

약한 계통에 연계된 풍력발전기의 과도안정도 해석

서규석*, 박지호¹
¹거제대학교 선박전기과

Transient Stability Analysis of Wind Turbine Generator Connected to a Weak Grid

Gyu-Seok Seo^{*}, Ji-Ho Park¹

¹Dept. of Electrical Engineering, Koje College

요약 약한 계통은 단락비가 작고 임피던스가 크므로 과도 안정도 여유도가 매우 낮다. 약한 계통에 사고가 발생하면 보호 시스템은 사고 전로를 개방함으로써 사고를 제거하는데 이것은 시스템의 안정도를 더욱 약하게 만든다. 그러므로 약한 계통의 안정도 여유를 증가시키기 위한 하나의 방법은 시스템에 추가적인 발전기를 연결하는 것이다. 본 논문에서는 약한 계통의 안정도 여유도를 증가시키기 위하여 기존의 동기발전기를 추가하는 경우와 풍력발전기를 추가하는 경우의 안정도 여유도를 비교한다. PSSE를 이용한 과도안정도 시뮬레이션 결과 풍력발전기가 충분한 제동력을 제공하고 안정도 여유를 증가시킬 수 있었다. 풍력발전기를 추가할 때 안정도 여유도는 CCT 기준으로 5배까지 향상되었다.

Abstract The margin of transient stability of a weak grid system is very low because of the small short-circuit ratio and large impedance. If the fault of the weak grid is cleared by the protection system, one of the major lines is disconnected after the fault is cleared. This further reduces the system strength. Therefore, it is necessary that a new generation system be added to the weak grid to enhance the transient stability margin. A conventional synchronous generator and wind turbine generator were added to a base grid system. The results of transient stability analysis with additional generators using PSSE were compared. The simulations showed that wind turbine generators provide good damping performance and enhance the transient stability margin based on CCT up to 5 times.

Key Words : Transient Stability, Weak Grid, Wind Turbine Generator

1. 서론

내륙이나 바다에 설치되는 풍력단지에는 전력선을 통하여 전력계통에 연계된다. 풍력에너지를 이용한 발전 즉 풍력발전의 가장 도전적인 문제들 중 하나가 풍력자원의 불확실성이다. 일정하지 않은 풍속이나 풍량의 변화는 연계된 전력계통의 전압의 맥동을 일으켜 플리커를 발생시킨다. 그러므로 기존의 전력계통에 연계되는 풍력발전량이 적정량 이상으로 많아지면 전력계통의 안정도에 나

쁜 영향을 줄 수 있다. 하지만 약한 계통[1]에 풍력발전기를 추가하면 사고가 발생했을 때 동기발전기를 추가하는 경우보다 더 많은 제동력을 제공하여 시스템을 안정화시킬 수 있다. 기존의 연구에서는 주로 약한 계통에 풍력발전기가 연결된 경우의 전압안정화에 초점을 두고 있다. 참고문헌 [2]는 약한계통에 풍력발전기를 이용하여 전력을 공급할 때 PI제어를 통한 전압안정화를, 참고문헌 [3]은 HVDC를 통하여 연결된 해상 풍력발전기의 전압안정화를 위한 방법을 제시했다. 본 논문은 약한 계통의 과도

이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(NRF-2012R1A1A1042577)

*Corresponding Author : Gyu-Seok Seo(Koje College)

Tel: +82-55-680-1558 email: gsseo@koje.ac.kr

Received March 19, 2014

Revised (1st May 7, 2014, 2nd June 3, 2014)

Accepted July 10, 2014

안정도 향상을 위한 추가적인 발전기의 연계에 관한 연구이다.

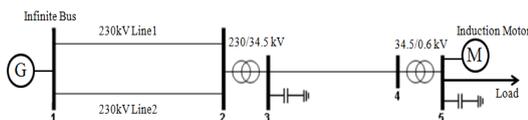
일반적으로 약한 계통은 부하에 충분한 전력을 공급할 수 없는 계통을 의미하는데 이것에 대한 엄격한 정의는 없지만 보통은 단락비가 20이하로 매우 작다. 약한 계통은 강한 계통만큼 전압이 일정하지 않고 계통의 임피던스가 중요하여 계통해석에 반드시 고려해야만 한다. 단락비와 X/R 비는 계통의 강인한 정도를 보여주는데 이것이 작아지면 계통은 더 약하게 된다. 약한 계통은 보통 배전거리가 멀어 전압이 낮은 원거리 지역에 나타난다. 그러므로 약한 계통은 과도상태의 안정도 여유도는 매우 낮다. 선로에 사고가 발생하면 보호계전기가 사고를 해소하기 위하여 사고 선로를 제거하게 되는데, 이때 계통은 임피던스의 증가로 인하여 더욱 약하게 된다. 이러한 계통의 안정도 여유도를 증가 시키는 방법은 추가적인 발전기를 계통에 연결하는 것이다.

본 논문에서는 먼저 약한 계통으로 구성되는 테스트 시스템에 대하여 안정도 여유도를 평가하기 위하여 과도안정도 해석을 수행한다. 다음으로 테스트 시스템에 기존의 동기발전기를 추가하여 안정도 여유도를 평가하고 마지막으로 동기발전기 대신에 풍력발전기[4-6]를 추가하여 과도안정도를 계산한 후 동기발전기를 추가한 경우와 결과를 비교한다. 안정도 여유도를 평가하기 위하여 약한 계통의 부하로 대형 유도전동기를 연결한다. 모의 결과에서 풍력발전기는 약한 계통에 향상된 제동을 제공하여 안정도 여유도를 증가시킨다.

2. 본론

2.1 테스트 시스템

Fig. 1은 본 논문에서 사용된 테스트 시스템의 단선도를 나타낸 것이다. 유도전동기와 일정 전력의 부하가 변압기, 선로, 병렬 전송선로를 통하여 무한대 모선에 연결되어있다. 모선1과 모선2 사이에 선로의 총 리액턴스의 값은 모선2에서의 단락비가 10으로 약한 계통에 해당한다.



[Fig. 1] Single line diagram of test system

이 테스트 시스템에는 모선5에 큰 부하가 연결된다. 유도전동기는 30MW 그리고 고정부하는 50MW 이다.

2.2 과도안정도 평가방법

전력계통에서는 계통의 구성을 변경시키는 사고가 빈번하게 발생한다. 보호계전기가 사고 선로를 제거하기 때문에 계통 구성에 변화가 생기는 것이다. 만일 사고가 발생하면 계통은 더 이상 정상상태가 아니다. 과도상태에서 얼마나 빨리 사고를 제거하느냐에 따라 계통은 다시 안정화를 유지할 수 있다. 과도상태의 안정도를 평가하기 위해서는 임계고장제거시간(CCT: Critical Clearing Time)을 계산한다. CCT는 발전기의 안정도를 유지하기 위한 최대의 고장제거 시간이다. 본 논문에서는 CCT계산을 통하여 계통의 안정도 여유도를 평가한다. CCT가 크면 안정도 여유도가 크다고 판단할 수 있다. Fig. 1에서 모선1-2 사이의 하나의 선로에서 3상 단락사고가 발생했다고 가정하고 사고 선로를 트립시켜 사고를 제거하면 모선2에서의 단락비는 반으로 줄어든다. 즉 이 시스템의 안정도 여유도는 더욱 줄어들게 된다.

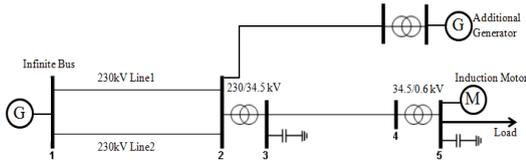
Fig. 1에서 무한대모선에 연결된 동기발전기에서 부하 모선으로 전송되는 유효전력은 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$P_e = \frac{EV}{X_{eq}} \sin\delta = P_{max} \sin\delta \quad (1)$$

여기서 E는 무한대 모선의 전압, V는 부하모선의 전압, X_{eq} 는 모선1과 모선5사이의 등가 리액턴스 그리고 δ 는 모선1과 모선5의 위상각차이다.

사고로 인하여 모선1과 모선2사이의 한 개의 선로가 트립되면 모선1과 모선2사이의 사고제거 후의 리액턴스 크기는 증가하여 사고전의 리액턴스 크기보다 커지게 된다. 그러면 식(1)에서 P_{max} 가 감소하게 되어 부하로 전송되는 유효전력이 감소한다. 따라서 위상각 δ 가 증가해야만 부하가 필요로 하는 유효전력의 공급이 가능하다. 하지만 δ 의 급격한 증가는 전력계통을 더욱 불안정하게 만든다[7]. 부하모선의 전압강하는 사고전보다 사고제거 후에 커지게 되고 리액턴스 값의 증가는 전력계통의 CCT를 작아지게 한다. 그러므로 CCT증가시켜 약한 계통의 안정도 여유도를 증가시키기 위해서는 약한 계통에 추가적인 발전기를 연결하는 것이 필요하다. 본 논문에서는 두 가지 경우에 대하여 모의를 수행한다. 첫 번째는 기존

의 동기발전기를 추가하는 것이고, 두 번째는 풍력발전기로 구성되는 풍력단지를 추가하는 경우이다. 발전기가 추가되는 위치는 Fig. 1의 모선2이다. Fig. 2는 발전기가 추가된 전력계통의 단선도이다. Fig. 2의 전력계통은 PSSE[8]으로 구현한 것이다.



[Fig. 2] Test system with additional generator

3. 과도안정도 해석

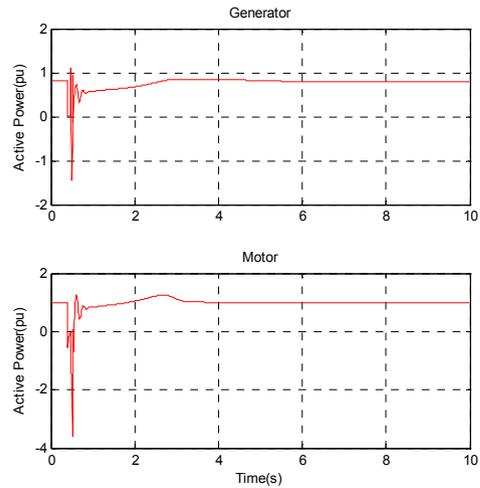
본 논문에서는 테스트 시스템에 대하여 선로의 사고를 가정하여 발전기와 모터의 동적인 응답을 모의하여 CCT를 계산한다. 계산된 CCT의 크기를 이용하여 안정도 여유도를 평가한다. 본 논문에서는 PSSE를 이용하여 과도안정도를 모의한다.

3.1 약한 계통의 과도안정도 해석

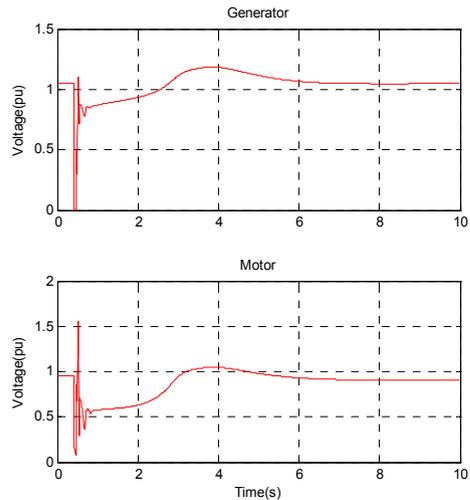
Fig. 1에서 무한대 모선에 연결된 동기발전기는 PSSE의 라이브러리 모델에 내장되어 있는 GENSAL모델이다. 부하모선에 연결된 유도전동기는 역시 PSSE의 라이브러리 모델에 내장되어 있는 CIM5BL모델이다. Fig. 1에서 선로 "230kV Line1"에 3상 지락사고를 가정하고 선로를 개방하여 고장을 제거한다. PSSE를 이용한 모의에서 임계고장제거시간 즉 CCT를 구하는 방법은 먼저 정상상태에서 사고를 가정하고 일정시간동안 사고를 지속시킨 다음 사고선로를 제거하여 사고를 제거시킨 사고 후의 상태에서 발전기와 모터의 응답을 파악한다. 이때 발전기와 모터의 응답이 새로운 동작점으로 수렴하면 안정하다고 판단하고, 그렇지 못하면 불안정하다고 판단한다. 이 과정을 반복적으로 수행하여 사고 후 응답이 새로운 동작점으로 수렴하지 않고 동기화를 상실하는 고장지속 시간을 찾게 된다. 이 시간 바로 직전의 사고제거시간이 바로 CCT가 된다.

이러한 모의과정은 시간이 많이 소요되고 복잡하지만 PSSE에서 제공하는 Python을 이용한 사용자 정의 프로그래밍 방식은 일련의 과정을 자동화 할 수 있도록 해준다.

다. 모의결과 Fig. 1의 약한 계통의 CCT는 0.06s인데 이 값은 매우 작다.



[Fig. 3] Active power response



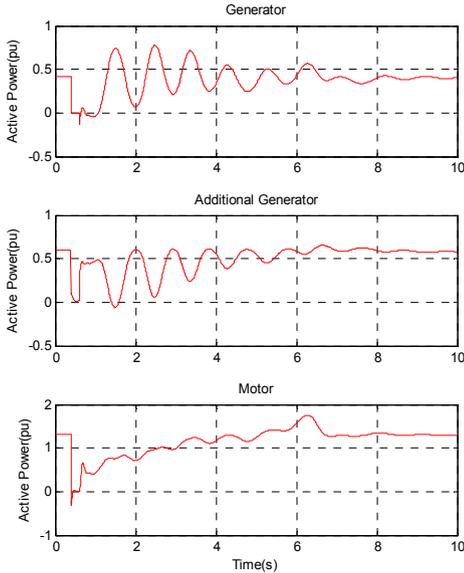
[Fig. 4] Voltage response

Fig. 3과 Fig. 4는 고장제거시간이 0.06s일 때 발전기와 모터의 유효전력과 전압응답을 나타낸 것이다. 모터의 전압응답이 사고제거 후에 2초 정도는 아주 낮은 전압을 유지하다가 정상적으로 회복하는데 6초 정도가 소요된다. 실제의 계통이라면 모터가 트립 될 수 있는 상황이다.

3.2 약한 계통에 동기발전기를 추가한 경우의 과도안정도 해석

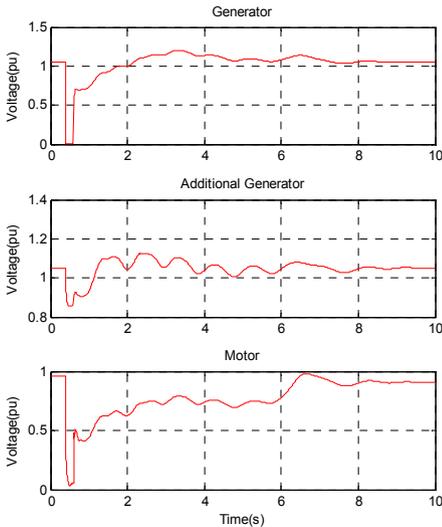
Fig. 2에서 추가한 발전기는 PSSE의 라이브러리 모델

중 GENROU 동기발전기이다. 추가되는 발전기의 출력을 다양하게 변화시켜 모의를 수행하여 추가되는 발전기의 출력은 30MW이상이어야 한다는 결과를 얻었다. 발전기의 출력이 30MW에서 60MW까지의 CCT는 0.2s이다. 하지만 60MW이상에서는 오히려 CCT는 감소한다. 3.1절의 경우보다 CCT는 크게 증가했다.

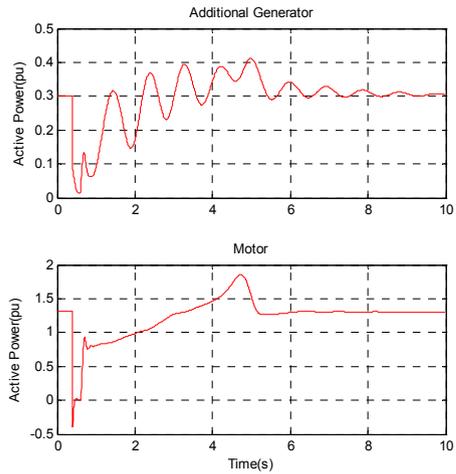


[Fig. 5] Active power response(60MW)

Fig. 5는 추가적으로 연결된 발전기의 출력이 60MW인 경우의 유효전력응답을 그리고 Fig. 6은 전압응답을 나타낸 것이다.

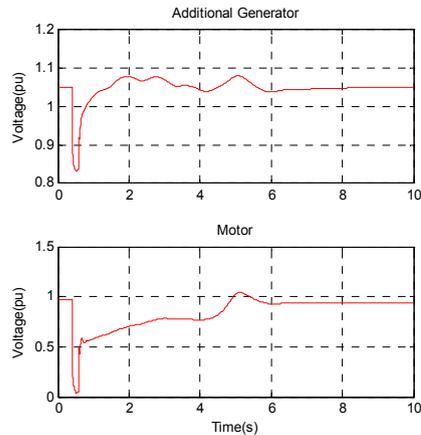


[Fig. 6] Voltage response(60MW)



[Fig. 7] Active power response(30MW)

Fig. 7은 추가적으로 연결된 발전기 출력이 30MW일 때의 유효전력 응답이고, Fig. 8은 전압 응답이다.



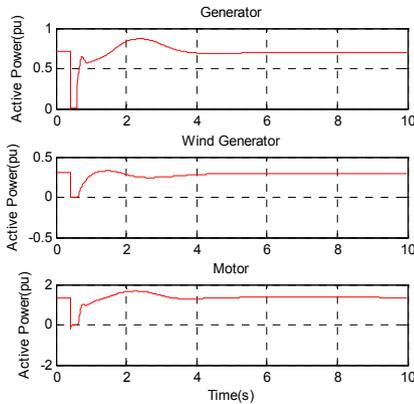
[Fig. 8] Voltage response(30MW)

3.3 약한 계통에 풍력발전기를 추가한 경우의 과도안정도 해석

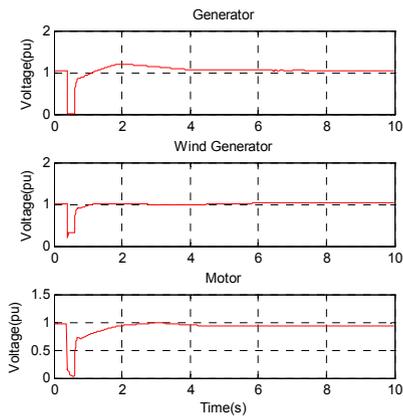
Fig. 2에서 추가한 풍력발전기는 PSSE의 라이브러리 모델 중 WT3G2 풍력발전기이다.

풍력발전기가 추가된 경우에 풍력발전기의 출력이 30MW일 때는 CCT가 0.3s이다. 풍력발전기의 출력은 최소 6MW까지 가능하다. 이것은 3.2절의 동기발전기가 연결된 경우보다 월등히 높은 안정도 여유도를 나타내는 것이다. Fig. 9와 Fig. 10은 30MW의 풍력발전기가 연결된 경우의 유효전력과 전압응답을 각각 나타낸 것이다.

이 응답을 Fig. 5 - 8의 결과와 비교하면 풍력발전기가 연결된 경우가 아주 우수한 응답특성을 나타냄을 알 수가 있다. 풍력발전기가 연결된 경우의 응답은 동기발전기가 연결된 경우의 응답보다 유효전력과 전압의 진동폭이 작고 응답과형의 안정화시간이 매우 짧다. 또한 과도 응답의 진동횟수도 매우 적다. 즉 풍력발전기의 추가적인 연결은 기존의 약한 계통을 매우 빠르게 안정화시켜 안정도 여유도를 증가시켜준다.



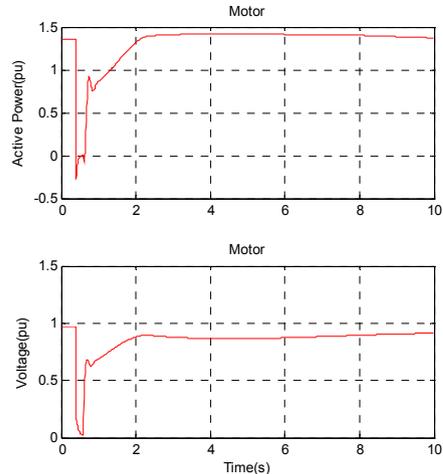
[Fig. 9] Active power response(30MW)



[Fig. 10] Voltage response(30MW)

풍력발전기가 30MW이하의 출력을 제공하는 경우도 동기발전기를 추가하는 경우에 비하여 약한계통을 더욱 효과적으로 안정화시킨다. 풍력발전기 출력이 15MW일 때는 CCT가 0.2s가되어 동기발전기가 추가되는 경우와 같지만 응답특성을 매우 좋다. 풍력발전기가 6MW의 출력을 제공하는 경우 CCT는 0.12s가 약한 계통만의 CCT

의 2배가 된다. 추가적으로 연결 가능한 동기발전기의 최소 출력량이 30MW임을 고려하면 풍력발전기의 추가적인 연결이 약한 계통의 안정화에 매우 효과적임을 알 수 있다. Fig. 11은 풍력발전기 출력이 15MW일 때의 모터의 응답을 나타낸 것이다. 동기발전기가 연결된 경우와 비교하면 풍력발전기 출력이 낮아도 응답특성이 부드럽게 나타나 풍력발전기가 계통의 안정화에 기여함을 알 수 있다.



[Fig. 11] Motor response(15MW)

본 논문에서 사용한 풍력발전기 모델 WT3G2 은 가변속 풍력발전기인 DFIG을 PSSE에서 구현한 것이다. 가변속 풍력발전기의 중요한 구성요소는 전력전자기술로 구현되는 전자식 컨버터인데 이 제어장치는 풍력발전기의 회전자와 기계적 속도와 계통의 주파수를 분리시켜주기 때문에 가변속 운전이 가능하다. 즉 가변속 풍력발전기의 터빈은 기계적 작동과 전기적 작동은 분리된다[4]. 컨버터는 회전자에 연결되어 있고 고정자는 계통에 직접 연결된다. 컨버터는 전자식으로 무효전력을 제어하기 때문에 기계식으로 제어하는 방식에 비하여 응답속도가 매우 빨라 과도응답의 진동이 작고 안정화 시간도 짧다.

4. 결론

본 논문은 약한 계통의 안정도 여유도를 증가시키기 위한 방법을 모의하였다. 먼저 주어진 약한 계통만을 대상

으로 3상 지락사고를 가정하여 CCT를 구하여 그 값이 0.06s으로 매우 작음을 확인하였다. 이를 개선하기 위하여 먼저 추가적으로 동기발전기를 연결한 결과 CCT가 0.2s으로 약한 계통보다는 개선됨을 알 수 있었다. 다음으로 풍력발전기를 추가한 결과 CCT가 0.3s으로 동기발전기를 추가한 경우보다 안정도 여유도가 1.5배로 개선된다. 전력계통에서 0.1s의 차이는 사고 시의 차단기 동작시간을 고려하면 매우 크다. 또한 추가적으로 연결할 수 있는 동기발전기의 최소 용량은 30MW인 반면에 풍력발전기는 6MW의 용량만으로도 CCT를 0.12s 즉 약한 계통만의 CCT 보다 2배로 향상시킬 수 있다. 시뮬레이션 결과 그림들을 비교해보면 풍력발전기가 동기발전기보다 응답 특성 또한 매우 빨라 같은 크기의 발전기 출력량에 대해서 더욱 효과적으로 약한 계통을 안정화시킴을 알 수 있다. 안정도 여유도의 향상뿐 아니라 계통의 안정화 시간이 풍력발전기가 추가된 경우가 동기발전기의 경우보다 빠르다. 또한 풍력발전기는 작은 출력만 유지하더라도 충분히 약한 계통의 과도안정도를 개선시킬 수 있다. 본 논문의 결과는 1기 무한대모선 계통에 적용한 결과로써 향후에는 다수기 계통에 확장 적용하는 연구가 필요하다.

References

- [1] H. Binder, Power Control for Wind Turbines in Weak Grids: Risø National Lab, March 1999.
- [2] Soenke Grunau and Friedrich W. Fuchs, "Effect of Wind-Energy Power Injection into Weak Grids", EWEA 2012 Conference Proceedings.
- [3] Dihn-Chung Phan and Kyoung-Soo Ro, "Voltage Recovery Capability of Offshore Wind Farm Connected to a Weak Grid via a VSC-HVDC", KIEE 2011 Summer Conference Proceedings.
- [4] J.G. Sloopweg, "Wind Power Modeling and Impact on Power System Dynamics," Ph.D. Thesis, 2003.
- [5] Brendan Fox, "Wind Power Integration- Connection and system operational aspects," IET Power and Energy Series 50, 2007.
- [6] N. W. Miller, J. J. Sanchez-Gasca, W. W. Price. and R. W. Delmerico, "Dynamic modeling of GE1.5 and 3.6MW wind turbine-generators for stability simulations ,"in Proc. 2003 IEEE Power Eng. Soc. Gen. Meeting, Jun. 2003, pp. 1977 - 1983

DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/PES.2003.1267470>

- [7] P.M. Anderson, A.A. Fouad, "Power System Control and Stability", pp14-48, Wiley Inter- Science, 2002.

DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/9780470545577>

- [8] "PSS/E-32 Program Application Guide Vol. 1", Shaw Power Technologies Inc.

서 규 석(Gyu-Seok Seo)

[정회원]



- 2003년 2월 : 경북대학교 전기공학과 (공학사)
- 2005년 2월 : 경북대학교 대학원 전기공학과 (공학석사)
- 2009년 2월 : 경북대학교 대학원 전기공학과 (공학박사)
- 2009년 2월 ~ 현재 : 거제대학교 선박전기과 교수

<관심분야>

배전시스템 운영 및 제어, 스마트 그리드

박 지 호(Ji-Ho Park)

[정회원]



- 1991년 2월 : 경북대학교 전기공학과 (공학사)
- 1996년 8월 : 경북대학교 대학원 전기공학과 (공학석사)
- 2001년 2월 : 경북대학교 대학원 전기공학과 (공학박사)
- 2013년 3월 ~ 현재 : 거제대학교 초빙교수

<관심분야>

전력계통 안정도, 스마트 그리드