

풍력발전기 제어시스템 성능평가를 위한 실시간 처리 기반의 Hardware-In-Loop 시뮬레이터 개발

김대진¹, 유경상¹, 김병기¹, 장문석¹, 고희상¹, 유철^{2*}
¹한국에너지기술연구원 시스템융복합연구실, ²한국에너지기술연구원 풍력연구실

Development of Real-time based Hardware-In-Loop Simulator for performance evaluation of wind turbine control system

Dae-Jin Kim¹, Kyung-Sang Ryu¹, Byungki Kim¹, Moon-Seok Jang¹,
Hee-Sang Ko¹, Cheol Yoo^{2*}

¹System Convergence Laboratory, Korea Institute of Energy Research

²Wind Energy Laboratory, Korea Institute of Energy Research

요약 본 논문에서는 풍력발전기의 제어시스템에 대한 성능평가를 위한 실시간 처리 기반의 Hardware-In-Loop(HIL) 시뮬레이터와 안정적으로 운용할 수 있는 시스템 제어 알고리즘을 제시한다. 기존의 수행된 연구는 모터와 발전기가 결합되어 동력이 전달되는 구조로서, 소형풍력발전기의 발전기 토크와 전력변환장치의 대한 특성분석으로 그 시험 범위가 제한적이나, 제한하는 실시간 처리 기반의 풍력발전기 시뮬레이터를 통해서 정상운전과 비상운전을 포함하여 제어시스템의 알고리즘과 하드웨어 요소에 대한 시험 성능평가가 가능하다. 한편, 제한하는 시뮬레이터는 세부적으로 하드웨어와 동기화되어 운영 될 수 있도록 MATLAB, CODER 그리고 PLC Library를 활용하여 동적모델과 제어시스템을 포함한 실시간 처리 기반의 풍력발전기 모듈, 바람 데이터를 생성/처리하는 모듈, 전력계통 모듈 그리고 전체 시뮬레이터의 운용을 위한 'Host PC'로 구성된다. 실제 풍력발전기가 설치되는 환경을 기반으로 외부적/내부적인 요소를 변수로 다양한 시나리오에 대한 시험을 수행하여, 풍력발전기 제어시스템의 성능평가를 통하여 본 논문에서 제시한 HIL-시뮬레이터의 우수성과 효용성을 입증한다.

Abstract This paper proposes a Hardware-In-Loop(HIL) Simulator for a Wind Turbine and an operational control algorithm to evaluate the performance of a wind turbine control system. It provides not only for the validation of the control logics, safety functions and H/W failure, but also for the high reliability of the wind turbines (by reducing/and the reduction of?)the operating expense(OPEX) through performance evaluation tests with complex scenarios. On the other hand, the proposed simulator uses MATLAB, CODER, and the PLC library to operate in synchronization with the hardware, and a real-time processing-based wind turbine module including a dynamic model and control system, wind module, grid module and host PC to manage the HIL-simulator. Several experiments were carried out under the above concept to verify the effectiveness of the proposed WT HIL-simulator.

Keywords : Control system of wind turbine, Hardware-In-Loop, Performance evaluation, Real-time, Simulator, Wind turbine

본 연구는 2017년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다.(No. 20143030021130)

*Corresponding Author : Cheol Yoo(Korea Institute of Energy Research)

Tel: +82-10-9062-7931 email: c.yoo@kier.re.kr

Received August 29, 2017

Revised September 14, 2017

Accepted October 13, 2017

Published October 31, 2017

1. 서론

전 세계적으로 환경 파괴로 인한 지구 온난화로 인류의 생존이 위협을 받고 있는 상황에서 과거의 화석연료를 대체할 수 있는 친환경 에너지원에 대한 필요성이 증대되었고 이에 최근에는 풍력, 태양열, 태양광 등과 같은 신재생에너지의 비약적인 발전을 이뤘다. 특히, 신재생에너지 중에서 가장 경제적이고 신뢰성 높은 풍력발전기는 개별 발전 용량이 ‘MW급’으로 보편화되고 대규모 발전단지가 상용 운전을 개시함으로써, 전체 전력 생산량에서 풍력 발전기가 차지하는 비중이 커지고 있는 상황이다. 또한 풍력발전기 산업의 성숙도로 인해 주요 부품의 단가와 건설비용이 낮아지고 있고, 이를 통한 낮은 발전단가를 통해 청정에너지원으로서의 장점과 더불어 경제적인 측면에서도 각광을 받고 있다. 하지만 초기 설비투자비용인 CAPEX(Capital Expenditure)는 산업규모의 증대로 인해 감소하는 추세이지만, 20년 이상의 장기간 운영해야 되는 풍력발전단지 특성으로 인한 운영비용인 OPEX(Operating Expense)는 풍력산업 확대에 부담으로 작용하고 있다. 그런데 풍력발전기 설치지역은 인적이 드물고 혹한, 혹서의 기후가 낯설지 않아, 주변 환경에 대해 강인해야 하며, 안정적으로 전력을 생산할 수 있어야 한다. 결과적으로 이를 통해서 개발/생산비용뿐만 아니라 운영비용을 크게 절감할 수 있다.

이런 이유로 인해 독일을 포함한 풍력산업의 선진국에서는 다양한 환경조건에서 풍력발전기의 제어시스템을 미리 검증해 볼 수 있는 Hardware-In-Loop-Simulator(HILS)에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다.[1-2]

특히, 풍력발전기 인증(Certificate)에 있어 세계적인 기관인 독일의 GL(Germanischer Lloyd)에서, 2010년에 발간한 Guideline을 보면, HIL에 의한 제어시스템 검증이 가능하도록 Alternative 2로 명시하였고, 최근 2016년 DNV-GL에서 발간된 Standard 문서 중, ‘Control and protection system for wind turbines’에서도 그 역할이 강화되면서 HIL에 대한 중요성이 점차 증대되고 있다. 이런 추세에 맞춰 국내에도 전력변환장치로 이뤄진 풍력발전기 시뮬레이터와 모터와 발전기로 구성된 소형풍력발전기 시뮬레이터에 대한 연구를 수행하고 있다.[3-5]하지만 상기의 연구는 전력변환장치 또

는 발전기 등의 개별 부품에 국한된 단편적인 부분에 대한 시험 평가만 가능하고 풍력발전 시스템 전체에 대한 신뢰성을 높이기 위한 제어시스템의 하드웨어와 소프트웨어 성능 및 신뢰성 시험이 불가능하다.

따라서 본 논문에서는 풍력발전기의 전체 제어시스템에 대한 성능평가가 가능한 실시간 처리 기반의 HIL-시뮬레이터와 안정적으로 운용할 수 있는 시스템 제어 알고리즘을 제시한다. 구체적으로 풍력발전기의 수학적 인 모델과 Safety System이 포함된 제어시스템, 실시간 연산 및 신호처리 기술, 그리고 시스템 전체를 운영할 수 있는 시스템 제어 알고리즘을 개발하여 WT HIL-시뮬레이터 Graphic User Interface (GUI)에 적용하고, 이를 바탕으로 MATLAB Coder와 TwinCAT Library를 활용하여, 하드웨어와 시뮬레이션이 연계되는 Console 프로그램 형태를 제안한다. 또한, Punching plate에 Open Cabinet의 형태의 시뮬레이터를 구성하여 H/W와 S/W의 유연성과 확장성에 대한 증대와, 다양한 시나리오에 대한 시험을 수행하여, 풍력발전기 제어시스템의 성능평가를 통해서 본 논문에서 제시한 시뮬레이터의 우수성과 효용성을 입증하고자 한다.

2. 기존연구의 사례분석

연산장치의 성능이 높아지고 시뮬레이션 툴의 진보로 인하여 산업전반에 걸쳐 큰 영향을 주었다. 특히, 실제 제어대상을 선형 또는 비선형으로 수학적인 모델링한 것과 하드웨어가 연계되는 Hardware-In-Loop 시뮬레이터 분야는 국방, 항공, 철도 분야에서 최근에는 자동차 분야에서 광범위하게 사용되고 있다. 이런 흐름으로 풍력발전기의 HIL 시뮬레이터가 해외에서는 활발하게 연구되고 있는데, 주로 고가의 Real-time 장비를 사용해서 연구하고 있다.[6-9]하지만, 실시간 시뮬레이션과 하드웨어 연계를 위한 실시간 RTOS가 설치된 고가의 OPAL-RT나 LabVIEW 등의 장비가 사용되었다. 하지만 실제 풍력발전기의 제어시스템의 하드웨어와 소프트웨어와의 호환성 문제로 인하여 범용적으로 사용하기 어렵고, 제한적인 입력/출력 포트의 수로 인한 확장성에 문제가 있다.

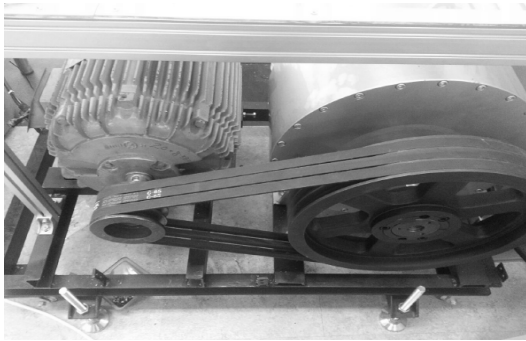


Fig. 1. The dynamometer interconnected induction motor and PMSG[3]

위와 관련하여 국내에서 수행된 대부분의 연구[3-5]는 소형풍력발전기의 출력부분인 발전기와 전력변환장치에 대한 특성분석에 한정된 연구이다. 대략적으로 유도전동기와 영구자석형 동기발전기를 결합한 형태로, 바람을 통해 생성된 풍력발전기의 공력이 기계적인 torque로 전달되는데 이것을 유도전동기가 담당하고, 반대편에 결합되어 이 회전 토크를 이용하여 발전하는 부분은 영구자석형 동기발전기가 담당한다. 위와 같은 연구를 통해서 바람에 따른 풍력발전기의 기계적인 torque를 모사하여 발전기의 특성 및 전력변환 장치에 대한 부분적인 분석이 가능하지만, 기계-유압-전기 및 다중센서를 탑재한 복합시스템인 풍력발전기 전체 제어 시스템의 알고리즘 검증에 제한적이며, 발전기와 전력 변환 장치에 국한된 시험범위로 인한 한계를 보인다.

3. 풍력발전기 Hardware-In-Loop 시뮬레이터 개발

2장에서 언급된 기존 연구의 문제점을 극복하기 위해서, 본 연구에서는 풍력발전기 시스템 전체의 성능 및 신뢰성 평가와 이를 통한 시스템 최적화 가능하고, 확장성 및 범용성이 뛰어난 풍력발전기 Hardware-In-Loop 시뮬레이터에 대해 제안한다.

3.1 풍력발전기 시스템 모델링

풍력발전기는 바람의 운동에너지를 기계적인 에너지로 변환시키고, 이후 발전기의 회전으로 전달되어 생산된 전기에너지를 최종적으로 전력 계통에 전달하는 구조이다. 따라서 환경변수인 바람과 발전기의 현재 주요

신호를 입력받아서 공력토크를 계산하는 블록, 기계적인 요소로 구성되어 기계적인 토크를 계산하는 블록, 그리고 발전기와 전력장치 블록으로 구성되어 있으며, Fig. 2과 같다.

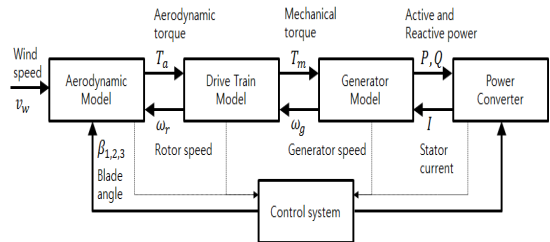


Fig. 2. Structure of a model of a variable-speed wind turbine

바람에 의해 풍력발전기의 블레이드를 통해 공력과 위 P_a 가 발생하고, 로터의 회전속도 w_r 로 나누면 공력 토크 T_a 를 구할 수 있고, 수학적으로 식(1), (2)와 같다. 여기서, 선단속도비(TSR, Tip Speed Ratio) λ 는 식(3)과 같이 블레이드의 끝단의 속도 $\omega_r R$ 와 바람의 속도 ν_w 의 비율로 나타내고, 파워계수 C_p 는 선단속도비 λ 와 블레이드 각도 β 를 입력 인자로 받고 식(4)와 같이 나타낼 수 있다.[10]

$$P_a = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 \nu_w^3 C_p(\lambda, \beta) \quad (1)$$

$$T_a = \frac{1}{2} \rho \pi R^3 \nu_w^2 C_p(\lambda, \beta) / \lambda \quad (2)$$

$$\lambda = \frac{\omega_r R}{\nu_w} \quad (3)$$

$$C_p(\lambda, \beta) = 0.5176 \left(\frac{116}{\mu} - 0.4\beta - 5 \right) e^{-\frac{21}{\mu}} + 0.0068\lambda$$

$$\frac{1}{\mu} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad (4)$$

여기서, ρ 는 공기밀도 [kg/m^3]이고, R 은 풍력발전기의 회전 반지름 [m]이다.

위에서 생성된 공력토크 T_a 는 풍력발전기의 Drivetrain에서 기계적인 토크 T_m 로 전달되는데, Shaft와 기어박스를 포함한 로터의 등가 관성모멘트 J_{eq} 와

댐핑 B_{eq}^r 를 이용하여 식(5)와 같이 표현할 수 있다.[11] 또한, 위의 기계적인 토크 T_m 는 발전기의 전자기력 T_e 과 등가 관성모멘트 J_{eq}^g 와 댐핑 B_{eq}^g 을 이용하여 식(6)으로 나타낼 수 있다.

$$T_m = J_{eq}^r \frac{dw_r}{dt} + B_{eq}^r w_r + T_a \quad (5)$$

$$T_e = J_{eq}^g \frac{dw_g}{dt} + B_{eq}^g w_g + T_m \quad (6)$$

여기서, w_r 은 로터의 회전속도 [rad/s]이고, w_g 는 발전기의 회전속도 [rad/s]이다.

최근 풍력터빈의 발전기로 운전범위가 넓고 제어하기 용이한 영구자석형 동기발전기를 사용하는 추세이다. 발전기는 L1, L2, L3의 삼상(Three-phase)출력으로 전력변환 장치에 연계되어 있는데, 계산과 분석의 용이함으로 회전좌표계에서 고정좌표계인 d-q변환을 통해 고정좌표계로 나타낼 수 있다. 발전기의 인덕턴스 L_d , L_q 와 자기력선속 ψ_{pm} , 그리고 고정자에 흐르는 전류 i_d , i_q 를 통해 고정자의 전압 V_d , V_q 을 출력하는 형태로 나타낼 수 있고, 식(7), (8)과 같다. 또한, 식(9)는 전기적 토크 T_e 로 앞에서 설명된 발전기 파라미터와 영구자석 N-S극의 개수 p 를 추가하여 나타낸다.[11]

$$V_d = R_s i_d + \frac{d}{dt} \psi_d - w_e \psi_q \quad (7)$$

$$V_q = R_s i_q + \frac{d}{dt} \psi_q - w_e \psi_d \quad (8)$$

$$(\psi_d = L_d i_d + \psi_{pm}, \psi_q = L_q i_q)$$

$$T_e = \frac{3}{2} p (\psi_{pm} i_q + (L_d - L_q) i_d i_q) \quad (9)$$

여기서, ψ_d 는 고정자 d축의 linkage flux [wb]이고, ψ_q 는 고정자 q축의 linkage flux [wb]이다.

본 연구는 풍력발전기의 제어시스템 알고리즘 검증을 위한 시뮬레이터를 개발에 그 목적을 두고 있어, 운전에 따른 각 주요 구성품의 상태와 상세한 하중 값을 분석할 수 있어야 한다. 하지만 앞에서 언급된 식은 각

블록별로 상관관계와 대략적인 흐름을 알 수 있지만, 3차원 바람데이터 이용 및 상세한 분석 등의 한계로 인하여, 본 논문에서는 미국 신재생에너지연구소 (NREL, National Renewable Energy Laboratory)에서 개발하여 공개한 FAST (Fatigue, Aerodynamics, Structures and Turbulence)를 사용하였다. FAST는 Fortran으로 작성되었는데, 풍력발전기의 부품별 기초 데이터를 입력을 받아 AeroDyn이라는 풍력발전용 공기역학 소프트웨어와 연동하여 동작하고, 실행파일 또는 MATLAB/SIMULINK와의 호환을 위하여 S-Function형태로 제공한다.[12]

Fig. 3는 기본적으로 제공하는 MATLAB 파일로 총 3개의 입력으로 구성되어 있지만 배열의 형태로, 블레이드가 3개인 수평축 풍력발전기를 기준으로 발전기의 토크 값과 전력 값, Yaw의 위치 값과 Yaw의 속도 값, 그리고 세 개의 블레이드 각도 등을 포함한다. 또한 출력은 사용자가 임의로 선택할 수 있다.

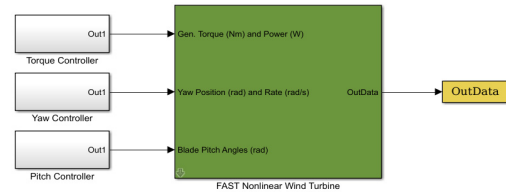


Fig. 3. FAST Block a comprehensive aero-elastic code

3.2 풍력발전기 제어시스템 설계 및 구현

풍력발전기의 제어시스템은 블레이드의 피치각과 발전기의 토크를 제어하는 동적제어기와 시스템의 전체 운용을 담당하는 상위제어기로 나눌 수 있다.

A. Pitch controller and Torque controller

풍력발전기는 내부 부품의 구성과 설계에 따라 최대 정격출력 용량을 갖고 있는데, 정격출력을 제어하기 위해 블레이드 피치 각을 제어할 수 있는 피치제어기가 있다. 그리고 발전기의 토크를 제어하는 토크제어기가 있는데 위 두 가지를 동적제어기(Dynamic controller)라고 하며, Fig. 4과 같다.

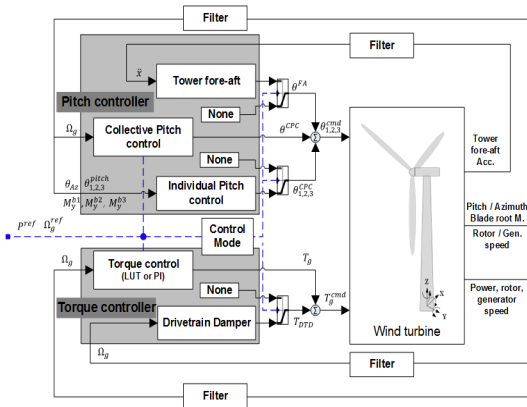


Fig. 4. Control algorithm of wind turbine

바람의 운동에너지를 전기로 변환하는 시스템인 풍력발전기는 블레이드가 시스템에서 차지하는 중요성이나 원가의 비중이 가장 크고, 따라서 이를 제어하는 피치제어기는 견고하게 설계되어야 한다. 정격이하의 풍속에서 블레이드는 바람의 운동에너지를 최대한 얻기 위해, ‘Fine pitch’ 상태를 유지하고, 정격이상의 풍속으로 발전기 로터의 회전속도가 상승할 경우에는, 피치제어기를 통해 공력성능을 감소시켜서 정격 회전속도를 유지한다.

풍력발전기는 비선형시스템으로 시스템의 안정적인 제어를 위해서 이를 선형화하여 기존 선형시스템의 제어방법을 이용하였다. 이때, 각 상태에 따른 모델링을 수행하는 LPV(Linear Parameter Varying) System의 형태로 표현하였다. 이는 특정시간 t 일 때, 풍력발전기의 운전 점($\omega_r, \theta_{blade}, \nu_w$)에 따른 상태행렬, 입출력행렬 등의 계수가 변경되어 시스템의 동특성이 달라지는 것으로, 주요 운전 점에 대한 최적의 PI 이득 점을 찾았다. 또한, 각 이득 점을 Curve fitting을 통해서, 피치각 θ_{blade} 에 의한 LUT(Look Up Table)를 생성하였고, 피치제어기의 전체 구조는 Fig. 5와 같다.

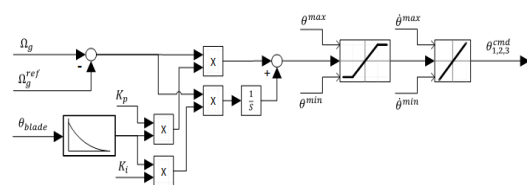


Fig. 5. PI-Gain scheduled pitch controller

B. Supervisory Control

풍력발전기는 외부의 제어 명령 없이, 독립적으로 운영되어 바람, 온도 등의 환경요인을 이용하여 전기를 생산하는 시스템으로써, 저주파 소음과 그림자 등의 문제로 인해 설치 및 건설 되는 지역이 인적이 드물고 접근하기가 어려워 다양한 상황에 대한 안정적으로 운영될 수 있도록 대처해야 한다. 따라서 시스템 전체를 운영하는 알고리즘인 Supervisory Control은 풍력발전기에 탑재되어 있는 모든 장치의 상태와 작업자의 안전까지도 모니터링하면서, 현재 운영 모드를 결정하고 실행하는 역할을 한다.

최상위의 단계에서 풍력발전기 시스템 전체를 운영하는 Supervisory Control은 ‘Init’, ‘System test’, ‘Idle’, ‘Power production’을 수행하는 Normal Operation 부분과 ‘Cable unwinding’, ‘Safety Chain fault’와 같은 Safety Operation으로 나눌 수 있고, Fig. 6과 같다. 또한, 상기의 운영을 참고하여 하위 단계의 기어박스, 전력변환장치, 발전기, 유압장치, 그리고 방열장치 등의 개별부품에 대한 운전 모드가 결정되어 진다.

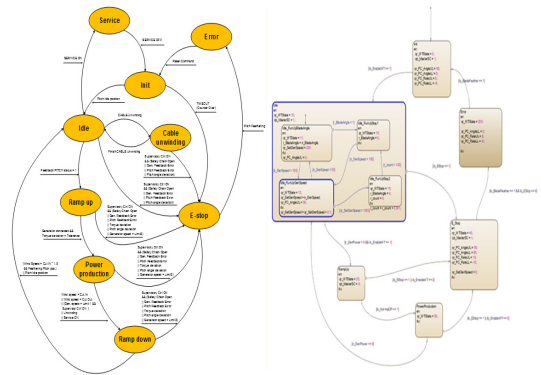


Fig. 6. State flow of Supervisory control of wind turbine(left), Implementation of state flow by MATLAB(right)

여기서, Normal Operation은 내부의 모든 주요장치가 오류가 없는 정상적인 상태로, 각 부품의 초기화 과정부터, 자체 테스트를 거쳐 최종적으로 전력을 생산하는 단계에 이르는데, 이때 동적제어기인 Pitch controller와 Torque controller가 동작한다. 하지만, 내부 또는 외부의 요인으로 부품의 오동작, 출력이상, 진동 등의 이상 동작이 발생할 경우, 전력생산을 중단하고 정지하게 된

다. 이를 Safety Operation이라고 하는데, 그 우선순위나 레벨의 종류에 따라서 정지단계와 복구단계가 차이가 있다.

3.3 풍력발전기 Hardware-In-Loop 시뮬레이터 설계

본 연구에서는 풍력발전기의 다양한 상황에 대한 풍력발전기 제어시스템의 성능평가를 위해서, ‘Host PC’에서 시나리오를 생성하여 해당 모듈에 전달하고 전체 시스템의 운영 및 모니터링을 수행하도록 설계하였고, Fig. 7과 같다. 또한, 외부 환경요소인 바람과 전력계통의 모델을 분리하여 독립적으로 구성하여, 복수의 풍력발전기로 구성하여 발전기의 운전에 따른 블레이드의 회전으로 인한 Wake등의 간섭을 확인 할 수 있도록 하였다.

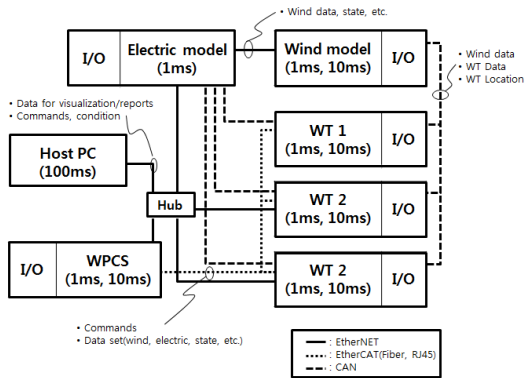


Fig. 7. Concept of Interface of wind turbine HILS

한편, 풍력발전기를 포함한 개별 시뮬레이션 모델이 실제 사용되는 PLC(Programmable Logic Controller)를 포함하는 실제 하드웨어와 연동하도록 EtherCAT 통신과, 풍력발전기, Wind model, Electric model 등 다수의 모델간의 원활한 통신을 고려하여 연산장치 및 통신 시스템을 구성하였고, Fig. 8과 같다. 또한, 전체 시스템을 운영하기 위해, ‘Host PC’와 개별 모델의 프로토콜을 정의하여 EtherNET 통신으로 명령과 정보를 송수신한다.

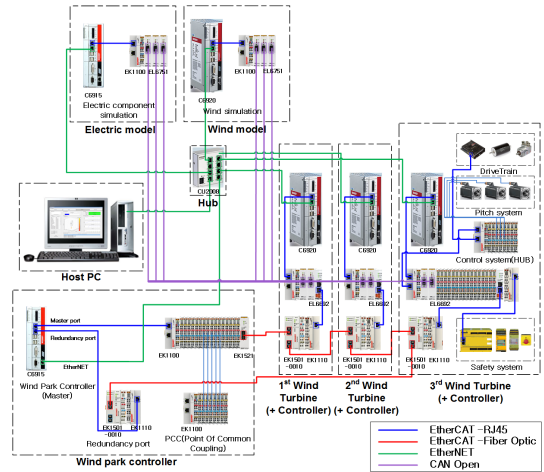


Fig. 8. Detail interface of wind turbine HILS

3.4 풍력발전기 Hardware-In-Loop 시뮬레이터 구현

앞장에서 설명한 풍력발전기 HIL-시뮬레이터의 설계를 기반으로 하여, 제어시스템이 포함된 풍력발전기의 시뮬레이션 모델과 실제 시스템에서 사용되는 하드웨어와 연동되어 운영되도록 MATLAB과 BECKHOFF의 TwinCAT Library를 이용해 구현하였고, Fig. 9과 같다.

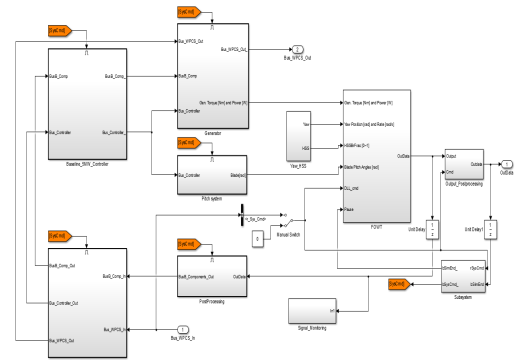


Fig. 9. Wind turbine model with control system

이때, 시뮬레이터의 기본요건은 시간에 따른 시스템의 동적인 특성과 제어 알고리즘의 성능을 평가하기 위해서, 실시간동기화(Real-time synchronization)가 반드시 필요한데, 이를 위해서 MATLAB으로 모델링된 풍력발전기와 제어시스템을 Coder와 Windows API를 활

용하여 변환하였다. 따라서 고가의 RTOS가 탑재되어 있는 특수 장치를 대신하여, 일반형 PC의 내부 CPU clock을 이용하여 실시간성 및 범용성이 가능하였다. 구체적으로, 1ms의 샘플링의 실시간 시뮬레이션을 수행하면서, PLC H/W와 EtherCAT통신을 수행하고, 전체 프로그램의 형태는 고속처리를 위해 리소스 (Resource) 관리 목적으로 Console형태로 구현하였고, Fig. 10과 같다.

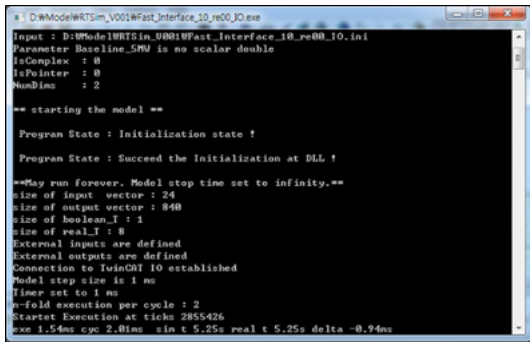


Fig. 10. Real-time based Wind Turbine HIL-Simulator s/w

제어시스템의 성능 평가를 위한 HIL 시뮬레이터는 부품, 통신모듈, PLC의 I/O, Safety system 등의 하드웨어적인 요소와 통신 프로토콜, 제어기 알고리즘, Calibration의 소프트웨어가 빈번히 최적화를 통한 업데이트가 이뤄진다. 이에 따라, 모듈의 탈부착과 접근성이 용이하고, 시스템에 대한 이해도를 높이기 위해서, Open Cabinet의 형태로 Punching plate를 사용해서 Simulator를 구현하였고, Fig. 11과 같다. 풍력발전기와 바람모델, 전력계통, 그리고 단지제어기인 WPCS(Wind Park Control System)의 고속연산을 위해 IPC(Industrial PC)에 탑재하였고, WPCS는 풍력발전기와 전력계통의 주요 정보전달의 목적으로 사용하였다. 또한, 풍력발전기의 동적인 상황을 표현하기 위해서, Servo motor와 BLDC motor를 이용하여 Blade pitch system과 Rotor, 그리고 Generator를 각각 시뮬레이션 모델과 동기화 하였다.

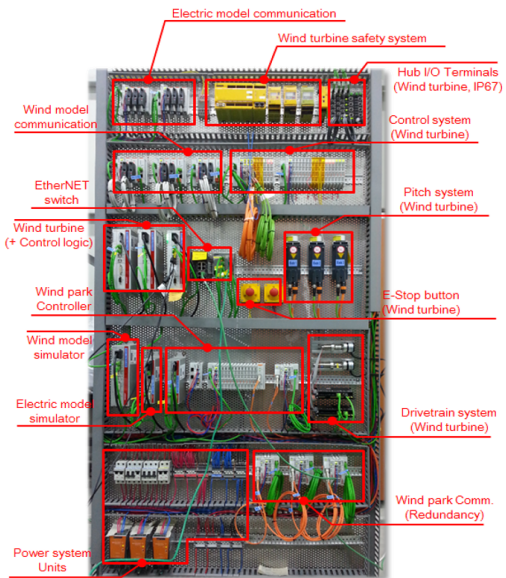


Fig. 11. Real-time based Wind Turbine Hardware-In-Loop-Simulator

본 논문에서 제안한 WT HIL-시뮬레이터는 테스트 시나리오에 따른 개별 시스템의 현재 상태에 따라서 입력과 출력에 대해 상호 연동제어가 필요하기 때문에 전체 시스템의 통합 운영이 필수적이다. 따라서 ‘Host PC’에서 중앙 제어 방식의 시스템 제어 알고리즘을 Fig. 12와 같이 적용하였고, 이를 상세하게 설명하면 아래와 같다.

- 단계 1 : 시스템 초기화 및 각 모듈별 TCP/IP 통신상태 확인 및 복구.
- 단계 2 : 단계별 테스트 시나리오 생성 및 수정, 풍력발전기 모듈별로 주요 Fault 조건 지정.
- 단계 3 : 각 모듈별 파라미터 설정 및 전송.
- 단계 4 : ‘Host PC’에서 시작 명령을 통해 HILs를 이용한 테스트 시나리오 수행.
- 단계 5 : 각 모듈에서 EtherNET을 통해 전송되는 실시간 연산데이터를 이용한 분석.
- 단계 6 : ‘step 2’에서 정의한 테스트 전체가 완료될 때까지 ‘step 4’ ~ ‘step 6’ 반복수행.
- 단계 7 : 각 모듈별 테스트 시나리오 결과인 Raw 데이터를 ‘Host PC’로 전송.

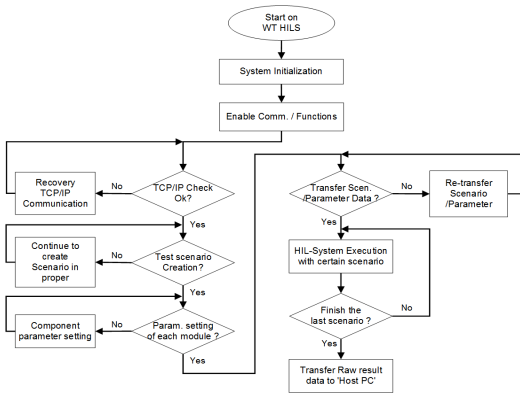


Fig. 12. System control algorithm for WT HIL-simulator

또한, 효율적인 시험의 수행을 위한 주변 모듈과 명령, 각종 주요 신호의 데이터 송수신 인터페이스, 그리고 실시간 시각화(Real-time visualization)와 Logging 기능이 포함된 WT HIL-시뮬레이터의 GUI(Graphic User Interface)를 Fig. 13과 같이 개발하였고, Back-End와 Front-End의 주요 데이터 처리 흐름 및 구조를, Fig. 14와 같이 구현하였다.

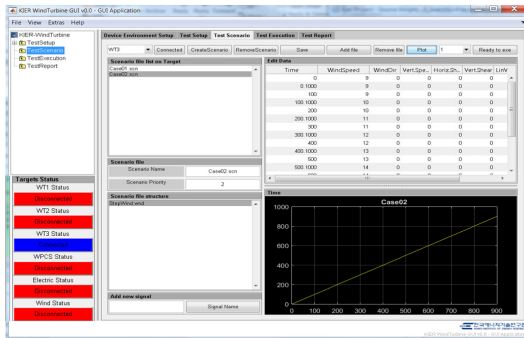


Fig. 13. Monitoring GUI For HILS of WT

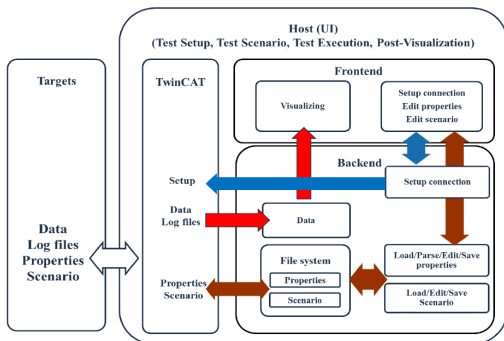


Fig. 14. Data processing flow of wind turbine GUI

4. 풍력발전기 HIL-Simulator를 이용한 제어시스템의 성능평가

본 연구를 통해 제안하는 풍력발전기 제어시스템의 성능평가 목적의 HIL-Simulator와 그 시스템의 운영을 위한 제어 알고리즘에 대한 우수성 및 유용성을 입증하기 위하여, 본 장에서는 시뮬레이션과 연동되는 HILS의 시험을 통해 성능 검증을 수행하였다. 세부적으로 풍력발전기의 블레이드 피치 각을 조절하는 피치제어기 종류에 따른 주요 하중 값의 변화와 정상운전 상태에서 ‘비상정지’시 발생하는 운전 특성에 대해 분석하였다. 이를 통해 Normal Operation과 Safety Operation에 대해 동적 제어기와 현재 설정된 제어 파라미터에 대한 성능 평가를 수행하였다.

4.1 시뮬레이션 및 시험조건

본 연구의 시뮬레이션 및 시험을 위해서, 미국의 국립 신재생에너지연구소(NREL, National Renewable Energy Laboratory)에서 공공의 연구 목적으로 제공하는 5MW급 Baseline 풍력발전기[12]를 이용하였는데, 많은 풍력관련 제어시스템 연구가 위 데이터에 기반으로 하여 이루어졌고, 이에 성능 비교분석과 알고리즘 적용에 용이하여 선정하였고, 주요 사양은 Table 1과 같다.

Table 1. Specification of NREL 5MW Baseline Wind Turbine

Category	Value	Unit
Rated Power	5	MW
Rotor Orientation	Upwind	-
Number of blade	3	-
Rotor diameter	126	m
Hub Height	90	m
Cut-In, Rated Rotor Speed	6.9, 12.1	rpm
Cut-In, Rated, Cut-Out Wind Speed	3, 11.4, 25	m/s
Gearbox ratio	97:1	-
Generator inertial	534,116	$kg \cdot m^2$
Nacelle Mass	240,000	kg
Tower Mass	347,460	kg

위의 정보를 바탕으로 실시간 처리 기반의 Console 프로그램이 탑재된 IPC에서 초기화 및 주변 I/O

Hardware와 연계하여 ‘Host PC’의 명령에 따라 운전을 개시하며, IPC의 주요 사양은 Table 2와 같다. 이때, 풍력발전기 제어와 관련된 신호는 EtherCAT통신이고, ‘Host PC’에서 통합 제어 및 모니터링 목적으로는 EtherNET 통신을 이용한다. 또한, 연계 점(PCC, Point of Common Coupling)에서의 계통 모델은 풍력발전기와 CANOpen으로 전압, 전류, 유효효전력, 그리고 주파수 신호를 송수신한다.

Table 2. Specification of IPC and I/O Module

Category	Value	Unit
Processor	Intel i7, 4 Cores	-
Memory	8	MB
OS	Windows 7 pro.	-
EtherNET	2 ports	-
Power supply	24	V
Protection class	IP 20	-

한편 위의 시뮬레이션 및 시험환경에서 본 연구를 통해 개발된 HIL-시뮬레이터를 이용한 제어시스템의 Dynamic controller와 Supervisory controller 그리고 Safety logic의 s/w적인 알고리즘부분과 전기적인 신호의 연결의 오류로 발생한 노이즈로 인한 H/W적인 검증 및 성능평가와 실시하였다.

4.2 시뮬레이션 및 시험 결과 분석

풍력발전기 제어시스템의 주요 기능에 대한 시험평가 테스트 시나리오를 총 3가지 경우로 설정을 하였고, 그에 따른 바람 및 주요 데이터가 생성되었고, 전체 시스템을 모니터링 및 운영을 담당하는 ‘Host PC’에 의해 각 모듈로 전송되었다. 또한, 각 모듈의 파라미터를 설정하였고 아래의 CASE에 대한 시험평가가 수행되었다.

- CASE 1: Supervisory Control에 의한 풍력발전기의 각 단계별 상태에 따른 운전모드 분석

풍력발전기는 독립된 개별시스템으로 적용된 제어시스템에 의해 외부 환경적인 요소와 내부의 장치의 상태에 의하여 ‘Init’, ‘System test’, ‘Idle’, ‘Power production’의 Normal Operation에 대해 오류 없이 안정적으로 수행되어야 한다. 따라서 본 시험평가의 항목은 정지상태의 풍력발전기가 전력을 생산하는 전력을

생산하는 단계까지의 Normal Operation의 전 과정에 대한 운전을 검증하는 시험을 수행하였다.

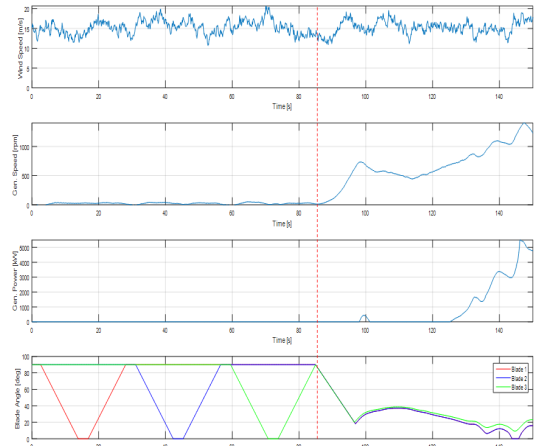


Fig. 15. Normal operation procedure of wind turbine (System test to Power production)

초기의 정지 상태에서, 시작명령에 의한 풍력발전기의 제어시스템의 로직을 검증하기 위한 위 시험의 결과는 Fig. 15와 같다. 먼저, 주요 장치에 대한 초기화 이후에, 블레이드가 Feathering position에서 Fine position으로 이동하면서 블레이드의 운전 상태를 점검을 하는 ‘System test’, 로터의 회전을 서서히 증가시키면서 ‘Idle’ 모드를 거쳐, 전력을 생산하는 ‘Power production’ 모드 등 Normal Operation에 대한 알고리즘의 성능을 확인하였다.

- CASE 2: 풍력발전기 현장에서 작업자에 의한 비상정지(Emergency Stop) 버튼의 활성화 일 때, 운전모드 확인

풍력발전기는 각 부품이 현장에 설치 및 건설되는 과정이후에, 시운전(Commissioning)을 수행하는데 작업자가 주요 기능에 대한 점검을 현장에서 실시한다. 상업운전을 개시한 이후에도 기계/전기적인 부품에 대한 부정기적인 또는 정기적인 유지/보수가 필요하여, 작업자가 현장에서의 업무수행이 빈번하다. 따라서 작업자를 보호할 수 있는 안전은 가장 중요한 요소이고, 이에 ‘Safety Logic’에 의한 풍력발전기의 ‘Safety Operation’은 반드시 검증되어야 한다. 본 ‘CASE 3’은 대표적인

경우로 작업자가 비상정지 버튼을 눌러 활성화 시켰을 때의, 그 이후 운전 특성과 각 주요 신호에 대한 분석을 실시하였다.

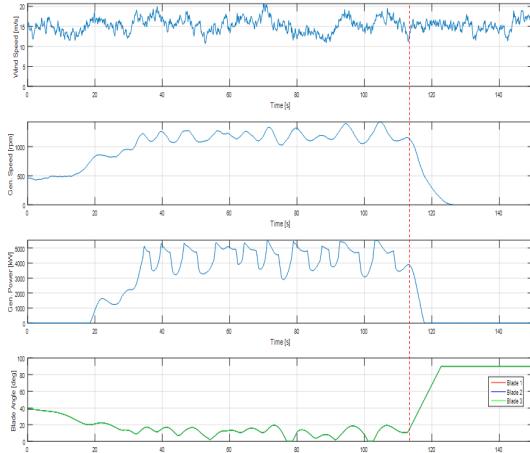


Fig. 16. Dynamic analysis of wind turbine when emergency button is activated

작업자에 의한 비상정지 버튼의 활성화를 고려한 위 시험은 정상상태에서 항상 ‘Close loop’ 구성되어 있는 Safety Chain의 ‘Open loop’ 상태를 확인하였고, 그때 주요 결과 데이터는 Fig. 16과 같다. ‘Safety Operation’은 풍력발전기 제어시스템에서 가장 우선순위를 부여받아서, 현재의 모든 운전모드를 최대한 빠르게 정지하도록 한다. 따라서 위의 결과 값과 같이, 피치시스템의 설계 최대치 속도로 Feathering position으로 이동하고, 로터의 속도도 급격히 감소되는 것을 볼 수 있었다.

- CASE 3: 피치제어기에 구조에 따른 풍력발전기의 운전 특성 및 주요 하중 분석

정격이상의 풍속에서, 바람으로부터 받는 운동에너지를 감소시켜 전기적인 출력을 조절할 수 있는 블레이드는 풍력발전기의 핵심부품이고, 이를 제어하는 피치 제어기는 제어 목적에 맞도록 적절하게 설계되어야 한다. 위 피치제어기를 통해 정격출력 제어뿐만 아니라, 하중을 저감시켜서 풍력발전기 개별 부품에 대한 원가를 절감할 수도 있다. 따라서 다양한 피치제어기가 연구되고 있는데, 본 연구에서는 직관적이며 보편적으로 산업현장에서 가장 많이 사용되는 PID 제어방식에 비선형

시스템을 선형제어방법을 통해 제어하기 위해서 LPV(Linear Parameter Varying)로 모델링하여 생성한 Gain Scheduled PI 제어방식을 적용하였다. 또한, 비교를 위해 위의 결과 값을 모든 블레이드에 적용하는 CPC(Collective Pitch Control) 방식에서 로터의 회전에만 따른 Cyclic motion에 의해 발생되는 하중을 저감하기 위해 IPC(Individual Pitch Control) 추가하여 시험을 실시하였다.

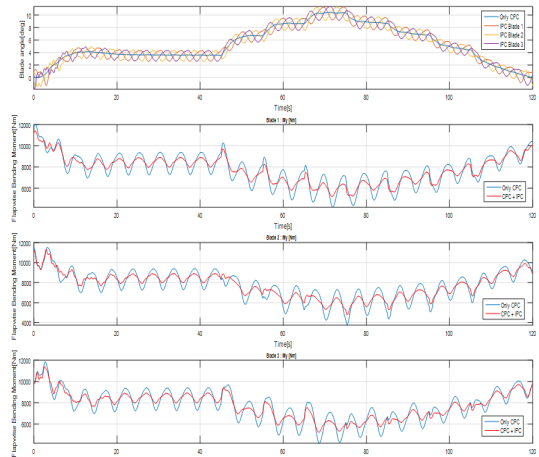


Fig. 17. Comparison data of Blade pitch control algorithm (CPC, IPC)

위 시험을 통해서 블레이드 피치각의 제어를 위한 CPC와 IPC에 대한 성능을 확인 할 수 있었고, 그 결과는 Fig. 17와 같다. ‘CPC’는 3개의 블레이드에 동일한 피치각의 명령을 추종하는 것으로, 로터의 회전에 의한 각 블레이드의 위치에 따른 ‘IPC’와 결합한 ‘CPC+IPC’에 비해서 각 Pitch System의 Root부분 Flapwise bending 모멘트가 큰 것을, 결과 그래프로 확인하였다. 또한, 정격이상의 풍속에서 로터의 속도가 증가하면서 시작되는 피치제어기의 시작, 종료 그리고 동작중의 명령 값에 대한 검증과 오동작이 발생할 수 있는 기능에 대해 반복적인 시험/디버깅을 통해 강건한 알고리즘을 구현할 수 있었다.

5. 결론

본 논문에서는 풍력발전기의 제어시스템에 대한 성능평가가 가능한 실시간 처리 기반의 HIL-시뮬레이터

와 안정적으로 운용할 수 있는 시스템 제어 알고리즘을 개발하였다. 이를 통해 실제 풍력발전기 운용에 필요한 제어 알고리즘의 검증은 다양한 시나리오와 시뮬레이터의 각 모듈별로 연동하여 시험을 수행하였고, 풍력발전기의 ‘Normal Operation’과 ‘Emergence Operation’에 대한 성능평가를 할 수 있었다. 이에 대한 주요결과를 나타내면 아래와 같다.

- (1) 기존 개발된 풍력발전기 시뮬레이터의 경우 모터와 발전기를 연계하여 토크 및 전류 특성분석에 초점이 이뤄졌지만, 본 연구는 풍력발전기의 전체 제어시스템에 대한 성능평가를 수행할 수 있음을 확인하였다. 따라서 Dynamic controller와 Supervisory controller에 대한 알고리즘을 검증할 수 있었으며, 반복되는 시험으로 제어기의 오류를 쉽게 찾고 교정할 수 있었다.
- (2) HIL-시뮬레이터를 활용하여 다양한 시나리오에 대한 알고리즘 시험과 진동이나 작업자의 실수로 인한 신호선의 이탈 등 노이즈 성 신호에 대한 시험 수행이 가능하여 S/W와 H/W적으로 강건한 알고리즘 개발이 가능함을 확인할 수 있었다.
- (3) 본 연구를 통해 개발된 시뮬레이터는 풍력발전기의 제어시스템 개발과 인증을 받기위해 사용될 수 있을 뿐만 아니라 O&M현장 작업자의 Troubleshooting을 위한 교육에도 사용될 수 있어 그 우수성과 효용성이 입증되었고, 향후 이를 활용하여 국내 풍력발전기의 제품에 대한 신뢰성 및 가격 경쟁력확보를 기대한다.

“Development of Torque simulator for the performance analysis of the 10kW wind turbine system”, *Journal of Korean Institute of Intelligent System*, vol. 2, no. 6, pp. 579-585, 2014.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5391/JKIS.2014.24.6.579>

- [4] Sung-Ho K., YoungHoon J., Sujin K., “Development of Matlab-based Variable Torque Simulator for wind Turbine Systems”, *Institute of Control, Robotics and Systems*, vol. 16, no. 4, pp. 396-402, 2010.
- [5] Sun-Hyung K., Seung-Ho S., “Simulation and Experiment of Dynamic Torsional Vibration during Grid Low Voltage in a PMSG Wind Power Generation System”, *The Transactions of the Korean Institute of Power Electronics*, vol. 18, no. 3, pp. 211-216, 2013.
DOI: <http://dx.doi.org/10.6113/TKPE.2013.18.3.211>
- [6] Xiaojiao C., Peng F., Liansheng H., Ge G., Shiyong H., “Hardware-in-the-loop simulation of the EAST PF converter for PF control system upgrade”, *Fusion Engineering and Design*, vol. 112, pp. 55-66, 2016.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2016.07.020>
- [7] Hooshyar H., Mahmood F., Vanfretti L., Baudette M., “Specification, implementation, and hardware-in-the-loop real-time simulation of an active distribution grid”, *Sustainable Energy, Grids and Networks*, vol. 3, pp. 36-51, 2015.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.segan.2015.06.002>
- [8] Jee-Hoon J., “Power hardware-in-the-loop simulation (PHLS) of photovoltaic power generation using real-time simulation techniques and power interfaces”, *Journal of Power Sources*, vol. 285, pp. 137-145, 2015.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2015.03.052>
- [9] Octavian C., Adrian F., Iulian M., Antoneta I. B., Seddik B., Daniel R., “Hardware-in-the-loop simulation applied to protection devices testing”, *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 54, pp. 55 - 64, 2014.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2013.06.031>
- [10] Siegfried Heier, “Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems”, John Wiley & Sons Ltd, 1998, ISBN 0-471-97143-X
- [11] Munteanu I , Bartcu AI , Cutululis NA , Ceanga E . Optimal control of wind energy system, *London: Springer-Verlag*, pp. 55-6, 2008.
- [12] Jonkman J , Buhl ML . “FAST user’s guide. Golden (CO), National Renewable Energy Laboratory, 2005.

References

- [1] Jianzhong Z., Ming C., “A real time testing system for wind turbine controller with xPC target machine”, *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 73, pp. 132 - 140, 2015.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2015.04.007>
- [2] Steurer M, Edrington CS, Sloderbeck M, Ren W, Langston J. “A Megawatt-Scale Power Hardware-in-the-Loop Simulation Setup for Motor Drives”, *IEEE Trans., Industr Electron 2010*, vol. 57, no. 4, pp. 1254 - 1260.
DOI: <https://doi.org/10.1109/TIE.2009.2036639>
- [3] Se-Yoon K., Sung-Ho K., Jong-Hee L. Jin-Young M.,

김 대 진(Dae-Jin Kim)

[정회원]



- 2007년 2월 : 서울과학기술대학교 기계설계자동화공학과 졸업.
- 2009년 8월 : 동 대학원 메카트로닉스공학과 졸업(석사).
- 2009년 8월 ~ 2014년 6월 : 대우조선해양 풍력연구소.
- 2010년 6월 ~ 2013년 12월 : 독일 DeWind 풍력제어시스템.

• 2014년 7월 ~ 현재 : 한국에너지기술연구원 연구원 재직 중.

<관심분야>

control system design and Power-Hardware-In-Loop Simulator.

유 경 상(kyung-Sang Ryu)

[정회원]



- 2007년 8월 : 한국기술교육대학교 전기공학과 졸업.
- 2013년 2월 : 동 대학원 전기공학과 졸업(석사).
- 2013년 2월 ~ 현재 : 한국에너지기술연구원 연구원 재직 중.

<관심분야>

operation of power distribution systems, energy storage system, power quality.

김 병 기(Byungki Kim)

[정회원]



- 2008년 2월 : 한국기술교육대학교 전기공학과
- 2012년 2월 : 동대학원 전기공학과 (석사)
- 2015년 8월 : 동대학원 전기전자통신공학과 졸업 (박사)
- 2016년 10월 ~ 현재 : 한국에너지기술연구원 재직 중

<관심분야>

operation of power distribution systems, dispersed storage, generation systems and power quality.

장 문 석(Moon-Seok Jang)

[정회원]



- 1984년 2월 : 한양대학교 기계공학과 졸업.
- 1987년 2월 : 한양대학교 대학원 기계공학과 졸업(석사).
- 1994년 2월 : 한양대학교 대학원 기계공학과 졸업(박사)
- 1994년 8월 ~ 현재 : 한국에너지기술연구원 연구원 재직 중

<관심분야>

microgrid, distribution network

고 희 상(Hee-Sang Ko)

[정회원]



- 1996년 2월 : 제주대학교 전기공학과 졸업.
- 2000년 2월 : Pennsylvania State 대학원 전기공학과 졸업(석사).
- 2006년 12월 : Univ. of British Columbia 대학원 전기컴퓨터공학과 졸업(박사).
- 2006년 12월 ~ 2007년 7월 : 캐나다 PowerTech Lab. 연구원.

• 2008년 3월 ~ 2013년 3월 : 삼성중공업 풍력발전사업부 파트장.

• 2013년 4월 ~ 현재 : 한국에너지기술연구원 연구원 재직 중.

<관심분야>

microgrid, distribution network, power systems stability, control design, and system identification.

유 철(Cheol Yoo)

[정회원]



- 2002년 2월 : 건국대학교 항공우주공학과 졸업
- 2004년 2월 : 서울대학교 대학원 항공우주공학과 졸업(석사)
- 2004년 3월 ~ 2009년 1월 : 현대자동차 남양연구소
- 2009년 2월 ~ 2014년 7월 삼성중공업 풍력사업부

• 2014년 8월 ~ 현재 : 한국에너지기술연구원 풍력연구실 재직 중.

<관심분야>

풍력발전기 블레이드 공력해석, 성능평가, 하중해석