

<https://doi.org/10.7236/IIBC.2017.17.5.181>

IIBC 2017-5-25

라즈베리파이를 이용한 IEEE 802.15.4와 IEC 61850 간의 브리지

Bridge between IEEE 802.15.4 and IEC 61850 using Raspberry Pi

황성호*

Sung-Ho Hwang*

요약 IEC 61850은 전력 설비 자동화를 위한 표준안이다. 이더넷을 사용하는 IEC 61850을 사용하면, 소규모 배전 변전소인 경우 그 가치보다 자동화하는데 더 많은 비용이 소요될 수 있다. 따라서 소규모 배전 변전소 자동화에는 적은 비용과 간편한 설치가 요구된다. 본 논문에서는 저렴하고 설치가 간편한 IEEE 802.15.4를 사용하고, 기존의 IEC 61850 장비와 연결하기 위해 라즈베리파이를 이용한 IEC 61850과 IEEE 802.15.4간의 브리지를 구현하였다. IEEE 1588을 사용하여, SV, GOOSE와 MMS 같은 IEC 61850 트래픽 성능 평가를 수행하였다. IEC 61850 요구 사항과 성능 평가 결과를 분석하여, IEEE 802.15.4의 적용 범위를 결정하였다.

Abstract IEC 61850 is a standard for power utility automation. Using IEC 61850 that uses ethernet may consume more costs for the automation than its value in small distribution substations. Thus, less expense and installation cost are required for the automation of small distribution substations. This study used inexpensive and easy-to-install IEEE 802.15.4 and implemented a bridge between IEC 61850 and IEEE 802.15.4, using Raspberry Pi to connect the existing IEC 61850. Using IEEE 1588, IEC 61850 traffic performances were evaluated, such as SV, GOOSE and MMS. Analyzing IEC 61850 requirements and performance evaluation results, the scope of application of IEEE 802.15.4 was decided.

Key Words : IEEE 802.15.4, IEC 61850, Raspberry Pi, SV, GOOSE, MMS

1. 서론

전기 전력 설비들은 전력 전달의 신뢰성을 증가하기 위하여, 측정되고 예측된 데이터뿐만 아니라 자산의 상황과 상태 감시가 필요하다. 전력망에서 통신망과 시스템 분야의 주요 표준 중에 하나가 IEC 61850이다. 그러나 소규모 배전 발전소인 경우, 이더넷을 기반으로 하는

IEC 61850을 사용하면 소규모 배전 변전소 자체의 가치보다 자동화하는데 더 많은 비용이 소요될 수 있다. 소규모 배전 변전소 자동화에 적은 비용과 설치비가 요구된다.

IEEE 802.15.4는 저비용으로 전송할 수 있는 표준이다. 소규모 배전 변전소에서, IEC 61850과 IEEE 802.15.4를 연동하면 복잡한 구조와 값비싼 기반시설 없이 통신 서비스를 제공할 수 있다.

*정회원, 강원대학교 전자정보통신공학부
접수일자: 2017년 8월 29일, 수정완료: 2017년 9월 29일
게재확정일자: 2017년 10월 13일

Received: 29 August, 2017/ Revised: 29 September, 2017 /
Accepted: 13 October, 2017

*Corresponding Author: shhwang@kangwon.ac.kr
Division of Electronics, Communication & Information
Engineering, Kangwon National University, Korea

본 논문에서는 기존의 IEC 61850과 연동하기 위하여 IEC 61850과 IEEE 802.15.4간의 브리지를 구현하였다. 그리고 Wireshark과 IEEE 1588을 사용하여, IEC 61850 트래픽 유형에 따른 성능 분석을 수행하였다.

능 등급과 배전과 전송 같은 역할에 따라 다르다. IEC61850 메시지들은 그림 1과 같이 서로 다른 통신 스택에서 6가지 Type으로 분류된다.^[5]

II. 관련 연구

IEC 61850에서 소규모 배전 변전소인 경우에는 특별한 요구 사항들을 설정하지 않으므로, 소규모 배전 변전소에는 IEEE 802.15.4를 적용할 수 있다.^[1]

1. IEEE 802.15.4 프로토콜

IEEE 802.15.4는 물리계층과 MAC 계층으로 구성되어 있다. 물리계층은 상위 계층에서 보낸 전송 데이터를 무선 채널을 통해 전달한다. MAC 계층은 디바이스들 간의 신뢰성 있는 단일 홉(single hop) 통신을 제공한다. IEEE 802.15.4에서 사용하는 주파수 대역은 표 1과 같다.^[2] 본 논문에서는 주파수 대역 2.4GHz와 비트 레이트는 250kb/s를 사용한다.

표 1. IEEE 802.15.4 주파수 대역과 변조 파라미터^[2]
Table 1. IEEE 802.15.4 Frequency Bands and Modulation Parameters^[2]

Frequency Band (MHz)	Modulation	Bit Rate (kb/s)	Number of Radio Channels
868.0 - 868.6	BPSK	20	1
902 - 928	BPSK	40	10
2400 - 2483.5	O-QPSK	250	16

IEEE 802.15.4의 디바이스 간의 통신 방식은 CSMA/CA(Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance)를 이용하는 Beacon 모드와 Non-Beacon 모드이다. 두 모드 사이의 차이는, 디바이스들 간의 동기화된 통신 방식을 제공하는 Beacon 사용 유무이다. 두 방식 중에 데이터 전달 속도가 더 빠른 방식은 Non-Beacon 모드이다.^{[3][4]} 본 논문에서는 IEEE 802.15.4의 전달 모드는 Non-Beacon 모드를 사용한다.

2. IEC 61850

IEC 61850의 전송 시간 요구사항들은 메시지 유형, 성

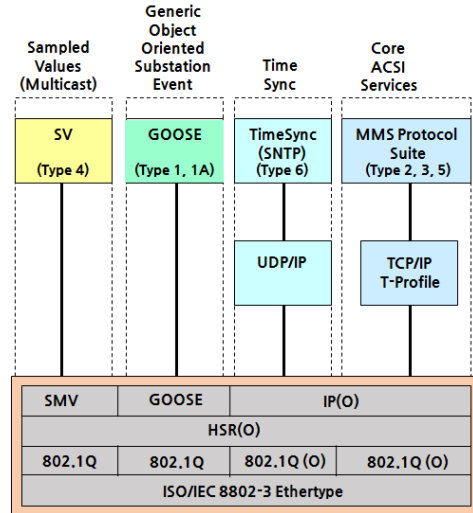


그림 1. 기능과 프로파일의 개요^[5]
Fig. 1. Overview of Functionality and Profiles^[5]

SV(Sampled Values)(Type 4)와 GOOSE(Generic Oriented Substation Event)(Type 1, 1A)는 시간에 엄격하다. 그러므로 SV와 GOOSE 메시지들은 Physical 계층과 MAC 계층에서 직접 Application 계층으로 전달된다. MMS(Manufacturing Message Specification)는 TCP/IP 스택을 사용하여, 중간 속도 메시지(Type 2), 저속 메시지(Type 3)와 파일 전달(Type 5) 기능을 수행한다. 명령 메시지와 접근 제어 기능을 가진 파일 전달(Type 6)는 Type 3에 패스워드와 검증 절차를 추가한 것이다. 그리고 시간 동기화를 위해 IEEE 1588을 사용한다. 서로 다른 메시지 유형에 따른 성능 등급은 표 2와 같다.^[6]

IEC 61850에서 요구하는 성능 요구사항들 중에서 IEEE 802.15.4가 수용할 수 있는 범위에 대한 연구가 아직까지 명확히 이루어지고 있지 않다. D.Nowak^[7]는 컴퓨터 시뮬레이션인 OMNet++를 사용하여 실험하였다. SV나 GOOSE 프레임과 같은 IEC 61850의 프레임 언급 없이 IEEE 802.15.4의 실험만 수행하였다. IEEE 802.15.4의 Beacon 모드를 사용하여 Non-Beacon 모드에 비해 상대적으로 많은 전송 지연 결과를 도출하였다. Hamdy Saleh Khalil Elgohary^[8]은 IEC 61850 메시지 유형과 비

교 없이, Deactivation 기간을 변화시켜 가면서 실험을 수행하였다. 실시간 데이터 전송이 요구되는 변전소 환경 하에서 Deactivation 기간을 두는 것은 바람직하지 않으며, IEC 61850 요구 사항을 구체적으로 수행하지 않았다.

표 2. IEC 61850 메시지 유형의 성능 요구사항^[6]
 Table 2. Performance Requirements of IEC 61850 Messages Types^[6]

Message Type		Performance Class	Transfer Time (ms)
Type 1 - Fast Messages	A "Trip"	P1	≤3
	B "Others"	P2	≤10
Type 2 - Medium Speed Messages (Automatics)		P3	≤20
Type 3 - Low Speed Messages (Operator)		P4	≤100
Type 4 - Raw Data Messages (Samples)		P5	≤500
		P6	≤1000
Type 5 - File Transfer Functions		P7	≤3
		P8	≤10
Type 6 - Command Messages and File Transfer with Access Control		P9	≤10000
		P10	≤500
		P11	≤1000
		P12	≤10000

III. 시나리오

IEEE 802.15.4의 MAC 프레임 구조는 무선 미디어의 특성을 고려하여 최소한의 구성요소로 단순하게 설계되었다. MAC 프레임은 그림 2와 같이 MAC 헤더(Header), MAC 페이로드(Payload)와 MAC 푸터(Footer)로 구성된다.^[2]

MAC 헤더에서 프레임 제어 필드(Frame Control Field)는 프레임 타입, 보안과 주소 필드의 포맷과 내용을 지정하고, 수신측의 확인(Acknowledgement) 메시지가 필요한지를 나타낸다. 주소 필드(Addressing Field)는 출발지와 목적지의 PAN 식별자와 주소를 포함한다.

MAC 페이로드는 송수신 중인 트랜잭션 타입의 정보를 포함하고, 상위 프로토콜 계층의 사용을 위한 필드들을 포함한다.

MAC 푸터는 에러 검출을 위해, 순환 잉여 검사(CRC: Cyclic Redundancy Check)를 이용하여 프레임 검사 시퀀스(FCS: Frame Check Sequence)를 수행한다.

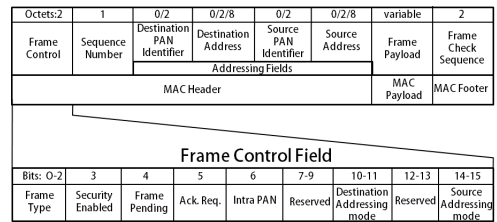


그림 2. IEEE 802.15.4 프레임 구조
 Fig. 2. IEEE 802.15.4 Frame Structure

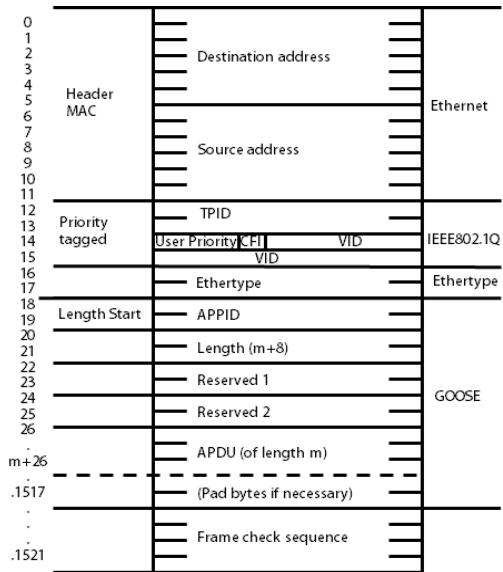


그림 3. ISO/IEC 8802-3 프레임 포맷
 Fig. 3. ISO/IEC 8802-3 Frame Format

IEC61850의 SV와 GOOSE 프레임은 그림 3과 같다. 목적지 주소(Destination Address)는 멀티캐스트(Multicast) 주소로서, SV에서는 01-0C-CD-04-00-00부터 01-0C-CD-04-01-FF까지 사용하고, GOOSE에서는 01-0C-CD-01-00-00부터 01-0C-CD-01-01-FF까지 사용한다. 출발지 주소(Source Address)는 보내는 장비의 MAC 주소이다. TPID는 802.1Q를 위해 사용된 이더넷 유형을 나타내고, TCI는 사용자 우선순위와 가상랜(VLAN) 식별자를 설정한다. SV일 경우, Ethernet Type은 88-BA이고 APPID는 01이다. GOOSE일 경우, Ethernet Type은 88-B8이고 APPID는 00이다. APPID는 응용 식별자이고, Length는 APPID부터 시작하여 APDU까지의 길이를 나타내며, 여기서 m은 APDU의 길이를 나타낸다. Reserved는 예약되어 있고, APDU는 응용

PDU로서, SV와 GOOSE에서 필요한 정보를 이 필드를 통해 보낸다. 프레임 검사 시퀀스(FCS: Frame Check Sequence)를 통해 에러 검출을 수행한다.

MMS	
Association Control Service Element, ACSE, ISO 8649/8650, N2526, N2327	Application
Abstract Syntax Notation, ISO 8822/8823, 8824/8825	Presentation
ISO 8326/8327	Session
RFC 1006	Transport
TCP	Network
IP	Link
"Ethernet"	MAC
ISO 8802-3	Physical
(Ethernet)	

그림 4. MMS 스택
Fig. 4. MMS Stack

IEC 61850의 MMS는 그림 4와 같이 물리(Physical) 계층부터 전송(Transport) 계층까지 기존의 TCP/IP 프로토콜 스택 위에서 구현된다. Session 계층에서의 MMS는 TPDU(Transport Protocol Data Unit)로 불리는 정보의 단위로 교환한다. RFC 1006은 모든 TPDU들이 TPKT(Transport Packet)라고 단위로 캡슐화가 된다. OSI COTP(Connection Oriented Transport Protocol)는 TPKT를 사용한다. Presentation 계층에서는 ASN.1 표기법과 BER을 사용한다. ASN.1은 메시지와 응용 간의 데이터 구조와 값들을 정의하는 표기법이다. BER은 ASN.1 표기법을 따르고, 유형 식별자, 길이, 실제 데이터 구성요소로 표현된다. Application 계층은 ACSE 프로토콜을 사용하여 연결과 해제를 수행한다. MMS 클라이언트와 MMS 서버 사이에서 지역 변수를 읽거나 쓰는 것과 같은 동작을 수행한다. TimeSync 메시지는 네트워크 상에서 시간 동기화를 위해 필요 하다. 본 논문에서는 IEEE 1588 PTP(Precision Time Protocol)을 사용하였다.

표 2의 IEC 61850 메시지 유형의 성능 요구사항 분석을 위해 트래픽 형태에 따른 지연(Delay)을 측정하였다. 그림 1에서 SV와 GOOSE는 MAC 계층에서 직접 Application 계층에 전달된다. SV 주기적으로 전송하며, GOOSE 이벤트 기반(Event-Driven)으로 동작한다. SV와 GOOSE는 단방향으로 전송한다. MMS는 이벤트 기반(Event-Driven)으로 동작하며 TCP/IP를 사용하고, 클라이언트/서버 환경하에서 동작한다.

SV 메시지는 MAC 계층을 사용하여, 센서로부터 샘플링한 전류와 전압 데이터를 단방향으로 그림 5와 같이 전송한다.

플링한 전류와 전압 데이터를 단방향으로 그림 5와 같이 전송한다.

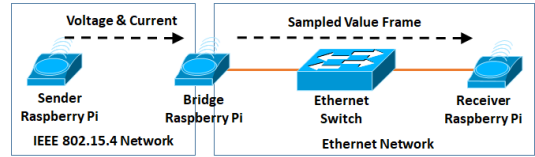


그림 5. SV 전송 시나리오
Fig. 5. SV Transfer Scenario

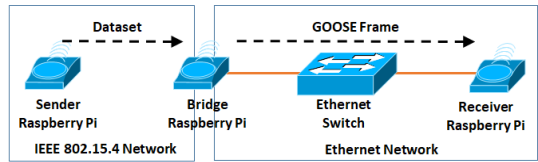


그림 6. GOOSE 전송 시나리오
Fig. 6. GOOSE Transfer Scenario

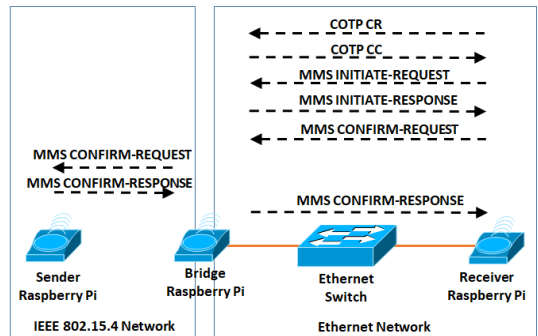


그림 7. MMS 전송 시나리오
Fig. 7. MMS Transfer Scenario

GOOSE 메시지는 MAC 계층을 사용하여, IEC 61850 장비들 간의 제어를 위한 Dataset을 단방향으로 그림 6과 같이 전송한다.

MMS 메시지는 TCP/IP 프로토콜 스택을 사용하고 클라이언트/서버 환경 하에서 동작한다. 라즈베리파이 Receiver에서 정보를 요청하면 그림 7과 같은 절차를 거쳐서 라즈베리파이 Sender에서 원하는 정보를 전달한다. 여기서 지연은, 초기 설정이 끝난 후에, Receiver에서 MMS CONFIRM-REQUEST를 보내고 Sender에서 응답한 MMS CONFIRM-RESPONSE를 수신하기까지의 지연을 의미한다.

IV. 실험 및 결과

라즈베리파이를 이용한 IEEE 802.15.4와 IEC 61850간의 브리지 실험을 위한 실험실 구성을 그림 8과 같다. 라즈베리파이 III를 사용하였고, IEEE 802.15.4 모듈은 한백전자의 Zigbex를 사용하였다. 네트워크 스위치는 시스코사의 Catalyst 2950을 사용하였다. 성능 분석을 위해 Qotom사의 miniPC를 사용하였고, 운영체제는 Ubuntu를 사용하였으며, 프로토콜 분석은 Wireshark을 사용하였다.



그림 8. 실험실 하드웨어 구성
 Fig. 8. The Hardware Configuration in the Lab.

SV 전송은 그림 5와 같이 수행하였다. SV 프레임 1000개를 전송한 결과는 그림 9와 같다. SV의 평균 지연은 17.6 msec이고, 최대 지연은 23.6 msec이다. SV는 표 2의 Type 4의 “Raw Data Messages”에 해당되는데, 성능 등급(Performance Class) P7과 P8의 기준을 SV의 평균 지연과 최대 지연 모두 충족시키지 못한다.

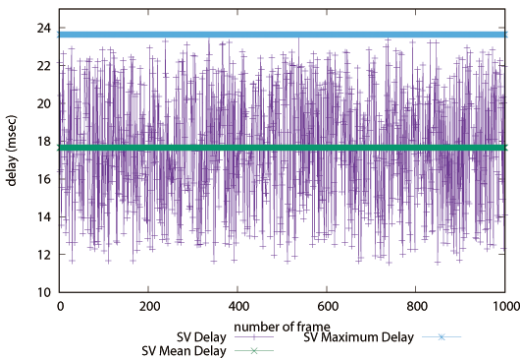


그림 9. SV 전송 지연
 Fig. 9. SV Transfer Delay

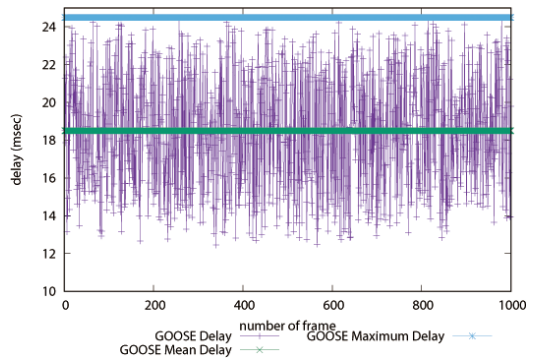


그림 10. GOOSE 전송 지연
 Fig. 10. GOOSE Transfer Delay

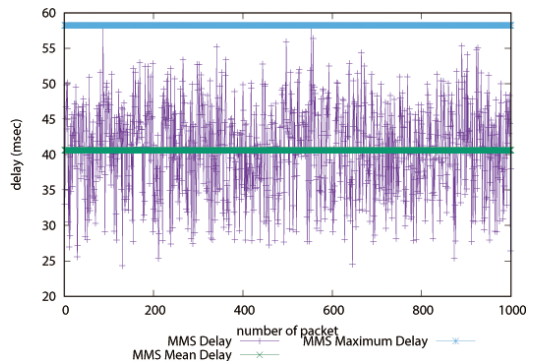


그림 11. MMS 전송 지연
 Fig. 11. MMS Transfer Delay

GOOSE 전송을 그림 6과 같이 수행하였다. GOOSE 프레임 1000개 전송하여 전송 지연을 측정한 결과는 그림 10과 같다. GOOSE의 평균 지연 시간은 18.5 msec이고, 최대 지연 시간은 24.5 msec이다. GOOSE는 표 2의 Type 1, 1A인 “Fast Messages”에 해당되는데, 성능 등급(Performance Class) P1과 P2의 기준을 GOOSE의 평균 지연과 최대 지연 모두 충족시키지 못한다.

따라서 IEEE 802.15.4를 이용한 SV와 GOOSE 트랙픽의 전송은 IEC 61850 기준을 만족시키지 못한다.

MMS 전송을 그림 7과 같이 수행하였다. MMS 패킷을 1000개 전송하여 전송 지연을 측정한 결과는 그림 11과 같다. MMS의 평균 지연 시간은 40.6 msec이고, 최대 지연 시간은 58.2 msec이다. MMS는 표 2의 Type 2, 3, 5에 해당이 되는데 성능 등급(Performance Class) P4, P5, P6, P9의 기준을 MMS의 평균 지연과 최대 지연 모두 충족시키고 있다.

V. 결론

본 논문에서는 IEEE 802.15.4와 IEC 61850 브리지를 라즈베리파이로 구성하고, 실제 장비를 통해 성능 분석을 수행하였다.

IEC 61850의 SV, GOOSE와 MMS 트래픽들을 라즈베리파이와 IEEE 802.15.4 모듈을 사용하여 전송하였고, 각 트래픽에 따른 평균 지연과 최대 지연을 구하였다. 성능 분석 결과, 본 논문에서의 IEEE 802.15.4를 사용한 IEC 61850 트래픽 전송은, SV와 GOOSE 같이 시간에 엄격한 트래픽 전송 요구조건을 만족하지 못했다. 주요 원인은 IEEE 802.15.4의 Backoff 지연 때문이다. 그러나 저속, 중속, 명령, 파일전달 같이 시간에 민감하지 않은 MMS 트래픽 전송 요구 조건은 만족하였다.

본 논문에서의 라즈베리파이를 이용한 IEEE 802.15.4와 IEC 61850 간의 브리지는, 소규모 배전 변전소에서 시간에 민감하지 않은 디바이스들을 MMS 메시지를 사용하여 모니터링 할 수 있다.

IEEE 802.15.4 프로토콜을 그대로 사용하면 SV와 GOOSE 트래픽 전송 기준을 만족시키지 못한다. 향후 연구방향은 SV와 GOOSE 트래픽 기준을 만족시키기 위한, 개선된 IEEE 802.15.4 Backoff 알고리즘을 개발 할 계획이다.

References

- [1] IEC Std 61850-1, Communication networks and systems in substations, Part 1: Introduction and overview, 1st ed. 2003.
- [2] IEEE 802.15.4, Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs), 2003.
- [3] Sung-Ho Hwang, "Improved Unslotted IEEE 802.15.4 Algorithm for HAN in Smart Grids", Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, Vol. 15, No. 3, pp.1711-1717,

2014. 3.

DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2014.15.3.1711>

- [4] Sung-Ho Hwang, "GOOSE Traffic Generator Using Network Emulation", The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication (IIBC), Vol. 16, No. 1, pp.209-214, 2016. 2.
DOI: <http://dx.doi.org/10.7236/JIIBC.2016.16.1.209>
- [5] IEC Std 61850-8-1, Communication networks and systems for power utility automation, Part 8-1: Specific Communication Service Mapping (SCSM) - Mapping to MMS (ISO 9506-1 and ISO 9506-2) and to ISO/IEC 8802-3, 2011.
- [6] IEC Std 61850-5, Communication networks and systems for power utility automation, Part 5: Communication requirements for functions and device models, 2013.
- [7] D.Nowak, et al 2, "Integration of ZigBee and IEC 61850 networks for a substation automation system", 4th IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe(ISGT Europe), 2013. 10.
- [8] Hamdy Saleh Khalil Elgohary, et al 3, "D1 substation automation based on IEC61850 and Zigbee", International Conference on Engineering and Technology (ICET), pp. 928-931, 2012. 10.
DOI : <https://doi.org/10.1109/ICEngTechnol.2012.6396168>

저자 소개

황 성 호(정회원)



- 1991년 2월 : 성균관대학교 전자공학과 공학사
- 1993년 2월 : 성균관대학교 대학원 전자공학과 공학석사
- 1996년 8월 : 성균관대학교 대학원 전자공학과 공학박사
- 1997년 9월~현재 : 강원대학교 공학대학 전자정보통신공학부 정보통신공학전공 교수

<주관심분야 : 컴퓨터 네트워크, 스마트 그리드, WSN>

※ 2016년도 강원대학교 대학회계 학술연구조성비로 연구하였음(관리번호-620160053)
(This study was supported by 2016 Research Grant from Kangwon National University(No. 620160053))