

## • 특집 • 삶의 질 향상을 위한 환경 모니터링 정밀 측정 기술 (Precision Measurement Technology for Environmental Monitoring to Improve Quality of Life)

# 데이터 기반 스마트 그리드 모니터링 고도화를 위한 시각동기 측정 기기 소개 및 동향

## Introduction and Trends of Time-synchronized Measurement Devices to Advance Data-driven Smart Grid Monitoring

이결<sup>1,#</sup>  
Gyul Lee<sup>1,#</sup>

<sup>1</sup> 한국표준과학연구원 (Korea Research Institute of Standards and Science)  
E-mail: eegyul@kriss.re.kr, TEL: +82-42-868-5491  
ORCID: 0000-0002-6197-2829

KEYWORDS: Smart grid (스마트 그리드), Data-driven monitoring (데이터 기반 감시), Time-synchronization (시각동기화), Phasor measurement unit (시각동기위상측정장치), Waveform measurement unit (파형측정장치), Mirco-PMU (마이크로PMU)

*The smart grid was initially developed to facilitate communication between operators of the electric power system (such as power generation companies and transmission system operators) and consumers within the distribution network. To implement the smart grid paradigm, time-synchronized measurement devices were developed and introduced into the electric power system. Phasor measurement units (PMUs) and waveform measurement units (WMUs) were created for wide-area transmission networks (at the high-voltage layer), while micro-PMUs were introduced for real-time state estimation in distribution networks (at the low-voltage layer). These time-synchronized measurement devices allow power system operators to monitor the operational status of power generation, transmission, and distribution infrastructure in real time. In particular, data-driven applications utilizing the measurement data can intelligentize and advance the monitoring, operation, and control of the smart grid. The capabilities of digitized high-resolution measurement and time-synchronization are the key factors that enable these contributions to the smart grid. This paper provides an introduction to time-synchronized measurement devices, outlines their specific capabilities, and explores the data-driven applications that can be implemented for advanced smart grid monitoring systems.*

Manuscript received: July 3, 2024 / Revised: July 24, 2024 / Accepted: July 25, 2024

### 1. 서론

2000년대 이후 기후 변화에 대응하기 위해 신재생 에너지원의 도입이 증가하고, 전력 수요 또한 급격히 증가하면서 기존의 노후화된 전력 인프라 설비의 안정성 문제가 대두되었다. 이를 배경으로, 전력 시스템의 효율적이고 안정적인 감시와 운용을 위해 스마트 그리드(Smart Grid) 개념이 제시되었다. 스마트

그리드는 정보 통신기술을 활용하여 전력 생산자, 공급자, 소비자 간의 상호 작용을 최적화하는 것을 목표로 한다. 이를 위해, Fig. 1처럼 높은 신뢰도의 전기량(전압/전류, 유효/무효 전력, 주파수 등) 정보를 측정하기 위한 정밀 측정기기가 개발되고 도입되었다.

광대역 고전압 송전망의 경우, 기존의 전력망 감시시스템에서 계통의 수학적 모델을 통해 추정하던 전기량을 직접 측정하는

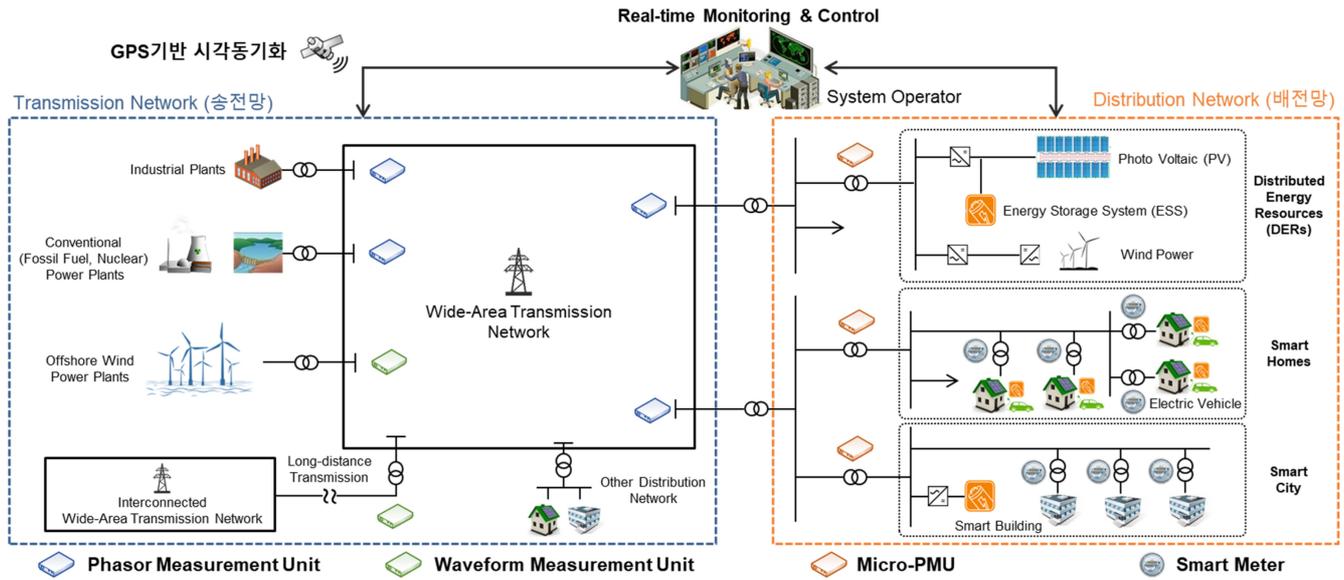


Fig. 1 Time-synchronized measurement devices in smart grid; phasor measurement unit, waveform measurement unit, micro-PMU

PMU (Phasor Measurement Unit)의 도입이 제안되었다[1]. 또한 더욱 정밀한 감시 데이터가 요구되는 송전망의 특정 지점에는 WMU (Waveform Measurement Unit)의 도입이 검토되고 있다 [2]. 한편, 송전망에 비해 복잡도가 매우 높은 저전압 배전망에서는 실시간 계통 모니터링을 위해 PMU의 개념을 도입한 Micro-PMU의 개발이 진행되었다[3].

소개하는 측정기기(PMU, WMU, Micro-PMU)들은 기존 전력망 감시데이터와 비교하여 GPS (Global Positioning System) 기술을 기반으로 시각동기화 되어있다는 특징을 가지고 있다. 또한 높은 Sampling Rate로 방대한 양의 실시간 측정 데이터를 생성해 낸다. 이러한 높은 신뢰도의 측정 데이터를 기반으로, 데이터 기반 스마트 그리드의 모니터링 기술이 빠르게 발전하고 있다. 특히, 인공지능과 같은 기술이 도입되면서, 전력 계통의 실시간 상황인지(Situational Awareness)와 더불어 안정도를 예측하는 방안이 적극적으로 검토되고 있다.

본 논문의 2장에서는 데이터 기반 스마트 그리드 모니터링 고도화를 위해 개발되었거나 연구 중인 측정기기를 소개한다. 특히 기존의 감시시스템과 비교하여 각 측정기기가 가지는 장점을 제시한다. 3장에는 측정값을 활용한 데이터 기반 모니터링 기술 개발 동향에 대해 서술하며, 각 내용은 Table 1에 요약되어 있다.

## 2. 스마트 그리드의 시각동기 측정기기

### 2.1 Phasor Measurement Unit

2003년도 북미지역 대정전 발생의 주요 원인으로 계통 연계 지역 간 계통 감시 정보 공유 시스템의 부재가 지적되었다. 이에 따라 북미 신뢰도위원회(North America Electric Reliability Council, NERC)는 계통 운영 신뢰도 향상을 위해 권고 기술 중의

하나로 Synchrophasor 기술을 제시하였다. Synchrophasor 기술의 목적은 광대역 송전망의 운영 정보를, GPS를 통해 데이터 간의 시각을 동기화 함으로써 높은 신뢰도의 광대역 전력망 감시 시스템을 구축하는데 있다.

Synchrophasor 기술의 구현을 위해 PMU가 개발되어 미국을 시작으로 광대역 송전망에 도입되었다. PMU는 송전망 내의 모선(Bus)과, 이에 연계된 송전 선로의 전기량을 실시간으로 측정하여 계통운영자에게 제공하는 역할을 수행한다. 여기서 PMU가 측정하는 전기량은 전압/전류의 Phasor, 주파수가 해당되며 취득되는 과정은 다음과 같다[4]. 먼저 변전 시스템의 Potential/Current Transformer (CT/PT)로부터 측정되는 교류 전압/전류의 정현파 신호  $x(t)$  는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$x(t) = X_m(t) \cos(2\pi ft + \phi(t)) \tag{1}$$

여기서  $X_m(t)$  은 진폭,  $f$  는 주파수,  $\phi(t)$  는 위상(Phase)에 해당한다. 식(1)을 시스템 주파수  $f_0$  (60 또는 50 Hz)에 대하여 복소평면 극좌표계의 Phasor 형식으로 표현하면 다음과 같다.

$$X(t) = (X_m(t)/\sqrt{2}) \angle \phi(t) \tag{2}$$

PMU는 식(1)의 신호를 1 Cycle (1/60 또는 1/50 초) 당 50-60개의 포인트를 샘플링하여, 푸리에 변환을 통해 시스템 주파수  $f_0$  에 해당하는 크기(Magnitude)  $X_m(t)/\sqrt{2}$  와 위상  $\phi(t)$  를 도출한다. 도출된 전류/전압의 크기와 위상은 계통의 전기적 상태변수로서, 전력 조류(Power Flow) 계산 등 계통 해석에 활용된다.

기존 SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) 기반의 전력망 감시시스템의 경우, 전류/전압의 크기와 위상을 직접 측정하지 못했다. 대신 일부 모선의 전압, 전압 위상, 유효 전력, 무효전력 등을 측정하고, 계통의 수학적 모델 (네트워크, 선로정수 등)을 활용하여 다른 모선의 전압/전류 크기와 위상을

Table 1 Capabilities and data-driven applications of the time-synchronized measurement devices

Device	Installation voltage level	Measurement capability (sampling rate)	Data-driven applications
PMU	High (Transmission)	Voltage/current phasor, frequency (30-120/sec. for $f_0 = 60\text{ Hz}$ )	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Measurement based state estimation</li> <li>- Event detection &amp; classification &amp; location</li> <li>- Dynamic stability monitoring and prediction</li> <li>- Model validation, calibration, and extraction</li> <li>- Real-time control &amp; protection</li> </ul>
WMU	High (Transmission)	Voltage/current waveform (over 1,500/sec. for $f_0 = 60\text{ Hz}$ )	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Event detection &amp; classification &amp; location</li> <li>- Monitoring of sub- and super-synchronous oscillations</li> <li>- Analysis of power electronics devices and inverter-based resources</li> <li>- Harmonic analysis</li> </ul>
Micro-PMU	Low (Distribution)	Voltage/current phasor, frequency (120/sec. for $f_0 = 60\text{ Hz}$ )	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Measurement based state estimation</li> <li>- Event detection &amp; classification &amp; location</li> <li>- Identification of topology and phase imbalance</li> <li>- Power quality analysis</li> <li>- Physical and cyber security</li> </ul>

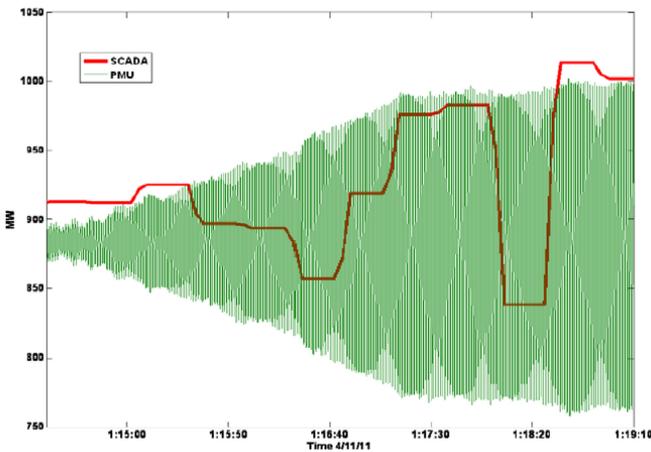


Fig. 2 Comparison of SCADA versus PMU recordings of the same grid event; un-damped oscillations at a power plant [5] (Adapted from Ref. 5 on the basis of OA)

추정하였다. 이와 같은 과정을 상태 추정(State Estimation)이라 하며, 수천~수만 개의 모선을 포함한 네트워크의 상태 추정을 위해 큰 연산 부담이 요구되었다. 때문에 데이터의 Sampling Rate는 약 0.25 Hz로 제한되었으며, 수 Cycle 내로 발생하는 계통 사고를 실시간으로 관측할 수 없었다. 또한 선로정수(저항, 인덕턴스, 컨덕턴스 등)와 같은 수학적 모델은 대부분 상수(Constant)값으로 고정되는데, 실제 운용 상황에서는 온도 등의 환경요인으로 인해 실시간으로 변화한다. 때문에 추정의 정확도가 떨어지는 상황이 발생하였으며, 모선과 선로 등 각 계통 구성 요소 데이터의 시각 동기화가 이루어지지 않아 실시간 감시/제어 측면에서 활용도가 떨어졌다.

반면에, PMU로부터 취득되는 Phasor 데이터의 Sampling Rate는 30-120 Hz로, Fig. 2와 같이 SCADA 데이터로 관측이 불가능한 계통의 이상 현상을 관측할 수 있다[5]. 또한 추정이 아닌 측정된 값을 제공함으로써, SCADA 기반 감시 데이터 보다 신뢰도가 높으며 GPS로 시각이 동기화 되어있어 실시간 계통

감시 기술 적용에 유리하다. 이러한 장점을 배경으로, 미국 에너지부(Department of Energy, DOE)에 따르면 2023년 기준 약 2,500기 이상의 PMU 미국 송전 계통에 설치되어 감시 시스템에 활용 중이다[6]. 중국은 모든 500 kV급 변전소를 포함하여 주요 발전 지역에 4,000기 이상의 PMU를 설치하여 운용 중이다[7]. 한국의 경우 2011년 수도권 지역 순환 정전 이후, 수도권 주요 23개 변전소에 약 40기의 PMU가 설치되었다. 또한 신재생 에너지 비율이 크고 육상과 해저 케이블로 연계된 제주도 지역에 추가로 약 20기의 PMU가 설치되었다.

## 2.2 Waveform Measurement Unit

PMU 기기를 활용한 Synchrophasor 기술이 차세대 송전망 감시 시스템의 주요 흐름인 것은 사실이나, 몇 가지 한계점을 내포하고 있다. PMU는 식(2)에서와 같이 시스템 주파수  $f_0$ 를 기준으로 한 전압/전류의 크기와 위상을 제공한다. 때문에 식(1)과 같이 CT/PT로부터 측정된 정현파(Waveform) 신호에 시스템 주파수 이외의 주파수 성분이 포함되어 있다면, PMU가 Waveform신호를 Phasor 신호로 변환하는 과정에서 왜곡이 발생할 수 있다. 또한 PMU의 샘플링 주파수(30-120 Hz)가 기존 SCADA에 비해 월등히 높지만, Nyquist 이론에 따라 15-60 Hz 이상의 주파수 성분을 가진 계통의 이상 현상은 관측할 수 없다.

따라서 PMU로부터 취득되는 Phasor 형식의 데이터가 아닌, CT/PT를 통해 측정된 Raw 데이터에 해당하는 Waveform 신호를 직접 계통 감시에 활용하려는 노력이 진행되고 있다. 이를 위한 측정 기기로 WMU(또는 Synchronous-WMU, SWMU)가 제안되어 연구 개발이 진행되었다[2]. 기존의 CT/PT를 이용한 Waveform 측정 기술에 GPS 기술을 적용하여 데이터 간 시각 동기화를 구현하였다. 또한 Synchrophasor 데이터보다 더 높은 Sampling Rate(256 Samples per Cycle,  $f_0 = 60\text{ Hz}$  기준 약 15,000 Hz)를 제공하여 Synchrophasor 기술로 관측 불가능한 계통 이벤트 상황에 대응하고자 하였다.

Table 2 Comparison of PMU and micro-PMU

	PMU	Micro-PMU
Precision (TVE) [4] (Adapted from Ref. 4 on the basis of OA)	$\pm 1\%$	$\pm 0.01\%$
Magnitude Resolution	$\pm 0.1\%$	$\pm 0.0002\%$
Angle Resolution	$\pm 1^\circ$	$\pm 0.001^\circ$

하지만 WMU가 PMU를 완전히 대체하기는 어려운 상황이다. 높은 해상도로 인해 더 많은 데이터가 실시간으로 생산되는데, 현재 전력 시스템의 데이터 통신 용량의 한계로 인해 설치 수의 제한이 생긴다. 또한 광역의 계통망을 해석하기 위해서는 Phasor형태의 데이터가 요구되기 때문에, Waveform 측정값을 Phasor로 변환하여 전송하는 PMU가 WMU보다 유리하다. 이로 인해 WMU는 계통의 취약 지점이나 특수한 이벤트 현상을 집중적으로 모니터링하기 위한 목적으로 연구되고 있다[8].

### 2.3 Micro-PMU

고전압 송전망의 감시 기술은 인프라 유지 보호를 위해 사고를 미리 방지하는 것이 주목적이나, 저전압 배전망의 감시 시스템은 배전 설비의 유지보수 비용이 상대적으로 낮기 때문에 사고 이후 후속 유지보수에 집중되어 있다. 하지만 수요자의 능동적인 전력시장 참여가 가속화되고, 소규모 신재생 발전과 전기차의 증가에 따라 실시간 배전망 감시 시스템의 필요성이 증가하고 있다.

이에 따라 배전망의 전기량을 실시간으로 계측하기 위한 Micro-PMU 측정기기의 도입이 제기되었다. Micro-PMU는 기존 배전망 계측기기에 송전망 Synchrophasor 기술의 개념을 도입하여, GPS를 통해 취득되는 데이터의 시각을 동기화 하였다. 미국 DOE의 지원 하에, University of California Berkeley, CIEE(California Institute for Energy and Environment), PSL(Power Sensors Ltd., 현재는 Powerside 사로 합병)는 협력 연구를 통해 기존의 PQ 미터를 개선한 Micro-PMU인 PQube3를 상용화 제품으로 출시하기도 하였다[9].

송전망의 PMU와 배전망의 Micro-PMU는 시각 동기화된 Phasor 정보를 측정한다는 점에서 기본적인 목적이 동일하다. 하지만 적용 대상이 되는 송전망과 배전망의 차이에 의해 측정기기의 기능이 달라진다. 송전망은 큰 전기적 관성으로 동적인 상황을 빠르게 제어하여 최대한 안정된 운전을 지향해야 한다. 따라서 PMU는 Observability를 고려하여 최대한 많은 모선에 설치되어 송전망 전체를 감시하고자 한다. 반면 배전망은 송전망에 비해 매우 복잡한 네트워크를 가지고 있으며, 많은 선로가 3상 균형이 맞지 않거나 단상선로로 구성되어 있고, 소비자의 부하 패턴 또는 신재생에너지의 불확실성 높은 성질에 직접적인 영향을 받는다. 때문에 Micro-PMU는 Table 2와 같이 PMU보다 더 정밀한 측정 성능이 요구된다. 이를 바탕으로 송배전 Feeder, 신재생 분산전원 연계 지점 등 주요 감시 대상이 되는 모선에 설치되는 것이 연구중이다.

### 3. 측정 데이터 기반 스마트 그리드 운영 기술

PMU, WMU, Micro-PMU는 데이터의 Sampling Rate가 기존 추정 데이터보다 월등히 높으며, 시각 동기화된 실시간 측정 정보를 제공한다. 전력 생산자, 공급자, 소비자 간의 상호작용을 최적화한다는 스마트 그리드의 목적에 있어, 이와 같은 시각 동기화된 실시간 측정 정보는 전력망 모니터링 고도화를 위한 다양한 기회를 제공한다. 특히 데이터 마이닝, 인공지능 기술과 같은 데이터 기반 해석 기법이 도입되면서, 기존의 추정 기반 감시 기술을 보완하거나 대체하는 기술들이 활발히 연구 중이다.

PMU의 경우 SCADA 기반의 추정값을 대체하여 계통운영자의 상황 인지(Situational Awareness) 능력을 향상시키는 것이 주목적이다[1]. 또한 계통에 이벤트가 발생했을 때, 이를 빠르게 검출하고 종류를 판별하며 위치까지 추정해 내는 기술이 연구되었다[10,11]. 이에 더하여 PMU 데이터와 인공지능 기술을 융합하여, 발전 시설과 송전망을 제어하는 데 있어 계통 운영의 안정성을 확보하기 위한 안정도(Stability)를 평가하는 기술 또한 연구되었다[12].

WMU는 고해상도의 측정 원신호(Waveform)를 제공한다는 이점을 살려, 송전망의 특정 지점을 정밀하게 분석하고 감시하는데 활용되고 있다. 예를 들어, 신재생에너지로 대표되는 풍력 발전단지가 연계된 지역에서 자주 발생하는 저주파 공진현상(Sub-Synchronous Resonance, SSR)등은 시스템 인프라의 붕괴를 야기할 수 있는 문제이다. PMU는 시스템 주파수  $f_0$  이외의 정보는 왜곡시킬 가능성이 있으며, SSR과 같은 저주파 공진주파수 성분은 관측하기 어렵다[17]. 때문에 대규모 해상 풍력발전단지 연계율이 높은 영국을 중심으로 한 북서부 유럽 국가들은 컨소시엄을 구성하여 WMU의 도입을 추진하고 있다. 또한, 유연송전시스템(Flexible AC Transmission System, FACTS)과 태양광 발전단지의 인버터 시스템과 같이 고속 스위칭 소자를 포함한 전력 설비의 Harmonic Analysis에도 활용이 검토되고 있다[2,18].

PMU와 WMU의 경우, 높은 신뢰도의 운영/제어 기술이 요구되는 송전망에 배치되므로, 높은 데이터 품질 또한 요구된다. PMU 또는 WMU에 포함된 저품질 데이터(누락, 잡음, 조작 등)로 인해 기술이 오경보(False Alarm)가 발생된다면 광역 정전, 전력 설비 파손 등 대규모 인프라적 손해를 야기할 수 있기 때문이다. 때문에 데이터의 압축, 저장, 복원 등 데이터 관리 기술이 필수적으로 선행되어야 한다. PMU 데이터의 경우, 신호의 비정상성(Non-stationary)를 고려하여 Wavelet 분석을 이용한 데이터 압축기법이 제안되었으며[13], 이를 기반으로 데이터 마이닝 기술을 적용한 다중스케일 압축 기술이 개발되었다[14]. 또한 데이터 마이닝과 인공지능 기술을 활용하여 빈번하게 발생하는 저품질(누락, 잡음, 조작 등) PMU 데이터를 복원하기 위한 기술이 개발되었다[15,16]. WMU의 경우, 정현파 형태의 신호이므로 기존 이미지, 음성 신호처리 기술의 적용이 가능하다.

Micro-PMU는 해석이 어려웠던 배전망의 감시 기술 발전에 기여하고 있다. 배전망의 특성상 3상 불균형 선로가 다수 존재하기 때문에 수학적 모델을 활용한 상태 추정이 제한적이다. 하지만 Micro-PMU가 각 모선의 Phasor 정보를 측정함으로써, 상태 추정과 전력 조류 계산 같은 계통 해석이 가능해졌다[19,20]. 또한 실시간 계통해석은 분산전원 발전이나 수요반응(Demand Response) 등 지역 발전사업자와 소비자의 능동적인 참여를 촉진시킬 수 있다[3]. 이에 더하여, Micro-PMU의 도입으로 인해 송전망의 데이터 기반 이벤트 검출/위치추정 기술이 적용 가능해지면서, 배전 설비 유지/보수 자동화에 기여하고 있다[21,22].

한편 한국 산업통상자원부의 제3차 지능형전력망 기본계획에 따르면, 재생에너지의 관제와 배전망 운영을 동시에 수행할 수 있는 차세대 배전망 관리시스템(Advanced Distribution Management System, ADMS)의 전국적인 확대가 계획되어 있다. 특히 ADMS 환경에서, 재생에너지와 에너지저장 시스템(Energy Storage System, ESS)를 중심으로한 가상발전소(Virtual Power Plant, VPP)의 구현을 위해서는 ICT 기술을 이용한 실시간 데이터 수집, 통신이 필수적이다. 이러한 조건에서 Micro-PMU는 배전계통의 Phasor정보 기반 실시간 감시/제어를 가능하게 함으로써 ADMS의 신뢰도를 높이고 VPP 시장의 활성화를 유도하는 데 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

본 논문에서 소개한 측정기기들이 생산하는 데이터는 전력 시스템의 ‘빅데이터’라고 할 수 있으며, 머신러닝이나 인공지능 기술의 적용 대상으로 주목받고 있다. 국가 전력 인프라 시설의 보안과 관련된 만큼 제한이 따르지만, 타분야(이미지, 음성, 비디오 등)와 마찬가지로 오픈소스 데이터를 제공하여 연구 활성화를 도모하려는 움직임이 생겨나고 있다. 한가지 예로, 미국의 ORNL (Oak Ridge National Laboratory)와 LLNL (Lawrence Livermore National Laboratory)는 DOE의 지원과 심사 아래 전력망의 오픈소스 데이터를 제공하는 GESL (Grid Event Signature Library)를 구축하였다[23]. GESL은 미국의 7개 계통운영자/연구소로부터 PMU와 PT/CT (Waveform)를 포함한 전력망의 다양한 센서의 데이터를 취합하였고, 8,513개의 Event Tag와 함께 검색할 수 있는 플랫폼을 제공하고 있다. 이와 같은 움직임을 바탕으로, 측정기기의 데이터를 기반으로한 스마트 그리드 모니터링 기술의 연구 개발이 더욱 촉진될 것으로 생각된다.

#### 4. 결론

본 논문은 PMU, WMU, Micro-PMU 등 스마트 그리드 모니터링 고도화를 위해 전력망에 도입되고 있는 측정기기를 소개하였다. 이 측정기기들은 기존 전력망 감시시스템에서 얻지 못했거나 수학적 모델을 통해 추정해 내던 전기량을 직접 측정하여 제공한다. 또한 GPS를 통해 데이터 간 시각을 동기화함으로써, 넓은 지역의 계통 운전 상황을 동시에 실시간으로 감시할 수 있게 되었다. 특히 측정기기들로부터 취득되는 실시간 측정

정보를 바탕으로 데이터 기반 계통 감시/해석 기술이 활발히 연구되고 있다. 이와 같은 기술들은 기존 전력망 감시시스템을 보완하고 대체함으로써 스마트 그리드 운영 고도화와 안정성 제고에 기여할 것으로 기대된다.

#### ACKNOWLEDGEMENT

이 논문은 2024년도 한국표준과학연구원의 지능형 전력망 표준체계 확립을 위한 국가최상위 측정 시스템 핵심 기술 개발 재원으로 지원을 받아 수행된 연구임(한국표준과학연구원-2024-GP2024-0005).

#### REFERENCES

- Aminifar, F., Fotuhi-Firuzabad, M., Safdarian, A., Davoudi, A., Shahidehpour, M., (2015), Synchrophasor measurement technology in power systems: Panorama and state-of-the-art, IEEE Access, 2, 1607-1628.
- Mohsenian-Rad, H., Xu, W., (2023), Synchro-waveforms: A window to the future of power systems data analytics, IEEE Power and Energy Magazine, 21(5), 68-77.
- Mohsenian-Rad, H., Stewart, E., Cortez, E., (2018), Distribution synchrophasors: Pairing big data with analytics to create actionable information, IEEE Power and Energy Magazine, 16(3), 26-34.
- IEEE, (2011), IEEE standard for synchrophasor measurements for power systems, IEEE Standard C37.118.1-2011 (Revision of IEEE Std C37.118-2005), 1-61. <https://home.agh.edu.pl/~turcza/pmu/C371181-2011.pdf>
- North American SynchroPhasor Initiative, (2015), Diagnosing equipment health and mis-operations with PMU data, (Report No. NASPI-2015-TR-009). <https://www.naspi.org/>
- Department of Energy, (2023), Big data synchrophasor analysis. <https://www.energy.gov/>
- Yang, Q., Bi, T., Wu, J., (2007), WAMS implementation in china and the challenges for bulk power system protection, Proceedings of the IEEE Power Engineering Society General Meeting, 1-6.
- Follum, J., Miller, L., Etingov, P., Kirkham, H., Riepnicks, A., Fan, X., Ellwein, E., (2021), Phasors or waveforms: Considerations for choosing measurements to match your application, (Report No. PNNL-31215), Pacific Northwest National Laboratory. [https://www.naspi.org/sites/default/files/reference\\_documents/pnnl\\_31215\\_follum\\_phasors\\_waveforms.pdf](https://www.naspi.org/sites/default/files/reference_documents/pnnl_31215_follum_phasors_waveforms.pdf)
- Power Sensors Ltd., Synchrophasors for distribution, microgrids: PQube 3 MicroPMU (MicroPMU Data Sheet Revision 1.3). [http://www.pqs.it/Download/MicroPMU\\_Data\\_Sheet\\_Rev1\\_3ITA.pdf](http://www.pqs.it/Download/MicroPMU_Data_Sheet_Rev1_3ITA.pdf)

10. Pandey, S., Srivastava, A. K., Amidan, B. G., (2020), A real time event detection, classification and localization using synchrophasor data, *IEEE Transactions on Power Systems*, 35(6), 4421-4431.
11. Kim, D. -I., Wang, L., Shin, Y. -J., (2020), Data driven method for event classification via regional segmentation of power systems, *IEEE Access*, 8, 48195-48204.
12. Dharmapala, K. D., Rajapakse A., Narendra K., Zhang Y., (2020), Machine learning based real-time monitoring of long-term voltage stability using voltage stability indices, *IEEE Access*, 8, 222544-222555.
13. Ning, J., Wang, J., Gao, W., Liu, C., (2010), A wavelet-based data compression technique for smart grid, *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2(1), 212-218.
14. Lee, G., Kim, D.-I., Kim, S.H., Shin, Y.-J., (2019), Multiscale PMU data compression via density-based WAMS clustering analysis, *Energies*, 12(4), 617.
15. Hao, Y., Wang, M., Chow, J. H., (2019), Modeless streaming synchrophasor data recovery in non-linear systems, *IEEE Transactions on Power System*, 35(2), 1166-1177.
16. Yu, J. J. Q., Hill, D. J., Li, V. O. K., Hou, Y., (2019), Synchrophasor recovery and prediction: A graph-based deep learning approach, *IEEE Transactions on Internet Things*, 6(5), 7348-7359.
17. Xu, W., Huang, Z., Xie, X., Li, C., (2022), Synchronized waveforms - A frontier of data-Based power system and apparatus monitoring, protection, and control, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 37(1), 3-17.
18. Bastos, A. F., Santoso, S., Freitas, W., Xu, W., (2019), Synchrowaveform measurement units and applications, *Proceedings of the IEEE Power Engineering Society General Meeting*, 1-5.
19. Dehghanpour, K., Wang, Z., Wang, J., Yuan, Y., Bu, F., (2019), A survey on state estimation techniques and challenges in smart distribution systems, *IEEE Transactions on Smart Grid*, 10(2), 2312-2322.
20. Shahsavari, A., Farajollahi, M., Stewart, E. M., Cortez, E., Mohsenian-Rad, H., (2019), Situational awareness in distribution grid using micro-PMU data: A machine learning approach, *IEEE Transactions on Smart Grid*, 10(6), 6167-6177.
21. Zhou, Y., Arghandeh, R., Spanos, C. J., (2018), Partial knowledge data-driven event detection for power distribution networks, *IEEE Transactions on Smart Grid*, 9(5), 5152-5162.
22. Aligholian, A., Shahsavari, A., Stewart, E. M., Cortez, E., Mohsenian-Rad, H., (2021), Unsupervised event detection, clustering, and use case exposition in micro-PMU measurements, *IEEE Transactions on Smart Grid*, 12(4), 3624-3636.
23. Biswas, S., Follum, J., Etingov, P., Fan, X., Yin, T., (2023), An open-source library of phasor measurement unit data capturing real bulk power systems behavior, *IEEE Access*, 11, 108852-108863.



### Gyu Lee

Gyu Lee received the B.S. and Ph.D. degrees in electrical and electronic engineering from Yonsei University, Seoul, South Korea. Since 2023, he has been with the Group for Quantum Electricity & Magnetism Metrology, Korea Research Institute of Standards and Science (KRISS), Daejeon, South Korea, as a senior research scientist. He is currently working toward development of measurement standards and precision measurement technology to meet emerging demands in the electromagnetism field.

E-mail: eegyul@kriss.re.kr