The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication (IIBC)
Vol. 17, No. 1, pp.115-121, Feb. 28, 2017. pISSN 2289-0238, eISSN 2289-0246

https://doi.org/10.7236/JIIBC.2017.17.1.115
JIIBC 2017-1-15

D1 소규모 배전 변전소를 위한 IEEE 802.15.4 성능 분석

Performance Analysis of IEEE 802.15.4 for D1 Small Distribution Substation

황성호*, 강은영**

Sung-Ho Hwang*, Eun-Young Kang**

요 약 스마트 그리드 응용에서 ICT(Information and Communication Technologies) 활용은 전력망을 효율성 있고 신뢰성 있게 구축할 수 있다. 전력 시설 내에서 필요한 정보를 교환하는 스마트 그리드 표준으로 IEC 61850이 채택되었다. 그러나 이더넷을 사용하는 IEC 61850과 같은 기술을 소규모 배전 변전소 자동화에 직접 적용하면, 소규모 배전 변전소 그 자체의 가치보다 더 많은 비용이 소요될 수 있다. IEEE 802.15.4 기술은 적은 설치비용과 설치의 용이성으로 인해 전력 설비 자동화 분야에서 관심을 받고 있다. 다소 덜 엄격한 성능이 요구되는 D1 소규모 배전 변전소에 IEEE 802.15.4를 이용하는 연구들이 진행되고 있다. 본 논문에서는 소규모 배전 변전소에 IEEE 802.15.4를 적용하고, 실제 장비들을 이용하여 성능분석을 수행 하였다. 성능 분석 결과를 IEC 61850 메시지 유형과 비교 분석하여 IEEE 802.15.4 적용 범위를 결정하였다.

Abstract Times New RomanThe utilization of Information and Communication Technologies (ICT) in the smart grid application can construct efficient and reliable electrical grid. IEC 61850 was adopted as the standard for smart grid exchanging the information required in an electric power utility. However, applying technologies like IEC 61850 using Ethernet to the automation of small distribution substation directly may cost more than the value of the small distribution substation itself. IEEE 802.15.4 technology attracts attention in the field of power utility automation because of low installation cost and ease of installation. Studies are conducted, which use IEEE 802.15.4 in less strict D1 small distribution substation. This study applied IEEE 802.15.4 to the small distribution substation and conducted performance evaluation using the actual equipment. This study determined the scope of application of IEEE 802.15.4 by conducting a comparative analysis of the message type in IEC 61850.

Key Words : Smart Grid, Distribution Substation Automation, IEC 61850, IEEE 802.15.4

Ⅰ. 서 론

배전 변전소 자동화에서 ICT(Information and Communication Technology) 기술은 제어, 모니터링과 보호 응용을 달성하는데 중요한 역할을 담당한다. IEC 61850은 ICT를 이용하여 변전소내의 IED(Intelligent Electronic Device)들 사이에서 공통의 관리 정보를 교환한다. IEC 61850은 다른 제조회사로부터 공급된 변전소

*정회원, 강원대학교 전자정보통신공학부
**정회원, 동양미래대학교 컴퓨터소프트웨어공학과(교신저자)
접수일자: 2017년 1월 2일, 수정완료: 2017년 2월 2일
게재확정일자: 2017년 2월 3일

Received: 2 January, 2017 / Revised: 2 February, 2017
Accepted: 3 February, 2017
**Corresponding Author: eykang@dongyang.ac.kr
School of Computer Engineering, Dongyang Mirae University, Korea

자동화 장치들 간의 통합을 위해 이더넷(Ethernet)을 사용한다.

IEEE 802.15.4 기술은 적은 설치 비용과 설치의 용이성으로 인해 소규모 배전 변전소 응용을 구현하는데 적합하다. 특히 다소 덜 엄격한 성능이 요구되고, 전력 분배 레벨에서 투자가 제한된 경우 더 유리한다. 소규모 배전 변전소 보호, 제어와 모니터링에 연관된 응용에 IEEE 802.15.4 기술을 적용하는 연구가 수행되어 왔다.[1][2]

그러나 소규모 배전 배전소에 IEEE 802.15.4 기술을 적용하였을 경우 나타나는 트래픽들의 특성에 관한 연구는 미미한 실정이다. IEC 61850-5에서 명시된 시간 지연 요구사항에 대해 정확한 IEEE 802.15.4의 성능 분석 연구 결과는 없다. 따라서 본 논문에서는 IEC 61850에서의 메시지 유형과 IEEE 802.15.4를 적용하였을 때, 수용할 수 있는 메시지 유형에 관한 실험과 결과 분석을 수행하고자 한다. 이러한 실험을 통해 IEEE 802.15.4 기술이 경제적으로 뿐만 아니라 기술적으로도 소규모 배전 변전소 응용에 적합함을 확인 한다.

II. 관련 연구

IEC 61850과 IEEE 802.15.4의 표준과, 소규모 배전 배전소에 IEEE 802.15.4 기술을 적용한 연구를 살펴본다.

1. 변전소 자동화를 위한 IEC 61850

IEC 61850 표준은 변전소 내의 통신을 위한 기능적인 계층 구조를 그림 1과 같이 제시하였다. 변전소 기능들은 스테이션 레벨, 베이 레벨과 프로세스 레벨로 분류하였다. 스테이션 레벨 장치들은 데이터베이스 서버, 원격 통신을 위한 게이트웨이와 함께 HMI(Human Machine Interface)를 구성한다. 베이 레벨 장치들은 제어, 보호, 모니터링 설비를 포함한다. 프로세스 레벨 장치들은 원격 I/O 장치나 지능형 센서 및 엑추에이터와 통신한다.

IEC 61850은 각 계층 레벨 사이의 인터페이스를 명시하였다. 인터페이스(IF)는 그림 1에서 원안에 있는 숫자들로 표현되며, 의미는 다음과 같다.[3]

IF1: 베이 레벨과 스테이션 레벨 사이의 보호-데이터 교환

IF2: 베이 레벨과 원격 보호 장치 사이의 보호-데이터 교환

IF3: 베이 레벨 내 데이터 교환

IF4: 프로세스 레벨과 베이 레벨 사이의 CT(Current Transformer) 및 VT(Voltage Transformer) 순시 데이터(특히 샘플) 교환

IF5: 프로세스 레벨과 베이 레벨 사이의 제어 데이터 교환

IF6: 베이 레벨과 스테이션 레벨 사이의 제어 데이터 교환

IF7: 변전소(레벨)와 원격 기술자 작업장 사이의 데이터 교환

IF8: 상호 연동과 같은 고속 기능을 위한 특히 베이 사이의 직접 데이터 교환

IF9: 스테이션 레벨 내의 데이터 교환

IF10: 변전소(장치)와 원격 제어 센터 사이의 제어-데이터 교환

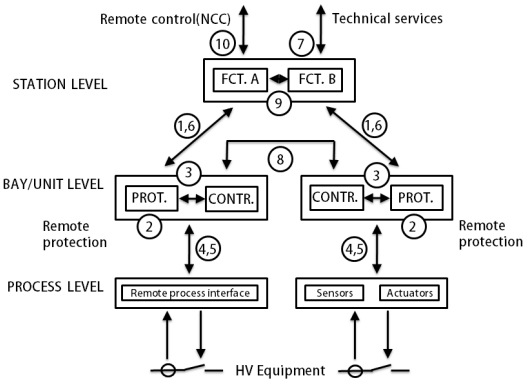

그림 1. 변전소 자동화 시스템 내의 레벨과 인터페이스
Fig. 1. Levels and logical interfaces in substation automation systems

2. IEEE 802.15.4 무선 센서 네트워크

IEEE 802.15.4 무선 센서 네트워크는 저비용, 저전력을 목표로 하는 널리 사용되는 무선 통신 표준이다. 이 IEEE 802.15.4는 소비자 전자제품, 가정과 빌딩 자동화, 스마트 계량, 산업 제어, PC 주변장치와 의료 응용에 널리 사용되고 있다.

IEEE 802.15.4는 물리계층과 MAC(Medium Access Layer)계층으로 나뉜다. 물리계층은 868MHz, 915MHz와 2.4GHz 3개의 주파수 대역으로 나뉘는데, 본 논문에서는 250kbps의 전송속도의 16개의 채널을 제공하는 2.4GHz 주파수 대역을 사용한다.

IEEE 802.15.4 MAC 계층은 CSMA/CA(Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance) 방식으로 동작한다. CSMA/CA 방식은 Slotted와 Unslotted 알고리즘이 있는데, 본 논문에서 동작속도가 더 빠른 Unslotted 알고리즘을 사용한다.

Ricardo André Pinto Faria[1]는 전류 또는 전압에 대한 샘플링 속도(Sampling Rate)에 관련된 언급이 없이 결과를 도출하였다. 본 논문에서는 IEC 61850에서 제안한 보호를 위한 샘플링 속도에 따라 샘플링을 수행하였다.

Hamdy Saleh Khalil Elgohary[2]는 실험 결과를 IEC 61850 메시지 파라미터와 비교 분석을 정확히 하지 않았다. Deactivation period 변화에 따라 실험을 수행하였지만, 실제 변전소에서 Zigbee 사용할 때 배터리가 아닌 상전을 사용할 경우 Deactivation을 할 필요가 없다. IEEE 802.15.4에서 Sleep 모드(Deactivation)를 사용하는 것은 실시간이 요구되는 변전소 자동화에는 적합하지가 않다.

Ⅲ. 유형 D1 소규모 배전 변전소

변전소 내의 통신 네트워크에 대한 성능 요구사항들은 변전소 크기와 전력 시스템내의 중요성에 따라 좌우된다. 변전소는 크게 배전 변전소와 송전 변전소로 나눌 수 있다. D1 소규모 배전 변전소(Small Distribution Substation)는 5개 보다 작은 구성 요소를 가진다. 전형적인 예가 4개의 피더(Feeder)와 하나의 연결차단기로 구성되며, 변성기(Transformer) 없는 변전소인 스위칭 스테이션(Switching Station)이다.[4]

D1 소규모 배전 변전소의 구성 예는 그림 2와 같다. IEC 61850은 송전 배전소와 배전 변전소의 기능과 구성 요소의 수에 따라 다음과 같이 변전소 유형을 나눌 수 있다. 문자 D는 배전 변전소를 나타내며, 첫 번째 숫자는 변전소의 크기(숫자가 증가함에 따라 소형, 중형, 대형으로 크기가 커짐)를 나타낸다. 두 번째 숫자는 변형(Variant)을 나타낸다.

D1 변전소는 간단한 과전류 보호, 요약된 알람, 베이 레벨 HMI와 제한된 제어 기능을 가진다. 예를 들어 회로차단기(Circuit Breaker) 제어이고, 각각의 피더로부터의 단상 전류 값을 계량을 한다. D1 변전소 자동화는 원격제어 게이트웨이(Remote Control Gateway)에 의해 제한된다. D1 변전소의 인터페이스는 그림 1의 IF3과 IF6를 기본으로 사용하고, IF4와 IF5를 선택적으로 사용한다. 제한된 변전소 자동화 시스템은 주로 원격 제어 게이트웨이에 의해 구성된다.

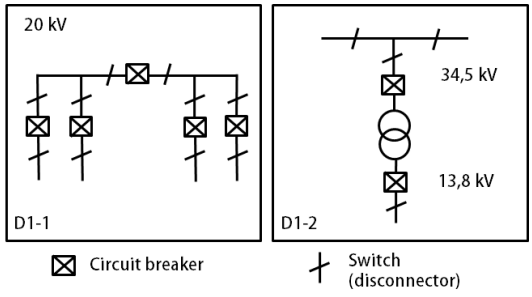

그림 2. 유형 D1을 위한 전형적인 단선도 예
Fig. 2. Examples of typical single line diagram for type D1

표 1. IEC 61850 메시지 유형에 따른 요구사항
Table 1. Requirements for Different Types of the IEC 61850 Messages

Message Type		Transmission Time		Typical for Interfaces in Fig 1.
		P1	P2/P3	
1A	Fast Messages (Trip/Block)	< 10ms	< 3ms	IF3, IF5, IF8
1B	Fast Messages (Others)	< 100ms	< 20ms	
2	Medium Speed	< 100ms	< 100ms	IF3, IF8, IF9
3	Low Speed	< 500ms	< 500ms	IF1, IF3, IF4, IF5, IF6, IF7, IF8, IF9
4	Raw Data	< 10ms	< 3ms	IF4, IF8
5	File Transfer	Not Request > 1000ms		IF1, IF3, IF4, IF6, IF7

일반적인 IEC 61850 메시지 유형(Message Type)에 따른 요구사항은 표 1과 같다. 여기서 P1은 배전 베이(Distribution Bay), P2는 송전 베이(Transmission Bay), P3는 최고 성능의 송전 베이(Transmission Bay)를 의미한다.

D1 소규모 배전 변전소는 베이 장치와 원격제어 인터페이스를 연결하기 위한 매우 간단한 통신을 요구한다. 베이와 베이 간의 통신이 필요 없고, 표 1의 "Fast Messages"도 필요하지 않다.[4]

IEC 61850은 다음과 같이 메시지 유형을을 명시한다. Raw 데이터인 SV(Sampled Value)(메시지 유형 4)와 GOOSE/GSE(Generic Object Oriented Substation

Event/Generic Substation Event)(메시지 유형 1) 메시지들은 시간에 엄격한 응용들이므로, 두 번째 계층인 이더넷 링크 계층에 직접 매핑 된다. 중속과 저속의 메시지들은 메시지 유형 2, 3, 5이다.

Ⅳ. 실험 및 결과

IEC 61850 네트워크와 IEEE 802.15.4 네트워크 연동을 위하여 그림 3과 같다. 그림 1의 프로세스 레벨은 그림 3의 IEEE 802.15.4 네트워크에서 수행하고, 그림 1의 베이 레벨과 스테이션 레벨은 그림 3의 IEC 61850 네트워크에서 담당한다.

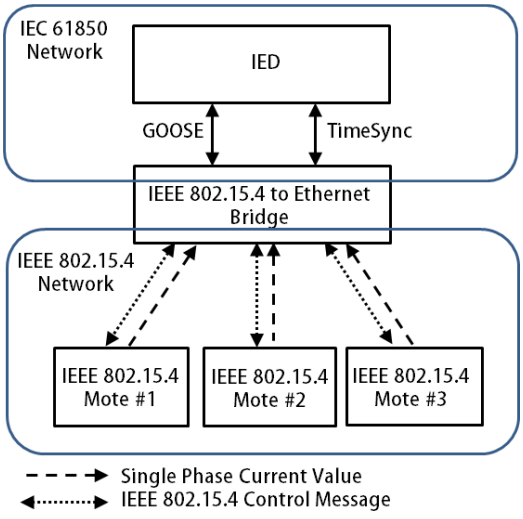

그림 3. 유형 D1을 위한 IEEE 802.15.4와 IEC 61850
Fig. 3. IEEE 802.15.4 and IEC 61850 for type D1

IEEE 802.15.4 모트에서는 IEC 61850의 배전 변전소 보호를 위해 초당 480번의 샘플링 속도로 단상 전류 값을 전송한다. IEEE 802.15.4 to Etherent Bridge는 IEEE 802.15.4 모트로부터 단상 전류 값을 수신 한다. 그리고 베이 레벨에서 GOOSE 트래픽을 발생시킨다.[5][6][7]

IEC 61850에서 전송 시간의 정의는 그림 4와 같다. 전송 시간은 송신측에서 데이터를 송신측의 전송 스택에 올려놓는 순간부터 시작하여, 수신측에서 수신 스택에서의 데이터를 추출하는 순간까지이다.

IEC 61850의 성능 요구사항을 만족하기 위해서는 전송 시간이 허용된 시간 지연보다 같거나 적어야 한다.

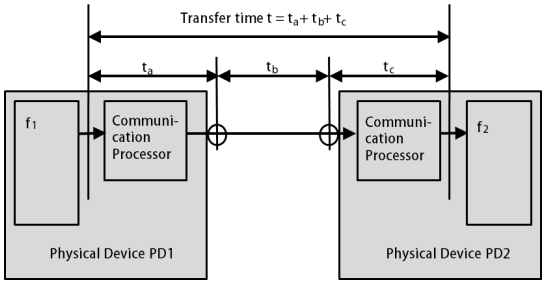

그림 4. 전송 시간의 정의
Fig. 4. Definition of transfer time

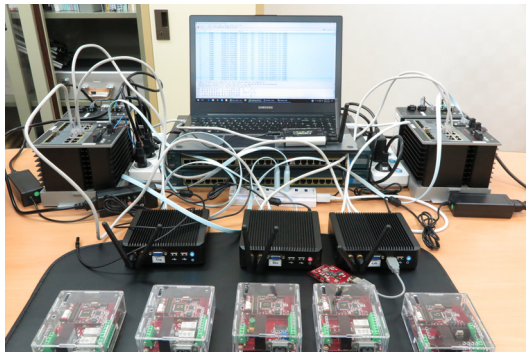

그림 5. 실험실 하드웨어 구성
Fig. 5. The Hardware Configuration in the Lab.

100Mbps 네트워크 스위치는 시스코사의 Catalyst 2950을 사용하였고, 1Gbps 네트워크 스위치는 시스코사의 IE 4000을 사용하였다. IEEE 802.15.4 장비는 한백전자의 Zigbex를 사용하였고, 운영체제는 TinyOS를 사용하였다. IED 장비역할은 Qotom사의 miniPC를 사용하였고, 운영체제는 Ubuntu를 사용하였다. 프로토콜 분석 도구는 Wireshark을 사용하였다.

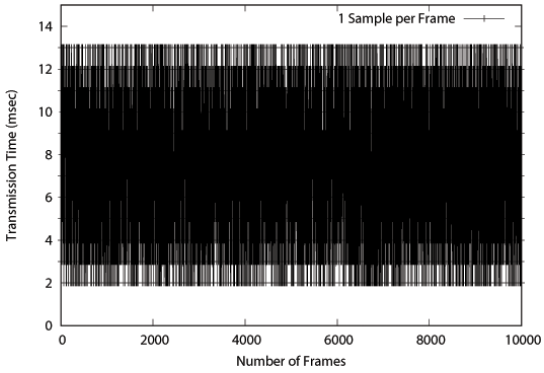

그림 6. 프레임 당 1 샘플을 전송하는 IEEE 802.15.4 전송 시간
Fig. 6. IEEE 802.15.4 Transmission Time of 1 sample per Frame

IEEE 802.15.4 모트에서 단상 전류 샘플 값들을 한 개씩 전달할 때 전송시간은 그림 6과 같다. 평균 전송시간은 7 msec이고, 최대 전송시간은 13 msec이다. IEC 61850-5에서 보호(Protection)를 위해서는 초당 480번의 샘플링을 하여 전달하여야 한다. 그러나 그림 6의 결과에서 최대 전송 지연 시간이 13 msec이므로 송신할 수 있는 최대 프레임 수는 초당 76.9 샘플들 밖에 되지 않는다. 따라서 IEEE 802.15.4에서는 샘플들을 초당 480 번을 전송할 수 없다.

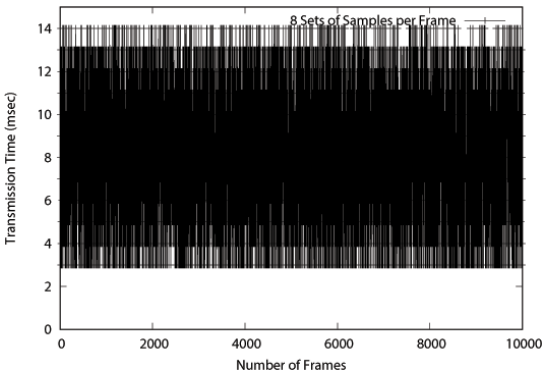

그림 7. 프레임 당 8 샘플을 전송하는 IEEE 802.15.4 전송 시간
Fig. 7. IEEE 802.15.4 Transmission Time of 8 sets of samples per Frame

IEC 61850-9-2에서는 샘플 값들을 ASDU 필드에 8개의 샘플들을 모아서 한꺼번에 전송할 수 있다. IEC 61850-9-2 LE에서는 싸이클 당 80번 샘플링 할 때는 샘플 한 개씩을 보내고, 싸이클 당 256 샘플링을 할 경우에는 8개의 샘플들을 모아서 한꺼번에 전송한다. 따라서 본 논문에서는 8개의 샘플들을 모아서 한 번에 전송하기로 한다. 480 샘플들을 8개씩 모아서 전송하면, 초당 60번 전송하면 된다. 프레임 당 8 샘플들을 모아서 전송한 결과는 그림 7과 같다.

그림 3의 IEEE 802.15.4 Control Message는 표 1의 메시지 유형 2, 3, 5에 해당된다. 그림 7에서는 평균 전송시간은 8 msec 이고, 최대 전송시간은 14 msec이다. IEEE 802.15.4 Control Message의 평균 전송시간과 최대 전송시간 모두 메시지 유형 2, 3, 5의 전송시간을 충족한다.

그림 3의 Single Phase Current Value들은 표 1의 메시지 유형 4에 해당이 된다. P1의 경우 10 msec 이하의 전송 시간을 요구한다. 평균 전송시간은 만족하지만, 최대 전송 시간은 4 msec 초과된다. 그러나 유형 D1 소규모 배전 변전소의 경우 표 1의 메시지 유형 1에 해당되는 "Fast Message"들은 필요 없다.[3] 따라서 일반적인 변전소가 아닌 유형 D1 소규모 배전 변전소에서, 3 msec에서부터 100 msec에 해당되는 "Fast Message" 전송 속도를 엄격히 적용하지 않으면, 단상 전류 값들을 전송하는데 사용이 가능하다고 판단된다. "Fast Message" 전송속도를 꼭 적용해야 한다면, IEEE 802.15.4 프로토콜을 변형 및 개선하는 연구가 필요하다.

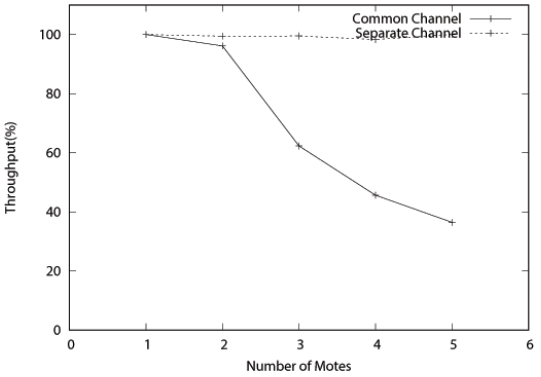

그림 8. 공통된 채널과 분리된 채널의 IEEE 802.15.4 전송 시간
Fig. 8. IEEE 802.15.4 Transmission Time of Common Channel and Separate Channel

그림 7의 결과에서 8개의 샘플들을 모아서 전송할 경우, IEEE 802.15.4의 최대 전송시간이 14 msec이므로 초당 최대 71.4번 전송이 가능하다. IEEE 802.15.4 모트 수가 증가할 경우, 모트들이 동일한 채널(Common Channel)을 사용하는 경우와 모트들이 서로 다른 채널(Separate Channel)을 사용하여 전송하는 경우로 실험하였다. 실험결과는 그림 8과 같고, 공통 채널을 사용할 경우, 모트 수가 증가함에 따라 수율(Throughput)이 많이 감소하는 것을 알 수 있다. 그리고 다른 채널을 사용할 경우 모트 수 증가에 영향을 받지 않는 것을 알 수 있다. 따라서 IEEE 802.15.4에서는 모트들이 서로 다른 채널을 사용하여야만 한다.

그림 3의 GOOSE 프레임 전송시간은 표 1의 메시지 유형 1에 해당이 된다. 100Mbps 네트워크 스위치와 1Gbps 네트워크 스위치에서 GOOSE 프레임을 전달하였고 결과는 그림 9와 같다. 100Mbps 네트워크 스위치인 경우, 100Mbps 네트워크 스위치와 1Gbps 네트워크 스위치 모두 메시지 유형 1의 최소 전송시간 3 msec를 모두 충족한다.

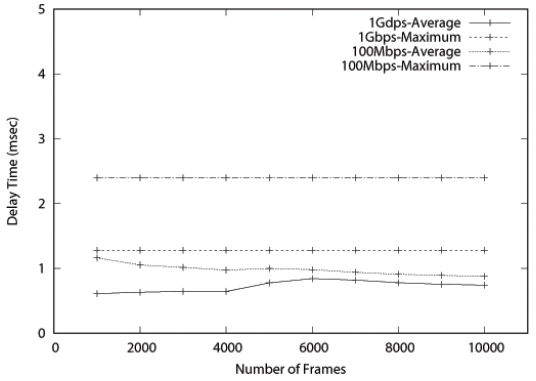

그림 9. 100Mbps와 1Gbps 이더넷에서의 지연 시간 비교
Fig. 9. Comparison of Delay of 100Mbps and 1Gbps Ethernet

V. 결 론

본 논문에서는 유형 D1 소규모 배전 변전소에 IEEE 802.15.4를 적용하여, 실제 장비를 통한 성능 분석을 수행하였다.

IEC 61850에서 보호를 위해 초당 480번 샘플링을 수행하여야 한다. IEEE 802.15.4 모트에서 샘플 당 전송시간을 측정하여 최대 13 msec가 됨을 확인하였다. 이 시간은 1초에 76.9개의 샘플들만 전송할 수 있으므로, 초당 480번 샘플링한 값들을 전달하기 위하여, 8개 샘플들을 모아서 한꺼번에 전달하도록 하였다. 초당 480개의 샘플들을 초당 60개의 프레임으로 전송하였다. 그리고 성능 분석 결과를 IEC 61850 메시지 유형과 비교 분석하여 IEEE 802.15.4 적용범위를 결정하였다.

유형 D1 변전소는 5개 이하의 구성요소를 가지는 소규모 변전소이므로, 5개의 IEEE 802.15.4 모트를 사용하여 동시에 샘플 값들을 전송하였다. 동일 채널을 사용할 경우 수율이 모트 수 증가에 따라 급격히 감소하는 것을 확인 할 수 있었고, 다른 채널들을 사용할 경우에는 다른 모트에 영향을 받지 않는 것을 확인할 수 있었다. 베이 레벨에서 GOOSE 트래픽의 전송 시간을 측정하였는데 100Mbps와 1Gbps 네트워크 장비 모두 3 msec 이하의 전송 요구조건을 만족하였다.

본 논문에서 성능 분석 결과는 유형 D1 소규모 배전 변전소 환경 하에서 IEEE 802.15.4를 적용할 때 유용하게 활용될 수 있을 것이다.

References

[1] Ricardo André Pinto Faria, “Wireless Sensor Network for electrical Secondary Substations”, Microwave Conference (EuMC) 42nd European, pp. 928-931, 2012.

[2] 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

[3] KS C IEC 61850-5, Communication networks and systems in substations, Part 5: Communication requirements for functions and device models, 1st ed. 2003.

[4] IEC 61850-1, Communication networks and systems in substations, Part 1: Introduction and overview, 1st ed. 2003.

[5] Sung-Ho Hwang, et al 4, “Traffic Generation Method of Sampled Values for Smart Grid”, The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication (IIBC), Vol. 15, No. 6, pp.225-230, 2015. 12.
DOI: https://doi.org/10.7236/JIIBC.2015.15.6.225

[6] 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: https://doi.org/10.7236/JIIBC.2016.16.1.209

[7] Sami S. et al 3, “Performance analysis of Centralized, Distributed and Hybrid Demand Load Control architecture for Smart power Grid” Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society (JKAIS), Smart Computing Review, vol. 2, no. 5, pp. 370-378, 2012. 10.
DOI: https://doi.org/10.6029/smartcr.2012.05.007

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>

강 은 영(정회원)

- 1988년 : 숙명여자대학교 공학사
- 1999년 : 숙명여자대학교 공학석사
- 2008년 : 성균관대학교 공학박사
- 2009년 ~ 현재 : 동양미래대학교 컴퓨터소프트웨어공학과 교수

<주관심분야 : 모바일 애드-혹 네트워크, 임베디드소프트웨어, 서비스디스커버리, 영상 워터마킹 & QR code, 모바일앱 개발 등>

※ 2015년도 강원대학교 대학회계 학술연구조성비로 연구하였음(관리번호-201510028)
(This study is supported by 2015 Research Grant from Kangwon National University(No. 201510028)