

AC/DC Hybrid 배전망 안전 운영을 위한 가상 물리 시스템 통합형 데이터 아키텍처 설계

박종혁*, 박영수**

Design of an Integrated Data Architecture for Safe Operation of AC/DC Hybrid Distribution Network using Cyber Physical System

Jong-hyeok Park*, Yeong-Su Park**

이 논문은 2023년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술 평가원(KETEP)의 ‘차세대 AC/DC Hybrid 배전 네트워크 기술개발사업’으로 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 202300281219)

요 약

신재생 에너지 발전량과 DC 전력의 수요가 확대되면서 DC전원에 대한 중요성이 강화되고 있다. 따라서 장기적인 전력 효율 향상을 위해서는 기존의 AC 계통의 전력망과 DC 계통의 전력망의 연계는 필수적이다. 하지만 AC계통과 DC 계통에서의 안전문제의 종류와 대응이 상이하기 때문에 가상 물리 시스템(CPS, Cyber Physical System)을 도입하고자 한다. 본 연구는 AC/DC Hybrid 배전망의 CPS 도입을 위한 요구사항을 분석하여 CPS 모듈에서 수행하여야 하는 실시간 시뮬레이션, 이벤트 시뮬레이션, 안전운전-고장재난 시나리오 시뮬레이션 등의 개체를 정의하였고 데이터 모델링을 수행하였다. 본 연구에서 제안하는 데이터 호출부와 데이터 구조를 통해 AC/DC Hybrid 배전망 테스트베드를 기준으로 약 0.07 Mbps의 대역폭을 사용하게 되고 이는 충분한 동시 사용자 확보할 수 있으므로 실시간 시뮬레이션을 위한 데이터 구조로 적합하다.

Abstract

As the generation of renewable energy and the demand for DC power increases, the importance of DC power source is becoming more important. Therefore, for long-term improvements in power efficiency, the integration of existing AC power grids with DC power grids is essential. This integration can minimize capital costs and enhance operational efficiency. However, the difference between AC and DC systems results in varying types of safety issues and different responses. To address these issues and ensure the safe operation of AC/DC hybrid distribution networks, risk prediction through real-time data collection, analysis, and simulation using Cyber-Physical System(CPS) can be introduced. This study analyzes the requirements for adopting CPS in AC/DC hybrid distribution networks and defines entities such as real-time simulation, event simulation, and safe operation-fault disaster scenario simulation, which need to be performed by the CPS module and data modeling was conducted. Based on the AC/DC hybrid distribution network test-bed, the proposed data structure and call mechanism require approximately 0.07 Mbps of bandwidth, which is sufficient to support multiple concurrent users, making it suitable for real-time simulation data structures.

Keywords

AC/DC hybrid distribution network, cyber physical system, safe operation, real-time simulation

* 고등기술연구원 연구원 / 에너지경제연구원 연구원
- ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-5152-0153>
** 고등기술연구원 연구원(교신저자)
- ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7473-9500>

• Received: Aug. 12, 2024, Revised: Dec. 10, 2024, Accepted: Dec. 13, 2024
• Corresponding Author: Yeong-Su Park
Plant Engineering Center, Institute for Advanced Engineering, Korea
Tel.: +82-031-330-7878, Email: yspark@iae.re.kr

1. 서 론

최근 저탄소 발전의 영향으로 신재생에너지를 통한 전력 생산의 비중이 확대되고 있다. 제 10차 전력수급기본계획에 따르면 신재생에너지를 통한 발전량 비중은 2021년 7%이며 2030년 21.6%, 2036년 30.6%까지 확대될 것으로 전망하고 있다[1]. 신재생에너지의 비중이 확대됨에 따라 전력 계통에 대한 연구도 같이 이루어지고 있다. 현재 우리나라의 전력계통은 AC 기반인 것에 반해 태양광, 연료전지 등의 신재생에너지로 생산된 전력은 DC계통이다.

신재생에너지원으로 발전한 DC 전력을 기존의 전력망과 연계시키기 위해서 현재 대부분 AC로의 변환을 실시하고 있다. DC의 AC로의 전력 변환을 통한 전력망 연계 시, 별도의 망 설치 또는 연계 등이 수반되지 않기에 자본비용 측면에서는 유리하다. 하지만 변환 과정에서 발생하는 전력 손실에 의해 동일 발전량에 투자되는 운영 비용 측면에서는 비효율적이다. 이와는 반대로 DC 전력망 구축을 통한 신재생에너지 발전 전력 연계에는 자본비용이 투자되지만 신재생원의 연계 효율이 높아져 운영 비용은 감소하게 된다[2].

신재생에너지원의 분산 전원 확대와 전기차 이용의 확대에 발전원에서부터 수용가까지의 DC 수요가 높아지고 있다. 이러한 이유로 기존의 AC 배전망과 연계함으로써 자본비용을 최소화할 수 있는 AC/DC Hybrid 배전망에 대한 연구와 안전운영 기술 연구가 더불어 진행 중이다.

AC 전력망의 특징과 DC 전력망의 특징이 다르기 때문에 통합 운영으로 인해 예상되는 안전 사고 및 전력 계통 특징으로 인한 안전 점검 사항 등을 반영한 운영 시스템이 요구된다. 한 예로, AC와 달리 DC는 전압이 일정한 방향으로 흐르기 때문에 지락 사고가 발생하는 경우 사고 발생 지역에 전류가 지속적으로 흐르기 때문에 그 일대가 감전 위험 구역이 될 수 있다. 따라서 AC/DC Hybrid 배전망 운영에 가상 물리 시스템을 접목하여 안전성을 확보하고자 한다.

가상 물리 시스템(CPS, Cyber Physical System)은 디지털 컴퓨팅 시스템과 물리적 시스템이 통합되어

인간과 상호작용할 수 있는 차세대 시스템이다. 가상 물리 시스템은 실제 물리적인 공정을 모니터링하고 제어할 수 있는 계산 요소를 포함하며, 이를 통해 더 안전하고 효율적인 시스템의 운영이 가능하다. 물리적 공정과 계산 요소가 긴밀하게 통합되어있어, 문제 발생 시 즉각적으로 반응할 수 있어 문제 상황에 적절한 조치를 신속히 취할 수 있다 [3]-[6]. 가상 물리 시스템은 스마트 그리드, 자동화 교통 시스템 등 다양한 분야에 응용할 수 있어 그 중요성이 부각되고 있다. 이 시스템은 실시간 데이터를 통해 더 나은 의사 결정을 가능하게 함으로써 대상 시스템의 안전성을 강화함과 동시에 효율성을 개선하고 운영 비용을 절감할 수 있다[6].

가상 물리 시스템은 물리적인 공정과 시스템의 실시간 모니터링을 통해 잠재적인 문제를 사전에 감지하고 대응할 수 있다. 예를 들어 공장의 기계 장비에서 이상이 감지되면, 가상 물리 시스템에서 자동으로 시스템을 중지시키거나 안전 모드로 전환하여 안전사고를 예방할 수 있다. 또한 물리적 공정과 계산 및 분석 시스템이 통합되어있어 실시간으로 문제 상황을 감지하고 조치할 수 있다[3][6].

이러한 특징을 적용하여 AC/DC Hybrid 배전망의 안전 운영 기술 구축을 위해 열, 전기 복합의 가상 물리 시스템을 도입할 수 있다. 배전망 설비 센서 데이터의 열, 전기 시뮬레이션을 통해 설비의 고장 예측에 활용한다면 전력망에서 발생 가능한 지락 및 단락 사고 등의 전기 안전 사고 예방에 효과적일 것이다.

가상 물리 시스템을 통해 생산되는 데이터는 다양한 형태의 대규모 데이터이며 시뮬레이션 데이터 뿐만 아니라 배전망 설비로부터 불러오는 실시간 센서 데이터를 동시에 처리하기 위해서는 방대한 양의 데이터를 효과적으로 저장, 관리, 분석할 필요가 있다.

이와 비슷하게 데이터 아키텍처는 데이터의 효과적인 관리를 위해 널리 사용되고 있지만, 데이터의 수집, 변환, 분배, 소비에 이르는 데이터 흐름의 설계를 목적으로 하고 있다. 따라서 일반적인 데이터 아키텍처 모델은 데이터의 분석에 해당하는 가상 물리 시스템을 반영하는데 한계가 있다.

가상 물리 시스템을 구동하기 위해서는 크게 1. 상태 일관성 유지; 2. 프로토콜 및 데이터 형식의 다양성 등의 특징을 반영하여야 한다. 하지만 일반적인 데이터 아키텍처는 상태 업데이트의 실시간 관리가 어렵고, 가상 물리 시스템을 구성하는 다양한 형식의 프로토콜과 데이터를 처리하기 위한 유연성이 부족하다[6].

또한 스마트 그리드 시스템의 구현에 있어서도 가상 물리 시스템과 비슷하게 1. 실시간의 대량 데이터 처리; 2. 다양한 데이터 소스와 시스템 간의 통합 문제; 3. 확장성 부족의 이유로 데이터 아키텍처의 한계를 논하고 있다[7].

가상 물리 시스템과 같이 실시간 데이터 분석이 동반되는 시스템에서 일반적인 데이터 아키텍처는 한계점을 갖는다. 문헌에서는 이를 극복하기 위해 다양한 데이터 소스를 통합하기 위해 통합형 플랫폼 구축 등을 제안하였지만, 데이터 처리 과정에서 플랫폼을 거치면서 처리 시간을 지연시킬 우려가 있다. 이를 실시간 데이터가 중요한 시스템 구축에 활용하기 위해서는 신중한 검토가 요구된다.

이에 본 연구에서는 배전망의 설비 데이터와 가상 물리 시스템의 효과적인 관리를 위한 통합형 데이터 아키텍처 모델을 제안한다. 본 연구에서 대상으로 하는 배전망 시스템에서 센서로 측정되는 데이터는 주로 전류와 전압으로, 비교적 간결한 단위계를 갖는다. 이를 바탕으로 데이터 호출부를 통일

하여 동일한 포맷의 데이터 테이블을 정의하여 데이터 소스 간의 일관성을 유지하면서 복잡한 변환 과정을 거치지 않아 지연을 최소화한다. 또한 요구사항 분석을 통해 가상 물리 시스템과 관련된 텔레이션을 데이터 아키텍처 설계에 반영함으로써 시스템의 확장성을 반영하였다.

II. 가상 물리 시스템 기반 데이터 아키텍처 설계

2.1 요구사항 분석

기존 구축된 AC 계통 전력망과 DC 전력 망은 서론에서 언급한 바와 같이 그 특성상 안전 운영 관점에서 많은 차이를 보인다. 이를 위해 가상 물리 시스템을 적용하기 위하여 요구사항을 조사하였고, 이를 분석하여 데이터 모델링의 개념을 정립하였다.

표 1에 정리된 가상 물리 시스템과 관련 요구사항은 실시간 시뮬레이션, 이벤트 기록 및 시뮬레이션, 그리고 안전운전과 관련된 고장 재난 사고 시나리오에 대한 시뮬레이션을 가능하게 하며, 또한 시뮬레이션 결과에 대한 시각화가 이뤄져야 한다. 또한 시뮬레이션은 과거 재현, 현재 예측, 미래 예측의 동특성을 갖고, 전기 시뮬레이션, 열 시뮬레이션, 열-전기 복합 시뮬레이션의 기능을 갖춰야 한다.

표 1. AC/DC Hybrid 배전망 CPS 관련 요구사항
Table 1. Requirements for CPS in AC/DC Hybrid distribution networks

Category	Requirements	Detailed requirements
Functional requirement	CPS analysis data integration	Visualization through Integration of 3D models and CPS simulation
	Safety disaster scenario simulation	CPS simulation of Human and material accident scenarios in Startup / Shutdown / Normal operation / Mode change / Abnormal operation conditions
	Test-bed equipment data simulation	The CPS module performs simulations using electrical, thermal, and multi-physics models.
	Real-time and scenario data integration	Integrate sensor data and simulation - Integration of cyber physical simulation data for safe operation & fault disaster scenario - Real-time integration of equipment sensor data
	Event data integration	The event data recorded in the operation system is integrated and retrieved to implement CPS simulation
Data requirement	CPS simulation visualization system	Periodically infer equipment sensor data through the CPS module and visualize the predicted values

2.2 데이터 호출부 통일

가상 물리 시뮬레이션을 위해서는 AC/DC Hybrid 배전망에서 발생하는 설비 센서 데이터 수신 및 저장에 필요하다. 이 배전망 센서 데이터는 전류와 전압으로 구성된 간단한 단위계를 갖게 된다. 또한 측정된 전류와 전압을 바탕으로 피상전력, 유효전력, 무효전력, 역률 등이 계산되어 정의된다. 가상 물리 시스템의 실시간, 고장재난 시나리오, 이벤트 시뮬레이션을 위해서는 같은 구성의 데이터 셋이 정의가 가능하다면 데이터 소스 사이의 일관성을 유지하기 용이하고, 데이터 변환 과정을 거치지 않기 때문에 실시간 시뮬레이션에 대응하기 유리하다. 따라서 본 연구에서는 가상 물리 시뮬레이션의 센서 데이터, 고장재난 시나리오, 이벤트 데이터의 호출부를 통일하여 데이터를 수집 및 저장한다.

본 연구의 대상 시스템인 AC/DC Hybrid 배전망의 테스트베드는 그림 1의 구조를 바탕으로 구축될 예정이다[8]. 따라서 그림 1의 AC/DC Hybrid 배전망 시스템과 열-전기 복합 가상 물리 시스템으로부터 속성을 정의하였다. 대상 배전망 설비에서 시스템의 설비 구성 요소를 도출하고 센서류의 데이터의 종류와 타입을 분석하여 통일된 데이터 호출부를 정의한다. 정의된 데이터 호출 테이블과 테스트베드 구성 요소, 동시접속 등을 고려하여 테스트베드 센서데이터의 데이터베이스 저장, 그리고 가상 물리 시스템에서 데이터베이스로부터의 데이터 호출 과정에서의 대역폭 부하를 분석하였다.

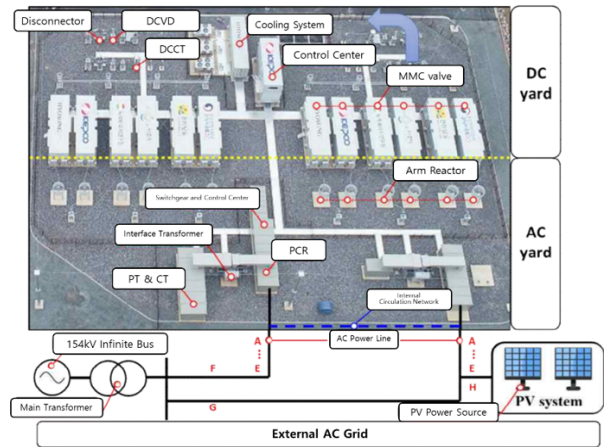


그림 1. AC/DC Hybrid 배전망 테스트베드 구성
Fig. 1. Configuration of AC/DC Hybrid distribution network testbed

III. 데이터 모델링 및 설계 환경 테스트

3.1 요구사항 분석을 통한 아키텍처 및 데이터 모델링

본 연구에서 대상으로 하는 AC/DC Hybrid 배전망의 가상 물리 시스템 요구사항을 분석한 결과 가상 물리 시뮬레이션 대상 데이터는 크게 안전운전-고장재난 시나리오, 테스트베드 센서 데이터, 그리고 이벤트 데이터로 구분된다. 이를 각각의 개체로 정의하였고, 요구사항 분석을 통해 각 개체 사이의 관계를 도출한 결과를 표 2와 같이 정리하였다.

AC/DC Hybrid 배전망 설비 시스템과 가상 물리 시스템을 통합하기 위해 표 2와 같이 정의된 개체와 관계를 바탕으로 데이터 개념적 모델링을 수행하였다.

표 2. 요구사항에 명시된 개체-관계

Table 2. Entity and relationship specified in the requirements

No.	Entity - Entity	Relationship
1	CPS module - Test-bed sensor data	Test-bed sensor data is integrated with the CPS module in real-time for simulation.
2	Test-bed sensor data - Event data	Event data When an anomaly occurs in the sensor data status, it is recorded as an event case. The sensor data can be retrieved using the timestamp and equipment ID stored in the recorded event data.
3	CPS module - Event data	Event simulation is performed by defining the event data ID.
4	CPS module - Test-bed sensor data	The test-bed sensor data retrieved using the defined event ID is input into the CPS module for simulation
5	CPS module - Safe operation & Fault disaster Scenario	The safe operation & fault disaster scenario data is used as input to perform a simulation of the scenario

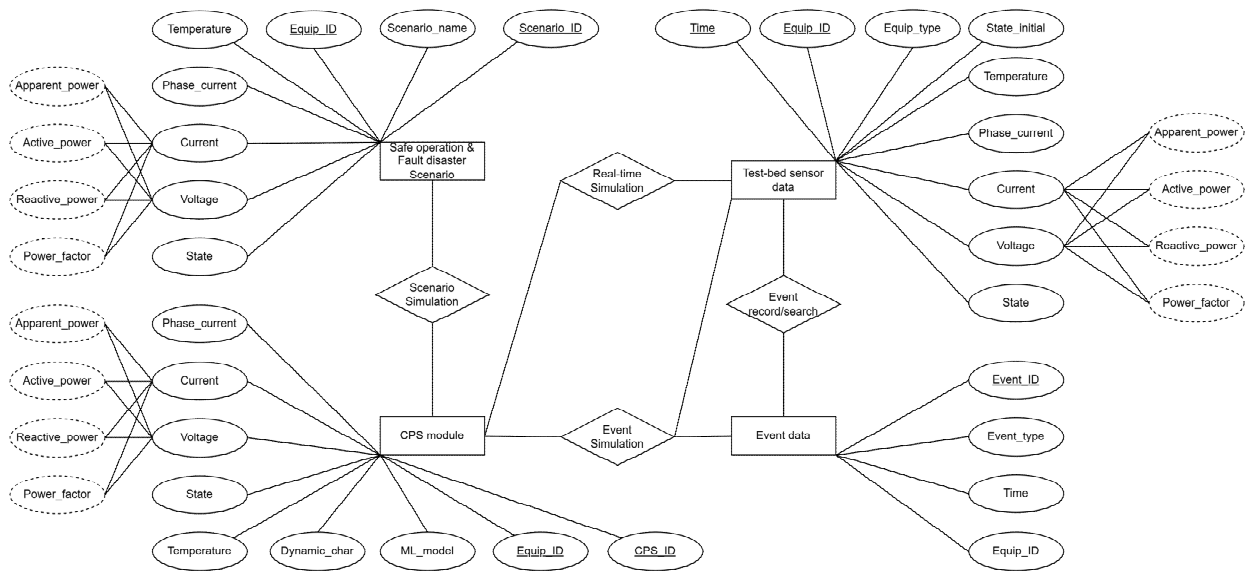


그림 2. 가상물리 시스템 ERD
Fig. 2. Cyber-Physical system ERD

이는 배전망의 실시간 데이터 수집 및 분석을 통해 배전망의 동작 상태를 지속적으로 모니터링하면서 위험 요소를 사전에 예측하기 위해 설계되었다.

그림 2는 표 2에 정의된 개체와 관계를 바탕으로 작성된 Entity Relationship Diagram, ERD이다. 테스트베드의 센서 데이터 개체의 데이터 구성은 3.1에 정의된 것과 같이 통합된 데이터 테이블로 정의되었다. 이에 같은 동시간대의 각 센서 데이터가 동일한 형태의 테이블로 정의되어 별도의 처리 과정을 거치지 않고 시뮬레이션이 가능하다. 또한 센서 데이터의 이벤트 기록/조회 관계에서는 이벤트 데이터의 시간과 설비ID 값으로 저장, 호출하게 된다. 이벤트 시뮬레이션 시에는 이벤트ID를 정의함에 따라 이벤트 사례의 시간과 설비 ID가 정의되고 해당 값을 기준으로 센서 데이터의 데이터를 조회하여 사용하게 된다.

안전운전-고장재난 시나리오의 경우, DC 개폐 아크 발생, 누설/불평형 전류 발생, 잔류전하, 작업자 부주의, 단/지락 사고 등의 인적 재난 요소와 절연 파괴, 개폐 서지, 제어 발산, 작업자 부주의로 인한 설비 손상 등의 물적 안전 재난 요소에 대해 정의된 데이터를 구성하고 시나리오 ID에 따라 조회함으로써 시뮬레이션을 실시한다. 여기서 안전운전-고장재난 시나리오의 속성은 테스트베드의 센서 데이

터와 동일한 구성을 갖는데, 이는 동일한 테스트베드에서 특정 문제 상황이 발생한 경우의 초기 데이터셋을 정의하기 때문이다.

가상 물리 시뮬레이션은 전기, 열, 복합 물리 시뮬레이션이 ‘electric-steady’, ‘electric-transient’, ‘electric-anomaly’, ‘thermal’, ‘co-simulation’, ‘complex-diaster’ 등 총 6개의 ML(Machine Learning) 모델로 수행된다. 그리고 각각의 시뮬레이션 ML 모델은 현재 추정, 미래 예측, 과거 재현의 동특성을 계산한다.

AC/DC Hybrid 배전망의 안전 운영을 위한 요구사항을 분석하여 가상 물리 시스템과 관련된 관계를 데이터 모델링 단계에서부터 포괄하여 설계함으로써 통합형 데이터 아키텍처를 제안한다. 이를 구현하기 위해 통합형 데이터 아키텍처를 구성하고자 데이터 베이스의 개념적, 논리적 모델링을 통해 데이터 구조를 설계하였다. 가상 물리 시스템과 관련된 요구사항을 분석하여 시뮬레이션 구현을 위한 데이터의 흐름을 포함하도록 통합형 데이터 모델링을 실시하였다. 이는 AC/DC Hybrid 배전망의 실시간 데이터 수집 및 분석을 통해 배전망의 동작 상태를 지속적으로 모니터링하고 관리할 수 있도록 그림 3의 구조로 설계되었다.

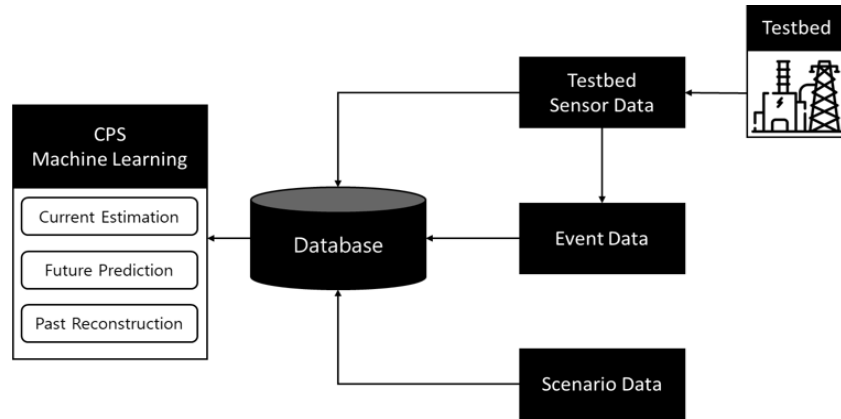


그림 3. 가상 물리 시스템 데이터 아키텍처
Fig. 3. Cyber-Physical system data architecture

3.2 데이터 호출 요구 대역폭

3.2.1 데이터 호출부 테이블 정의

데이터 호출부의 통일을 통해 동시간의 데이터를 일관성 있게 정의함으로써 복잡한 변환 과정 없이 시뮬레이션이 가능하다. 데이터의 실시간 가상 물리 시뮬레이션을 위해 데이터의 일관성 처리를 위한 별도의 과정을 거치지 않기 때문에 실시간 시뮬레이션에 보다 유리한 데이터 시스템을 구성할 수 있다. 요구사항을 바탕으로 정리한 그림 2의 ERD에서 보여지는 바와 같이 실시간 데이터가 요구되는 사례는 테스트베드 센서데이터의 실시간 가상 물리 시뮬레이션이다.

표 3. 데이터 호출부 테이블 구조
Table 3. Table structure for data retrieval

Table name		Testbed_Sensor
Key	Column name	Type
PK	Time	DATETIME
PK	Equip_ID	VARCHAR(20)
	Equip_type	VARCHAR(20)
	State_initial	VARCHAR(20)
	Temperature	INT
	Phase_current	FLOAT
	Current	FLOAT
	Voltage	FLOAT
	Apparent_power	FLOAT
	Active_power	FLOAT
	Reactive_power	FLOAT
	Power_factor	FLOAT
	State	VARCHAR(20)

따라서 실시간 시뮬레이션을 위한 테스트베드의 구성 요소를 분석하여 데이터 호출부를 정의하였다. 정의된 데이터 호출부의 데이터 테이블은 ERD에서 구성된 속성에 따라 데이터 타입을 결정하였으며 아래 표 3과 같이 정의하였다.

3.2.2 트래픽(대역폭) 부하

표 4는 AC/DC Hybrid 배전망 테스트베드의 구성 요소를 구분하기 위해 AC 계통과 DC 계통을 각각 Yard, 선로, 선로 간, 수전반의 구역으로 정리하여 전체 시스템의 설비 구성 요소를 분석하였다. AC Yard에서는 차단기, 변압기, 암 리액터 등 총 8종의 설비로 구성되고, AC 선로는 전주, 애자, 변압기, 단로기, 접지선 등의 총 17종의 설비 구성, AC 선로 간에서는 케이블, 관로, 개폐기, 변압기 등 총 4종의 설비로 구성되어 AC계통에서 총 29종의 설비 구성을 갖는다. DC Yard는 DCVD(직류 전압 분배기), 냉각 시스템, 제어기, DCCT(직류 전류 변성기), MMC 밸브 등 총 22종의 설비 구성, DC 선로에서는 전주, 완금, 애자 등의 13종, DC 선로 간에는 케이블과 관로 2종, 그리고 DC 수전반에서는 차단기를 포함하여 9종의 설비로 구성되어 DC 계통에서 총 46종의 설비 구성을 갖는다. AC계통과 DC 계통을 통틀어 AC/DC Hybrid 배전망 테스트베드에서는 총 75종의 설비 구성 요소를 갖는다.

대부분의 경우 이 실시간 데이터의 송수신 상태가 유지되기 때문에 네트워크 대역폭에 평균 부하인 사례라고 할 수 있다.

표 4. AC/DC Hybrid 배전망 설비 구성 요소
Table 4. Equipment components of AC/DC Hybrid distribution network

AC grid		DC grid	
Equip. Area	# Component	Equip. Area	# Component
AC yard	8	DC yard	22
AC transmission line	17	DC transmission line	13
Between AC lines	4	Between DC lines	2
-		DC distribution board	9

따라서 평균 부하 사례에 대하여 표 3과 표 4에 정리된 데이터 타입과 데이터 종류 수를 바탕으로 네트워크 부하를 산출하고 그 결과를 바탕으로 네트워크 부하 여부를 판단하였다.

표 3에 정의된 데이터 테이블에 따르면 센서 데이터는 1개의 DATETIME, 4개의 VARCHAR(20), 1개의 INT, 7개의 FLOAT 타입 데이터로 구성되고, 이벤트 데이터는 3개의 VARCHAR(20), 1개의 DATETIME 타입 데이터로 구성된다. 센서 데이터는 1초 단위로 기록되고, 데이터 타입과 총 설비(센서류)의 수를 고려하여 네트워크 부하를 산출하였다. 네트워크 부하는 1명의 접속자가 센서 데이터 전체를 송수신하는 평균 부하 사례에 대해 산출하였다. 평균 부하는 식 (1)과 같이 계산하였으며, 식 (1)의 Data type size는 byte의 단위로 정의함에 따라 식 (2)의 계산 과정에서는 byte를 bit로 환산하였다.

$$\Sigma(\text{Datatype size} \times \text{number of datatype}) \times \text{Equipment Count} = \text{Data Traffic} \quad (1)$$

$$\{(5 \times 1) + (20 \times 4) + (4 \times 1) + (4 \times 7)\} \times 8 \times 75 = 70200 \quad (2)$$

식 (2)에서 산출된 결과와 같이 평균 부하 사례의 경우 각각 약 0.07 Mbit의 트래픽을 발생시킨다. 또한 센서류의 데이터 수집 주기는 1초이므로 각각의 네트워크 부하도 역시 0.07 Mbps를 갖는다. 이는 일반적인 100Mbps 네트워크 환경에서 최대 1400여명의 사용자를 수용하는 것을 보장할 수 있다.

이는 데이터 호출부를 통일함으로써 센서 데이터의 일관성을 확보하면서 100 Mbps 네트워크 환경에서도 동시 사용자를 충분히 확보할 수 있기 때문에 실시간 시뮬레이션을 위한 데이터 구조로 적합하다. 실시간 시뮬레이션을 위한 데이터 구조를 확보함으로써 AC/DC 혼용 배전망의 지속적인 모니터링과 이상 데이터를 통한 고장 예측으로 위험 요소를 사전에 예방할 수 있다. 이는 기존의 AC 계통 전력망과 다른 특성을 갖는 DC 계통 전력망 운영에서의 안전성 확보에 큰 영향을 미칠 수 있다.

IV. 결 론

AC/DC Hybrid 배전망의 안전하고 효율적인 운영을 위해 가상 물리 시스템을 도입하는 과정에서, 다양한 요구사항을 정의하고 분석하였다. 요구사항은 배전망의 복잡한 특성과 안전성을 유지하기 위한 가상 물리 시스템으로 실시간 연동, 이벤트 시뮬레이션, 안전운전 및 고장재난 시나리오 시뮬레이션을 포함한다. 실시간 연동을 통해 배전망의 상태를 지속적으로 모니터링하여 고장 예측을 가능하게 하고, 이벤트 시뮬레이션을 통해 발생 가능한 다양한 상황에 대응할 수 있도록 한다. 이는 본 연구의 대상 공정인 배전망 시스템 뿐 아니라 다양한 제조 시스템에서도 동일하게 적용 가능하며, 디지털 트윈과 연계하여 실시간 데이터 수집/분석, 잠재 위험 요소 파악 및 대비를 가능하게 한다[9].

또한 안전운전 및 고장재난 시나리오 시뮬레이션을 통해 고장 및 재난 상황에서의 대응 전략을 사전에 시뮬레이션 할 수 있는 시스템을 구축하여 배전망의 안전 운영을 달성할 수 있게 한다. 이러한 통합형 데이터 모델은 고장 예측과 사고 예방에 중요한 역할을 하며, 배전망 운영자가 실시간 데이터를 바탕으로 운영 가이드라인을 설정하고 문제 발생 시 적절한 대응을 할 수 있도록 지원할 수 있다.

또한 테스트베드 센서 데이터 호출부를 통일함으로써 데이터의 일관성을 유지하였고 네트워크는 일반적인 상황에서 약 0.07 Mbps의 대역폭을 요구하며, 100Mbps 네트워크 기준, 최대 1400여명의 동시 사용자를 확보할 수 있으므로 실시간 데이터 송수신에 유리하다.

결론적으로, AC/DC Hybrid 배전망의 실시간 가상 물리 시스템을 통한 안전 운영을 실현하기 위해 통합형 데이터 아키텍처가 중요한 역할을 하며, 이를 통해 배전망의 효율성과 안정성을 동시에 향상시킬 수 있다.

향후에는 3D 모델과의 연계를 통해 가상 물리 시뮬레이션과 설비 데이터의 시각화 구현을 목표로 하고 있다. 이를 통해 배전망 시스템 운영자가 복잡한 배전망의 상태를 보다 직관적으로 상태를 이해하고, 실시간 데이터 시각화를 통해 빠르고 정확한 결정을 내릴 수 있도록 할 것이다. 제안된 통합형 데이터 아키텍처 모델은 향후 테스트베드 구축 후 평가를 통해 성능을 검증할 예정이며, 이를 바탕으로 실질적인 적용 가능성을 높일 계획이다.

References

- [1] M. Y. Yang and J. S. Park, "The economic impact analysis of the 10th Master Plan for long-term-electricity", KEER, Vol. 22, No. 1, pp. 135-158, 2023. <https://doi.org/10.22794/keer.2023.22.1.006>.
- [2] S. Y. Kim, S. H. Lee, and J. O. Kim, "The Economic Evaluation of Renewable Energy Penetration Based on Grid Parity According to the Ratio of DC Power Supply", Journal of JEET, Vol. 61, No. 1, pp. 16-21, Jan. 2012. <https://doi.org/10.5370/KIEE.2012.61.1.016>.
- [3] Y. Liu, Y. Peng, B. Wang, S. Yao, and Z. Liu, "Review on Cyber-physical Systems", IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, Vol. 4, No. 1, pp. 27-40, Jan. 2017. <https://doi.org/10.1109/JAS.2017.7510349>.
- [4] K.-J. Park, R. Zheng, and X. Liu, "Cyber-physical systems: Milestones and research challenges", Comput. Commun., Vol. 36, No. 1, pp. 1-7, Dec. 2012. <http://dx.doi.org/10.1016/j.comcom.2012.09.006>.
- [5] A. Berezovskyi, J. El-khoury, and E. Fersman, "Linked Data Architecture for Plan Execution in Distributed CPS", IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT), Melbourne, VIC,

Australia, pp. 1393-1399, Feb. 2019. <https://doi.org/10.1109/ICIT.2019.8755245>.

- [6] R. Baheti and H. Gill, "Cyber-physical systems", The Impact of Control Technology, Vol. 12, No. 1, pp. 161-166, Mar. 2011.
- [7] H. Taherdoost, "A systematic review of big data innovations in smart grids", Results in Engineering, Vol. 22, pp. 102132, Jun. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102132>.
- [8] S. H. Kang and B. S. P, "Establishment and Demonstration Plan for $\pm 35\text{kV}$ MVDC Demonstration System", The Korean Institute of Power Electronics (KIPE) Magazine, Vol. 27, No. 5, pp. 44-49, Oct. 2022.
- [9] K. S. Kim, B. M. Im, S. S. Choi, S. Y. Chi, and K. H. Yoo, "Design and Implementation of Web-based Virtual Twin Model for Synchronization between Physical and Cyber Space in Manufacture Industry", Journal of KIIT, Vol. 14, No. 2, pp. 115-124, Feb. 2016, <https://dx.doi.org/10.14801/jkiit.2016.14.2.115>.

저자소개

박종혁 (Jong-hyeok Park)



2022년 2월 : 한양대학교
화학공학과(공학석사)
2022년 11월 ~ 2024년 11월 :
고등기술연구원 연구원
2024년 12월 ~ 현재 :
에너지경제연구원 연구원
관심분야 : 공정 해석, 전산 모사,
공정 설계

박영수 (Yeong-Su Park)



2003년 2월 : 창원대학교
환경공학과(공학석사)
2011년 12월 : (일)동경공업대학교
환경공학과(공학박사)
2012년 1월 ~ 현재 : 고등기술연구원
연구원
관심분야 : 디지털 전환