

풍력-디젤-플라이휠 하이브리드 발전시스템 모델링에 관한 연구

김재언*

충북대학교 전자정보대학 전기공학부

Modeling of Hybrid Generation System with Wind Turbine, Diesel Generator and Flywheel Energy Storage System

JAE-EON KIM*

Department of Electrical Engineering, Chungbuk National University

요약 본 논문은 도서지역에서 운용되고 있는 풍력-디젤 하이브리드 발전시스템의 풍속변화 등으로 인한 주파수변동 문제를 해결할 수 있는 플라이휠 저장장치의 모델링 및 제어기 설계 방법을 제안하였다. 플라이휠 저장장치는 효율측면에서 유리한 영구자석 동기기형 플라이휠로 선정하여 모델링하였고, 주파수보상 제어기는 AC/DC/AC 양방향컨버터로 구성하되 동기기형 컨버터는 연계계통의 주파수변동에 대하여 충방전운전을 하도록 하고, 계통측 컨버터는 직류버스전압 일정제어를 통하여 출력을 하도록 설계하였다. 제안된 모델링 및 제어기 설계방법을 풍력-디젤 하이브리드 독립운전계통에 적용한 결과 풍속변화에 따른 주파수변동을 적정범위내로 유지할 수 있었다.

Abstract This paper proposes a modeling and controller design method of Flywheel Energy Storage System(FESS) for solving the unstable operation problem in hybrid generation system with wind turbine and diesel generator applied in island area. FESS is considered as a permanent magnetic synchronous machine connected to flywheel because of its efficiency. The controller of FESS is composed of AC/DC/AC back-to-back converter. The AC/DC converter is designed to charge/discharge according to the frequency variation and the DC/AC converter to operate to keep the DC bus voltage constant. The proposed modeling and controller design method of FESS was applied to hybrid generation system with wind turbine and diesel generator. The unstable operation problem owing to wind variations was solved through simulation results.

Key Words : Wind Turbine, Diesel Generator, Flywheel Energy Storage System, Hybrid Generation, Islanded System

1. 서론

도서지역의 전원문제를 해결하는 방법의 하나로서 풍력-디젤 하이브리드 발전시스템이 고려될 수 있다. 그러나, 풍력-디젤 하이브리드 발전시스템의 경우 풍속변화시 주파수 변동이 심하여[1,2,3] 이에 대한 대책으로서 더미부하[4], 2차전지[5], 슈퍼캐패시터[6], 이중여자형 유도발전기(DFIG)[7,8,9], 등을 채용한 다양한 형태로 제시되어 왔으나, 제어의 복잡성, 유지관리 및 경제성의 문제로 최근에는 플라이휠 저장장치를 이용한 방법이 제안되고

있다.[10,11] 그러나, 유도기방식의 플라이휠 저장장치는 유지관리면에서는 유리하나 손실측면에서 문제가 된다. 따라서, 본 논문에서는 손실 및 유지관리측면에서 상대적으로 유리한 영구자석 동기기 방식의 플라이휠 저장장치[12]를 이용하여 풍속변화에 따른 주파수변동을 보상하는 방법을 제안하고자 한다. 특히 논문[3]에서 풍력-디젤 하이브리드 발전시스템의 제어기를 모델링하는 방법을 제안하여 그 특성을 분석한 결과 풍속변화시 주파수 변동이 심하다는 결론을 얻었다. 따라서, 본 논문에서는 이와 같은 풍속변화에 따른 주파수 변동문제를 보완

이 논문은 2011년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

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

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

Received April 26, 2013 Revised (1st May 9, 2013, 2nd May 24, 2013, 3rd June 5, 2013)

Accepted June 7, 2013

하고자 영구자석형 동기기에 연결되는 플라이휠일의 속도 제어 모델링 방법과 여기에 AC/DC/AC Back-to-Back 방식의 전력변환장치의 주파수변동 보상제어기 설계방법을 제안한다. 그리고, 제안된 속도제어 플라이휠일저장장치 모델과 주파수변동 보상제어기를 주파수변동의 문제가 되는 풍력-디젤 하이브리드 독립운전 모델계통[3]에 연결하여 그 성능을 모의해석전문 소프트웨어 패키지인 PSCAD/EMTDC[13]을 통하여 검증하기로 한다.

2. 영구자석 동기기 방식의 플라이휠일 저장장치 모델링 및 제어기 설계방법

본 장에서는 풍력-디젤 하이브리드 독립운전 모델계통[3]의 풍속변화시 주파수 변동 문제를 해결하기 위하여 먼저 플라이휠일저장장치를 모델링하는 방법을 제안하고, 주파수 변동시 저장된 에너지를 충방전함으로써 주파수 변동을 억제할 수 있는 플라이휠일 저장장치 제어기 설계방법을 제안하기로 한다.

2.1 플라이휠일저장장치(FESS) 모델링

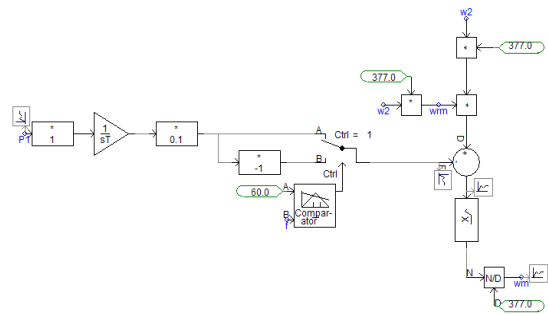
관성질량 J를 갖는 플라이휠일이 각 속도 ω 로 회전하는 경우 저장되는 에너지는 $1/2J\omega^2$ 으로서 각속도가 ω_1 에서 ω_2 로 변화된 경우 에너지 변화는 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$E_2 - E_1 = \frac{1}{2} J(\omega_2^2 - \omega_1^2) = \int_{t_1}^{t_2} p dt \quad (1)$$

$$\omega_2^2 = \frac{2}{J} \int_{t_1}^{t_2} p dt + \omega_1^2 \quad (2)$$

여기서 식(2)을 이용하여 $\omega_2 > \omega_1$ 인 경우는 속도가 증가하여 식(1)의 전력 p가 +로 되어 에너지가 저장되는 모터운전모드로, $\omega_2 < \omega_1$ 인 경우는 속도가 감소하여 식(1)의 전력 p가 -로 되어 에너지가 방출되는 발전운전모드로 모델링을 수행하도록 한다.

모델링 대상 플라이휠일 저장장치는 기존에 상용화 판매되고 있는 Beacon Power사의 25 kWh (90MJ)을 기준으로 하여 정격 15,000 rpm(250 Hz, 1570.796 rad/s), 관성질량 $J=72.951 \text{ kgm}^2$ 로부터 식(2)를 만족하도록 그림 1과 같이 모델링하였다



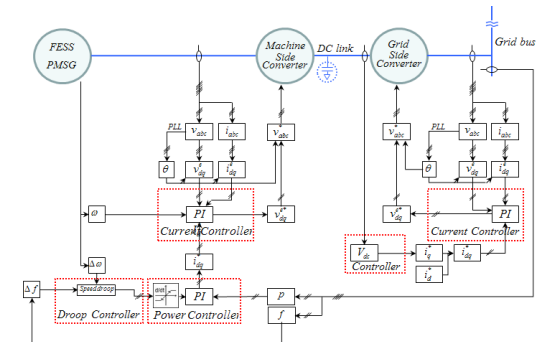
P_f: 플라이휠일의 출력전력 1/sT: 적분기
w2, wm: 식(1), (2)의 w1 및 w2

[Fig. 1] Flywheel Modeling

그림 1에서의 P1은 FESS의 방전(발전)전력으로서 계통의 주파수 f가 기준 주파수 60Hz 보다 작으면 FESS로부터 전력을 공급해야 하므로 스위치의 위치가 1로 되어 발전함으로써 플라이휠일의 속도가 감소되도록 모델링하였다.

2.2 플라이휠일저장장치 제어기 설계

주파수변동을 억제할 수 있는 플라이휠일저장장치의 제어기는 고속 및 효율에 유리한 영구자석형 동기기(PMSG)에 AC/DC/AC의 Back-to-Back 컨버터가 연결된 그림 2와 같은 구성을 선정하였다.



[Fig. 2] FESS Controller Structure

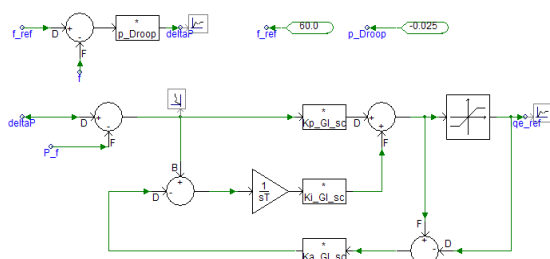
풍속변화에 따른 주파수변동 보상을 위하여 제안된 그림2의 FESS 저장장치 제어기의 설계방법은 다음과 같다. 먼저, 영구자석형 동기기측에 연결되어 있는 컨버터(MSC: Machine-side Converter)가 독립운전계통의 주파수변동을 검출하여 식(1), (2) 및 그림 1에 근거하여 플라이휠일이 충방전운전을 수행하도록 전류제어를 수행하고, 독립운전계통측에 연결되어 있는 컨버터(GSC: Grid-side Converter)는 직류버스의 전압을 일정하게 유지하게 함으로써 플라이휠일의 충방전 전력을 독립운전계

통에 전달하도록 한다. 하기에 이에 대한 상세 설계 및 모델링 방법을 기술하도록 한다.

먼저, 풍속변화에 따른 주파수변동 보상을 위한 플라이휠저장장치의 순간적인 충방전동작을 제어하는 MSC 제어기 설계방법에는 다음과 같은 Droop 계수 K를 이용하는 설계방법을 제안한다.

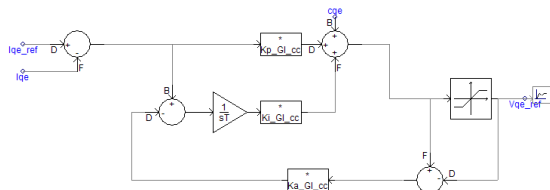
$$\Delta f = f - f_{ref} = K\Delta P \quad (3)$$

즉, 그림 2의 독립운전계통의 주파수 f 를 검출하여 유지하고자 하는 기준주파수 $f_{ref} = 60 Hz$ 보다 크면 식(3)에 의거하여 변동량 $\Delta P(+)$ 가 플라이휠로부터 충전되도록 그림 3과 같이 PI전류제어기를 설계하여 얻어진 I_{qe_ref} 와 PLL에 의하여 추정된 FESS PMSG의 전압위상을 기준으로 MSC 스위칭전압제어 기준신호를 만들어 내어 그림 4와 같이 설계된 MSC 스윗칭제어회로에 입력되도록 한다(출력전류는 충전기준임).



f_{ref} : 기준주파수 f : 대상독립운전계통주파수
 δP : 식(3)의 ΔP p_Droop : 식(3)의 $-1/K$
 P_f : 플라이휠의 출력전력
 Kp_GI_sc, Ki_GI_sc : 비례, 적분 제어상수
 Ka_GI_sc : anti-windup 상수
 I_{qe_ref} : 변동량 $\Delta P(+)$ 에 상응하는 기준전류값

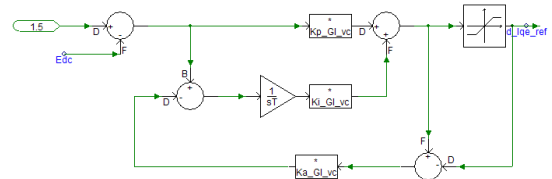
[Fig. 3] Frequency Compensation Controller



I_{qe} : FESS PMSG의 출력전류
 cqe : FESS PMSG의 출력전압
 V_{qe_ref} : MSC 스윗칭 전압제어 기준신호
 Kp_GI_cc, Ki_GI_cc : 비례, 적분 제어상수
 Ka_GI_cc : anti-windup 상수

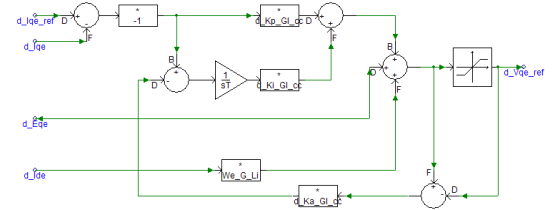
[Fig. 4] Switching Controller of MSC

한편, 계통측 컨버터(GSC: Grid-side Converter)는 직류버스의 전압을 일정하게 유지하도록 그림 5과 같이 PI전류제어기를 설계하여 얻어진 $d_I_{qe_ref}$ 와 PLL에 의하여 추정된 독립운전계통의 전압위상을 기준으로 GSC 스위칭 전압제어기준신호를 만들어 내어 그림 6과 같이 설계된 GSC 스윗칭제어회로에 입력되도록 한다.



E_{dc} : 직류버스전압 1.5: 기준직류전압[kV]
 Kp_GI_vc, Ki_GI_vc : 비례, 적분 제어상수
 Ka_GI_vc : anti-windup 상수
 $d_I_{qe_ref}$: 기준직류전압에 상응하는 기준전류값

[Fig. 5] DC Voltage Controller of FESS GSC

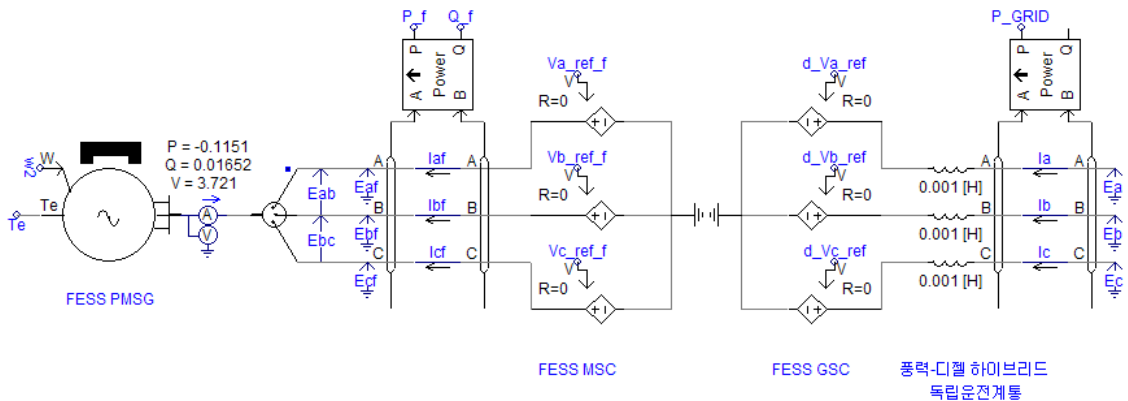


d_I_{qe} : GSC의 출력전류
 d_E_{qe} : GSC의 출력전압
 $d_V_{qe_ref}$: GSC 스윗칭 전압제어 기준신호
 Kp_GI_cc, Ki_GI_cc : 비례, 적분 제어상수
 Ka_GI_cc : anti-windup 상수

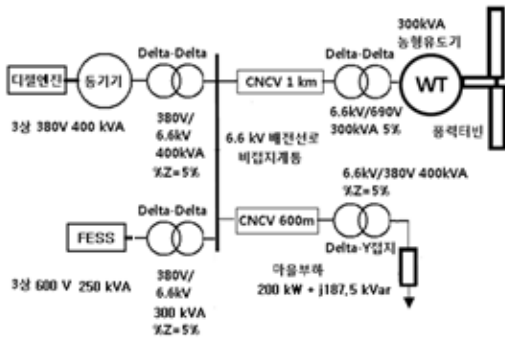
[Fig. 6] Switching Controller of FESS GSC

3. 모의분석 및 고찰

본 장에서는 2장에서 제안한 주파수변동 보상용 FESS의 모델링방법과 제어기의 설계방법을 검증하고자 그림 7과 같이 PSCAD/EMTDC에 의하여 모델링된 FESS를 구성하였다. 그리고 이 FESS와 제어기를 주파수변동의 문제점을 가지고 있는 참고문헌[3]의 풍력-디젤 하이브리드 독립운전계통 모델에 그림 8과 같이 연결하여 그 효과를 검증하기로 한다.



[Fig. 7] FESS Modeled by PSCAD/EMTDC

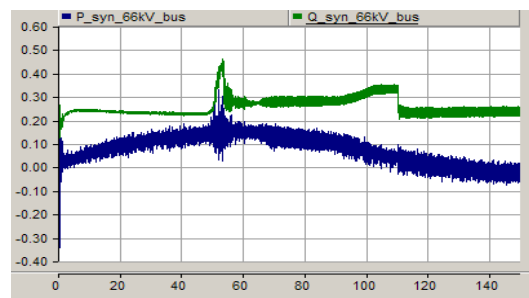


[Fig. 8] WT-Diesel-Flywheel Hybrid Systems

제안된 FESS의 주파수변동 보상효과를 검증하기위한 모델계통 그림 8에 대한 모의분석절차는 다음과 같이 하였다.

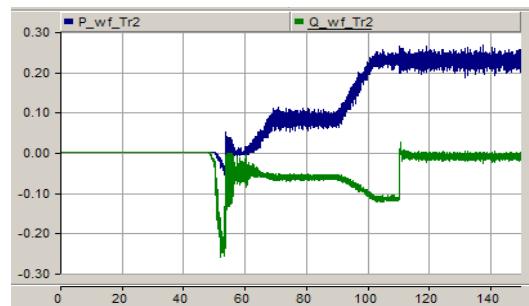
- Step 1. $t=0$ 초에서 디젤발전기 기동
3상 200 kW + j 187.5 kVar 투입상태
FESS 투입상태
- Step 3. $t=30$ 초~45초: 15초간
(0 m/s에서 5 m/s로 풍속변화)
- Step 4. $t=60$ 초~69초: 9초간
(5 m/s에서 8m/s로 풍속변화)
- Step 5. $t=90$ 초~102초: 12초간
(8 m/s에서 12m/s로 풍속변화)
- Step 6. $t=110$ 초에서 100 kVA 커패시터투입

먼저 $t=0$ 의 상태에서 정전압정주파수 운전모드의디젤 발전기가 3상 200 kW + j 187.5 kVar 의 부하에 1.0 pu(60Hz) 주파수의 전력을 공급하도록 하였다. 모든 그림에서의 가로축 단위는 초이다.



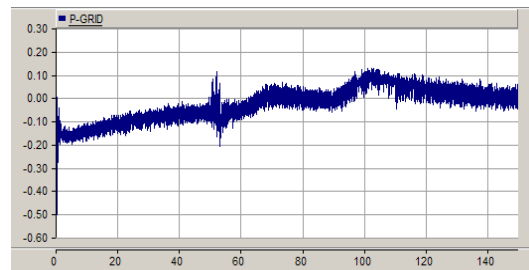
상: 무효전력(Mvar) 하: 유효전력(MW)

[Fig. 9] Diesel Output at 6.6 kV Bus



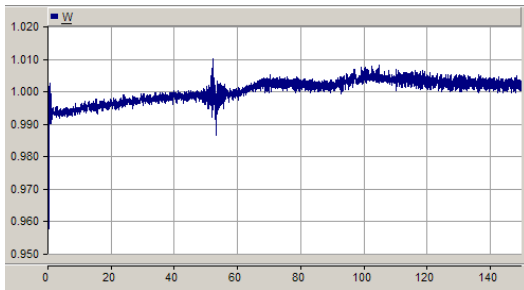
상: 유효전력(MW) 하: 무효전력(Mvar)

[Fig. 10] Wind Turbine Output at 6.6 kV Bus



+값: 충전(MW): -값: 방전(MW)

[Fig. 11] FESS Output at 6.6 kV Bus



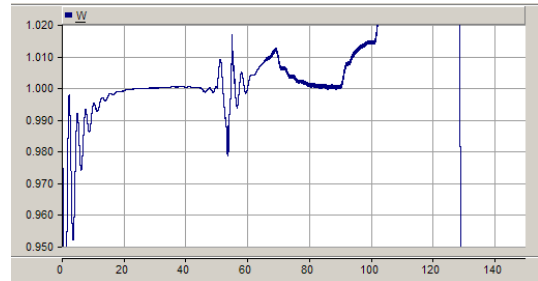
세로축 단위: pu (1.0은 60Hz임)
 [Fig. 12] Frequency Variation [pu]

그림에서 알 수 있듯이 처음에는 디젤발전기와 플라이휠이 같이 부하에 전력을 공급하고 있다(그림 11에서 +가 플라이휠이 충전, -가 방전임) 풍속이 5 m/s, 8 m/s, 12 m/s 로 변화함에 따라 풍력발전의 출력이 증가하게 됨으로써 그림9의 디젤발전기의 출력은 점차적으로 작아지고, 그림 10의 풍력발전기의 출력이 부하를 초과하는 시점에서는 디젤발전기의 출력은 거의 0이 되고 초과된 풍력발전기의 출력량은 플라이휠 저장장치에 의하여 흡수됨(충전, 즉 모터링)을 알 수 있다. 이 때, 풍속 변화에 따른 FESS의 주파수 보상 효과를 살펴보면, 그림 12(주파수 단위 pu, 1 pu = 60 Hz)에서와 같이 풍속변화에도 불구하고 계통의 주파수는 $\pm 1\%$ 내로 즉, 정격주파수 60 Hz 를 기준으로 59.4 Hz 에서 60.6 Hz사이의 적정유지 범위가 잘 유지됨을 알 수 있다. 이것은 풍속변화에 따른 풍력발전기의 순간적인 출력변화가 가져오는 주파수 변화를 검출하여 이를 순간적으로 보상해야할 총방전 전력량을 결정하여 빠르게 응답하는 제안된 플라이휠의 MSC 및 GSC의 제어기 효과에 기인한 것으로 판단된다.

한편, FESS가 연결되어 있지 않은 풍력-디젤 하이브리드 계통에 대하여 모의분석하면, 그 때의 주파수는 그림 13에서와 같이 풍속변화에 대하여 계통의 주파수는 $\pm 1\%$ 를 훨씬 벗어나고, 또한 풍력발전량이 부하량을 상회하는 시점, 즉 그림 10에서와 같이 풍력발전량이 부하 200 kW보다 커지는 약 100초 부근 이후부터는 전력공급이 수요보다 커지게 되므로 계통의 주파수가 상승하여 결국 주파수를 유지하고 있는 디젤발전기가 과속되어 탈조 정지하게 된다. 그 이유는 플라이휠과 같이 풍력발전기에 의하여 초과공급된 발전량을 소비 또는 흡수하여 줄 곳이 없기 때문이다.

제안된 주파수변동 보상을 FESS의 모델과 제어기는 풍속변화에 따른 주파수 변동을 잘 보상함으로써 독립운전계통의 주파수가 적정범위내($\pm 1\%$)로 잘 유지되도록 하였고, 이외에 추가적인 장점으로서 풍력발전량이 부하량을 초과하는 경우 그 초과 발전량을 흡수 또는 충전할

수 있는 모터링 모드로 동작하여 디젤발전기가 과속 및 탈락하지 않도록 할 수 있음을 확인할 수 있었다.



세로축 단위: pu (1.0은 60Hz임)
 [Fig. 13] Frequency Variation without FESS[pu]

4. 결론

본 논문에서는 도서지역의 독립운전형 풍력-디젤 하이브리드 계통의 풍속변화에 따른 주파수변동문제를 해결할 수 있는 영구자석형 동기방식의 플라이휠 저장장치 모델링 및 주파수 변동 보상 제어기 설계방법을 제안하였다. 제안된 모델링 및 제어기 설계방법의 타당성을 검증하기 위하여 PSCAD/EMTDC S/W 패키지를 이용하여 풍력-디젤 하이브리드 계통에 제안된 FESS 모델과 제어기를 모델링하여 모의분석하였다. 그 결과 풍속변화에 따른 주파수 변동은 적정범위내($\pm 1\%$)로 잘 유지됨을 확인할 수 있었고, 또한 풍력발전량이 부하량을 초과하는 경우 FESS가 모터링으로 동작하여 주파수를 잘 유지함을 확인할 수 있었다. 이로써 FESS의 모델링 및 주파수 보상을 제어기의 타당성을 입증하였다.

References

- [1] Eduard Muljadi, H. Edward Mckenna, "Power Quality Issues in a Hybrid Power System", IEEE Transactions On Industry Applications, Vol. 38, No. 3, May/June 2002.
 DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TIA.2002.1003433>
- [2] 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)
- [3] 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

- [4] R. Hunter and G. Elliot, Wind - Diesel Systems: A Guide to the Technology and Its Implementation. Cambridge, U.K.: Cambridge Univ. Press, 1994.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1017/CBO9780511574467>
- [5] 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>
- [6] C. Abbey and G. Joos, "Super Capacitor Energy Storage for Wind Energy Applications", IEEE Trans. Ind. Appl., Vol. 43, No. 3, pp. 769 - 776, May/Jun. 2007.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TIA.2007.895768>
- [7] R. Pena, R. Cardenas, J. Proboste, J. Clare, and G. M. Asher, "'Wind - Diesel Generation using Doubly Fed Induction Machines", IEEE Trans. Energy Convers, Vol. 23, No. 1, pp. 202 - 214, Mar. 2008.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TEC.2007.914681>
- [8] R. Pena, J. C. Clare, and G. M. Asher, "A Doubly Fed Induction Generator using Back-to-Back PWM Converters Supplying an Isolated Load from a Variable Speed Wind Turbine", IEE Proc. Electr. Power Appl., Vol. 143, No. 5, pp. 380 - 387, Sep. 1996.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1049/ip-epa:19960454>
- [9] 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>
- [10] Gabriel O. Cimuca, et. al., "Control and Performace Evaluation of a Flywheel Energy Storage System Associated to a Variable Speed Wind Generator", IEEE Transactions On Industrial Electronics, Vol. 53, No. 4, August 2006.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TIE.2006.878326>
- [11] Gabriel O. Cimuca, et. al., "Design and Control Strategies of an Induction-Machine-based Flywheel Energy Storage System Associated to a Variable Speed Wind Generator", IEEE Transactions On Industrial Electronics, Vol. 25, No. 2, June 2010.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TEC.2010.2045925>
- [12] <http://www.beaconpower.com/>
- [13] PSCAD/EMTDC Power System Simulation Software

user's Manual, Manitoba HVDC Research Centre, Winnipeg, Canada.

김 재 연(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 전자정보대학 전기공학부 교수

<관심분야>

전력/배전 계통, 분산전원연계, 전력품질해석, Microgrid 설계