

<http://dx.doi.org/10.17703/JCCT.2024.10.6.855>

JCCT 2024-11-104

## MVDC 연계 운용을 위한 DTS 데이터 모델링에 관한 연구

### A Study on DTS Data Modeling for MVDC Integrated Operation

임채영\*, 박영수\*\*

Chae-Young Lim\*, Yeong-Su Park

**요약** 전력 산업은 스마트그리드 표준체계의 도입과 분산전력 기술 등 신기술의 도입으로 인해 급격한 변화를 겪고 있다. 이 중 중전압 직류 기술은 에너지 효율 향상과 온실가스 감축에 중요한 역할을 하며, 이를 안정적으로 관리하기 위한 체계적인 아키텍처 구축이 필수적이다. 본 연구에서는 IEC 61850과 IEC 62541 표준에 정의된 서비스를 구현하고, DTS(Digital Twin System)의 객체화를 위한 VMD (Virtual Manufacturing Device)를 정의하였다. VMD는 제어 및 모니터링에 필요한 기능과 객체를 추상화 하기 위해 구현되며, 이는 역량강화를 하기 위한 DTS의 객체화로 반영된다. 운용을 위해 객체화된 DTS 데이터는 서버와 클라이언트 관계로 정보를 주고받게 된다. 객체화된 DTS 데이터는 서버와 클라이언트 간의 데이터 교환을 통해 운용되며, 제안된 DTS-MS 통신 프로토콜은 JSON 형식으로 정의되어 원격에서 데이터를 웹상에서 확인할 수 있게 한다. 이러한 시스템은 MVDC 시험평가망 구축 이후 DTS에서 Node 기능을 제공할 수 있도록 설계되었다.

본 논문은 MVDC 시스템의 연계 및 관리 운용을 위해 기존 디지털 트윈 참조 모델을 분석하고, 국제 표준 체계를 활용하여 이더넷 기반의 DTS 아키텍처를 위한 데이터 모델링을 제안하였다. 수학적 시뮬레이션을 통해 제안된 시스템이 실시간 운용에 미치는 영향을 분석하고, 성능 향상을 검증하였다.

**주요어** : 중전압직류(MVDC), 국제산업표준IEC 61850/62541, 데이터 모델링, DTS(Digital Twin 기반 교육 시스템), DTS-MS(DTS-Message Specification), VMD

**Abstract** The power industry is undergoing a rapid transformation with the adoption of smart grid standards, advanced communication infrastructure, and new technologies for distributed power. MVDC (Medium Voltage Direct Current) technology plays a vital role in promoting efficient energy transmission and reducing greenhouse gas emissions, necessitating a structured architecture for stable management. This paper implements services defined in IEC 61850 and IEC 62541, defining a Virtual Manufacturing Device (VMD) to objectify the DTS (Digital Twin System). The VMD abstracts essential functions for control and monitoring, which are realized in DTS to enhance capabilities. The objectified DTS data facilitates server-client data exchange. Additionally, the proposed DTS-MS communication protocol defines transmitted data in JSON for remote access, providing node functionality for MVDC testing environments. The paper analyzes reference models for Digital Twin, proposes an Ethernet-based DTS architecture using international standards, and verifies the real-time performance improvements of the proposed system through mathematical simulations.

**Key words** : DTS(Digital Twin based Training System), MVDC(Medium Voltage Direct Current), DM, IEC 61850/ 62541, DTS(Digital Twin based Training System), VMD(virtual manufacture device)

\*정회원, 고등기술연구원 플랜트엔지니어링본부 선임연구원(교신저자) Received: September 24, 2024 / Revised: October 25, 2024

\*\*정회원, 고등기술연구원 플랜트엔지니어링본부 수석연구원(공동저자) Accepted: November 1, 2024

접수일: 2024년 9월 24일, 수정완료일: 2024년 10월 25일

\*Corresponding Author: cylim@iae.re.kr

게재확정일: 2024년 11월 1일

Institute for Advanced Engineering, Korea

## I. 서 론

현대 사회는 기후 변화와 자원 고갈 문제에 직면하면서 지속 가능한 발전과 환경 보호의 필요성을 그 어느 때보다도 강조하고 있다. 이러한 상황에서, 재생 가능 에너지 자원의 통합과 온실가스 배출 감축이라는 목표는 전 세계적으로 중요한 과제로 부상하고 있다. 전력 시스템의 효율적 관리와 안정적 운영은 이러한 목표를 달성하는 데 핵심적인 요소로, 전력망의 복잡성과 중요성이 날로 증가하고 있다[1].

전통적으로 사용되어 온 교류(AC) 전력망은 오랜 시간 동안 안정적이고 신뢰할 수 있는 시스템으로 자리 잡아 왔다. 그러나 최근 들어 중전압 직류(MVDC, Medium Voltage Direct Current) 기술이 새로운 전력망 구성 방식으로 주목받고 있다. MVDC 시스템은 기존의 교류 시스템이 가지는 한계를 극복하고, 특히 장거리 전력 전송에서 전력 손실을 최소화하고 높은 전송 효율성을 제공하는 등의 장점을 가지고 있다[2]. 이러한 장점에도 불구하고, MVDC 시스템의 성공적인 구현과 안정적인 운영을 위해서는 여러 가지 도전 과제가 존재한다. 특히, 실시간 데이터 통신과 효율적인 제어 메커니즘의 필요성은 MVDC 시스템의 안정적 운영을 위한 핵심 요소로 대두되고 있다. 전력 IT 산업에서는 스마트그리드 표준체계를 기반으로 실시간 데이터를 송수신하고, 실시간 전력망의 운전, 제어 및 감시 기능을 수행할 수 있는 국제 표준인 IEC 61850 규격을 준수하는 기기들이 개발되고 있다. IEC 61850은 전력망에서 사용되는 통신 규격 중 하나로, 다양한 장비와 시스템 간의 상호 운용성을 보장하는데 중요한 역할을 하고 있다. 또한, MVDC 시스템의 운용을 위한 데이터 전송 및 관리를 위해서는 IEC 62541, OPC-UA, IEC 61850, MMS(Maintenance Message Specification) 등의 국제 표준 프로토콜이 필요하며, 이들 프로토콜은 전력 시스템의 효율성과 안정성을 높이는 데 핵심적인 역할을 한다[3].

본 연구는 이러한 배경을 바탕으로, IEC 61850 및 OPC-UA를 기반으로 한 디지털 트윈(Digital Twin) 기반 교육 시스템(DTS, Digital Twin based Training System)의 데이터 모델링 아키텍처를 제안하고자 한다.

디지털 트윈은 물리적 시스템의 가상 모델을 통해

실시간으로 데이터를 처리하고 제어 명령을 주고받을 수 있도록 하는 기술로, 최근 다양한 산업 분야에서 주목받고 있다. 특히, 전력 시스템 운영에서 디지털 트윈을 활용하면 시스템의 가시성을 높이고 성능을 극대화할 수 있는 가능성이 있다. 디지털 트윈은 실제 시스템의 동작을 가상 환경에서 모사함으로써, 시스템 운영의 문제점을 사전에 발견하고 이를 개선할 수 있는 기회를 제공한다[4].

본 논문에서는 MVDC 시스템의 연계 및 관리 운용에서 디지털 트윈의 실시간성을 향상시키기 위해 DTS-MS를 적용하고, 이를 통해 제안된 아키텍처의 성능을 시뮬레이션 및 실험을 통해 검증하고자 한다.

디지털 트윈을 기반으로 한 교육 시스템(DTS)은 전력 시스템 운영자에게 교육과 훈련의 기회를 제공하여, 시스템 운영의 가시성을 높이는 데 기여할 수 있다. 교육 시스템은 실제 시스템의 운영 환경을 가상으로 재현함으로써, 운영자가 실제 상황에서 발생할 수 있는 다양한 시나리오에 대비할 수 있게 한다. 이러한 시스템은 특히 MVDC와 같은 복잡한 전력 시스템의 운영에 있어서 중요한 역할을 할 수 있다. IEC 61850과 IEC 62541 기반의 데이터 모델링 아키텍처는 DTS의 실시간성을 보장하고, 시스템 성능을 극대화하는 데 중요한 역할을 할 것으로 기대된다.

이 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 IEC 61850 및 IEC 62541 등의 정의 및 구조를 설명하고, MVDC 시스템에 적용할 수 있는 통신 환경을 구성하는 방법을 논의한다. 3장에서는 DTS-MS 기반의 통신 환경 구성과 클라이언트 및 서버 프로그램의 설계와 구현에 대해 설명한다. 4장에서는 설계된 클라이언트 및 서버 프로그램의 실험을 통해 성능을 검증하는 과정을 제시한다. 마지막으로 5장에서는 본 연구의 결론을 내리고, 향후 연구 방향에 대해 논의한다.

## II. 관련연구

### 2.1. MVDC 기반 DTS 시스템

MVDC 시스템의 운영자 역량 강화를 위해 DTS(Digital Twin-based Training System) 기반의 가상현실(VR) 교육 솔루션이 개발되고 있다. 이 교육 솔루션은 MVDC 시스템 운영자들이 실제 운영 환경

과 유사한 가상 환경에서 교육과 훈련을 받을 수 있도록 설계되었다. 이를 통해 운영자들은 MVDC 시스템의 복잡한 운용 절차와 긴급 상황 대처 방법을 보다 효과적으로 학습할 수 있다. 이러한 DTS 기반 교육 솔루션은 MVDC Pilot Testbed에서 시범 교육과 실증을 통해 그 효과성을 검증하고 있으며, 향후 MVDC 시스템의 확산에 중요한 역할을 할 것으로 기대된다 [5] 이와 같은 연구들은 MVDC 시스템의 관리 및 운영 효율성을 향상시키기 위한 새로운 접근 방안을 제시하고 있으며, 특히 디지털 트윈과 VR 기술의 결합을 통해 보다 안전하고 효율적인 전력 시스템 운영을 가능하게 하고자 한다. 본 논문에서는 이러한 기존 연구들을 기반으로, MVDC 시스템에 최적화된 DTS 기반 교육 솔루션의 데이터 모델링을 제시하고, 이를 통해 전력 시스템 운영의 신뢰성과 효율성을 극대화하고자 한다.

## 2.2. IEC 62541 및 OPC-UA

IEC 62541은 제조업체 간 정보 교환을 지원하며, 국제전기기술위원회(IEC)에서 개발한 국제 표준으로, 플랫폼 독립적인 통신 프레임워크를 OPC-UA로 정의하여, 산업, 자동화 및 제조 환경에서 데이터와 제어 정보를 안전하고 신뢰성 있게 교환할 수 있는 사양을 제공한다. 특히 상호운용성에 중점을 둔 IEC 62541은 다양한 플랫폼 간의 원활한 통합을 가능하게 하여, Industry 4.0 애플리케이션의 핵심 요소이다. 아래 그림1은 전형적인 OPC-UA(Open Platform Communication Unified Architecture)의 서버/클라이언트 구조를 설명한다. OPC-UA는 정보 상호운용을 위해 개발된 M2M(machine to machine) 통신 프로토콜이며, 기존의 OPC DA, OPC A&E, OPC HDA의 기능을 상속받고 있다 [3][4][5].

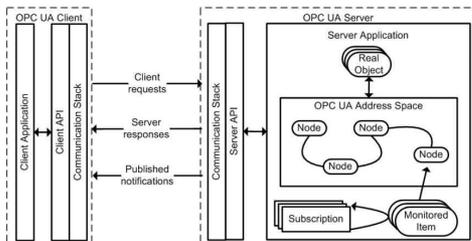


그림 1. 전형적인 OPC UA 서버와 클라이언트의 구조  
 Figure 1. Typical OPC Unified-Architecture Server/Client

## 2.3. IEC61850에 따른 MMS 매핑

IEC 61850 표준은 변전소, 엔지니어링, 데이터 모델, 통신 솔루션 및 적합성 테스트에 관련된 일반적 요구사항들에 대한 내용을 포함하며, 변전소자동화 시스템에 적용하기 위한 통신 네트워크 및 시스템 표준으로 적용분야를 점차 확장하고 있다[2]. IEC 61850은 스마트그리드 분야의 핵심 표준이며, IEC 61850-7의 개념은 IEC 61850-8-1에 의해 MMS로 매핑 된다. IEC 61850-8-1에서 제시하는 MMS ISO 9506에 대한 매핑개념은 그림 2와 같다.

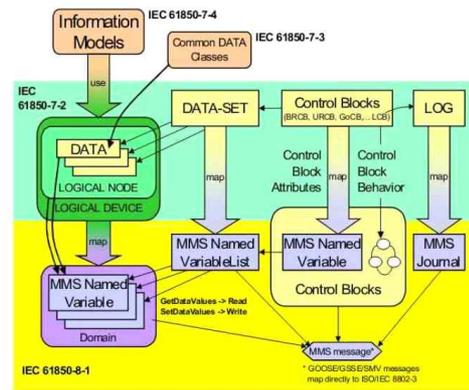


그림 2. 전형적인 MMS 매핑  
 Figure 2. Typical MMS mapping

IEC 61850-7-2에 따르면 각각은 메타 vs.메타, 메타, 도메인 타입 및 데이터 인스턴스로 정의되어 있다. 메타 vs. 메타 레벨에서는 base type, generic data attribute, nesting 및 composition을 정의하고, 메타 레벨에서는 파트 7-3의 CommonDataClass와 파트 7-4의 LogicalNode의 정의 방법을 명세하며, 도메인 타입 레벨에서는 IEC 61850 표준이 쓰이는 도메인에 대한 CommonDataClass와 LogicalNode를 정의한다. VMD를 통해서 클라이언트와 정보를 주고받기 때문에 실제 장비는 MVDC 시스템에서 정의된 노드로 매핑이 선행되어야 한다[6].

### 2.3.1 MMS

MMS(Manufacturing Message Specification)는 ISO/IEC 9506 표준에 따라 설계된 통신 프로토콜로,

산업 자동화 및 실시간 데이터 교환을 지원하는 메시지 전송 기술이다. MMS는 다양한 시스템 간의 실시간 통신을 제공하여 시스템 안정성을 향상시키고, 운영 효율성을 극대화할 수 있다.

### III. IEC61850 및 IEC 62541기반 데이터

#### 모델링 구조 설계

지능형 MVDC 기술의 제어망과 정보망의 구성 서비스들에 대해 조사하고, MVDC에서 사용되고 있는 네트워크에 대해서 분석한다. 다음으로 메시지 프로토콜 설계에서는 분석한 정보를 바탕으로 MVDC 통신 시스템에 적용 가능한 메시지 프로토콜 스택을 개발하고, 기존의 네트워크와 연동 기법을 설계한다 [7-8]. 응용 계층에서 정보교환시에 다양한 프로토콜을 이용하여 통신을 한다. 여러 노드를 거쳐야 한다고 할 때 시스템이 복잡해지고 응답 속도 및 실시간성이 떨어지게 된다. 또한 G/W와 여러 가지 프로토콜 사용으로 인한 구현 단계와 복잡도가 증가하게 된다. 이러한 점을 보완하기 위해서 본 논문에서 MVDC 테스트베드에서 사용가능하도록 이더넷 기반의 DTS 응용 메시지 아키텍처(DTS-MS)를 설계한다. DTS 메시지 프로토콜은 구조를 간소화된 프로토콜 구조를 사용하여 응답 시간을 감소시키고 이중화된 이더넷통신 기법을 사용하여 네트워크의 효율성을 높였다. 가상 시뮬레이션 환경의 운영자들이 시스템 문제를 가상으로 해결해 볼 수 있는 기회를 제공하며, 다양한 문제 시나리오에 대한 대응 방법을 학습할 수 있다. 이를 통해 실제 시스템 운용 시 발생할 수 있는 문제를 최소화할 수 있어, 운용 및 시스템 문제 발생 시 DTS를 통해 빠르게 대처할 수 있도록 실시간 상황에 대응하는 능력을 향상시키는 역량을 길러준다.

#### 3.1 전처리 매핑

VMD를 통해서 실제 장비는 클라이언트와 정보를 주고 받는다. 정보를 주고 받기 위해서는 실제 장비와 매핑이 선행되어야 한다. 매핑을 위해서 VMD들은 IEC61850-7에 정의되어 있는 데이터 속성(DA), 논리

노드(LN), 논리장치(LD)등으로 정보 모델링화된다 [9].

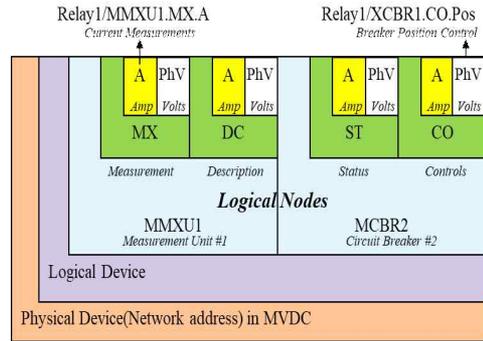


그림 3. IEC 61850 데이터 모델의 계층구조  
Figure 3. Hierarchical Structure of IEC 61850 Data Model

구성요소는 데이터 객체인 논리노드로 그림 3과 같이 각 논리노드를 공통 데이터 클래스(CDC)를 최대 30개까지 가질 수 있고, 각 데이터 객체는 데이터 속성(DA)을 가지고 있다.

#### 3.2 DTS 데이터 모델링 설계

본 논문에서는 IEC 61850을 기반으로 한 데이터 모델링 구조를 설계하여 MVDC 시스템의 연계 및 관리 효율성의 향상을 돕는다. DTS-MS 프로토콜은 각 MVDC Testbed 내의 노드의 상태 정보를 교환하며, 역방향화를 위한 솔루션과 연계되어 사용자에게 보다 직관적인 시스템 이해와 관리를 돕는다.

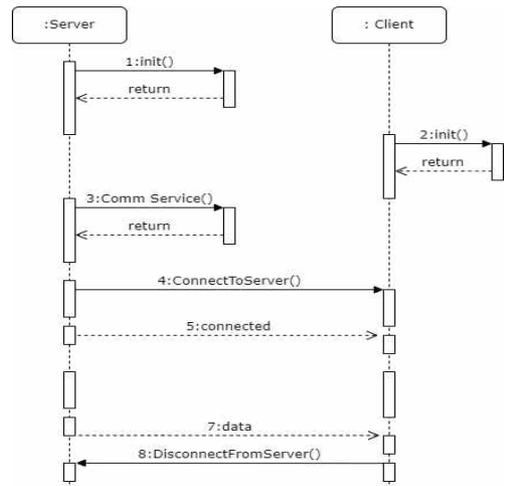


그림 4 DTS 통신 흐름도  
Figure 4. DTS Communication Flowchart

DTS-MS(DTS-Message Specification) 통신 테스트를 위한 서버 어플리케이션으로 Client는 미리 정의된 네트워크 설정정보를 가져오고, 지정된 ARName 및 초기조건 값들로 MVL(MMS-Virtual Lite) API를 통해 Server에 접속한다. 서버와의 연결이 이루어지면 Client의 서비스를 실행하며, 지정된 리포팅 서비스에서는 노드의 위치정보와 객체명을 통해 데이터에 접근하고 Client측에 데이터를 출력한다. 그림 4은 Client-Server간의 통신 흐름을 설명한다.

구현된 통신 흐름도에 따라 Client와 Server 프로그램을 설계하였으며, 그림 4는 구현된 Server, Client의 GUI 환경을 보여준다. 여기에 사용된 예시 데이터는 일부정보를 발췌하여 사용하였다. 두 대의 System을 Node로 구성하여 Server, Client 역할에 따라 정보를 주고받게 되며, Client 프로그램의 '연결' 버튼을 누르면 서버에 연결하기 위한 Client 프로세서가 생성되고, Server가 구동되고 있을 경우 Server에 접속하여 데이터를 읽어온 후 화면에 출력하게 된다.

그림 5는 OSI(Open Systems Interconnection) 7계층과 TCP/IP 및 DTS-MS의 프로토콜 구조로, DTS-MS는 실시간 데이터와 비실시간 데이터를 이중화된 구조로 이더넷 전송 기법을 사용하여 전송한다. 실시간 데이터는 데이터 전달시간을 줄이기 위해 응용 계층에서 하위 데이터 링크 계층으로 직접 연결을 하고, 비실시간 데이터는 UDP/IP(User Datagram Protocol / Internet Protoco)를 통해 하위 계층과 연결을 한다. 이로 인해 각 디바이스 간의 메시지 교환 시에 응답 속도가 향상되어 실시간성이 향상된다.

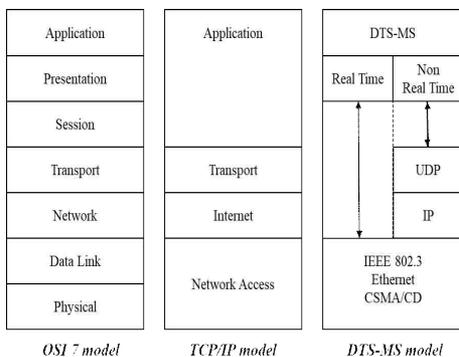


그림 5 DTS-MS 모델구조와 OSI 모델 구조 비교  
 Figure 5. Comparison of DTS-MS Communication Network

model with OSI Communication Network model

구조는 전형적인 이더넷 프레임과 유사하나 Adaptive Layer에 헤더가 포함된다. AL 헤더는 데이터를 구분하는 역할을 하며, 실시간인 경우 하위 디바이스 계층으로 직접적으로 연결하고, 아니면 UDP/IP를 통해 연결한다. 데이터는 시분할 방식으로 전송하며, 충돌을 회피하기 위해 요청 프레임을 보내고 응답 프레임을 받을때 메시지 교환이 이루어지도록 스케줄링 한다.

## IV. 구현 및 성능평가

### 4.1 시뮬레이션 환경 및 구현

본 논문에서는 DTS-MS 기반의 Client와 Server 프로그램을 개발하였으며, 그림 6은 IEC62541기반의 OPC-UA 시뮬레이터의 코드 일부를 나타낸다. OPC-UA 시뮬레이터는 FreeOpcUa을 기반으로 구현하였으며, 실시간 데이터를 OPC-UA Client로 전달하며, DTS-MS model과 연계된다. 그림 7은 DTS-MS기반으로 구현된 Server와 Client 프로그램의 GUI를 보여준다. 두 대의 System을 Node로 구성하여 Server 및 Client 역할에 따라 정보를 주고받게 되며, DTS-MS Client 프로그램의 '연결' 버튼을 누르면 서버에 연결하기 위한 Client 프로세서가 생성되고, Server가 구동되고 있을 경우 Server에 접속하여 데이터를 읽어온 후 화면에 출력하게 된다.

```

from threading import Thread
import copy
import logging
from datetime import datetime
import time
from math import sin
import sys

from opcua.ua import NodeId, NodeIdType

sys.path.insert(0, "..")

try:
    from IPython import embed
except ImportError:
    import code
    
```

그림 6 OPC-UA 시뮬레이터 코드 일부  
 Figure 6. OPC-UA Simulator Code extract

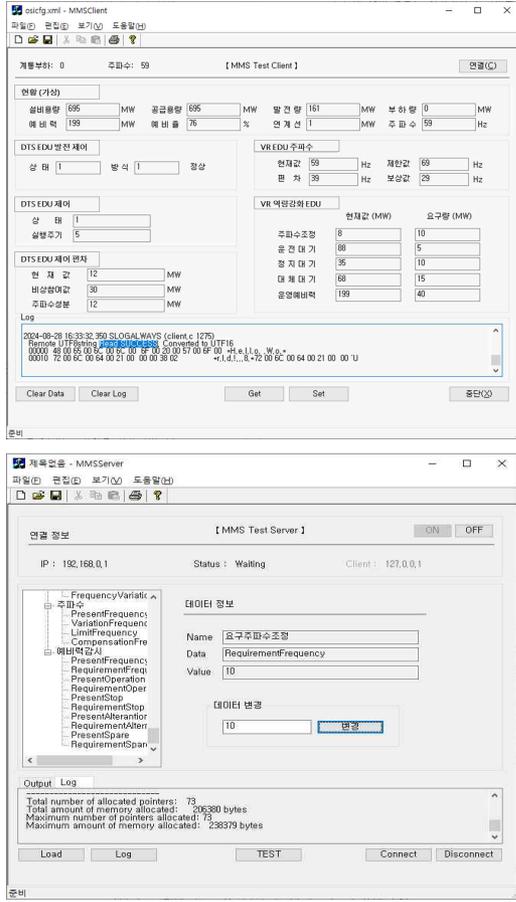


그림 7 DTS기반 Server/Client 프로그램 GUI 환경  
Figure 7. DTS-based Server/Client Program GUI Environment

#### 4.2 시간지연 분석 및 성능평가

각 노드 간에 메시지 교환 시에 소요되는 시간은 네트워크에서 채진송이 없다고 하면 식 1과 같이 표현된다[10]. 이에 각 두 노드 간에 DTS-MS를 응용 계층으로 메시지 교환 시에 소요되는 총 전송 시간은  $T^{DTSMS}$  이며, 식 1에서  $T_{pre}$  는 임의의 시작 노드에서 포 comm 함하는 선처리 시간으로 계산 시간과 인코딩 시간의 합으로 계산하고,  $T_{wait}$  는 임의의 시작 노드에서 큐잉 시간과 블로킹 시간의 합으로 계산되는 지연 시간이며,  $T_{tx}$  는 네트워크에서 전송지연으로 프리임 시간과 전달 시간의 합으로 계산된다.

$$\begin{aligned}
 T^{DTSMS} &= T_{end} - T_{srt} \\
 &= T_{pre} + T_{wait} + T_{tx} + \frac{DTSMS}{comm} + T_{post} \quad (1) \\
 &\approx T_{tx} + \frac{DTSMS}{c}
 \end{aligned}$$

식 2는 이중화된 이더넷 전송기법을 사용시 소요되는 시간이다.  $\frac{Eh}{frame}$  는 이더넷 프레임의 최소길이로 64byte를 적용하였고,  $\frac{UDP}{frame}$  는 UDP 프레임의 길이 579byte를 적용한다.  $T_{byte}$  는 1byte당 전송 시간이며, 전송속도를 100Mbit/s 로 적용하였다.

$$\begin{aligned}
 T_{tx} &= T_{soc} \\
 &+ N_o \times T_{Req} + 2 \times N_o \times \frac{Eh}{frame} \times T_{byte} + \dots \\
 &+ 2 \times T_{Req} \left( 3 \times \frac{Eh}{frame} + \frac{UDP}{frame} \right) \times T_{byte} \quad (2) \\
 &= \frac{Real}{tx} + \frac{Real-sporadic}{tx} + \frac{n-Real}{tx}
 \end{aligned}$$

Node 들을 포함한 Sub-System 구성요소간의 네트워크 및 상위 운영시스템과의 상호 통신 그리고 각 Grid 간의 물리적인 네트워크 구성이 선행되어야 정확한 Component 설계가 가능하며, 성능 분석 비교 결과 1개 노드로 가정하에 진행하였다. 실험 결과 비실시간 데이터  $\frac{n-Real}{tx}$  의 전송시간은  $79\mu s/cycle$ , 실시간 데이터  $\frac{Real-sporadic}{tx}$  는  $38\mu s/cycle$ 이 소요되어, 응답시간이 감소 되었음을 확인하였다.

#### V. 결론 및 향후과제

본 논문에서는 연계 및 관리 운용을 위한 DTS-MS 기반 데이터 모델링 설계를 제안하였고, 이를 IEC61850기반 DTS와 연계하여 MVDC 운영 효율성을 향상시키는 방법을 제시하였다. 이를 위하여 디지털 트윈 참조 모델 및 국제 표준체계를 분석하고, 국제규격인 IEC 61850/62541를 이용하여 이더넷 기반으로 디바이스간에 정보 교환 시에 실시간성을 향상시키고자 하였으며, 효율성을 증명하고자 수학적으 로 시간지연을 분석하였다. 실험 결과, 제안된 시스템

은 높은 안정성과 실시간 데이터 처리를 통해 실시간 성능을 향상시켰음을 확인하여 네트워크의 관리 효율성을 크게 향상시킬 수 있음을 시사한다.

최종 Component 개발 결과의 중간 과정으로 추후 MVDC 테스트베드에 DTS를 위한 통신 환경 구현을 위한 선행 연구로 활용될 예정으로, 향후 연구에서는 DTS의 확장성과 보안성을 강화하여 더 넓은 범위의 시스템에 적용할 수 있도록 할 것이다. 따라서 본 연구에서 제시하는 IEC61850/62541 기반 데이터 모델링 아키텍처는 전력 시스템의 미래 발전 방향을 제시하는 중요한 기여를 할 것으로 기대된다.

## References

- [1] Lee, J.H., Kim, S.W., & Park, H.J. (2023). "Enhancing Power Transmission Efficiency through MVDC Systems." *Journal of Power Systems Engineering*, 45(3), 211-222. <https://doi.org/10.1016/j.jpse.2023.05.014>.
- [2] International Electrotechnical Commission. (2010). "IEC 61850-7-2: Communication networks and systems for power utility automation." IEC Standards. <https://www.iec.ch/standards/61850-7-2>.
- [3] Zhang, Y., & Smith, R.L. (2022). "Interoperability Challenges in MVDC Systems Using IEC 61850 and MMS." *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 18(7), 3157-3168. <https://doi.org/10.1109/TII.2022.3141237>.
- [4] Chae-Eun Yeo, Woo-jin Cho, Jae Hoi Gu, Chae-Young Lim, "Energy Consumption Analysis of Batch Type Heating Process for Energy Savings in Food Processing Plants" *The Journal of the Convergence on Culture Technology (JCCT)* 9, no.3 (2023) 817-823.
- [5] C.Y. Lim, C.E Yeo, W.J. Cho, J.H Gu & S.H. Lee "Design and Implementation of IEC 62541 based Industry Internet of Things Simulator for Meta-Factory" *The Journal of the Convergence on Culture Technology (JCCT)* 9, no.3 789-795, 2023 <http://dx.doi.org/10.17703/JCCT.2023.9.3.789>
- [6] C.Y. Lim, C.E Yeo, S.Y. Ahn, M.O Lee & H.J Sung "Design and Performance Evaluation of Digital Twin Prototype Based on Biomass Plant" *The Journal of the Convergence on Culture Technology (JCCT)* 9, no.5 935-940, 2023 <http://dx.doi.org/10.17703/JCCT.2023.9.5.935>
- [7] Tao, F., Zhang, H., Liu, A., & Nee, A.Y.C. (2019). "Digital Twin in Industry: State-of-the-Art." *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 15(4), 2405-2415. <https://doi.org/10.1109/TII.2018.2873186>.
- [8] C.Y. Lim, C.E Yeo, H.J Sung, " Designing Digital Twin Concept Model for High-Speed Synchronization" *The Journal of the Convergence on Culture Technology (JCCT)* Vol.9 No.6 245-250 2023. <http://dx.doi.org/10.17703/JCCT.2023.9.6.245>
- [9] C.Y. Lim, C.E Yeo, S.Y. Ahn, S.H. Lee, "Artificial Neural Network-based Thermal Environment Prediction Model for Energy Saving of Data Center Cooling Systems", *The Journal of the Convergence on Culture Technology (JCCT)* 9, no.6 883-888, 2023 <http://dx.doi.org/10.17703/JCCT.2023.9.6.889>
- [10] Feng-Li Lian, James R. Moyne, Dawn M. Tilbury, "Performance Evaluation of Control Networks for Manufacturing Systems", *Proceeding of the ASME Dynamic Systems and Control Division*, 1999

※ 이 논문은 2024년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술 평가원(KETEP)의 '차세대 AC/DC Hybrid 배전 네트워크 기술개발사업'으로 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. RS-2023-00281219)