

건물일체형 태양광 시스템의 전력발전부 설계를 위한 SysML기반 시스템 모델링

이승준¹, 이재천^{2*}

¹한국건설생활환경시험연구원 에너지환경사업본부, ²아주대학교 시스템공학과

SysML-Based System Modeling for Design of BIPV Electric Power Generation

Seung-Joon Lee¹, Jae-Chon Lee^{2*}

¹Energy & Environment Business Division, Korea Conformity Laboratories

²Dept. of Systems Engineering, Ajou University

요약 건물일체형 태양광 발전(BIPV) 시스템은 건축물에 태양광 발전시스템이 통합되어 건축물 기능과 태양광 발전 기능을 동시에 수행하는 대표적인 통합시스템이다. BIPV 시스템은 건축물 외피의 기능을 수행하면서 동시에 태양광 발전기능을 수행할 수 있다는 장점이 있지만, 건축물 설계 프로세스의 개념설계 단계에서부터 태양광 발전기능이 통합되어야 하고, 동시에 전력발전을 극대화할 수 있는 태양광 발전시스템의 설계가 필요하다. 이러한 요구사항에 대한 선행연구로서, 건축설계 모델기반 BIPV 설계 프로세스에 관한 연구와 태양광 전력발전 성능 향상을 위한 모델기반 컴퓨터 시뮬레이션 결과들이 발표되었다. 그러나, BIPV 시스템의 요구사항이 명확하게 식별되어 체계적으로 반영되지 못하였고, 또한 시스템의 전력발전 설계가 개념설계 단계에서부터 반영될 수 있도록 요구사항에 대한 시스템 아키텍처, 구조 및 거동이 정의되지 못하였으며, 그리고 BIPV 시스템의 전력발전 설계를 검증할 수 있는 모델이 제시되지 못하였다. 이러한 문제들을 해결하기 위하여 본 연구에서는 BIPV 시스템의 요구사항을 체계적으로 모델링 하고 이를 기반으로 체계적인 전력발전 설계 방법을 연구하기 위하여 시스템 모델링 표준 언어인 SysML을 사용하여 전체시스템 관점에서 통합적이고 일관적인 설계 방법을 제시하였다. 구체적으로, 먼저 대상시스템(BIPV)에 대한 관련 표준, 사용자 및 설계자 등을 포함하는 이해당사자 들로부터의 요구사항을 식별하였다. 그리고 나서 domain model을 기반으로 BIPV 시스템 수준의 설계요구사항을 도출하였으며, 시스템 요구사항을 바탕으로 대상시스템의 SysML기반 기능 및 물리 아키텍처를 생성하였다. 또한 SysML 구조 모델과 거동 모델에 대한 설계를 구체화 하여 시스템의 구성 요소들 사이의 역할과 관계를 정의하였다. 마지막으로, 시뮬레이션이 가능한 SysML 모델 (Parametric diagram)을 통하여 BIPV 시스템의 전력발전 성능을 평가하였다. 본 연구에서의 SysML 시스템 모델에 향후 건축물에 적용해야 하는 조건들을 반영하여 시스템 모델을 보강한다면 BIPV 시스템에서 전력발전을 통합적으로 연구할 수 있는 기회가 될 것이다.

Abstract Building Integrated Photovoltaic (BIPV) system is a typical integrated system that simultaneously performs both building function and solar power generation function. To maximize its potential advantage, however, the solar photovoltaic power generation function must be integrated from the early conceptual design stage, and maximum power generation must be designed. To cope with such requirements, preliminary research on BIPV design process based on architectural design model and computer simulation results for improving solar power generation performance have been published. However, the requirements of the BIPV system have not been clearly identified and systematically reflected in the subsequent design. Moreover, no model has verified the power generation design. To solve these problems, we systematically model the requirements of BIPV system and study power generation design based on the system requirements model. Through the study, we consistently use the standard system modeling language, SysML. Specifically, stakeholder requirements were first identified from stakeholders and related BIPV standards. Then, based on the domain model, the design requirements of the BIPV system were derived at the system level, and the functional and physical architectures of the target system were created based on the system requirements. Finally, the power generation performance of the BIPV system was evaluated through a simulated SysML model (Parametric diagram). If the SysML system model developed herein can be reinforced by reflecting the conditions resulting from building design, it will open an opportunity to study and optimize the power generation in the BIPV system in an integrated fashion.

Keywords : BIPV(Building Integrated Photovoltaic) system, MBSE(Model-Based System Engineering), M&S (Modeling and Simulation), Power generation design, SysML(System Modeling Language)

본 논문은 2016년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지공단 신재생에너지 표준화 및 인증지원사업의 지원을 받아 수행된 연구임(71000151).

*Corresponding Author : Jae-Chon Lee(Ajou Univ.)

Tel: +82-31-219-3941 email: jaelee@ajou.ac.kr

Received July 24, 2018

Revised (1st September 4, 2018, 2nd September 7, 2018)

Accepted October 5, 2018

Published October 31, 2018

1. 서론

현대의 시스템은 서로 다른 산업의 기술들이 융복합화 되어짐에 따라 대형화되고 복잡화되었다. 따라서 시스템은 다수의 기능을 수행하도록 설계가 되어야 하며 이러한 복잡한 시스템을 효과적으로 설계하기 위해서는 모델기반 시스템엔지니어링(MBSE, Model-Based System Engineering)의 적용이 필요하다. BIPV(Building Integrated Photovoltaic) 시스템은 기존 건축시스템에 태양광 발전시스템이 통합되어 건축물 기능과 태양광 발전기능을 만족시키는 대표적인 통합시스템이라고 할 수 있다. BIPV 시스템은 건축물 기능의 요구사항과 태양광 발전 기능의 요구사항이 동시에 만족되어야 하며, 이러한 요구사항들은 BIPV 시스템의 설계단계에서 반영되어야만 한다.

BIPV 시스템의 설계단계에서는 외부환경, 디자인, 건축물 성능, 태양광 발전성능, 경제성 등의 설계요소들이 고려되어지며, 특히 태양광 발전성능은 경제성 향상에 가장 큰 영향을 미치고 건축설계의 방향을 결정하는 가장 중요한 요소라고 할 수 있다[1-2].

BIPV 시스템은 건축물 기능과의 통합을 추구하기 때문에 건축물 개념설계 단계부터 적용이 되어야 한다. 하지만 건축설계자들의 BIPV 시스템 설계에 대한 정보가 부족하고, 명확하게 제시된 BIPV 시스템설계의 산출물이 없는 상황이다. 따라서 현재 건축물 설계단계에서 BIPV 시스템 설계반영은 신재생에너지 설치 의무화 법규를 준수하기 위하여 실시설계단계에서 반영되는 경우가 많다. 이러한 이유로 BIPV 시스템이 적용되는 건축물에서 건축물 기능과 태양광 발전기능의 통합에 따른 효과성이 떨어지고, 제한적 범위에서 BIPV 시스템이 적용되는 사례가 빈번하게 발생하고 있다[3]. 또한, BIPV 시스템은 낮은 발전전력량, 높은 부품비용, 미흡한 전력발전시스템 설계 등으로 인하여 초기 투자비용에 대한 비용회수기간이 태양광 발전시스템보다 길어서 경제성이 떨어진다는 문제점이 있다[4]. 이러한 문제를 해결하기 위해서 건축물의 기능과 태양광 발전기능의 요구사항을 동시에 만족하고, 전력발전시스템의 설계 능력을 향상시킬 수 있으며, 건축설계자가 BIPV 시스템의 정보를 체계적으로 획득하여 건축물 개념설계 단계에서 BIPV 시스템을 용이하게 적용할 수 있는 연구가 필요하였다. 개념설계부터 BIPV 시스템이 체계적으로 수행되고 효

과적으로 활용하기 위해 제시되는 방법 중 하나가 모델기반 접근방법이다. 이는 개념설계에서 수행되는 분석, 결과의 검증, 문서 산출 등에 모델을 활용하는 접근방법을 말한다. 기존 문서중심으로 수행되어온 분석방법들보다 일관성 있고, 체계적으로 시스템 설계와 분석을 함께 수행할 수 있고, 시뮬레이션을 통해 결과를 검증할 수 있다는 이점이 제시되었다. 본 논문에서는 건축물 개념설계 단계에서 BIPV 시스템을 통합 설계하고 체계적으로 검증할 수 있도록 시스템공학 모델링 언어인 SysML을 활용한 BIPV 시스템의 모델기반 설계 방법론을 연구하였다. 이를 위해 대상 시스템을 선정하고 시스템 수준의 요구사항을 식별하였다. 그리고 시스템 아키텍처를 정의하였으며, 구조 모델과 거동 모델을 제시하여 시스템의 각 구성요소들의 역할과 관계를 식별하였다. 마지막으로 BIPV 전력발전 시스템의 효과를 검증할 수 있는 모델을 제시하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 1장에서는 모델기반 BIPV 시스템의 설계의 필요성과 연구동향에 대해 기술하였고, 2장에서는 관련연구 분석을 통한 문제정의, 연구 목표와 연구 방법을 기술하였다. 3장에서는 BIPV 시스템 설계의 고려사항 및 설계 방법론을 제시하였고, 4장에서는 모델기반 BIPV 시스템을 설계하고, 5장에서는 검증 모델 제시 및 사례연구를 수행하였다. 마지막으로 6장에서는 본 논문의 연구수행 결과와 공헌을 정리하였다.

2. 관련연구

2.1 모델기반 BIPV 시스템 설계 및 적용

기존 BIM(Building Information Modeling)기반 BIPV 시스템 설계 프로세스에 대한 연구에서는 건축설계자들을 대상으로 BIPV 시스템의 현황과 요구사항을 획득하였으며, 그 결과를 바탕으로 건축 설계단계와 부합되는 BIPV 설계 프로세스와 업무(task)를 할당하였으며 의사결정단계에서의 요구되는 BIPV 시스템의 주요 설계요소들의 결과물(Output)이 제시되었다[3]. 하지만 BIPV 시스템의 전력발전 설계방법을 제시하지 못하였으며, 건축물 기능의 요구사항은 구체적으로 반영되었으나, 태양광 발전 기능의 요구사항들에 대한 반영은 미흡하였다.

태양광 발전전력 향상을 위한 모델기반 설계에 대한

연구에서는 DC 전압, 전류, 태양광 셀, 등의 설계요소에 대한 태양광 어레이(Array) 설계를 컴퓨터 시뮬레이션을 이용하여 최대 발전전력을 예측하였으며, 14.3kWp 실증을 통하여 결과를 검증하였다[5]. 또한 BIPV 시스템과 전력저장장치(ESS)가 사용되는 건물에너지 시스템 설계에서 다목적 지향 최적화 모델 개발에 대한 연구가 진행되었다[6]. 그리고, BIPV 시스템의 다양한 설치각도(0 - 90°)와 설치방향(서향, 남서향, 남향, 남동향, 동향)에 대한 전력발전 검증 및 관계분석의 목업 실증연구가 수행되었다. BIPV 시스템의 설계요소(BIPV 모듈, 설치각도, 설치방향)들이 전력발전에 미치는 영향을 분석하기 위하여 각각의 설계요소들이 적용된 목업 실증 시험등을 설계 및 구축하였으며, 목업 실증을 통하여 1년간 취득한 데이터를 바탕으로 통계적인 분석 방법을 사용하여 일사량과 발전성능의 관계를 검증하였으며, BIPV 시스템의 전력발전과 설치각도, 설치방향의 관계에 대한 통계적인 수치 모델식이 도출되었다[7].

태양광 발전기능의 설계요소 및 고려사항은 식별되었으나 BIPV 시스템 관점의 물리적인 구성요소들의 역할과 관계가 체계적이고 명확하게 정의되지 못하였다.

2.2 시스템 모델링 언어(SysML) 활용 연구

시스템 엔지니어링 언어인 SysML(System Modeling Language)은 하드웨어, 소프트웨어, 정보, 절차, 시설 등을 포함하는 복잡한 시스템의 사양화, 분석, 설계, 검증을 위한 그래픽 모델링 표준 언어로써, 국방, 우주항공, 자동차, 등의 다양한 분야에서 사용되고 있다. SysML은 UML(Unified Modeling Language)을 기반으로 만들어졌으며 그 관계는 Fig. 1에 표시되어 있다.

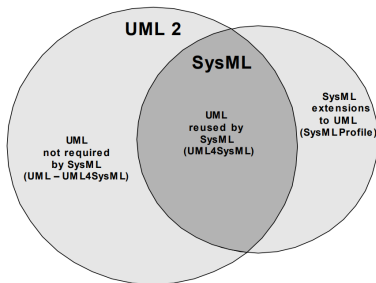


Fig. 1. Overview of SysML/UML Interrelationship

SysML의 다이어그램은 구조다이어그램 4개, 거동다

이어그램 4개, 요구사항 다이어그램 1개로 구성되어 있으며, Fig.2와 같이 구성되어 있다[8].

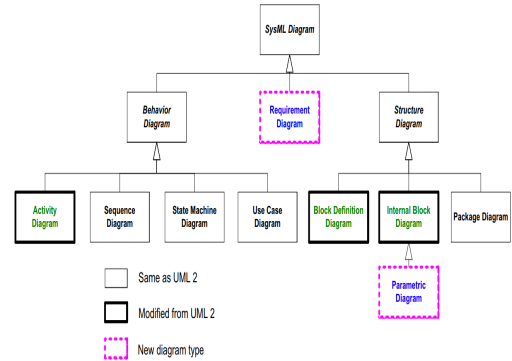


Fig. 2. Composition of SysML Diagram

SysML기반 태양광 시스템의 전력발전에 대한 컴퓨터 시뮬레이션 연구에서는 마이크로 그리드와 연계된 태양광 시스템을 대상 시스템으로 선정하였으며, Block definition diagram(bdd)을 통하여 시스템의 아키텍처를 정의하고 Activity diagram(ac)을 통하여 거동 모델을 기술하고, M&S(Modeling and Simulation)을 통하여 최대 전력 측정 포인트를 검증하는 방법론이 제시되었다[9-11]. 하지만 건축물 기능에 대한 요구사항과 BIPV 시스템에 대한 모델기반 설계는 제시되지 못하였으며, 시스템 수준의 모델링과 설계에 대한 수행보다는 서브시스템 수준의 모델링과 설계가 수행되어 전체적인 시스템을 설계하는데 있어서는 시스템 수준의 요구사항 반영과 구성 요소들 간의 역할 및 관계 정립에는 한계가 있다고 할 수 있다.

2.3 문제정의 및 연구 목표

모델기반 BIPV 시스템 설계와 SysML기반 태양광 발전시스템 설계에 대한 연구들은 아래의 사항들을 고려하지 못하였다.

- 1) BIPV 시스템의 건축물 기능과 태양광 전력발전 기능에 대하여 시스템 설계단계에서 동시에 만족되도록 요구사항들이 체계적이고 명확하게 식별하지 못하였음
- 2) BIPV 시스템이 건축물 설계 프로세스의 개념설계 단계부터 반영될 수 있도록 시스템 아키텍처 정의, 구조 모델 및 거동 모델 생성을 통한 시스템의 구

성 요소와 기능 수행을 명확하게 설계하지 못하였음

3) 시스템의 전력발전 설계의 효과를 검증할 수 있는 검증 모델을 명확하게 제시하지 못하였음

따라서 본 논문에서는 BIPV 시스템의 건축물 기능과 태양광 발전 기능에 대한 요구사항을 식별하고, 요구사항들이 동시에 반영되는 시스템 아키텍처를 정의하며, SysML기반 BIPV 전력발전 시스템의 구조 및 기능 수행을 설계하고, 전력발전의 효과를 검증할 수 있는 모델 및 설계 방법론을 제시하고자 한다.

3. 모델기반 시스템 설계 방법론 및 고려사항

3.1 모델 설계 방법

시스템의 모델 설계는 Fig. 3과 같이 2개의 단계로 구분하여 이루어진다. 첫 번째 단계에서는 이해당사자의 요구사항, 국제표준의 요구사항, BIPV 시스템 분야의 모델을 고려하여 시스템 수준의 요구사항, 기능, 제약사항, 등을 식별하였고, 두 번째 단계에서는 시스템 요구사항을 구현할 수 있는 시스템 아키텍처를 생성하고, 구조 모델과 거동 모델을 설계하였다. 이 방법은 관련연구에 제시한 논문[11]의 방법을 참고하여 수행되었다.

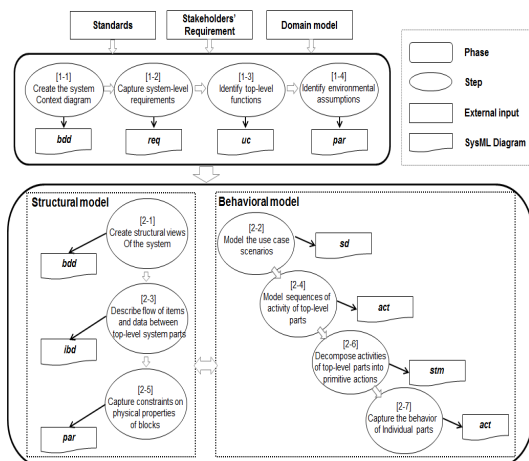


Fig. 3. Overview of modeling methodology

3.2 시스템 요구사항 생성

BIPV 시스템은 현재 건축물 설계 프로세스에 적용하는데 있어서 실시설계 단계에서 적용이 되고 있다. 실제

BIPV 시스템 적용 경험을 가지고 있는 국내 건축설계자 215명을 대상으로 BIPV 시스템의 현황 및 요구사항을 조사하고 분석한 연구결과에 따르면, BIPV 시스템을 건축물 설계에 반영하는 이유는 정부정책으로 수행되는 신재생에너지 의무화 제도를 이행하기 위해서 설치하는 경우가 가장 많으며, 건축설계자들이 생각하는 BIPV 시스템 적용의 가장 큰 단점은 높은 설치비용 대비해서 낮은 발전전력 생산으로 분석되었다. 또한 현재 건축물 설계 프로세스의 실시단계에 적용되는 BIPV 시스템 설계를 개념설계 단계부터 반영하고 전력발전 기능과 건축물 기능이 문제없이 수행될 수 있도록 건축설계자들에게 충분한 설계정보가 전달되는 것이 중요하다는 요구사항이 분석되었다[3]. 따라서 본 논문에서는 건축물 설계 프로세스의 개념설계 단계에서 BIPV 시스템 설계가 적용될 수 있도록 건축물 기능과 태양광 전력발전 기능에 대한 요구사항을 고려하였다. 또한, 본 논문에서는 BIPV 시스템관련 유럽 연합의 표준인 BS EN 50583에서 제시하는 건축물의 기능과 태양광 발전기능의 요구사항을 고려하였다[12]. 건축물 기능의 요구사항은 BIPV 시스템은 건축물 외장재를 대체하여 기계적인 저항성, 화재, 등으로부터 내부의 주거환경을 보호해야하며, 태양광 발전기능의 요구사항은 태양광 발전기능을 극대화하면서 전기적인 위험요소로부터 보호되어야한다는 요구사항이 고려되었다.

3.3 BIPV 시스템 Domain model

BIPV 전력발전 시스템의 구성요소와 역할에 대한 개요는 아래 Fig. 4와 같이 나타낼 수 있다.

건축물에 적용되는 BIPV 시스템은 외부환경(일사량, 온도, 강우, 등)에 대한 영향을 받으며 특히 일사량에 비례해서 BIPV 모듈에서 전력발전이 이루어지며, 생산된 전력은 DC Booster, Inverter 등을 통하여 직류(DC)에서 교류(AC)로 변환되며, 교류 전력은 Public Grid로 공급되거나, ESS 시스템에 저장되어서 BIPV 시스템이 설치된 건물에 사용전력으로 공급되는 형태로 구성되어 있으며, 전력의 생산, 저장, 소비의 결정은 Control unit에서 결정을 할 수 있으며, 전력의 제어를 결정하기 위한 정보는 각 Sub-system에서 계측되는 Sensor의 데이터를 획득하는 구조로 구성되어 있다.

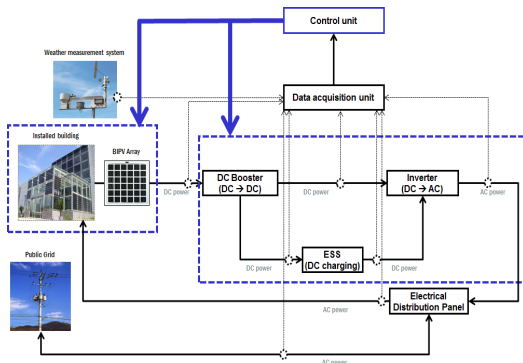


Fig. 4. Overview of BIPV power generation system

BIPV 시스템의 전력발전 설계를 위하여 고려되는 태양광 발전시스템 모델은 아래와 같다[13].

$$P = H \cdot A \cdot eff \quad \text{식(3.1)}$$

- P : 발전시스템 전력 발전량(Power)
- H : 수평 일사량(Irradiance)
- A : 시스템 설치면적(Area)
- eff : 설치 모듈 효율(Efficiency)

시스템의 전력발전은 시스템이 설치되는 면적과 태양광이 입사되는 수평 일사량, 그리고 시스템에 적용되는 모듈 효율에 비례해서 전력 발전이 이루어진다. 그리고 전력발전에 영향을 주는 태양광 모듈 효율에 대한 모델은 아래와 같다.

$$\eta = \frac{V_{mp} \cdot I_{mp} \cdot FF}{P} \quad \text{식(3.2)}$$

- η : 모듈 효율(Efficiency)
- V_{mp} : 최대충정 전압(Voltage)
- I_{mp} : 최대충정 전류(Current)
- FF : 충전률(Fill Factor)
- P : 입력 전력(1,000W/m²)

BIPV 모듈의 효율은 측정되는 최대 전압, 최대 전류 및 충전률(FF)에 비례하고, 상수로 정해지는 입력 전력에 반비례해서 효율을 표현한다.

4. BIPV 시스템 모델 설계

4.1 BIPV 시스템 수준 요구사항 및 기능 식별

BIPV 시스템의 대상시스템과 직접적으로 또는 간접적으로 상호작용하는 외부환경 개체들과의 관계에 대하여 Fig. 5와 같이 Context diagram 모델을 생성하였다. Context diagram은 대상시스템인 BIPV 시스템과 규제당국(Regulation authority), 운영자(Operator), EDS(Electrical distribution system), 설계자(Designer)의 개체들을 포함하고 있으며, Block definition diagram(bdd)으로 블록의 구조와 구성관계를 나타내었다.

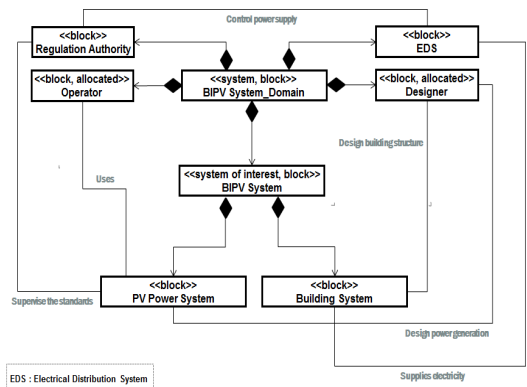


Fig. 5. Context diagram of BIPV system

3장에서 제시한 이해당사자 요구사항, 국제표준에서 요구되는 요구사항, BIPV 시스템 영역 모델의 요구사항들을 고려하여 BIPV 시스템 수준의 요구사항 식별하였으며, Fig. 6과 같이 Requirement diagram(req) 모델을 생성하였다. req 모델은 외부환경, 제약, 기능, 운영, 외부연동으로 정의하였고 계층적으로 세분화하였다. 각 요건은 id의 식별특성과 개체가 만족해야하는 text의 문자 특성으로 구성되어 있다.

식별되어진 요구사항을 바탕으로 BIPV 시스템의 건축물 기능과 태양광 발전기능이 수행되어질 수 있도록 시스템 수준의 기능을 식별하였다. Fig. 7은 시스템을 활용하는 다양한 actor들과 시스템의 관계에 대한 Use case diagram(uc) 모델이다. 규제자(Regulator)는 BIPV 시스템의 운영을 규제하는 하나의 Use case를 가지며, 운영에 대한 규칙을 규정하고, 규칙이 준수되는지를 확인하는 단계로 구성되어 있다.

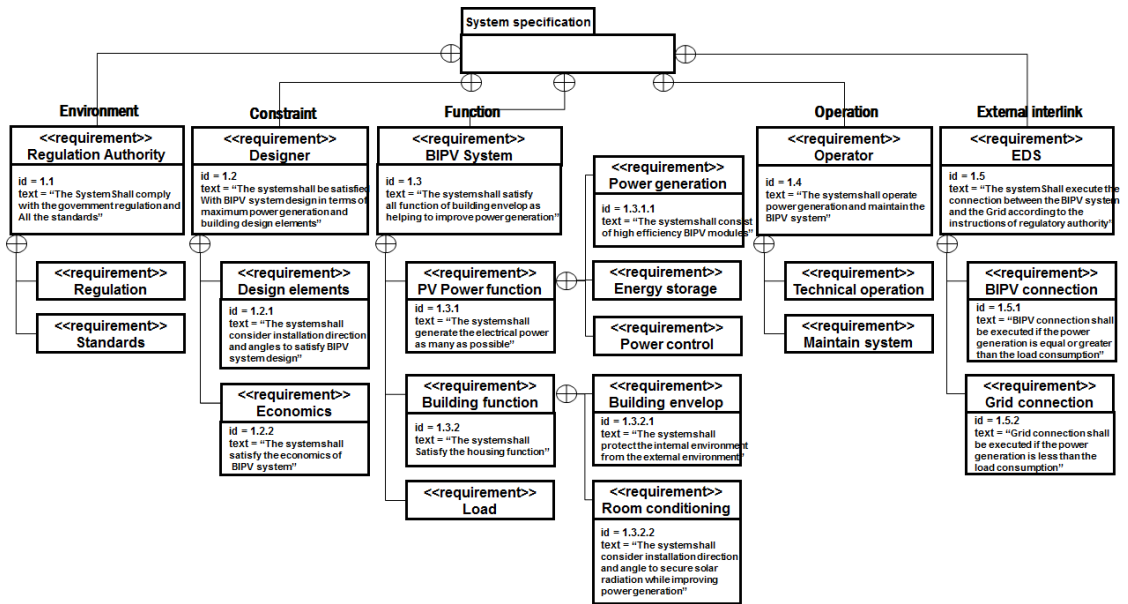


Fig. 6. Requirement diagram for System level

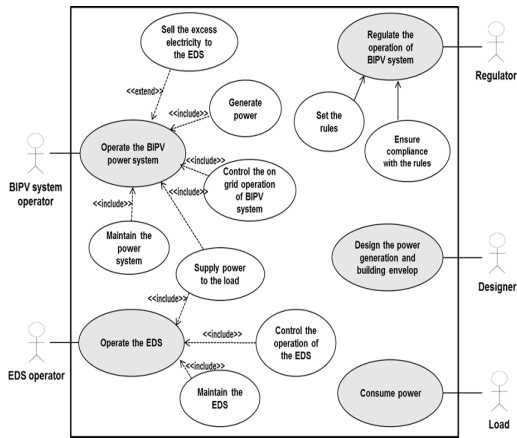


Fig. 7. Use case diagram for System level functions

설계자(Designer)는 시스템의 전력발전과 건축물 외 피 기능을 수행할 수 있도록 시스템을 설계하는 Use case를 가지며, 부하(Load)는 전력 소모의 Use case를 가진다. 운영자(Operator)는 BIPV 시스템 운영에 대한 Use case를 가지며 발전전력의 생산, 시스템 전력제어, 전력공급, 시스템 유지보수로 구성되어있으며, BIPV 시스템에서 초과되는 발전전력을 전력거래소를 통하여 판매하고 Public Grid에 공급하는 케이스도 포함되었다. 배전시스템(EDS) 운영자(Operator)는 EDS 시스템 운영의 Use case를 가지며, EDS 운영 제어, 부하에 전력공

급, EDS 유지보수의 케이스를 포함한다.

Use case들에 대하여 전력발전을 위하여 수행되어지는 거동에 대하여 Fig. 8과 같이 Activity diagram(ac) 모델을 생성하였다. ac 모델에서는 외부환경측정, 제어, 전력발전, 배전의 4개 세부적인 거동을 구분하여 Vertical swimlane으로 표현하였으며 세부 거동들이 어떻게 수행되는지에 대한 제어와 데이터 흐름을 나타내었다. 태양광 전력발전 시스템은 외부환경 측정 장치에서 태양빛의 상태를 파악하고, 제어장치에서 발전전력의 생산여부를 제어하여 전력생산이 가능한 경우에는 BIPV 전력시스템에서 전력을 생산하고 배전시스템을 통하여 Load, Grid에 전력공급을 수행한다.

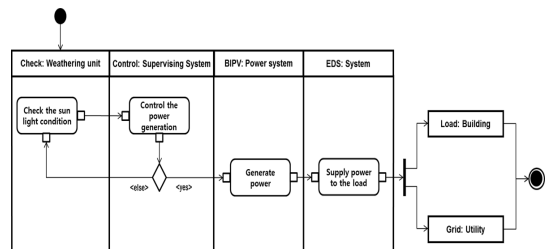


Fig. 8. Activity diagram for System level functions

3장에서 제시한 BIPV 시스템 영역 모델과 Context diagram의 요소들을 고려하여 BIPV 전력발전 시스템의

일부 환경적인 제약사항들에 대하여 Fig. 9와 같이 Parametric diagram(par) 모델을 제시하였다. BIPV 시스템의 전력생산을 위해서 요구되는 일사량(Irradiance), 설치면적(Installation area), BIPV 모듈 효율(Module efficiency)을 입력값으로 BIPV 시스템의 전력생산량을 출력으로 표현하였으며, 태양광 발전시스템의 영역 모델을 활용하였다.

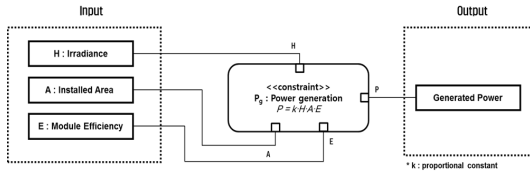


Fig. 9. Parametric diagram for System environment

4.2 BIPV 시스템 아키텍처 생성

BIPV 시스템의 요구사항과 기능 분석을 통하여 대상 시스템이 기능수행을 할 수 있도록 Fig. 10과 같이 *bdd* 모델로 구조적인 시스템 아키텍처를 생성하였다. 대상시스템은 태양광 전력발전 시스템과 건축물 시스템의 서브시스템으로 구성되어 있으며, 서브시스템은 컴포넌트와 부품으로 구조화하여 표현하였다. 태양광 전력발전 시스템은 전력생산, 저장, 수송의 기능을 수행하는 전력관리 시스템(PMS), 전력저장장치(ESS), 태양광 어레이(PV Array)의 서브시스템으로 구성되어 있으며, 건축물 시스템은 외부환경으로부터 주거기능을 수행하는 건축물 외장재, 환기시스템, 주거환경유지 시스템, 전력소모 Load의 서브시스템으로 구성되어 있다.

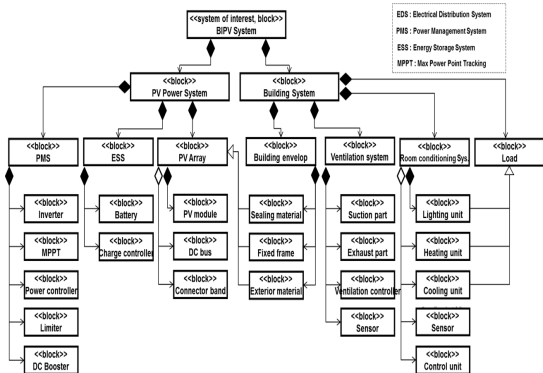


Fig. 10. System architecture of BIPV system

4.3 BIPV 시스템 구조 · 거동 모델 디자인

시스템의 *uc*모델을 바탕으로 BIPV 전력발전시스템의 Use case의 시나리오를 생성하였으며, 시나리오에 맞추어 Fig. 11과 같이 Sequence diagram(*sd*) 모델을 생성하였다. *sd* 모델은 시스템을 구성하는 서브시스템들 간의 거동을 표현함에 중요하게 작용하며 상위 수준의 블록들 간의 관계를 파악하는데 유용하게 활용할 수 있다. 대상시스템은 전력발전을 위하여 제어, EDS, PMS, PV 어레이, 부하 유닛들 간의 Signal event를 주고받으며 이 신호에 따라 각각의 유닛은 동작을 수행하게 된다.

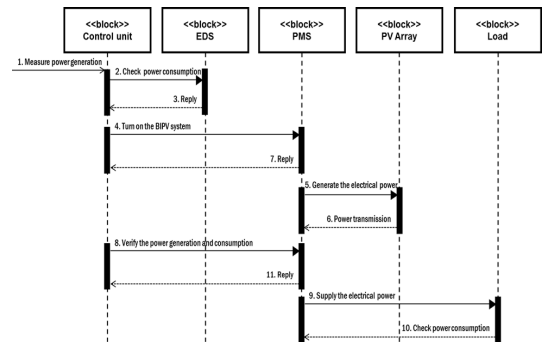


Fig. 11. *sd* model for BIPV power generation system

대상시스템의 서브시스템들의 특성과 관계를 Fig. 12와 같이 Internal block diagram(*ibd*) 모델을 생성하였다. *ibd* 모델은 서브시스템의 속성(Property), 항목 흐름(Item flow), 방향 포트(Port)를 통하여 구조적인 관계를 표현하였다. PV Array, PMS, EDS, Load, ESS 등의 서브시스템들이 전력을 생산하기 위하여 전력의 흐름과 제어 전략의 구조적인 관계를 모델을 사용하여 표현하였다. 단 본 논문에서는 컴포넌트와 부품들 간의 *ibd* 모델 내용은 제외하였다.

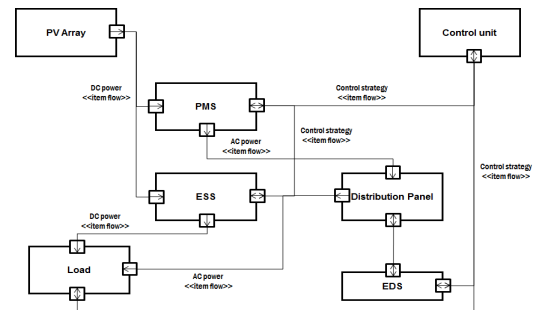


Fig. 12. *ibd* model for BIPV power generation system

대상시스템의 구조 모델과 거동 모델을 고려하여 Fig. 13와 같이 State machine diagram(stm) 모델을 생성하였다.

stm모델은 일반적으로 거동 모델링에 많이 사용이 되며 대상시스템이 기능에 맞게 어떠한 상태와 모드(mode)로 동작되어야 하는지를 정의하고 있다. BIPV 전력발전시스템에서 전력이 생산되고 부하(Load)나 그리드(Grid)에 전력이 공급되는 상태에 대하여 모델링하였다.

전력 생산량이 부하 요구 전력량과 동일한 경우 (Mode-1), 전력 생산량이 부하 요구 전력량보다 큰 경우 (Mode-2), 전력 생산량이 부하 요구 전력량보다 작은 경우 (Mode-3)의 3개 모드로 구분하였으며, 전력 생산량이 없는 경우에는 시스템이 Off 되는 것으로 설계하였다.

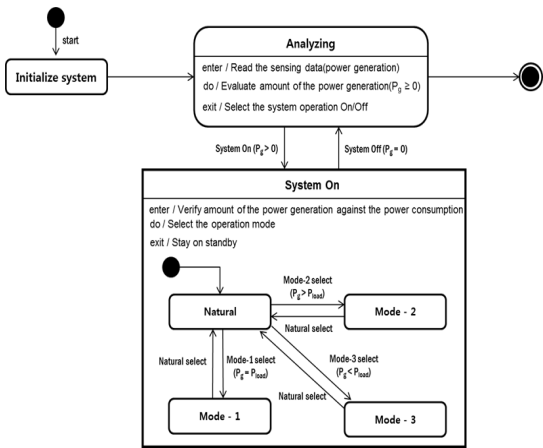


Fig. 13. stm model for BIPV power generation system

stm모델에서 제시된 3개의 시스템 작동모드와 Off 모드에 대하여 Fig. 14-17와 같이 Activity diagram(ac)을 생성하였다. ac모델은 시스템이 작동하는데 요구되는 제어전략으로 구성되어 있으며, BIPV 전력발전시스템에서 생산되는 전력량(P_g)과 부하(Load)에서 요구되는 전력량(P_{load})을 입력 매개변수로 가정하였다.

또한, 부하에 공급되는 전력은 BIPV 시스템에서 생산된 전력이 우선적으로 부하에 공급되는 것으로 가정하였다.

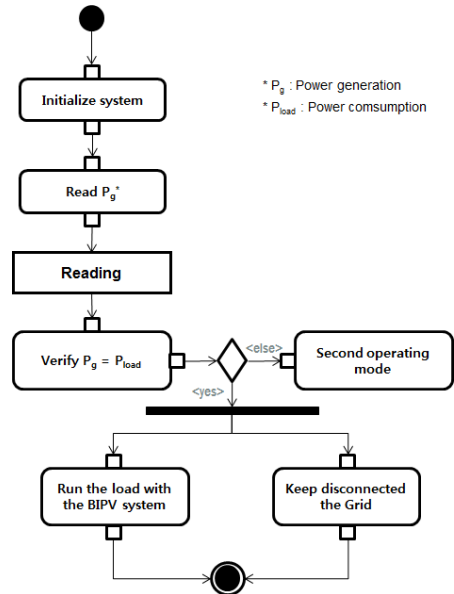


Fig. 14. Mode-1 for Activity diagram

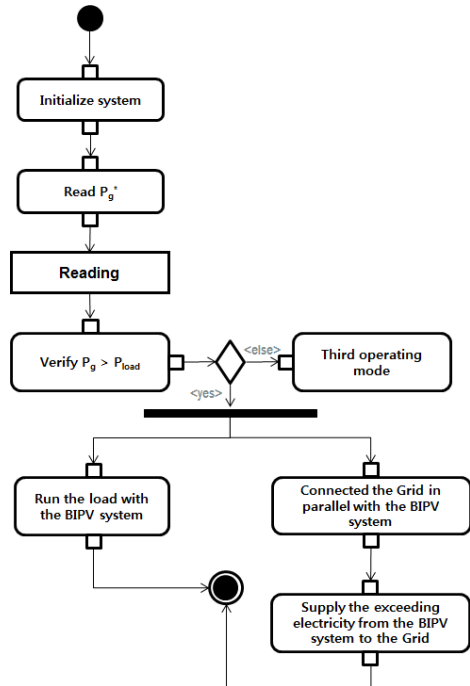


Fig. 15. Mode-2 for Activity diagram

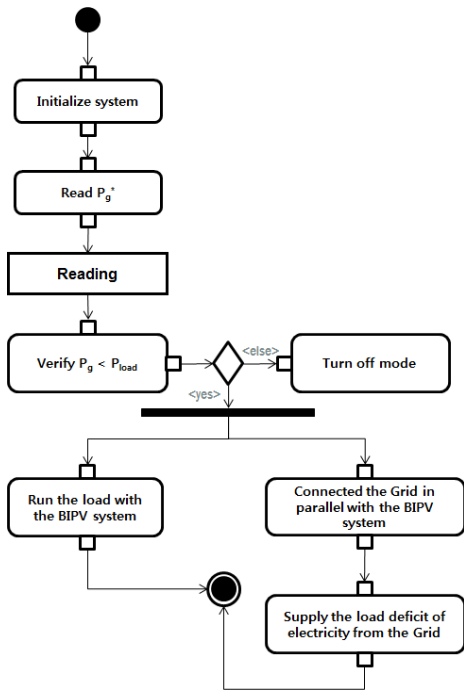


Fig. 16. Mode-3 for Activity diagram

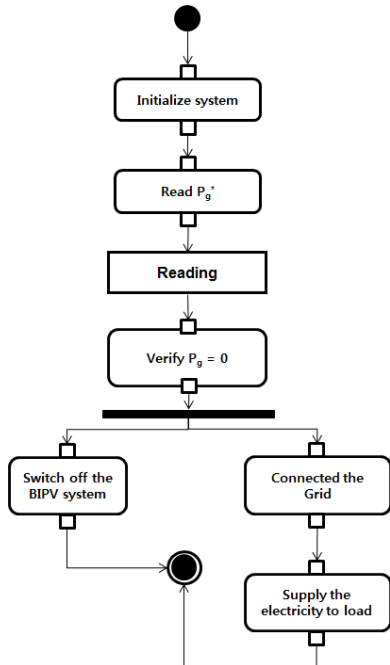


Fig. 17. System-Off for Activity diagram

대상시스템의 전력발전을 위한 거동에 따른 전력발전량을 파악하기 위하여 Fig. 18와 같이 전력발전시스템의 *par*모델을 생성하였다. *par*모델은 일사량(H), 설치면적(A), 모듈효율(E) 3개의 입력 매개변수를 고려하며, 모듈효율은 최대출력전압(V_{mp}), 최대출력전류(I_{mp}), 충전율(FF), 입력전력(P_{in}) 4개의 변수를 고려한다. 일사량(H)은 건축물 개념설계 단계부터 고려되는 가장 중요한 환경요인으로써 사무실 환경유지의 건축물 기능과 태양광 발전기능에도 크게 영향을 준다. BIPV 시스템의 설계요소 중에서 설치각도(Installed Angle)와 설치방향(Installed Direction)이 일사량에 크게 영향을 받으며 전력발전을 향상시키는 설계에 있어서도 반드시 고려되어야만 한다. 그리고 *par*모델을 통하여 산출되는 출력은 BIPV 시스템의 전력발전량이다.

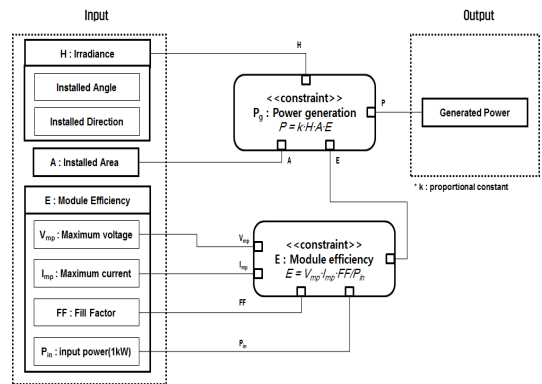


Fig. 18. *par* model for BIPV power generation system

5. Case study

BIPV 전력발전 시스템의 *par*모델에서 시스템의 설치면적(Installed area)과 모듈 효율(Module efficiency)은 시스템 설계단계에서 측정에 의한 정해진 값을 가진다. 따라서 BIPV 전력발전 시스템의 설계단계에서 중점적으로 고려되어야 할 요소는 일사량(H)이며, 일사량은 건축물의 설계요소인 설치각도(Installation angle)와 설치방향(Installation direction)에 영향을 미친다. 따라서 본 연구에서는 전력발전을 극대화하는 설치각도와 설치방향에 대하여 Fig. 19와 같이 *par*모델을 생성하였으며, SysML기반 시뮬레이션을 통하여 설계요소들이 최적의

전력발전을 수행할 수 있는 설계값을 검증하였다. 선행 연구에서 BIPV 시스템의 다양한 설치각도(0 - 90°)와 설치방향(서향, 남서향, 남향, 남동향, 동향)에 대한 실증 연구가 수행되었으며, 연구결과를 통하여 설치각도와 설치방향은 전력발전에 대하여 각각 독립적으로 작용하며, Fig. 19의 수식과 같은 관계에 있음을 도출하였다[7]. 건축물의 설계 프로세스에 따라 설치방향을 먼저 설정하고, 그리고 설치각도를 설정하는 순서를 가지게 된다. 설치방향의 경우, 태양광에 의한 전력발전이 크게 수행되지 못하여 BIPV 시스템이 설치되지 않는 북쪽방향을 제외한 서향, 남서향, 남향, 남동향, 동향을 대상 범위로 설정하였으며, 서향(0°)를 기준으로 시계 반대방향으로 동향(180°)까지 0° - 180° 범위를 입력값으로 설정하였다. 설치각도의 경우, BIPV 시스템의 설치형태를 고려하여 커튼월, 창호, 지붕 등의 형태로 설치되는 설치각도 0° - 90° 범위를 입력값으로 설정하였다. BIPV 모듈의 경우, BIPV 시스템에 보편적으로 적용되는 결정질 실리콘(c-Si) 모듈과 박막 실리콘(a-Si) 모듈을 대상으로 선정하였으며, 기준 광조사량(Pin)인 1000 W/m²에서 결정질 실리콘(c-Si) 모듈은 전압(Vmp) 20.38 V, 전류(Imp) 7.69 A, 충전율(FF) 0.76으로 최대전력(Pm) 160.21 W로 측정되었으며, 박막 실리콘(a-Si) 모듈은 전압(Vmp) 84.32 V, 전류(Imp) 0.97 A, 충전율(FF) 0.49으로 최대전력(Pm) 81.61 W로 측정되었다. 시스템의 설치면적(Installed area)은 1개의 모듈이 설치되었을 경우를 기준으로 설정하였으며, 보편적인 BIPV 모듈의 크기인 가로 길이 1,100mm, 세로 길이 1,300 mm를 기준으로 설치면적을 적용하였다.

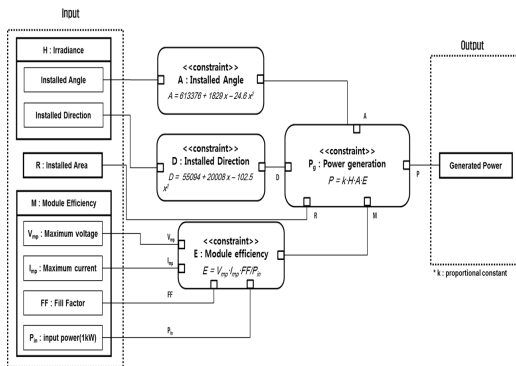


Fig. 19. *par* model of installed direction & angle for BIPV power generation system

설치방향에 대한 *par*모델의 시뮬레이션 결과, Fig. 20와 같이 각각의 방향에 대한 전력발전량이 시뮬레이션 되었으며, 전력발전이 가장 높은 남향을 기준으로 남서향, 남동향의 방향으로 전력발전이 감소함을 알 수 있다. 시뮬레이션 결과를 통하여 남향-남동향 방향의 기울기는 2.2 크기로 전력발전량이 감소하고 남향-남서향 방향의 기울기는 6.7 크기로 전력발전량이 감소함을 알 수 있다. 따라서 대부분 남서향과 남동향의 방향으로 설치되는 건축의 공동주택 모델에서 BIPV 시스템을 적용하는데 있어서 본 결과를 기준으로 설치방향에 따른 전력발전량의 차이를 고려하여 경제성 분석을 할 수 있다.

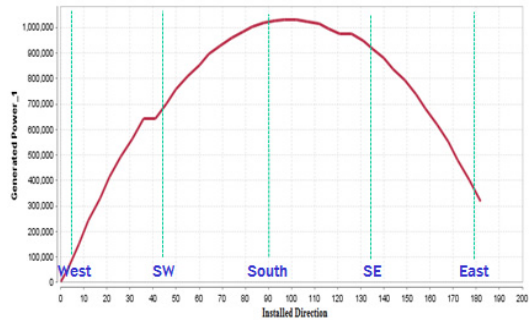


Fig. 20. Simulation result of the installed direction

설치각도에 대한 *par*모델의 시뮬레이션 결과, Fig. 21와 같이 각도에 따른 전력발전량이 시뮬레이션 되었으며, 전력발전이 가장 높은 설치각도인 25° - 30°을 기준으로 설치각도가 증가하거나 감소함에 따라 전력발전은 감소함을 알 수 있다. 최적의 설치각도를 기준으로 설치각도 0° - 25°에서는 기울기 1.25 크기로 전력발전량이 감소함을 알 수 있으며, 설치각도 25° - 90°에서는 기울기 3.3 크기로 전력발전량이 감소함을 알 수 있다. 설치각도 0° - 25° 구간은 지붕형태의 건축 모델이 적용될 수 있으며, 설치각도 25° - 90° 구간은 창호나 커튼월 형태의 건축 모델이 적용될 수 있다. 따라서 설계단계에서 건축물의 전력발전 설계에 따른 에너지 생산의 경제성을 고려한다면 지붕 형태의 모델에 BIPV 시스템을 적용하는 것이 더욱 효과적이라고 할 수 있다.

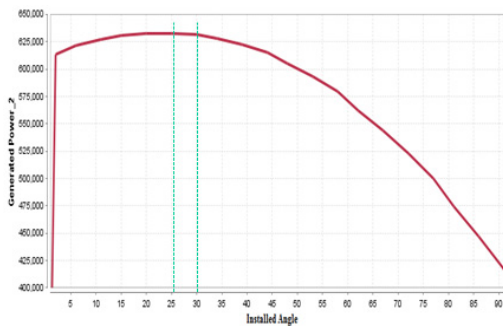


Fig. 21. Simulation result of the installed Angle

앞서 수행된 *par* 모델의 시뮬레이션 결과를 통하여 BIPV 시스템의 전력발전을 극대화할 수 있는 설계요소인 설치방향과 설치각도에 대한 최적조건을 구할 수 있었다. 이 시뮬레이션 결과는 BIPV 시스템의 개념설계 단계에서 건축물 설치방향 결정, 건축물 에너지 소비량 분석 및 경제성 분석에 활용이 될 수 있다. 각 지역에서 시뮬레이션을 활용하고자 할 경우에는 Fig. 19 모델의 k (proportional constant) 값을 각 지역에 일사량에 대한 비례상수 값으로 설정하여 시뮬레이션을 수행해야 한다.

6. 결론

BIPV 시스템은 건축시스템과 태양광 발전시스템의 통합시스템으로 건축물 기능의 요구사항과 태양광 발전 기능의 요구사항을 동시에 만족시켜야한다. 이러한 요구사항들은 시스템 개념설계 단계에서 반영되어야하며, 특히 BIPV 시스템의 발전성능을 향상시킬 수 있는 전력발전 설계 모델이 체계적으로 명확하게 제시되어야 하며, 설계 모델에 대한 검증이 이루어져야 한다.

본 논문에서는 BIPV 시스템의 표준, 도메인 모델, 이해당사자들의 요구사항을 모델링하였으며, 시스템 모델링 언어(SysML)를 사용하여 전력발전 설계 방법을 제시하였다. 구체적으로 BIPV의 시스템 수준의 요구사항을 식별하였으며, 식별된 요구사항을 바탕으로 BIPV 발전 시스템을 시스템 모델링 언어(SysML)를 기반으로 시스템 아키텍처를 생성하고 구조 모델과 거동 모델에 대한 설계를 수행하여 시스템의 구성 요소들의 역할과 관계를 정의하였다. 결론적으로, BIPV 시스템의 전력발전 설계 모델을 제시하였으며, 시스템의 발전성능을 검증할 수 있는 모델(Parametric diagram)을 제시하였다. 또한, *par*

모델의 시뮬레이션 결과를 통하여 BIPV 시스템의 전력발전이 극대화되는 설치각도와 설치방향을 도출하였다. 이 연구결과는 향후 BIPV 시스템을 건축물에 적용하는데 있어서 전력발전을 향상할 수 있는 개념설계의 기초 자료가 될 수 있다.

References

- [1] P. Bonomo, F. Frontini, P. De Berardinis, I. Donsante, "BIPV:building envelop solutions in a multi-criteria approach. A method for assessing life-cycle cost in the early design phase", *Advances in building energy research*, Vol.11, No.1, pp.104-129, July 2017. DOI: <https://dx.doi.org/10.1080/17512549.2016.1161544>
- [2] H. Sozer, M. Elnimeiri, "Critical Factors in Reducing the Cost of Building Integrated Photovoltaic (BIPV) Systems", *Architectural Science Review*, Vol.50, No.2, pp.115-121, June 2011. DOI: <https://dx.doi.org/10.3763/asre.2007.5017>
- [3] S. Y. Lee, A. Y. Lee, "A Study on BIPV(Building Integrated Photovoltaic) Design Process based on the BIM(Building Information Modelling) for Architects", *Journal of the architectural institute of korea planning & design*, Vol.33, No.4, pp.49-57, Apr. 2017. DOI: https://dx.doi.org/10.5659/JAIK_PD.2017.33.4.49
- [4] R. J. Yang, P. X. W. Zou, "Building integrated photovoltaics (BIPV): costs, benefits, risks, barriers and improvement strategy", *International Journal of Construction Management*, Vol.16, No.1, pp.39-53, Dec. 2015. DOI: <https://dx.doi.org/10.1080/15623599.2015.1117709>
- [5] E. Scolari, F. Sossan, M. Paolone, "Photovoltaic-Model-Based Solar Irradiance Estimators: Permanence Comparison and Application to Maximum Power Forecasting", *IEEE Transaction on Sustainable Energy*, Vol.9, No.1, pp.35-44, Jan. 2018. DOI: <https://dx.doi.org/10.1109/TSTE.2017.2714690>
- [6] F. Wang, L. Zhou, H. Ren, X. Liu, M. Shafie-Khah, J. P. S. Catalão, "Multi-objective optimization model of source-load-storage synergetic dispatch for building energy system based on TOU price demand response", *2017 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, pp.1017-1028, Mar. 2018. DOI: <https://dx.doi.org/10.1109/IAS.2017.8101713>
- [7] S. J. Lee, J. C. Lee, "BIPV System Design to Enhance Electric Power Generation by Building up a Demonstration Mock-up and Analyzing Statistical Data", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol.19, No.6, pp.587-599, June 2018. DOI: <https://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2018.19.6.587>
- [8] OMG Systems Modeling Language, v.1.5, pp.35-220, 2017.
- [9] A. Gutierrez, H. R. Chamorro, J. F. Jimenez, L. F. L. Villa, C. Alonso, "Hardware-in-the-loop simulation of PV systems in micro-grids using SysML models", *Proceedings of 2015 IEEE 16th Workshop on Control*

and Modeling for Power Electronics, Vancouver, Canada, July 2015.

DOI: <https://dx.doi.org/10.1109/COMPEL.2015.7236466>

- [10] A. Gutierrez, H. R. Chamorro, J. F. Jimenez, L. F. L. Villa, C. Alonso, "SysML methodology for HIL implementation of PV models", *Proceedings of 2015 17th European Conference on Power Electronics and Applications*, Geneva, Switzerland, Sep. 2015.
DOI: <https://dx.doi.org/10.1109/EPE.2015.7309196>
- [11] D. N. Luta, A. K. Raji., "A SysML based hybrid photovoltaic-wind power system model", *Journal of Energy Technology Research*, Vol.1, No.2, pp.1-12, Aug. 2017.
DOI: <https://dx.doi.org/10.22496/jetr.v1i2.75>
- [12] Photovoltaics in buildings - Part 2: BIPV Systems, BS EN 50583-2, 2016.
- [13] R. Chedid, Saifur Rahman., "A decision support technique for the design of hybrid solar-wind power systems", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol.13, No.1, pp.76-83, Mar. 1998.
DOI: <https://dx.doi.org/10.1109/60.658207>

이 승 준(Seung-Joon Lee)

[정회원]



- 2014년 9월 ~ 현재 : 아주대학교 시스템공학과 (박사과정)
- 2003년 3월 ~ 2013년 2월 : LG전자 전자기술원 책임연구원
- 2013년 3월 ~ 현재 : 한국건설생활환경시험연구원 선임연구원
- 2016년 3월 ~ 현재 : 태양광발전 KS 전문위원회 전문위원

• 2016년 3월 ~ 현재 : IEC TC82 / IECRE 전문위원

• 2016년 3월 ~ 현재 : ISO 전문위원

<관심분야>

건물일체형태양광(BIPV) 시스템, 태양광 발전시스템, 시스템 공학 (SE), Model-Based SE (MBSE), Modeling & Simulation

이 재 천(Jae-Chon Lee)

[정회원]



- 1977년 2월 : 서울대학교 공과 대학 전자공학과(공학사)
- 1979년 2월 / 1983년 8월: KAIST 통신시스템 (석/박사)
- 1984년 9월 ~ 1985년 9월 : 미국 MIT Post Doc 연구원
- 1985년 10월 ~ 1986년 10월 : 미국 Univ. of California 방문연구원
- 1990년 2월 ~ 1991년 2월 : 캐나다 Univ. of Victoria (Victoria, BC) 방문교수
- 2002년 3월 ~ 2003년 2월 : 미국 Stanford Univ. 방문교수
- 1994년 9월 ~ 현재 : 아주대학교 시스템공학과 정교수

<관심분야>

시스템공학 (SE), Model-Based SE (MBSE), Systems Safety, System T&E, Modeling & Simulation