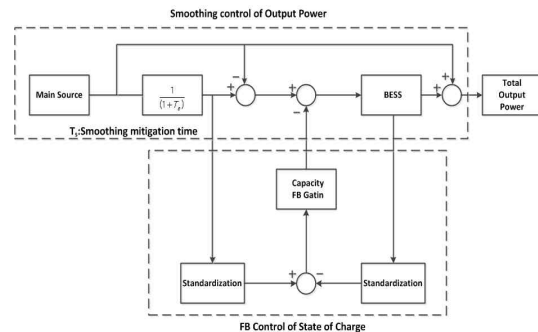


Fig. 6 Feed back control of state of charge

#### (2) 우도 - 종달 탈락 시 우도 전력계통 독립 제어

기상 변화나 설비 고장 등의 이유로 우도 전력계통의 독립운영 시 ESS는 CVCF (Constant Voltage Constant Frequency)제어를 하여 우도전력계통의 주전원 역할을 수행하게 된다. 전압제어기는 수식 (2)에 근거하여 구성된다.

$$i_d^* = (K_p + \frac{K_i}{s})(v_{\alpha l}^* - v_{\alpha l}) - \omega C_f v_{\alpha l} + i_{\alpha l} \quad (2)$$

$$i_q^* = (K_p + \frac{K_i}{s})(v_{\alpha l}^* - v_{\alpha l}) + \omega C_f v_{\alpha l} + i_{\alpha l}$$

(3) 우도 - 종달 사고 복구 시 동기화 제어 독립계통에서 재연계시 주파수, 위상, 전압의 크기에 대한 동기화가 이루어져야 한다. ESS의 PLL(Phase Lock Loop)기법 적용 시 지속적으로 주계통의 위상각  $\theta_{main}$ 을 검출하고 우도지역의 위상각  $\theta_{pre\_BESS}$ 와 비교하여 ESS 위상각  $\theta_{BESS}$ 를 생성한다. 그림 7의 경우  $\theta_{BESS}$ 를 검출하기 위한 블록도를 나타내며,  $\theta_{main}$ 과  $\theta_{pre\_BESS}$  위상 비교방식은 그림 8과 같다.<sup>5)</sup>

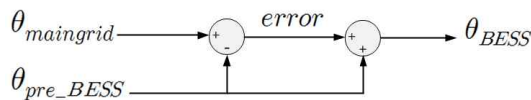


Fig. 7 Detecting method of the theta

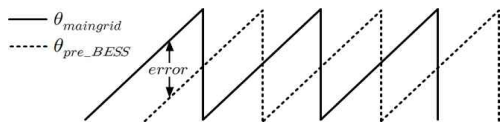


Fig. 8 Comparing method of the theta

#### 4. 컴퓨터 해석

표 3은 2010년 1월부터 2014년 12월까지의 우도지역 전기설비 고장 및 기상에 따른 정전 시간을 나타낸다.<sup>2)</sup> 정전의 경우 태풍에 의해 최대 10시간 30분에서 최소 10분 이내 인 것을 확인할 수 있다. 이때, 수용가 부하를 최대 부하로 가정하여 ESS의 용량산정을 할 경우 비용적인 측면에서 막대한 예산을 필요로 하므로 제주계통사고 혹은 해저케이블에 기인된 정전 시, 우도의 수요전력이 기저부하일 때,

가정부하만을 고려하였을 때, 기본 전기설비(냉장고, 조명설비)만을 고려하였을 때로 나누어 컴퓨터 해석을 진행하였다.

Table. 3 Blackout time and types in U-Island

| 시간별             | 고장횟수 | 비고              |
|-----------------|------|-----------------|
| 10분 이하          | 53   | 설비고장 및 풍우해      |
| 10분 초과 - 20분 이하 | 0    | -               |
| 20분 초과 - 30분 이하 | 0    | -               |
| 30분 초과 - 40분 이하 | 1    | 풍우해             |
| 40분 초과 - 50분 이하 | 2    | 풍우해 및 자연열화      |
| 50분 초과 - 1시간 이하 | 0    | -               |
| 1시간 초과          | 1    | 풍우해<br>10시간 30분 |
| 합계              | 57   | -               |

#### 4.1 기저부하를 고려한 컴퓨터 해석 결과

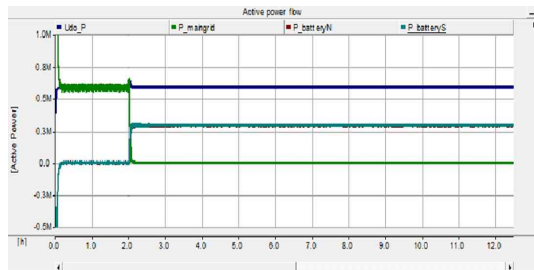
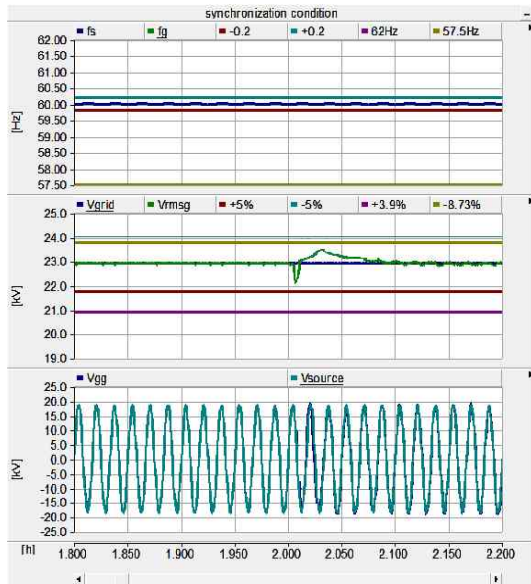


Fig. 9 Active power considering minimum load in Udo Island

그림 9는 우도 지역의 부하를 기저부하로 가정하였을 때를 가정하여 컴퓨터해석을 진행한 결과이다. 2시에 제주계통으로부터 전력공급이 차단되었을 때를 기준으로 ESS가 계통에 부족한 수요전력을 출력을 하여 우도 전력계통을 유지시켜주는 것을 확인할 수 있다.

그림 10은 제주계통으로부터 전력공급이 차단되었을 때, ESS의 응답을 통해 우도전력계

통의 전압, 주파수가 「송·배전전기설비 이용 규정」에 부합하는 것을 확인 할 수 있다.



(a) RMS voltage, (b) frequency, (c) Instantaneous voltage

Fig. 10 Grid voltage and frequency considering minimum load in Udo Island

#### 4.2 수용가 부하만을 컴퓨터 해석 결과

그림 11, 12는 우도지역의 관공서를 제외한 수용가 부하만을 고려하였을 시 ESS의 응답특성을 보여주고 있다. 위의 4.1절과 마찬가지로 계통의 전압, 주파수가 「송·배전전기설비 이용 규정」에 부합하는 것을 확인 할 수 있다.<sup>6)</sup>

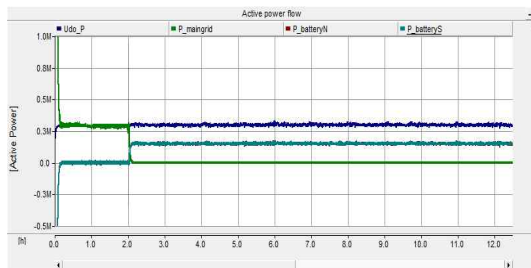
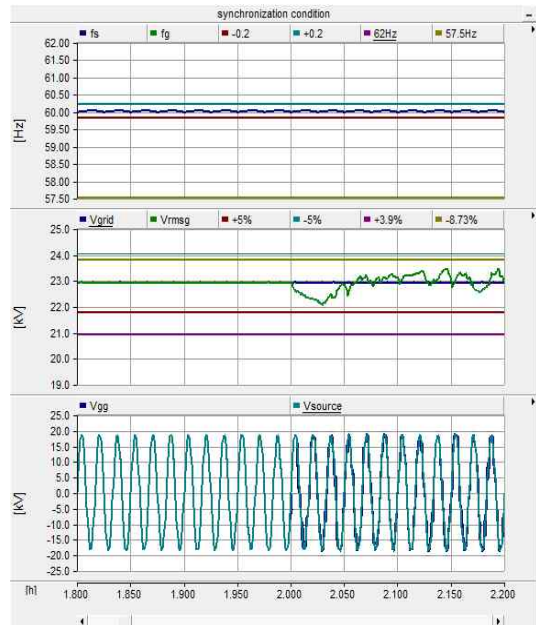


Fig. 11 Active power considering consumer load in Udo Island



(a) RMS voltage, (b) frequency, (c) Instantaneous voltage

Fig. 12 Grid voltage and frequency considering consumer load in Udo Island

#### 4.3 최소 전기설비를 고려한 컴퓨터 해석 결과

그림 13, 14는 우도지역 수용가의 기초 전기설비만을 고려하여 ESS로 전력계통을 유지하는 것을 보여준다. 마찬가지로 계통의 전압, 주파수가 「송·배전전기설비 이용 규정」에 부합하는 것을 확인 할 수 있다.

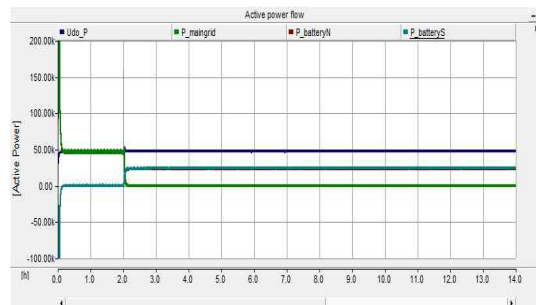
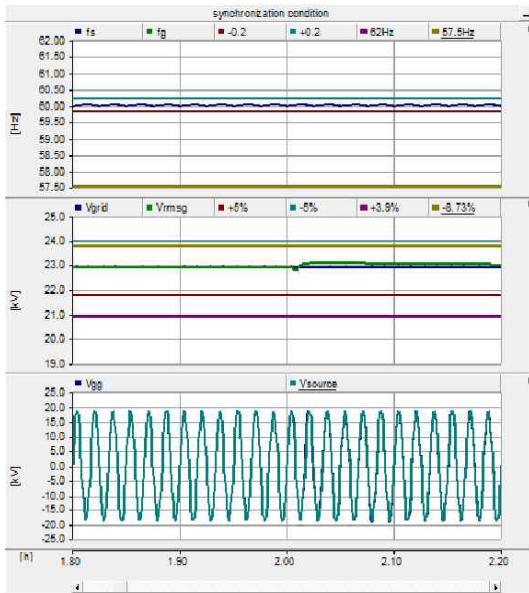


Fig. 13 Active power considering home appliance load in Udo Island



(a) RMS voltage, (b) frequency, (c) Instantaneous voltage  
 Fig. 14 Grid voltage and frequency considering home appliance load in Udo Island

표 4는 각 시나리오별 최대 10시간 30분 정 전 시를 유지할 수 있는 ESS의 용량을 나타 내고 있다.

Table. 4 capacity of ESS based on the types of loads

|     | 기저부하    | 수용가부하    | 전기설비    |
|-----|---------|----------|---------|
| ESS | 7.3 MWh | 3.04 MWh | 0.5 MWh |

### 5. 결 론

본 논문은 제주계통 사고 혹은 해저케이블사고 시, 우도 전력계통의 안정된 전력공급을 위해 에너지저장장치의 도입을 제안한다. 사고에 기인된 정전 시, 적은 비용으로 사고를 극복하고 안정적으로 계통을 운용하기 위해서 부하 제어가 필요할 것으로 판단된다.

따라서 우도부하를 기저부하, 수용가부하, 최

소전기설비만을 고려한 3가지 시나리오로 모의하여 최대정전시간인 10시간 30분을 유지할 수 있는 ESS 용량을 산정하였으며, 이에 따른 계통의 전력품질을 분석하였다. 컴퓨터해석결과 제주계통 탈락시 전력보상설비 중 빠른 응답특성을 갖는 ESS가 각각의 시나리오에서 전력계통을 안정적으로 유지하는 것을 확인할 수 있었으며, 수용가 최소전기설비만을 고려할 경우 0.5MWh의 ESS도입으로 우도의 안정적인 전력계통 운용이 가능할 것으로 사료된다.

### 후 기

본 연구는 2012년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술연구원(KETEP) 풍력특성화대학원 인력양성사업(과제번호:20094020200020) 및 「풍력발전설비 평가용 실증단지 확장개발」 과제(과제번호:2012T100201731)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다.

### Reference

1. Report, KEPCO, “도서지역 디젤발전 신재생 접목을 위한 기준 정립 및 타당성 연구”, 2012. 2.
2. KEPCO 한국전력, “우도 사업소 현황”, 2013.
3. Panasonic battery manufacturer’s data sheet.
4. Seung-Mo Kim, Seung-Jin Oh, Jong-Hak Lee, Jae-Min Ahn, Kyung-Min Jin, Byung-Gi Kwon, Chang-Ho Choi. POSCO ICT, “The application and Verification of the 2MVA BESS with Wind farm in Microgrid of Gapado. Jeju,” Trans. KIEPE, Nov. 2013.
5. JosepM. Guerrero, “Advanced Control Architectures for Interlligent Microgrids-Part1:Decentralized and Hierarchical control” IEEE,VOL. 60, NO.4, April, 2013.
6. KEPCO 한국전력, “송·배전용 전기설비 이용규정 : 별표 4 배전용전기설비 성능기준”, 2014.