

풍력-디젤-BESS 독립형 마이크로그리드 모델링 및 운전제어 알고리즘에 관한 연구

김재언^{1*}

¹충북대학교 전자정보대학 전기공학부

Modeling & Operating Algorithm of Islanding Microgrid with Wind Turbine, Diesel Generator and BESS

JAE-EON KIM^{1*}

¹Department of Electrical Engineering, Chungbuk National University

요약 본 논문은 연료비를 최소화 할 수 있는 2차전지 전력저장장치(BESS: Battery Energy Storage System)와 풍력-디젤 복합발전시스템으로 구성되는 독립형 마이크로그리드를 모델링하는 방법과 그 운전제어 알고리즘을 제안하였다. 먼저, 부하 변동 및 풍속변동에 따른 주파수와 전압을 일정하게 제어할 수 있는 양방향 DC/AC 컨버터의 BESS를 모델링하고, 디젤발전기는 공급전력의 부족 및 BESS의 충전시에만 가동하도록 하는 운전제어알고리즘을 제안한다. 그리고, 제안된 모델링 방법과 운전제어알고리즘을 독립형 마이크로그리드에 적용한 결과, 풍속 및 부하변화에 대하여 주파수와 전압변동이 적정범위내로 유지할 수 있음을 증명할 수 있었다.

Abstract This paper proposes a modeling method and operating algorithm of an islanding microgrid that is composed of a Battery Energy Storage System (BESS), wind turbine and diesel generator applied in island areas. Initially, the bilateral AC/DC converter was designed for charge/discharge for frequency and voltage to be maintained within the proper ranges according to the load and weather change, and the operating method was proposed for a diesel generator to operate when power supply from the wind turbine or BESS is insufficient. The proposed modeling and controller design method of BESS was applied to a typical islanded microgrid with a wind turbine and diesel generator. The frequency and voltage was kept within the permissible ranges and the proposed method was proven to be appropriate through simulations.

Key Words : Wind Turbine, Diesel Generator, Battery Energy Storage System, Microgrid, Islanded System

1. 서론

지리적 및 경제적 측면에서 내륙 전력망 연계가 어려운 낙도나 오지에 전기를 공급하기 위한 방법중의 하나가 독립형 발전시스템, 즉 독립형 마이크로그리드이다. 과거에는 디젤발전기만을 이용하였지만, 최근에는 덴마크, 독일 같은 풍력기술의 선진국을 중심으로 풍력-디젤, 풍력-디젤-담수화설비 형태의 마이크로그리드가 상용화되고 있다. 외국의 경우, 미국에서는 1995년부터 알래스

카 지역을 대상으로 500~1000 kW 규모의 풍력-디젤, 풍력-디젤-BESS이 각각 구축되어 운영중에 있으며, 국내의 경우 2013년부터 가파도, 가사도, 백령도를 중심으로 한 도서지역에 200~500 kW 규모의 풍력-디젤-BESS 마이크로그리드가 실증 및 보급되고 있다[1-5].

이와 같은 마이크로그리드의 구성방법에는 직류노드(이하 DC버스)에 각 발전시스템을 연결하여 하나의 인버터를 통해 전력을 공급하는 DC링크 방식과 각 발전시스템마다 인버터를 통해 교류노드(이하 AC버스)에 연계

이 논문은 2012년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

*Corresponding Author : JAE-EON KIM(Chungbuk National Univ.)

Tel: +82-43-261-2423 email: jekim@cbnu.ac.kr

Received July 23, 2014

Revised (1st August 21, 2014, 2nd September 10, 2014)

Accepted September 11, 2014

하는 AC링크 방식이 있다. DC링크방식의 경우, 시스템 구성이 비교적 간단하여 소비비용이 적고 제어가 간단하다는 장점이 있지만, 전체효율이 낮고 직류버스의 전압 레벨이 전체 시스템에 영향을 준다는 단점이 있다. AC링크방식의 경우에는 제어요소가 많아 제어가 비교적 어렵고 AC버스에 연계되는 시스템간의 전압 위상과 크기가 일치하지 않으면 시스템에 문제가 발생하는 단점이 있지만 효율이 높다는 장점이 있다[6-9].

AC링크방식의 디젤-풍력-BESS로 구성되는 마이크로그리드의 경우 대부분 디젤발전기가 주파수와 전압을 제어하는 역할을 하고, 에너지저장 및 방출의 기능을 갖고 있는 BESS(Battery Energy Storage System)는 순시 변동하는 전압 및 주파수의 보상역할을 수행하는 것이 일반적이다. 그러나, 이 경우에는 디젤발전기 용량이 커야하고 상시 운전되어야하기 때문에 연료소비가 많다.

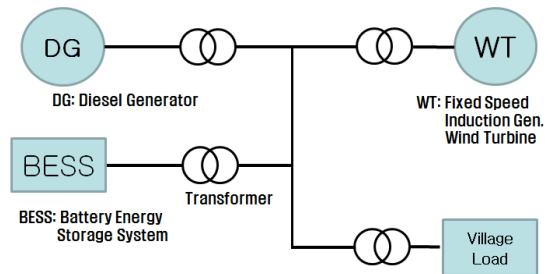
따라서, 본 논문에서는 이를 해결하기 위한 방법으로 풍력발전설비는 상시 최대출력운전을 하고, BESS가 주파수 및 전압을 조정하는 역할을 수행함으로써 디젤발전기의 연료소비를 최소화 시킬 수 있는 마이크로그리드(Microgrid: 이하 MG로 부름)의 모델링 및 운전제어알고리즘을 제안하고자한다.

먼저, 디젤발전기의 연료소비 최소화가 가능한 디젤-풍력-BESS으로 구성되는 AC링크방식의 독립운전형 MG의 모델링 방법을 설명하고, 이를 운용제어할 수 있는 알고리즘을 기술하기로 한다. 그리고, 모델 독립형 MG를 대상으로 하여 제안된 모델링 및 운전제어 알고리즘의 타당성을 소프트웨어 패키지인 PSCAD/EMTDC[11]을 통하여 입증하기로 한다.

2. 디젤-풍력-BESS AC링크방식의 독립형 MG 모델링 방법

본 절에서는 디젤발전기의 연료소비 최소화가 가능한 디젤-풍력-BESS으로 구성되는 AC링크방식의 독립운전형 MG의 모델링 방법에 대하여 기술하고자 한다. 모델링 대상의 독립운전형 MG구성은 Fig. 1과 같이 디젤발전기, 풍력발전기, BESS가 마을 부하와 같이 동일 버스에 연결된 AC 링크 방식이다. 풍력발전기는 고정속도로 운전되는 유도발전기를, 디젤발전기는 동기발전기로 한다. 디젤발전기의 연료를 최소화하기 위하여는 풍력발

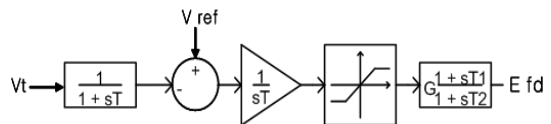
전기는 풍속변화에 따라 회전속도가 거의 일정한 고정속도로 그 출력이 항상 최대로 되도록 하고, 디젤발전기는 마을 부하에 공급되는 전력이 부족하거나 저장된 전력에너지가 최소충전율에 도달한 상태에서 충전이 필요할 경우에만 100% 정격출력으로 운전되도록 하는 것이다. 이때, 독립형 MG의 주파수와 전압은 BESS가 상시 제어하도록 한다. 이와 같이 하기 위한 디젤발전기 및 BESS의 모델링 방법을 다음과 같이 제안한다.



[Fig. 1] Structure of Islanded MicroGrid with Diesel-Wind Turbine-BESS

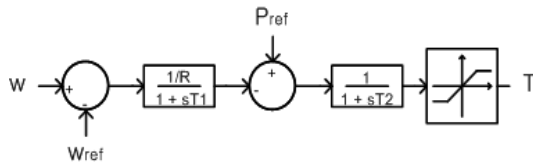
2.1 디젤 발전기 모델링

동기기를 근간으로 한 디젤발전기의 제어기는 출력전압을 조정하는 여자기(Exciter)와 유효전력출력을 조정하는 조속기(GOV: Governor)로 구성된다. 이 여자기와 조속기는 여러 가지 형태가 있으나, IEEE권장모형 및 Woodward사, Basler사 등에서 제시하는 여러 가지 형태를 조사분석한 결과, 모델링에 적합한 개루프 전달함수로 축약된 Fig. 2와 Fig.3의 각각 제시한 제어기를 이용한다[10].



V_t : Terminal Voltage
 V_{ref} : Terminal Reference Voltage
 E_{fd} : Field Winding Voltage
 T : Time constant, G (Gain) : 5.0 ~ 20.0
 T_2 (Exciter Time Constant) : 0 ~ 0.5

[Fig. 2] Exciter Model of Diesel Generator

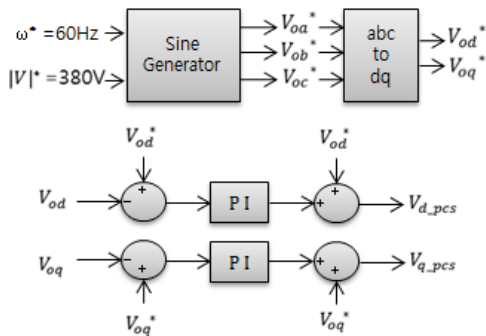


T: Turbine Torque, P_{ref} : Output Reference
 w: Rotating Angular Velocity
 w_{ref} : Reference Rotating Angular Velocity
 R(Droop Coefficient): 0.02 ~ 0.125
 T_2 (Prime Mover Time Constant): 0.3 ~ 2.0

[Fig. 3] Governor Model of Diesel Generator

2.2 BESS 모델링

풍속변화에 따른 고속 풍력발전기의 출력변화와 부하변화에 대하여 MG AC버스의 주파수와 전압을 적절한 허용범위내로 유지하기 위해서는 BESS의 충전상태에서 정전압 정주파수(CVCF: Constant Voltage Constant Frequency, 이하 CVCF로 부름) 제어가 가능한 Fig. 4와 같은 제어를 이용한다.



ω^* , V^* : Reference Frequency and Voltage of AC버스
 V_{oa}^* , V_{ob}^* , V_{oc}^* : Reference Voltage on a, b, c phase of AC버스
 V_{od}^* , V_{oq}^* : Reference Voltage on d, q axis of AC버스
 V_{od} , V_{oq} : Measured Voltage on d, q axis of AC버스
 V_{d_pcs} , V_{q_pcs} : Reference Voltage on d, q axis of BESS

[Fig. 4] CVCF Model of BESS

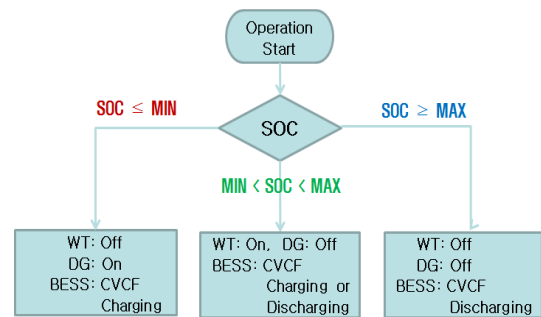
이 CVCF제어기는 제어대상 AC링크버스의 기준전압과의 차만 단순보상하는 전압제어방식이므로 LC필터의 전압전류제어방식에 비하여 상대적으로 고조파 전류에 의한 공진영향을 적게 받는다. 따라서 소프트스타터를 갖는 정속도 운전의 유도발전형 풍력발전기의 기동시에 발생하는 순시고조파전류에도 안정하게 운전될 수 있는 잇점이 있어 기존의 무정전 전원공급장치(UPS)에 적용

되고 있는 LC필터의 전압전류제어루프를 갖는 CVCF제어기 보다 훨씬 안정적이다.

3. 디젤-풍력-BESS AC링크방식 독립형 MG의 운전제어 알고리즘

디젤발전기의 연료소비 최소화가 가능한 디젤-풍력-BESS으로 구성되는 AC링크방식의 독립운전형 MG의 운전제어 알고리즘을 Fig. 5와 같이 제안한다.

Fig. 5에 있어서, 고속 풍력발전기는 풍속변화에 따라 별도의 제어없이 최대출력 운전하도록 하고, BESS가 상시 CVCF 운전을 하도록 한다. 이 때, BESS는 충전상태(State of Charge)의 최소값(MIN) 및 최대값(MAX)을 결정하여 이 사이에서 운전되도록 하되, BESS의 SOC가 최소값 보다 작게 되는 경우는 디젤발전기가 100%출력으로 동작하여 BESS를 충전함과 동시에 부하에 전력을 공급하도록 한다. 이 상태가 지속되어 BESS의 SOC가 정상 범위에 들어오게 되면 디젤발전기는 운전정지 하도록 한다. 한편, 풍력발전기의 출력이 부하보다 커서 BESS를 충전하는 상태가 계속적으로 지속되어 BESS의 SOC가 최대값 보다 크게 되는 경우는 풍력발전기를 분리시켜 BESS만으로 부하에 전력을 공급하도록 운전한다.

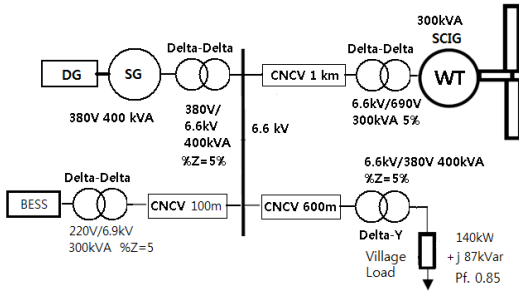


[Fig. 5] Operating Algorithm of MG

4. 모의분석 및 고찰

본 장에서는 2장 및 3장에서 제안한 디젤-풍력-BESS으로 구성되는 AC링크방식의 독립운전형 MG의 모델링 방법과 운전제어 알고리즘의 타당성을 검증하고자 Fig. 6과 같은 마이크로그리드 모델계통을 PSCAD/EMTDC

에 의하여 Fig. 7과 같이 이 모델링하였다.



[Fig. 6] Model of Islanded MG

제안된 모델링 방법과 운전제어 알고리즘의 타당성 검증에 대한 모의분석절차는 다음과 같이 하였다.

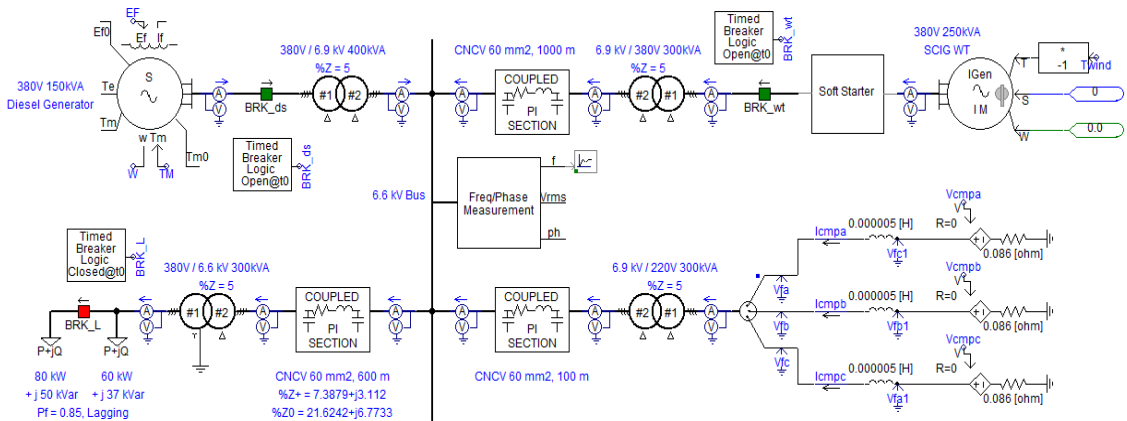
- Step 1. t=0~10초: 3상 140 kW+j87.5 kVar의 부하투입상태에서 BESS가 CVCF 방전 (풍력발전기/디젤 운전정지)
- Step 2. t=10~20초: 부하 60 kW + j 37 kVar로 감소 운전중 BESS의 SOC < MIN 됨
- Step 3. t=20~40초: 20초간 디젤100%출력운전 BESS CVCF 충전
- Step 4. t=40~50초: 디젤발전기 운전정지 BESS의 SOC > MIN로 되어 CVCF 방전
- Step 5. t=50~70초: 풍속 14m/s 풍력발전기 최대출력 210kW-j80kVar BESS CVCF 충전

- Step 6. t=70~90초: 풍속 8m/s 풍력발전기 출력 64kW-j15kVar BESS CVCF

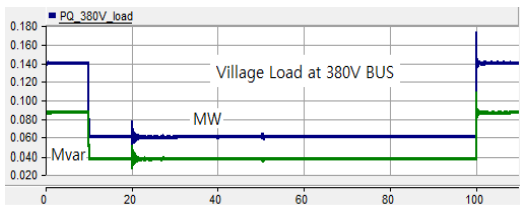
- Step 7. t=90초~100초: BESS의 SOC > MAX로 되어 풍력발전기 운전정지. BESS CVCF 방전
- Step 8. t=100초이후: 부하 140 kW+j87.5 kVar로 증가. BESS CVCF 방전

먼저 t=0의 상태에서 CVCF 방전운전모드의 BESS가 140 kW+j87.5 kVar 의 부하에 1.0 pu (60Hz) 주파수의 전력을 공급하도록 하였다. 모든 그림에서의 가로축 단위는 초이다.

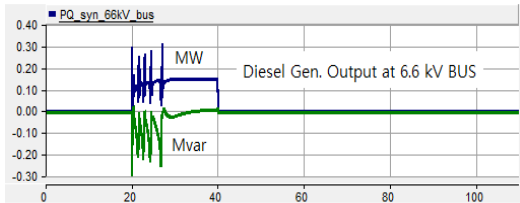
Fig. 8에서와 같이 t=10초에서 부하가 60kW+j 37kVar로 감소된 상태에서 BESS가 CVCF 방전운전중 SOC < MIN 됨에 따라 t=20초에서 Fig. 9에서와 같이 디젤발전기가 100%출력운전(150kW)됨으로써 Fig. 10에서와 같이 BESS가 약 90kW CVCF 충전운전되고 있음을 알 수 있다. 이 충전상태가 지속되어 충분히 BESS가 충전된 t=40초에서 디젤발전기가 운전정지되고, BESS가 다시 60kW+j 37kVar의 부하에 전력을 공급하면서 CVCF 방전운전한다. t=50초에서 풍속이 14m/s로 되어 풍력발전기는 Fig. 11에서와 같이 210kW-j80kVar로 운전되어 BESS는 Fig. 10에서와 같이 약 150kW로 CVCF 충전운전하게 된다. 이후 t=70초에서 풍속이 8 m/s로 되어 풍력발전기의 출력이 부하보다 큰 64kW-j15kVar로 되고, 계속적으로 BESS는 CVCF 충전운전이 되어 SOC >MAX 됨에 따라 풍력발전기는 t=90에서 운전정지하게 된다. 이후, BESS는 CVCF 방전운전하게 됨을 알 수 있다.



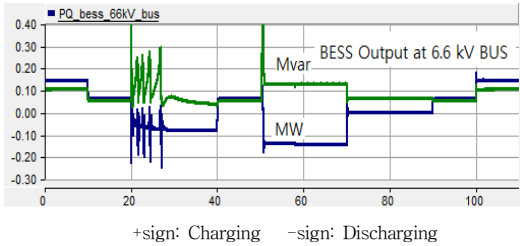
[Fig. 7] Islanded MG Modeled by PSCAD/EMTDC



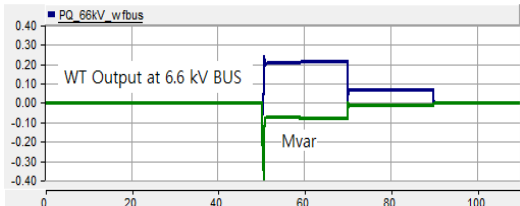
[Fig. 8] Village Load at 380 V Bus



[Fig. 9] Diesel Output at 6.6 kV Bus

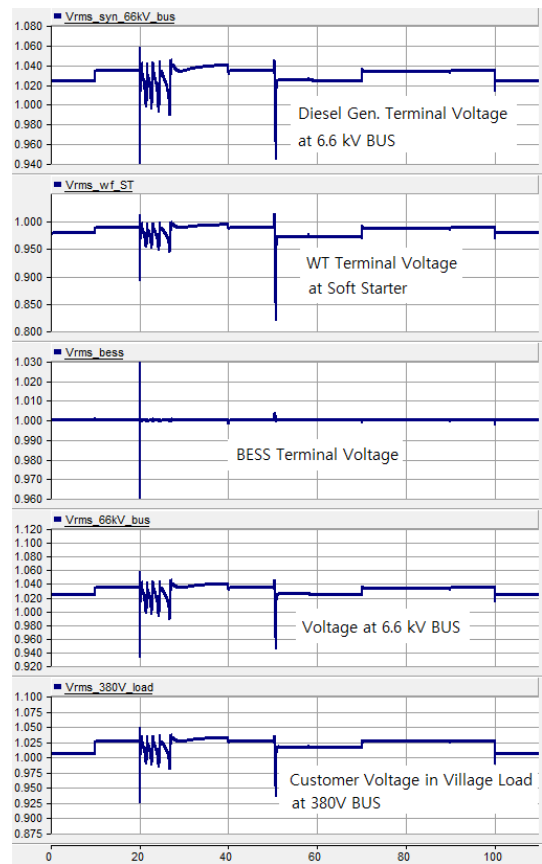


[Fig. 10] BESS Output at 6.6 kV Bus

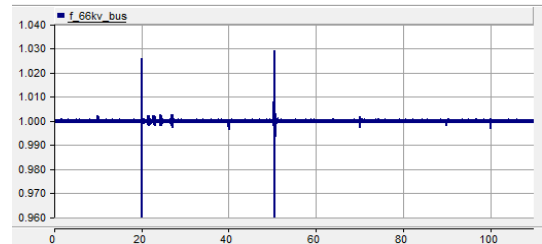


[Fig. 11] Wind Turbine Output at 6.6 kV Bus

한편, 마이크로그리드의 각 BUS에서의 전압은 Fig. 12에서와 같이 t=20초 에서 디젤발전기의 비동기 병입시와, 50초 에서 풍력발전기의 기동시에 전압변화가 크게 있었다. t=20초에서의 디젤발전기 비동기병입은 실제적으로 계통운용시 동기병입으로 진행되므로 문제는 없고, 다만 t=50초에서의 풍력발전기의 기동시 소프트스타터의 동작특성이 계통전압에 영향을 크게 줄 수 있다. 따라서, 풍력발전기의 소프트스타터의 점동각 제어가 상당히 중요하다. 주파수 특성도 Fig. 13에서와 같이 전압과 동일한 현상을 보이고 있다.



[Fig. 12] Voltage Variation: [pu]



[Fig. 13] Frequency Variation: [pu]

본 사례연구에서는 50%이상의 정전력 부하변동, 풍속의 계단함수변화(0 m/s에서 14 m/s), 디젤발전기의 비동기병입 등의 악조건을 상정하여 모의한 결과 및 고찰에서와 같이 제안된 디젤-풍력-BESS AC링크방식의 독립 운전형 MG의 모델링 방법과 운전제어 알고리즘을 마이크로그리드 모델계통에 적용한 결과, 계통의 주파수 허용범위(산업부 전력계통 신뢰도 및 전기품질 유지기준 1.03 pu~0.958 pu(62Hz~57.5Hz)), 수용가 전압허용범위

(한국전력공사 전기공급규정 220V±6%, 380V± 10%)내로 잘 유지될 수 있음을 확인할 수 있었다.

5. 결론

본 논문에서는 도서지역의 전력공급에 적합한 마이크로그리드, 즉 풍력발전의 출력을 최대로 활용함과 동시에 디젤연료를 최소화할 수 있는 디젤-풍력-BESS AC 링크방식의 독립운전형 MG의 모델링 방법과 운전제어 알고리즘을 제안하여 그 타당성을 입증하였다. 차후, 섬지역의 고조파 부하 및 모터부하를 고려한 악조건 부하에 대한 검증연구를 통하여 국내 및 국외 도서지역의 독립운전형 마이크로그리드에 제안된 방법이 적용되어 도서지역의 에너지절약이 가능하고 안정적인 전력공급이 가능할 수 있도록 활용되기를 기대한다.

References

- [1] Chad Abbey, Wei Li and Geza Joos, "An Online Control Algorithm for Application of a Hybrid ESS to a Wind-Diesel System", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 57, No. 12, December 2010.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TIE.2010.2051392>
- [2] Tapas Kumar Saha and Debaprasad Kastha, "Design Optimization and Dynamic Performance Analysis of a Stand-Alone Hybrid Wind-Diesel Electrical Power Generation System", *IEEE Trans. Energy Conversion*, Vol. 25, No. 4, pp. 1209 - 1217, December 2010.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TEC.2010.2055870>
- [3] A.J. Bowen, M. Cowie and N. Zakay, "The Performance of A Remote Wind-Diesel Power System," *Renew Energy*, Vol. 22, pp. 429 - 45, 2001.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0960-1481\(00\)00100-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0960-1481(00)00100-2)
- [4] Korea Institute of Machinery & Materials, *Modeling, Analysis and Design Tech. Development of Hybrid Generation System with Wind Turbine and Diesel Generator*, 2011.
- [5] Billy Muhando, Katherine Keith, Per Lundsager, *Best Practices in Implementaiton of WIND-DIESEL SYSTEM*, 2011.
- [6] Frede Blaabjerg, Fellow, Remus Teodorescu, "Over-view of Control and Grid Synchronization for Distri-buted Power Generation Systems", *IEEE Trans. on Industrial*

Electronics, Vol. 53, No. 5, Oct. 2006.

DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TIE.2006.881997>

- [7] Zhe Chen, Josep M. Guerrero, Frede Blaabjerg, "A Review of the State of the Art of Power Electronics for Wind Turbines", *IEEE Trans. on Power Elec-tronics*, Vol. 24, No. 8, Aug. 2009.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TPEL.2009.2017082>
- [8] Serim Heo et. al., "Simulation Analysis of a Renew-able Energy Based Micro-grid using RTDS", *KIEE Tans*. Vol. 60, No. 12, December 2011.
- [9] Eun-Sik Choi, Heung-Kwan Choi, Jin-Hong Jeon and Jong-Bo Ahn, "A Study on Simulation of Dynamic Characteristic in Prototype Micro-grid", *KIEE Tans*. Vol. 59, No. 12, December 2010.
- [10] Jae-Eom Kim, "Modeling of Hybrid Generation System with Wind Turbine and Diesel Generator", *Journal of KAIS*, Vol. 13, No. 4, pp.1806-1813, April 2012
DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2012.13.4.1806>
- [11] *PSCAD/EMTDC Power System Simulation Software user's Manual*, Manitoba HVDC Research Centre, Winnipeg, Canada.

김 재 언(Jae-Eon Kim)

[정회원]



- 1982년 2월 : 한양대학교 전기공학과 (공학사)
- 1984년 2월 : 한양대학교대학원 전기공학과 (공학석사)
- 1996년 3월 : 일본 교토대학교대학원 전기공학과 (공학박사)
- 1984년 3월 ~ 1998년 8월 : 한국 전기연구소 연구원/배전연구팀장
- 1998년 9월 ~ 현재 : 충북대학교 전기공학부 교수

<관심분야>

전력/배전계통, 분산전원연계, 마이크로그리드, 전력품질해석