

# 영구자석형 풍력-디젤-BESS 복합발전시스템 모델링 및 운전제어 알고리즘에 관한 연구

## Modeling & Operating Algorithm of Hybrid Generation System with PMSG Wind Turbine, Diesel Generator and BESS

오준석\* · 정의용\* · 박종호\* · 박민수\* · 김재연\*  
(Joon-Seok Oh · Ui-Yong Jeong · Jong-Ho Park · Min-Su Park · Jae-Eon Kim)

**Abstract** - Nowadays high-cost energy storage system using flywheel or secondary battery is applying to hybrid generation system with WT(Wind Turbine) and diesel generator in island areas for stable operation. This paper proposes an operating algorithm and modeling method of the hybrid generation system that can operate for variable wind speed and load, which is composed of energy storage system, variable-speed PMSG(Permanent Magnet Synchronous Generator) WT and diesel generator applied in island areas. Initially, the operating algorithm was proposed for frequency and voltage to be maintained within the proper ranges for load and wind speed changes. Also, the modeling method is proposed for variable speed PMSG WT, diesel generator and BESS(Battery Energy Storage System). The proposed operating algorithm and modeling method were applied to a typical island area. The frequency and voltage was kept within the permissible ranges and the proposed method was proven to be appropriate through simulations.

**Key Words** : PMSG, Wind Turbine, Diesel Generator, Hybrid Generation System, BESS

### 1. 서론

지리적으로 내륙의 전력망 연계가 어려운 낙도지역에 종전까지 만해도 디젤발전기만으로 전기를 공급하도록 되어 있었지만, 최근 풍력, 태양광발전과 같은 신재생에너지 및 에너지 저장장치(ESS: Energy Storage System)와 결합된 복합발전시스템이 개발되어 최근에는 덴마크, 독일 같은 풍력기술의 선진국을 중심으로 풍력-디젤, 풍력-디젤-담수화설비 형태의 복합발전시스템이 상용화되고 있다. 국외의 경우, 1995년부터 알래스카 지역을 대상으로 500~1000 kW 규모의 풍력-디젤, 풍력-디젤-BESS가 각각 구축되어 운영 중에 있으며, 국내의 경우 2013년부터 가파도, 가사도, 백령도를 중심으로 한 도서지역에 200~500 kW 규모의 풍력-디젤-BESS 복합발전시스템이 실증 및 보급되고 있다.[1-5]

전술의 도서지역 전력공급을 담당하는 복합발전시스템은 풍속, 일사량 및 부하의 변동에 대하여 적정범위내의 전압 및 주파수를 유지하는 것이 어렵다. 이의 대책으로 더미부하, 플라이휠, 2차 전지 저장장치 등을 주발전설비인 디젤발전기에 추가하여 운전하는 방법들이 제안되어 왔다.[6-9]

따라서, 본 논문에서는 적정범위의 전압 및 주파수를 유지할 수 있는 전 풍속에서도 가변속 제어가 가능한 영구자석형(PMSG: Permanent Magnet Synchronous Generator) WT, 디젤발전기 및 BESS로 구성되는 독립운전형 복합발전시스템의 운전제어 알고리즘을 제시하고자 한다.

먼저, 풍속 및 부하의 변동에 대하여 적정범위내의 전압 및 주파수를 유지할 수 있는 독립운전형 복합발전시스템의 전체 운전제어 알고리즘을 제시하고, 이를 입증하기 위하여 가변속 PMSG WT, 디젤발전기 및 BESS의 모델링 방법을 설명하고, 입증대상 독립운전형 복합발전시스템을 PSCAD/ EMTDC를 통하여 모델링하고, 여기에 제안된 운전제어 알고리즘을 적용하여 그 타당성을 입증하기로 한다.

### 2. PMSG 풍력-디젤-BESS 독립운전형 복합발전시스템의 운전제어 알고리즘

본 절에서는 풍속 및 부하의 변동에 대하여 적정범위내의 전압주파수를 유지할 수 있는 PMSG 풍력발전기, 디젤발전기 및 2차전지 저장장치(BESS)로 구성되는 독립운전형 복합발전시스템의 운전제어 알고리즘을 제안하기로 한다.

그림 1과 같이 PMSG 풍력발전기, BESS 및 디젤발전기로 구성되는 독립운전형 복합발전시스템이 부하변동과 풍속변동에도 허용범위내의 전압 및 주파수를 유지하기 위해서는 적절한 수요공급제어가 이루어져야 한다. 기본적으로 BESS는 정전압정주파수(CVCF: Constant Voltage Constant Frequency)제어를 수행하고

† Corresponding Author: School of Electrical Engineering, Chungbuk National University, Korea  
E-mail: jekim@cbnu.ac.kr  
\* School of Electrical Engineering, Chungbuk National University.  
E-mail: simeter@naver.com, sempeule07@hotmail.com, jongho6513@naver.com, pms432@naver.com  
Received: March 1, 2016; Accepted: April 20, 2016

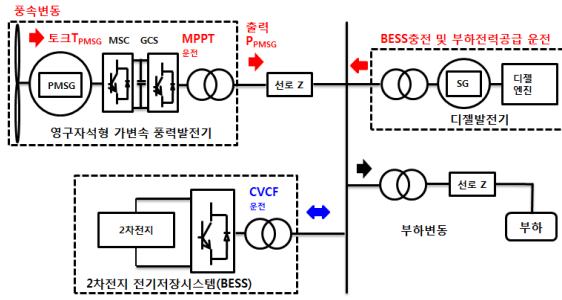


그림 1 영구자석형 가변속 풍력발전기, 디젤발전기 및 저장장치로 구성된 복합발전시스템 구성

Fig. 1 Structure of Hybrid Generation System with PMSG WT, Diesel Generator and BESS

록 하고, 풍속변화에 따른 PMSG 풍력발전기는 저속에서 고속에 이르기까지의 전풍속에 대하여 최대출력을 내도록 하고, BESS의 충전상태(SOC: State of Charge)와 풍력발전의 출력 PMSG와 부하PL의 조건에 따라 그림 2와 같이 운용하도록 한다. 먼저, BESS의 SOC가 어느 최소값(MIN)보다 작은 (1)의 상태, 큰 (2)의 상태 및 그 중간 상태인 3가지 상태로 나누고, (1)의 상태 (SOC(MIN)에서는 디젤발전(DG)을 최대로 출력하여 BESS충전과 부하전력공급을 수행하고, 충전상태를 감시하여 SOC가 50%정도 (MID) 이상으로 되면 풍력발전의 출력(WT)과 부하(Load)의 상태에 따라 (3)의 상태와 (4)의 상태로 나누어 수행한다. 즉, (3)의 상태인 WT<Load이면 DG 운전정지하고, BESS 방전운전하고, 이 상태에서 WT>Load 이면 (4)의 상태로 진행하며 아닌 경우는 SOC와 MIN을 체크하여 다음단계로 진행하도록 한다. (4)의 상태에서 DG 운전정지하고, BESS 방전운전하되 역시 마찬가지로 WT>Load를 비교하여 다음단계로 진행하도록 한다. (2)의 상태에서는 WT와 DG 모두 운전정지하고, BESS는 방전운전을 수행하되, SOC의 상태를 MIN과 비교하여 그 다음단계로 진행하도록 한다.

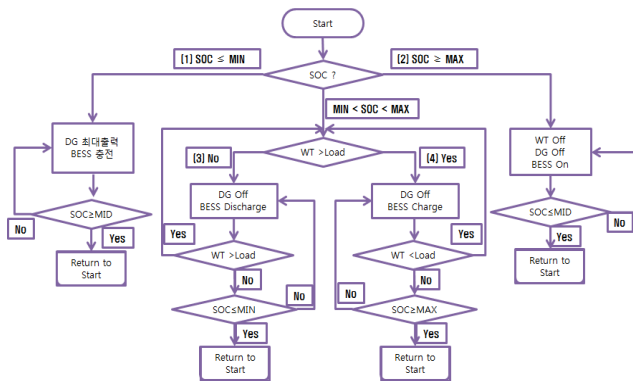


그림 2 PMSG 풍력-디젤-BESS 독립운전형 복합발전시스템의 운전 알고리즘

Fig. 2 Operation Algorithm of Hybrid Generation System with PMSG WT, Diesel Generator and BESS

### 3. PMSG 풍력-디젤-BESS 독립운전형 복합발전시스템의 모델링 방법

본 절에서는 풍속 및 부하의 변동에 대하여 적정범위내의 전압 및 주파수를 유지할 수 있는 가변속 PMSG 풍력발전기, 디젤발전기 및 BESS로 구성되는 복합발전시스템을 모델링하는 방법을 제시하기로 한다.

#### 3.1 가변속 영구자석형 풍력발전기(PMSG WT)

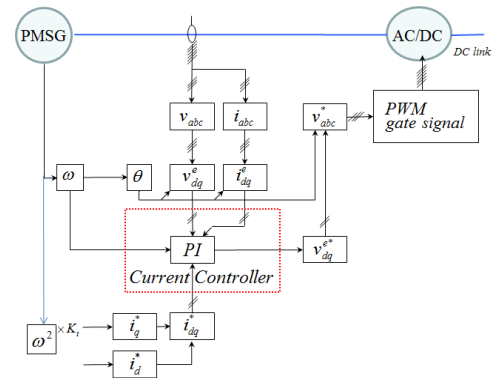
먼저, 풍력터빈의 전기적 출력( $P_{blade}$ )은 바람이 풍력터빈의 블레이드회전단면을 통과할 때 얻어지는 일반화된 대표적인 다음식에 근거하여 모델링한다.[10]

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

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

- 단,  $A$ : 블레이드의 회전단면적 [ $m^2$ ],
- $\rho$ : 공기밀도, 해수면에서  $1.25 [kg/m^3]$ ,
- $\omega$ : 블레이드 회전각속도 [ $rad/sec$ ]
- $C_p : (\gamma - 0.022\beta^2 - 5.6)e^{-0.1\gamma}$
- $\gamma$ :  $V/\omega$ ,  $\beta$ : 피치각
- $T$ : 토크 [ $Nm$ ]  $V$ : 풍속 [ $m/s$ ]

PMSG WT는 AC/DC/AC의 전력변환장치를 통하여 디젤발전기가 CVCVF운전하는 독립운전계통에 연계된다. 이 AC/DC/AC 전력변환장치의 PMSG측 컨버터는 각각 6개의 IGBT로 구성하여 SPWM방식을 적용하고, 블레이드에서 생산된 기계적 에너지를 전기에너지로 변환될 수 있도록 그림 3과 같은 전류제어방식의 전류제어기로 모델링 될 수 있다.



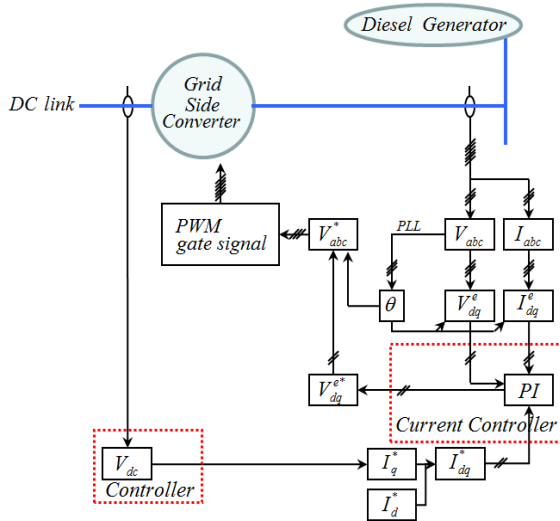
$\omega$ ,  $\theta$ : PMSG의 회전 각속도 및 회전각, PI: 비례적분제어기,  $K_I$ : 전류변환상수,  $v_{dq}^*$ ,  $i_{dq}^*$ :  $v_{abc}$ ,  $i_{abc}$ 의 dq축 성분  $v_{abc}$ ,  $i_{abc}$ : PMSG의 3상 출력전압 및 전류,  $v_{abc}^*$ : AC/DC 컨버터의 스위칭 기준전압,  $v_{dq}^*$ :  $v_{abc}^*$ 의 dq축 성분,  $i_{dq}^*$ :  $i_{abc}$ 의 dq축 기준성분

그림 3 PMSG측 컨버터

Fig. 3 Modeling of Machine-side Converter

WT-MSC의 전류제어를 위해서는 먼저, 3상의 순시전압·전류의 값을 동기위상각  $\theta$ 를 고려하여 동기좌표계로 좌표변환 하고 dq축 기준전류  $i_{dq}^*$ 와 실제 피드백 전류  $i_{dq}$ 로부터 전류제어기를 구성하여 기준전압을 생성한다. 생성된 기준전압은 삼각파 비교방식의 SPWM을 통하여 전력변환장치의 입력이 되도록 한다. 여기에, 2장 그림 2의 알고리즘이 고려되도록 토크-전류 제어기 및 PI 제어기를 추가한다.

독립운전 계통측 전력변환장치(Grid-side Converter)에서는 풍력발전기로부터 DC버스로 입력되는 전력과 계통측으로 출력되는 전력의 상관관계를 수학적으로 연산하여 DC버스의 전압을 일정하도록 그림 4와 같이 제어기를 모델링한다. 제어 블록은 DC버스 전압 일정 제어기와 이를 통한 기준전류( $i_{dq}^*$ ) 신호발생기로 구성된다.



$V_{dc}$ : 직류버스 전압, PLL: 계통전압 위상추정기,  
 $\theta$ : 계통전압위상, PI: 비례적분제어기  
 $V_{abc}, I_{abc}$ : 독립계통측 3상 전압 및 전류,  
 $V_{dq}^e, I_{dq}^e$ :  $V_{abc}, I_{abc}$ 의 dq축 성분,  
 $V_{abc}^*$ : 컨버터의 스위칭 기준전압,  
 $V_{dq}^{e*}$ :  $V_{abc}^*$ 의 dq축 성분,  $I_{dq}^*$ :  $I_{abc}$ 의 dq축 기준성분

그림 4 독립운전 계통측 전력변환장치  
 Fig. 4 Modeling of Grid-side Converter

3.2 디젤 발전기

동기발전기를 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 그림 5와 그림 6에서 각각 제시한 제어기를 적용한다.[10]

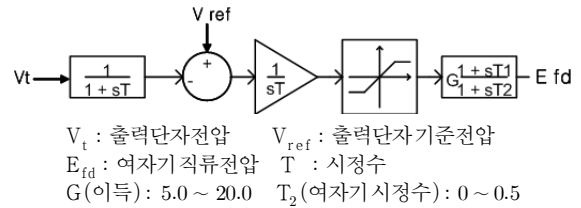


그림 5 동기발전기 여자기 모델  
 Fig. 5 Exciter Model of Diesel Generator

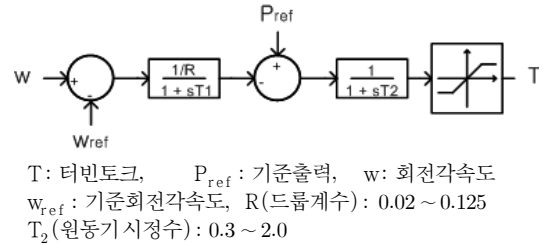
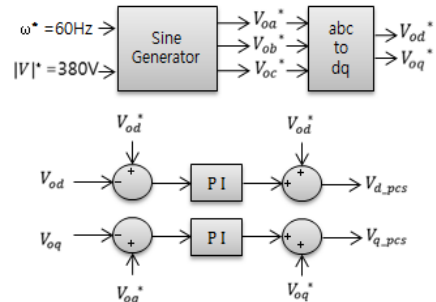


그림 6 동기발전기 조속기 모델  
 Fig. 6 Governor Model of Diesel Synchronous Generator

3.3 2차전지 전력저장장치(BESS) 모델링

풍속변화에 따른 가변속 풍력발전기의 출력변화와 부하변화에 대하여 교류독립계통버스의 주파수와 전압을 적절한 허용범위내로 유지하기 위해서는 BESS의 총방전 운전상태에서 정전압 정주파수(CVCF: Constant Voltage Constant Frequency, 이하 CVCF로 부름) 제어가 가능한 그림 7과 같은 제어기를 적용한다.



$\omega^*, V^*$  : 교류 독립계통버스의 기준 주파수와 전압  
 $V_{oa}^*, V_{ob}^*, V_{oc}^*$ : 교류 독립계통버스의 abc상 기준전압  
 $V_{od}^*, V_{oq}^*$  :  $V_{oa}^*, V_{ob}^*, V_{oc}^*$ 의 d, q축 전압  
 $V_{od}, V_{oq}$  : 교류 독립계통버스의 abc상 측정전압  
 $V_{d.pcs}, V_{q.pcs}$  : BESS의 d, q축 출력전압

그림 7 2차전지 전력저장장치 CVCF 제어기 모델  
 Fig. 7 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 풍력발전

기의 기동시에 발생하는 순시고조파전류에도 안정하게 운전될 수 있어 기존의 무정전 전원공급장치(UPS)에 적용되고 LC필터의 전압전류제어루프를 갖는 CVCF제어기 보다 훨씬 안정적이다.

#### 4. 모의분석 및 고찰

본 장에서는 2장 및 3장에서 제안한 PMSG 풍력 발전시스템-디젤-BESS로 구성되는 복합발전시스템의 운전제어 알고리즘의 타당성을 검증하고자 그림 1의 복합발전시스템 모델계통을 PSCAD/EMTDC에 의하여 그림 8과 같이 이 모델링하였다.

먼저, 영구자석 동기기는 84극 2.618[rad/s]의 정격주파수를 갖는 것으로 하여 PSCAD/EMTDC에서 제공되는 동기기는 극수가 고려되어 있지 않으므로 2.618\*42= 109.956으로 설계하였다. 제안된 모델링 방법과 운전제어알고리즘의 타당성 검증을 위한 모의분석절차는 다음과 같이 하였다.

**Step 1.** t=0~10초: 부하 300kW + j187.5 MVar의 부하투입상태에

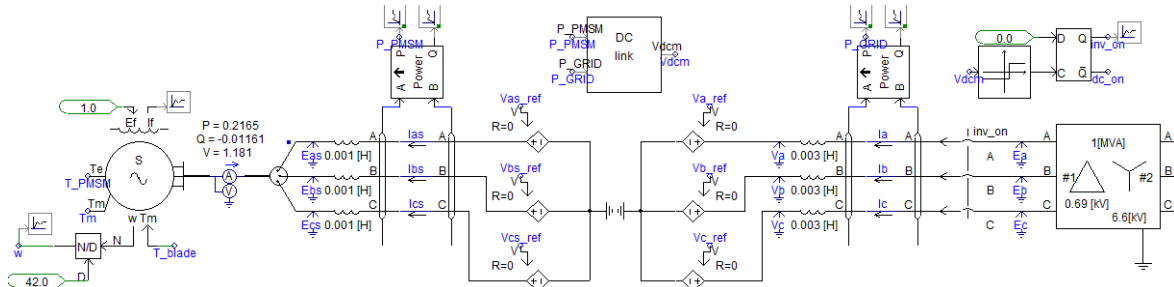
서 BESS CVCF운전 (MIN<SOC<MAX, P<sub>PMSG</sub>=0 < P<sub>L</sub> 인 운전상태)

**Step 2.** t=10~40초: SOC<MIN의 상태를 가정하여 디젤발전(DG) 400kW 최대출력, 풍력발전 기동하여 풍속 5 m/s에서 약 16 kW 발전(P<sub>PMSG</sub> < P<sub>L</sub>)

**Step 3.** t=40~90초: SOC>MID의 상태를 가정하여, 디젤발전(DG) 운전정지, 풍력발전 풍속 5 → 8 → 13 m/s 로 출력증가

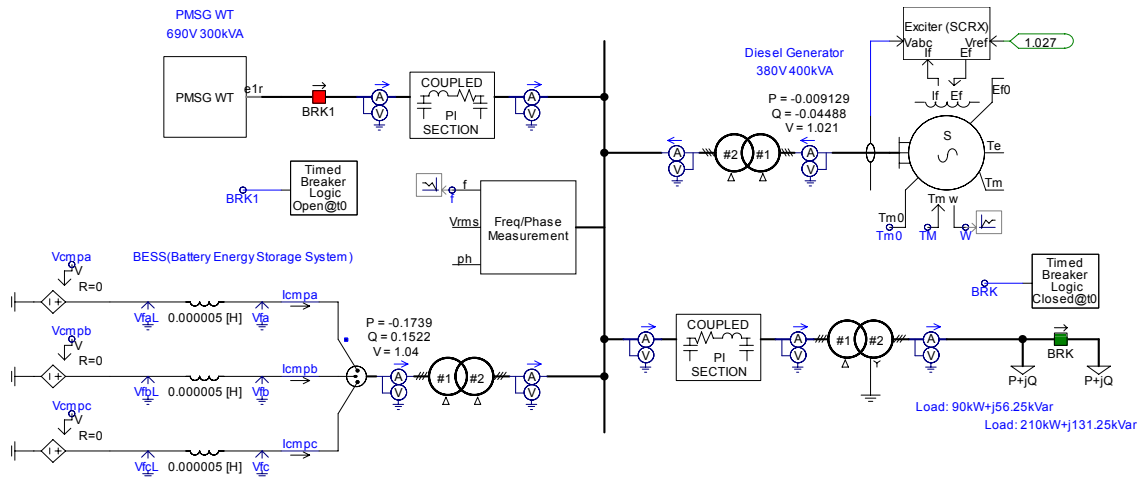
**Step 4.** t=90~100초: 부하 300kW + j187.5 MVar에서 90kW + j56.25kVar로 감소 (P<sub>PMSG</sub> > P<sub>L</sub> 로 변화)

전술의 모의분석절차에 의거한 모의결과를 그림 9(유효 및 무효 전력 출력), 그림 10(전압) 및 그림 11(주파수)에 제시한다. 먼저 t=0~10초의 기간에서 BESS가 CVCF 운전모드에서 300kW + j187.5 MVar의 부하와 선로의 유효 전력손실을 고려한 310kW + j208 MVar의 출력을 내고 있다. 이 때 6.6 kV 버스 및 부하단에서의 전압은 각각 1.02 pu 및 0.99 pu 로 유지되었



a) 가변속 영구자석형 풍력발전기 모델링

a) Modeling of PMSG WT Generator(PMSG, Machine-side Converter, Grid-side Converter and Transformer)



b) 디젤발전기, BESS, 배전선로 및 부하 모델링

b) Modeling of Diesel Generator, BESS, Distribution Lines and Loads

그림 8 PSCAD/EMTDC에 의한 복합발전시스템 모델링

Fig. 8 Hybrid Generation System Modeled by PSCAD/EMTDC

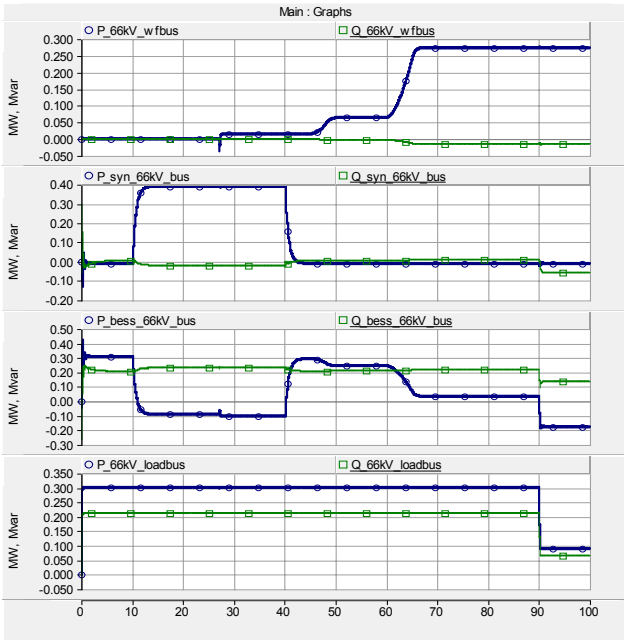


그림 9 6.6 kV 버스에서 측정된 출력전력(위에서부터 순서대로 PMSG WT출력, DG출력, BESS출력, 부하)

Fig. 9 Outputs at 6.6 kV Bus(PMSG WT, Diesel Generator, BESS, Load)

다.  $t=10\sim 40$ 초의 기간에서는 SOC(MIN)의 상태를 가정하여 디젤발전(DG)가 400kW 최대출력을 내고 있는 가운데 BESS는  $-89\text{kW} + j232\text{kVar}$ 로 충전운전을 하고 있되 무효전력은 공급하고 있다.  $t=40\sim 90$ 초의 기간에서는 SOC(MID)의 상태를 가정하여, 디젤발전(DG) 운전정지된 가운데, 풍속  $5\rightarrow 8\rightarrow 13\text{ m/s}$ 에서 풍력발전출력이  $16\rightarrow 66\rightarrow 273\text{ kW}$ 로 증가하였고, 이 때 BESS는  $293\rightarrow 244\rightarrow 37\text{ kW}$  방전감소운전되어 있다. 마지막,  $t=90\sim 100$ 초의 기간동안에는 부하가  $300\text{kW} + j187.5\text{ MVar}$ 에서  $90\text{kW} + j56.25\text{kVar}$ 로 감소된 상태(PPMSG > PL 로 변화)에서 BESS는 174kW 충전운전을 수행하고 있다. 모든 경우에 6.6 kV 버스 및 부하단에서의 전압은 각각 1.02 pu 및 0.99 pu 로 유지되었고,  $t=90$ 에서 부하감소에서 전압이 각각 1.025 pu 및 1.017 pu로 약간 상승되었으나 모두 적정범위에 있음을 알 수 있다. 한편, 전계통의 주파수는 1.004 pu 와 0.996 pu 사이로 허용범위내로 유지됨을 알 수 있었다.

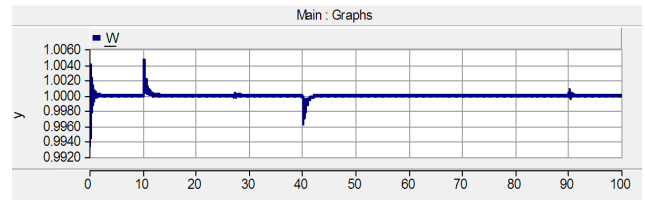


그림 11 복합발전계통의 주파수(pu)

Fig. 11 Frequency of Hybrid Generation System(pu)

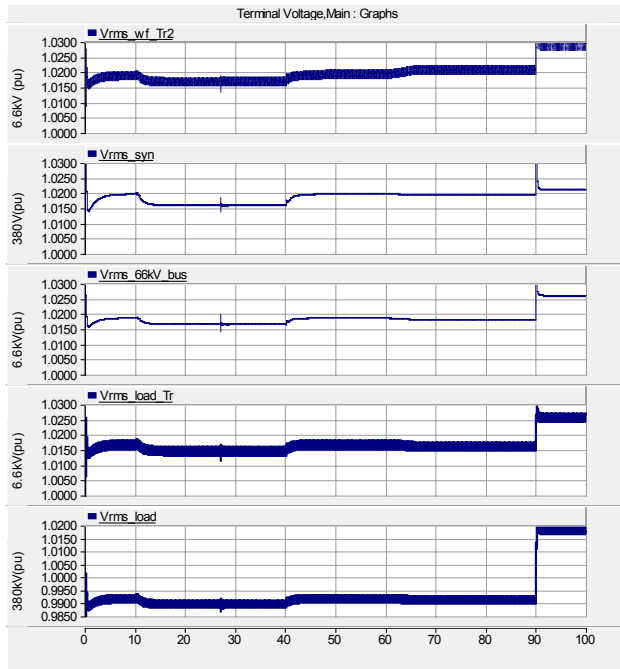


그림 10 각 출력단에서 측정된 전압(pu) (위에서부터 순서대로 PMSG WT 연계변압기 2차측 6.6 kV출력단, DG 380V 출력단, 6.6kV Bus, 6.6kV부하단, 380V부하단)

Fig. 10 Voltages at PMSG WT, 6.6 kV Bus, Diesel Generator Terminal, 6.6kV Bus, 6.6kV Load, 380V Load)

## 5. 결 론

본 논문에서는 도서지역에 적정범위의 전력품질을 갖는 전력을 공급할 수 있는 복합발전시스템을 가변속 PMSG 풍력발전시스템, 디젤발전기 및 BESS로 구성하고, 풍속 및 부하의 변동과 BESS의 충전상태를 고려한 경제적이고 효율적인 운전제어 알고리즘을 제안하였다. 제안된 복합발전시스템 구성과 운전제어알고리즘을 디젤발전으로 운전되고 있는 도서지역의 6.6 kV 독립계통에 적용하고, 이를 PSCAD/ EMTDC 소프트웨어 패키지로 모델링하여 모의한 결과, 독립운전형 하이브리드 발전시스템의 전압 및 주파수변동을 적정범위내계통의 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.

## 감사의 글

이 논문은 2014년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었음

## 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.

- [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.
- [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.
- [4] Woo-Kyu Chae, et.al., "Design and Field Tests of an Inverted Based Remote MicroGrid on a Korean Island" *Energies* 2015.8, pp.8193-8210.
- [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.
- [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.
- [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

저 자 소 개



**김재연 (Jae-Eon Kim)**

He received the B.S. and M.S. degrees from the University of Hanyang in 1982 and 1984, respectively. He was affiliated with KERI as a researcher from 1984 to 1989; a senior researcher form 1989 to 1996; and a team leader of advanced distribution systems and custom power lab from 1997 to 1998. He received

his Ph.D. from Kyoto University, Japan in 1996. He has been a professor at Chungbuk National University since 1998. His current interests are analysis of power quality; operation and design of power distribution systems with distributed generation and advanced distribution systems, such as micro-grid or smart grid with ESS.



**오준석 (Joon-Seok Oh)**

He received the B.S. and M.S. degrees in Electric Engineering from Chungbuk National University, Korea, in 2014 and 2016, respectively. His research interests include operation and design of power distribution systems with distributed generation and ESS.



**정 의 용 (Ui-Yong Jeong)**

He received the B.S. and M.S. degrees in Electric Engineering from Chungbuk National University, Korea, in 2014 and 2016, respectively. His research interests include operation and design of power distribution systems with distributed generation and ESS.



**박종호 (Jong-Ho Park)**

He received the B.S. degree in Electric Engineering from Chungbuk National University, Korea, in 2015. He is currently working toward his M.S. in Electric Engineering at Chungbuk National University. His research interests include operation and design of power distribution systems with distributed generation and ESS.



**박민수 (Min-Su Park)**

He received the B.S. degree in Electric Engineering from Chungbuk National University, Korea, in 2015. He is currently working toward his M.S. in Electric Engineering at Chungbuk National University. His research interests include operation and design of interoperable distribution systems with distributed generation and ESS.