

# 독립형 마이크로그리드내 풍력발전출력이 주파수 품질에 미치는 영향 분석

(Study on Impact of Wind Power in Grid Frequency Quality of Stand-alone Microgrid)

허재선\* · 김재철\*\*

(Jae-Sun Huh · Jae-Chul Kim)

## Abstract

This paper analyzed the influence of wind power fluctuations in grid frequency of a stand-alone microgrid that is hybrid generation system with diesel generator, wind turbine, and Battery Energy Storage System (BESS). The existing island area power system consists of only diesel generators. So the grid frequency can be controllable from load change. But hybrid generation system with Renewable Energy Sources (RES) such as wind energy that has the intermittent output can bring power quality problems. BESS is one of the ways to improve the intermittent output of the RES. In this paper, we analyzed the role of BESS in a stand-alone microgrid. We designed a modelling of wind power system with squirrel-cage induction generator, diesel power system with synchronous generator, and BESS using transient analysis program PSCAD/EMTDC. And we analyzed the variation of the grid frequency according to the output of BESS.

Key Words : Wind Power, Diesel Generator, Battery Energy Storage System(BESS), Frequency Quality, Stand-alone Microgrid

## 1. 서 론

최근 신재생전원을 이용한 마이크로그리드가 전력 산업 분야의 신성장 동력으로써 많은 관심이 집중되고 있다. 국내에서도 정부주도하에 산업계, 학계에서

관련 연구와 투자가 이루어지고 있다. 특히 도서지역을 중심으로 하는 독립형 마이크로그리드가 중요한 테마로 떠오르고 있다. 도서지역에 기존의 디젤발전기와 더불어 태양광발전, 풍력발전기와 같은 신재생발전원을 연계하는 형태로 독립형 마이크로그리드를 구현한다. 국내의 마이크로그리드는 2013년도부터 가파도, 가사도, 백령도를 중심으로 한 도서지역에 200~500kW 규모의 풍력-디젤-BESS(Battery Energy Storage System) 마이크로그리드가 실증 및 보급되고 있다[1].

한편 기존의 도서지역 계통에 간헐적인 출력의 대표

\* Main author : Ph.D candidate with Dept. of Electrical Eng., Soongsil Univ.

\*\* Corresponding author : Professor, Dept. of Electrical Eng., Soongsil Univ.

Tel : 02-817-7966, Fax : 02-817-0780

E-mail : jckim@ssu.ac.kr

Received : 2015. 11. 30.

Accepted : 2016. 1. 27.

전원인 태양광발전과 풍력발전기를 연계하면서 발생하는 전력품질의 문제가 아직 해결과제로 남아 있다 [2-5]. 특히 순간적인 출력변동으로 인해 발생하는 주파수의 변화는 계통의 전력품질과 안정도에 심각한 문제를 초래하게 된다. 이와 관련해 참고문헌 [4]에서는 국내의 낙도지역을 대상으로 풍력과 디젤발전기로 구성된 발전시스템을 모델링하고 풍력출력변동을 모의하여 주파수의 변동을 분석하였다. 그리고 참고문헌 [8]에서는 국내의 초도지역을 대상으로 디젤-태양광-풍력-BESS로 구성된 발전시스템을 모델링하고 신재생전원의 출력변화의 크기에 따른 부하단의 전압과 주파수 변동을 분석하였다. 본 논문에서는 참고문헌 [4]의 낙도의 계통도를 바탕으로 BESS를 연계하여 BESS제어 용량에 따른 주파수 변동을 모의하고 분석하였다.

본 논문에서는 신재생전원의 출력변동과 BESS 연계의 영향을 분석하기 위해 과도해석프로그램 PSCAD/EMTDC를 이용하여 풍력-디젤-BESS로 이루어진 독립계통을 구현하고 풍력발전기의 출력변동으로 인한 주파수의 변화를 모의하였다. 그리고 BESS의 제어범위에 따른 주파수에 미치는 영향을 분석하였다.

## 2. 신재생전원의 용량과 주파수 변동의 관계

### 2.1 기존 도서지역의 주파수 제어

큰 규모의 전력계통에서는 단순히 출력조정에 의한 주파수 제어가 아닌 전계통의 연료비 최소화, 송전전력과 지역별 전압상태를 고려한 계통 안정운전, 수력발전의 계획 사용수량 운영에 의한 상하수도의 안정공급, 발전연료의 수급에 따른 각 설비별 적정운영과 최적 배분 등 많은 복합 요소에 의해서 주파수 조정이 이루어진다[6]. 그러나 도서지역은 대부분 단독계통으로 운영되고 있고 계통 규모도 수 십~수 백 kW인 경우가 대부분이며 울릉도가 수천 kW로 운전되고 있다. 그리고 불규칙하게 나타나는 부하와 하계 휴가기간의 냉방부하 등의 변동성이 큰 부하가 많아 주파수 품질

유지가 매우 어려운 실정이다[1,6].

기존 도서지역은 거의 모든 발전소가 디젤발전기로 구성되어 있으며 경제부하 배분이나 발전기의 선택적 운전에 의한 연료비 절감과 계통 안정도보다는 전력의 안정적 공급이 우선시 되고 있다. 도서지역의 주파수 조정방식은 조속기의 운전방식에 따라 단독부하 등시성운전과 드롭 운전방식을 주로 활용한다. 그림 1은 디젤발전기의 주파수 제어의 운전방식의 개념도를 나타낸다[6]. 기존의 도서지역의 주전원 및 주파수 제어는 대부분 디젤발전기가 담당하고 있다. 디젤발전기의 일반적인 회전수는 900~1800rpm으로 운영하고 있다[6].

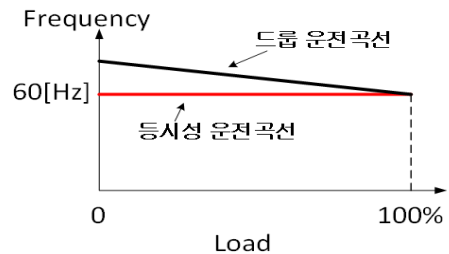


Fig. 1. Frequency control method of diesel generator

### 2.2 독립형 마이크로그리드의 주파수 변동에 미치는 요소

기존의 도서지역 계통 내 주파수 변동의 주원인은 부하변동에 있었다. 하지만 최근의 신재생전원 기반의 마이크로그리드 형태로 구성되고 있는 도서지역 계통내 주파수 변동의 주원인은 간헐적인 출력을 보이는 신재생전원의 연계에 있다[2-5]. 국내의 도서지역을 중심으로 구성되고 있는 독립형 마이크로그리드의 경우 기존의 디젤발전기와 태양광, 풍력 등의 신재생발전설비로 전원구성을 하고 있다. 그로 인해 발생하는 계통의 전력품질의 문제는 다양한 문헌에서 언급하고 있다. 뿐만 아니라 다양한 실증사례를 통해 주파수와 전압 품질 등의 문제를 확인할 수 있다. 대표적인 사례로 울릉도에는 지난 2000년 전력공급을 보완하고 관광자원으로 가치가 높다고 판단되어 600kW급 풍력설비가 설치되었다. 그러나 소규모 전력계통

에 대용량 풍력설비가 연결됨에 따라 잦은 주파수 변동과 한전의 발전기 증·감발 계획의 수립 곤란, 빈번한 설비 고장으로 운전이 정지되는 상황이 발생했다 [7-8].

### 3. 독립형 마이크로그리드의 구성 및 모델링

#### 3.1 독립형 마이크로그리드의 구성

본 절에서는 디젤-풍력-BESS로 구성된 AC링크 방식의 독립형 마이크로그리드의 구성을 설명하고자 한다. 독립형 마이크로그리드의 구성방식은 AC계통과 DC계통으로 구분되고 있다. 최근 DC계통의 구성방식이 많은 관심을 받고 있지만 현재 국내의 도서지역의 경우 기반시설이 AC계통방식으로 구성되어 있다. AC링크 방식의 마이크로그리드의 경우 대부분 디젤발전기가 주파수와 전압을 제어하는 역할을 하고 에너지 저장 및 방출 기능을 갖고 있는 BESS는 순시 변동하는 전압 및 주파수의 보상역할을 수행한다[4-5].

#### 3.2 디젤발전기의 모델링

국내의 도서지역에 설치된 디젤발전기는 동기기로서 수십~수천 kVA의 용량을 갖는다. 동기발전기의 제어기는 출력전압을 제어하는 여자기(Exciter)와 유효전력출력을 조정하는 조속기(Governor)로 구분된다. 그림 2와 3은 각각 동기발전기의 여자기와 정속도 제어모델을 나타낸다. 제어모델의 경우 IEEE 권장모형 및 Woodward사, Basler사 등에서 제시하는 모델링에 활용되고 있다[4-5]. 조속기의 경우 도서지역의 주파수 안정을 위해 일반적인 드롭제어가 아닌 정속도 운전모델을 활용한다.

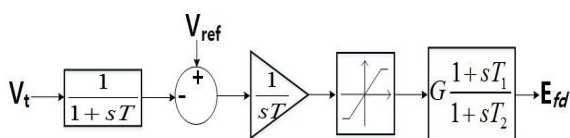


Fig. 2. SG exciter model

여기서  $V_t$  : 발전기 단자전압

$V_{ref}$  : 발전기 기준단자전압

$E_{fd}$  : 계자전압출력,  $T$  : 측정시정수

$G$ (gain) : 50~20.0 설정

$T_2$ (여자기 시정수) : 0~0.5 설정

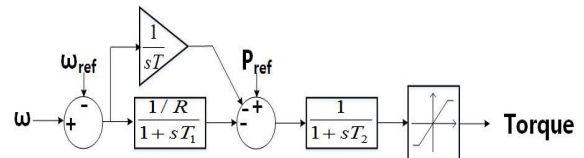


Fig. 3. SG constant speed model

여기서  $P_{ref}$  : 발전기 기준출력치

$\omega$  : 출력속도,  $\omega_{ref}$  : 발전기 기준속도

$R$  : 드롭계수, 0.02~0.125 설정

$T_2$  : 원동기 시정수 : 0.3~2.0 설정

#### 3.3 풍력터빈의 모델링

풍력터빈의 출력은 풍속과 풍력터빈의 블레이드 크기에 따라 결정된다. 식 (1)은 풍속과 풍력터빈의 출력 관계를 나타내는 수식이다[2]. 풍력발전기 모델은 크게 고정속 유도발전기 모델(type 1)부터 전출력 컨버터가 연계된 가변속 동기발전기 모델(type 4)까지 존재한다. 본 논문에서는 현재 도서지역에 널리 설치되어 있고 모의의 악조건을 구현하기 위한 풍력발전기로 고정속 운전하는 유도발전기를 선정한다.

$$P_{blade} = \frac{1}{2} A \rho V^3 C_p = \frac{1}{2} A \rho V^2 C_p \omega \frac{V}{\omega} \quad (1)$$

$$= \frac{1}{2} A \rho V^2 C_p \omega \gamma = T \omega$$

여기서  $A$  : 블레이드의 회전단면적( $m^2$ )

$\rho$  : 공기밀도, 해수면에서  $1.25(kg/m^3)$

$\omega$  : 블레이드 회전각속도( $rad/sec$ )

$C_p$  : 블레이드 출력계수

$\gamma$  : 피치각

$T$  : 토크( $Nm$ )

$V$  : 풍속( $m/s$ )

### 3.4 BESS의 등가모델

BESS 모델의 경우 인버터를 통해 계통에 연계되기 때문에 가변제어형 전압으로 간단히 모델링할 수 있다. 본 논문에서는 순시 변동하는 전압 및 주파수의 보상역할을 수행하기 위해 참고문헌 [5]의 BESS의 CVCF(Constant Voltage Constant Frequency)제어모델을 활용하여 구현하였다. 그림 4는 BESS의 CVCF 제어구조를 나타낸다.

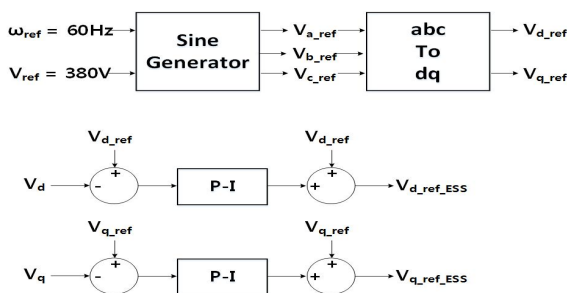


Fig. 4. CVCF model of BESS

## 4. 독립형 마이크로그리드의 모의분석

### 4.1 독립형 마이크로그리드의 모의구성

본 논문에서는 신재생전원의 출력변동으로 인한 주파수 품질의 영향을 분석하기 위해 도서지역 모델계

통을 PSCAD/EMTDC를 통해 구현하고 모의하였다. 독립형 마이크로그리드의 모델 구성을 위해 참고문헌 [5]의 디젤발전기, 풍력터빈, 변압기, 선로의 파라미터를 활용하였다. 그림 5는 독립형 마이크로그리드의 모의계통도이다.

그림 5와 같이 400kVA\*2급 디젤발전기, 3상 부하, 300kVA 고정속 풍력발전기와 300kWh BESS 설비가 각각 연계변압기를 통해 6.6kV AC선로에 연결되어 있다. 앞서 언급한 계통의 주파수 변동에 영향을 미치는 요소인 신재생전원 용량의 증감, BESS의 제어 유무에 대해 모의하였다.

### 4.2 독립형 마이크로그리드의 모의결과 분석

독립형 마이크로그리드의 디젤발전기, 풍력터빈의 모델에 대한 응답을 확인하기 위해 다음과 같이 모의하였다.

- step 1. t=0초에서 디젤발전기 기동
- step 2. t=2초에서 3상 부하 600kW+j187.5kVar 투입
- step 3. t=30초 풍속 5m/s 발생
- step 4. t=55초 풍속 8m/s 발생
- step 5. t=80초 풍속 12m/s 발생

그림 6~9는 BESS의 연계가 없을 경우의 디젤발전

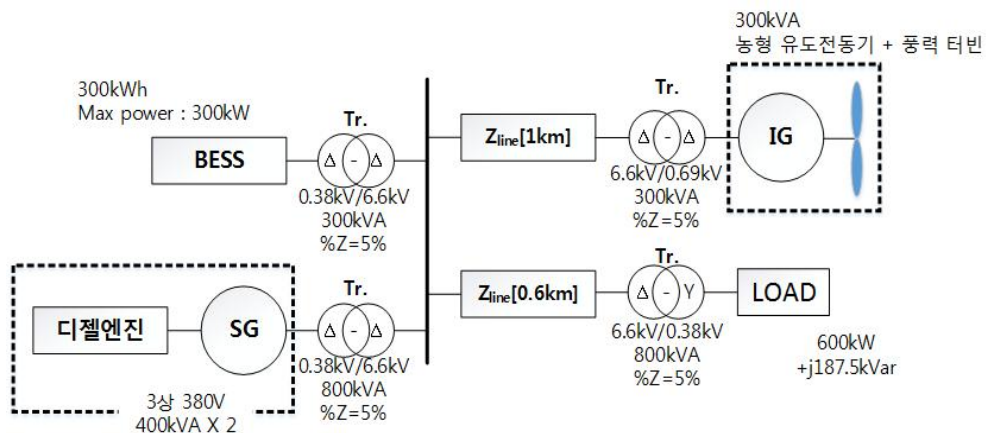


Fig. 5. Diesel-Wind turbine-BESS hybrid generation system

기의 공급전력, 회전각속도, 풍력발전기의 유효전력, 무효전력, 계통의 전압과 주파수 변동, 부하의 소비전력을 나타낸다.

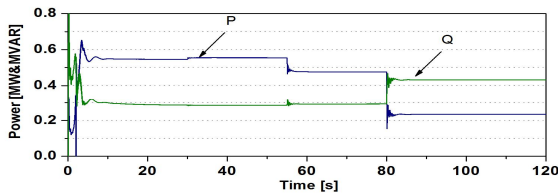


Fig. 6. Power supplied from diesel generator

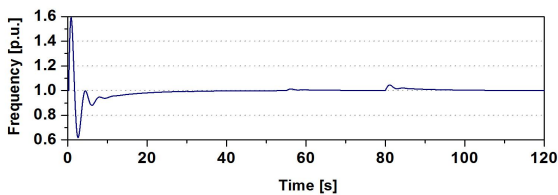


Fig. 7. Diesel generator speed

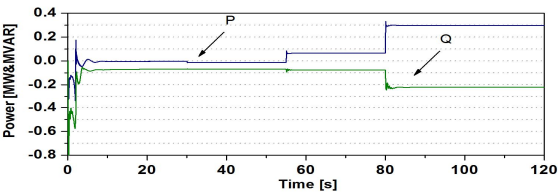


Fig. 8. Power supplied from WT generator

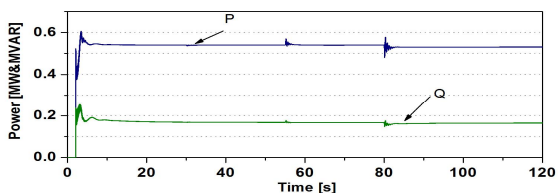


Fig. 9. Demand power of Load

t=0초에서 부하가 투입되기 전까지 디젤발전기가 기동하면서 디젤발전기의 초기 회전각과 출력은 초기 과도상태가 발생한다. 이 후 t=2초에 부하가 투입되면서 디젤발전기의 출력은 증가하고 회전각속도도 1pu에 수렴하고 있음을 보여주고 있다. 여기에서 계통의 손실 및 부하의 소비전력을 디젤발전기가 담당하고 있다. 이 후 풍속의 단계적 증가로 인해 풍력발전기의 공급 유효전력이 증가하면서 디젤발전기의 공급 유효

전력을 점차 감소한다. 반면에 풍력발전기의 무효전력의 소비가 증가함에 따라 계통의 전압은 강하함을 보인다. 동시에 디젤발전기의 무효전력이 증가함으로 보인다.

그림 10은 t=40초 이후의 계통 주파수의 변동을 나타내고 있다. 디젤발전기의 초기과도상태 이후 신재생전원의 출력변동에 따른 주파수의 변동을 확인할 수 있다. 풍력출력이 0에서 약 65kW으로 증가하면서 60.8Hz까지 증가하였다. 그리고 풍속이 8m/s에서 12m/s까지 증가하면서 풍력출력 300kW가 계통에 유입되었다. 그로 인해 약 계통 주파수는 62.8Hz까지 상승하였다. 이는 비상시 계통 주파수 허용범위 기준인 1.03~0.958p.u.를 초과하는 값이다. 반면에 수용가 전압은 허용범위(1.1~0.9p.u.)내에서 유지되었다. 결국 풍력출력의 급격한 변동에 대해 디젤발전기의 응답특성은 계통 주파수품질 유지에 한계가 있음을 확인할 수 있다.

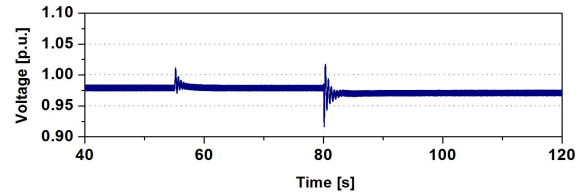
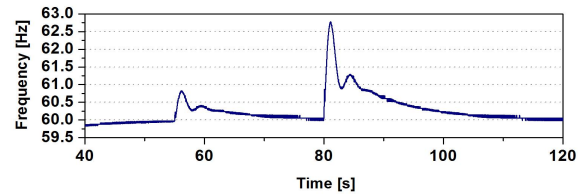


Fig. 10. Grid frequency & voltage

본 논문에서는 풍력발전기의 출력변동에 대해 BESS의 출력제어가 계통 주파수에 미치는 영향을 분석하기 위해 BESS의 유, 무의 차이와 BESS의 출력 제어 범위에 따른 주파수의 변동을 모의하였다. 여기서 BESS는 풍력출력의 smoothing 제어가 아닌 계통 주파수의 정상범위 유지를 위한 CVCF제어를 실행하고 있으며, BESS의 PCS(Power Conditioning System)를 통해 BESS의 출력을 제한한다.

그림 11은 신재생전원의 출력변동량에 따른 계통 주



파수의 변화의 최대값을 표시하고 있다. BESS의 보조없이 순수하게 풍력발전기, 디젤발전기만으로 이루어진 전원계통의 경우 50kW의 출력변동(부하의 1/12수준)에 대해 주파수변동량이 0.6Hz의 값을 나타냈다. 즉 계통 주파수가 60.6Hz까지 상승함을 보였다. 그리고 풍력발전기의 출력이 0에서 300kW로 증가하는 경우에 약 63.5Hz까지 상승하였다. 이는 계통 주파수 유지범위의 기준을 벗어나는 결과이다.

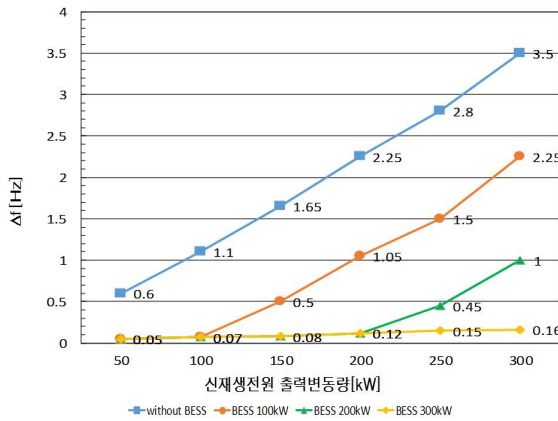


Fig. 11. Frequency maximum variation value according to output of WT generator

반면에 BESS의 PCS의 최대출력제한이 100kW인 경우에는 풍력발전의 출력이 250kW 변동할 때 61.5Hz이하로 제어한다. 하지만 300kW에서는 계통 주파수가 62.25Hz까지 상승함을 보이고 있다. 결국 BESS를 통해 풍력발전기의 출력제어를 하는 경우 순간적인 변동에 대해 반응하면서 계통 주파수를 60±0.2Hz 이내로 제어하고 있다. 하지만 제한용량을 벗어나는 경우 이를 제어하지 못하고 있음을 보인다. 결국 BESS의 제어성능이 독립형 마이크로그리드의 주파수 품질유지에서 중요요소를 확인하였다.

## 5. 결론

본 논문은 도서지역을 중심으로 구성된 독립형 마이크로그리드의 계통을 과도해석프로그램을 통해 모델링하였다. 이를 이용하여 풍력발전기의 출력변동을 모의하고 그로 인한 주파수의 영향을 분석하였다. 그

리고 풍력발전기의 출력변동과 BESS의 유무, 그리고 BESS의 출력제어 범위의 차이를 통해 주파수의 변화를 확인하였다.

모의 결과 풍력발전기와 디젤발전기로 이루어진 계통의 경우 디젤발전기의 가버너 제어만으로는 주파수 품질 유지기준을 만족할 수 없음을 확인하였다. 그리고 BESS의 출력제어범위 밖의 출력변동에 대해서도 주파수 품질유지 기준을 초과함을 보였다. 본 논문의 결과는 계통의 규모, 디젤발전기, 풍력터빈, BESS의 제어 파라미터에 따라 다른 모의결과를 보이게 된다. 하지만 신재생전원의 출력변동이 주파수 품질에 미치는 영향을 확인하고 이를 개선하기 위해서는 BESS 용량과 PCS의 출력범위 선정이 중요함을 확인할 수 있었다.

결국 독립형 마이크로그리드의 설계와 효율적이고 안정적인 운영을 위해서는 대상계통에 대한 정확한 모델링을 통해 상세한 분석이 요구된다. 뿐만 아니라 BESS의 설계를 함에 있어서 BESS의 설치 및 운영비용, 독립계통의 주파수 최소 유지범위, 보호협조와 같은 다양한 요소를 반영해야 하는 부분도 고려되어야 한다.

향후 연구에서는 BESS와 디젤발전기의 응답특성을 고려한 계통 운영방안에 대한 연구를 진행하고자 한다.

### 감사의 글

본 연구는 2016년도 숭실대학교 교내연구비 지원에 의한 연구임.

### References

- [1] Korea Institute of Machinery & Materials, "Modeling, Analysis and Design Tech. Development of Hybrid Generation System with Wind Turbine and Diesel Generator", 2011.
- [2] P.M.Anderson, Anjan Bose, "Stability Simulation Of Wind Turbine Systems", IEEE Transactions On Power Apparatus and System, Vol PAS-102, No.12, December 1983.
- [3] William B. Gish, "Small Induction Generator and Synchronous Generator Constants for DSG Isolation Studies", IEEE Transactions On Power Systems, Vol

- PWRD-1, No. 2, April 1986.
- [4] JAE-EON KIM, "Modeling of Hybrid Generation System with Wind Turbine and Diesel Generator", Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, Vol. 13, No. 4, p.1806-p.1813, 2012.
  - [5] JAE-EON KIM, "Modeling & Operating Algorithm of Islanding Microgrid with Wind Turbine, Diesel Generator and BESS", Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, Vol. 15, No. 9 p.5893-p.5898, 2014.
  - [6] Korea Electric Association, "A study on operating method of power plant in island area", Ministry of Trade, Industry and Energy, April 2004.
  - [7] Ji-Hoon Im and Seung-Ho Song, "Calculation of Required Reactive Power for Reduction of Voltage Variation due to the Wind Power Fluctuation", Journal of Wind Energy, p.35-p.40, April 2007.
  - [8] KEPCO, A Study on Standards of Renewable Energy for Remote Island, Ministry of Knowledge Economy Report, 2012.

◇ 저자소개 ◇



**허재선 (許宰善)**

1985년 1월 23일생. 2003년 숭실대 전기 공학부 졸업. 2011년 숭실대 대학원 전기 공학과 졸업(석사). 2011년~현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.  
E-mail : jasonh@ssu.ac.kr



**김재철 (金載哲)**

1955년 7월 12일생. 1979년 숭실대 전기 공학과 졸업. 1983년 서울대 대학원 전기 공학과 졸업(석사). 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1988년~현재 숭실대 전기공학부 교수.  
E-mail : jckim@ssu.ac.kr