

http://dx.doi.org/10.7236/IIBC.2014.14.1.259

IIBC 2014-1-33

IEEE 802.15.4를 적용한 직류배전선로 장애관리시스템에서 패킷전송 지연시간 분석

Analysis of Packet Transmission Delay in the DC Power-Line Fault Management System using IEEE 802.15.4

송한춘*, 황성호**

Han-Chun Song*, Sung-Ho Hwang**

요 약 IEEE 802.15.4는 다양한 모니터링과 제어 응용을 위한 보편적인 대안으로 대두되고 있다. 본 논문에서는 IEEE 802.15.4를 이용하여 직류배전선로를 실시간으로 감시하고, 신속한 장애감지와 장애발생 선로를 차단하기 위한 직류배전선로 장애관리시스템을 설계하였다. 각 노드에 번호를 할당하였고, IEEE 802.15.4의 Unslotted CSMA-CA 방식을 사용하였으며, 시뮬레이션을 통해 성능분석을 하였다. 이를 위해 전류 16비트, 진폭 16비트, 기타 상태정보 28비트로 총 60비트의 제어정보를 보냈고, 직류배전선로 장애관리시스템의 패킷전달율과 전송 지연시간을 측정하고 분석하였다. 트래픽 부하가 초당 330 패킷 이하일 때, 0.02초보다 짧은 평균 지연이 나타났으며, 트래픽 부하가 초당 260 패킷 이하일 때, 99.99% 이상의 패킷 전달률을 보여준다. 따라서 트래픽 부하가 초당 260 패킷 이하일 때, 미국 DOE(Department of Energy)의 엄격한 조건을 만족함을 확인할 수 있었다. 본 논문의 연구결과는 IEEE 802.15.4를 이용한 직류배전선로 장애관리시스템 구축을 위한 기본 자료로서 활용이 가능할 것이다.

Abstract IEEE 802.15.4 has been emerging as the popular choice for various monitoring and control applications. In this paper, a fault management system for DC power-lines has been designed using IEEE 802.15.4, in order to monitor DC power-lines in real time, and to rapidly detect faults and shut off the line where such faults occur. Numbers were allocated for each node and unslotted CSMA-CA method of IEEE 802.15.4 was used, the performance of which was analyzed by a simulation. For such purpose, a total of 60 bits of the control data consisting of 16 bits of the current, 16 bits of the amplitude, 28 bits of the terminal state data were sent out, and the packet transfer rate and the transmission delay time of the fault management system for DC power-lines were measured and analyzed. When the traffic load was 330 packets per second or lower, the average delay time was shown to be shorter than 0.02 seconds, and when the traffic load was 260 packets per second or lower, the packet transfer rate was shown to be 99.99% or higher. Therefore, it was confirmed that the stringent condition of US Department of Energy (DOE) could be satisfied if the traffic load was 260 packets per second or lower. The results of this study can be utilized as basic data for the establishment of the fault management system for DC power-lines using IEEE 802.15.4.

Key Words : DC power transmission management, IEEE 802.15.4, Smart Grid

*정희원, 서울대학교 정보통신학과

**정희원, 강원대학교 전자정보통신공학부(교신저자)

접수일자 2014년 1월 25일, 수정완료 2014년 2월 7일

게재확정일자 2014년 2월 7일

Received: 25 January, 2014 / Revised: 7 February, 2014

Accepted: 7 February, 2014

**Corresponding Author: shhwang@kangwon.ac.kr

Division of Electronics, Communication & Information
Engineering, Kangwon National University, Korea

I. 서 론

스마트그리드는 기존의 전력시스템에 정보통신기술을 융합하여 전력에너지를 효율적으로 관리하기 위한 차세대 전력망이라고 할 수 있다. 최근 첨단 인터넷 통신기술을 전력운영 및 관리시스템에 적용하여 전력에너지를 효율적으로 운영 및 관리하고, 기존 전력시스템의 신뢰성, 보안성, 품질, 유연성 등을 향상시키고자 하는 스마트그리드 기술에 대한 연구가 많이 이루어지고 있다.^[1] 또한 스마트그리드시스템을 통한 신뢰성이 높고, 효율성이 있는 전력망에 대한 필요성, 디지털 부하의 급증 등 전력사용 환경변화에 따라 직류전력 및 직류배전망에 대한 관심이 높다.^[2] 직류배전은 교류배전보다 선로에서의 검출이 어렵고, 배전선로에서 단락 등의 장애가 발생 시 전류가 급격하게 증가하여 빠르게 회로를 차단하지 않으면 큰 사고위험을 초래할 수 있다.

본 논문에서는 최근 많이 사용되는 첨단 무선통신기술인 IEEE 802.15.4 표준을 적용하여 직류배전 선로를 실시간으로 감시한다. 특정 배전선로에 장애가 발생 시 즉시 해당 배전선로를 차단하여 부하장치를 보호하기위한 스마트그리드시스템을 설계하고 이 시스템에서 요구되는 장애감지에서 긴급 차단까지의 전송 지연시간을 분석하였다.

II. IEEE 802.15.4와 직류배전관리

1. 직류배전과 보호제어

최근 신뢰성이 높고, 효율성이 있는 전력망을 통해 고 품질의 전력에너지 공급에 대한 요구가 증가하고 있다. 디지털부하의 급증 등에 따라 직류전력의 효율적인 공급을 위한 직류 배전망에 대한 관심이 높아지고 있다. 직류배전에서 보호제어장치는 시스템의 보호는 물론 배전반 내에 설치된 차단기, 단로기 및 각종 스위치 등을 제어할 수 있어야 한다. 배전반에서 발생하는 각종 신호를 분석할 수 있어야 하며, 통신망을 통하여 각종 상태정보를 외부로 송수신 할 수 있어야 한다. 기존의 일반 배전반이 단순히 과전류, 누전차단 등의 부분적인 기능만을 수행하는 것에 비하여 스마트배전반은 전류, 전압, 전력, 역률 등의 전기정보를 수집하고 통신망과 연동하여 원격에서 전력차단 기능까지 구현되어야 한다^[3]. 직류배전은 배전

과정에서 단락 등의 장애가 발생 시 순간적으로 전류가 급격히 증가하여 부하에 치명적인 문제가 발생할 수 있다. 따라서 직류배전에서의 안전성에 대해서도 지속적으로 문제가 제기되고 있으며, 직류배전에서 선로장애로 인한 급속히 증가하는 고장전류로부터 부하시스템을 보호하기 위한 효율적인 관리기술, 센서제어기술이 연구되고 있다.^{[4][7]}

2. IEEE 802.15.4 표준

IEEE 802.15.4는 무선개입통신망에서의 저속, 저가격, 저전력 서비스를 위한 물리계층과 MAC계층을 정의하고 있다.^[5]

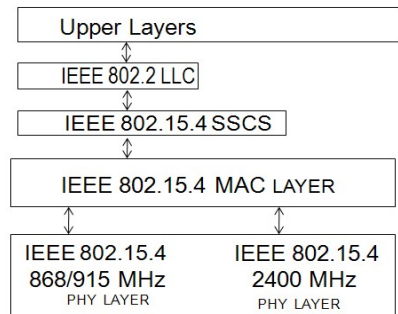


그림 1. IEEE 802.15.4 프로토콜
Fig. 1. IEEE 802.15.4 Protocol

IEEE 802.15.4는 스타구조와 피어 대 피어 구조, 그리고 혼합구조의 동작을 지원한다. 물리계층과 MAC 계층의 동작구조는 다음과 같다.^[6] 그림1은 IEEE 802.15.4 프로토콜의 계층 구조를 나타내고 있다.

1) 물리계층

물리계층은 두 개의 서비스를 제공하는데, 물리계층 데이터서비스와 물리계층 관리 엔터티(PLME) 서비스 액세스 포인트(PLME-SAP)를 위한 물리계층 관리서비스 인터페이스 기능이다.

물리계층 데이터서비스는 물리적 무선채널을 통하여 물리계층 데이터 유니트의 송신과 수신을 가능하게 한다. PLME-SAP는 MAC 계층의 관리요소와 물리계층관리 요소 간의 관리 명령어 전송을 허용한다. 물리계층의 특징은 물리계층을 통하여 패킷의 송신수신 뿐만 아니라 무선 트랜시버, 에너지검출, 링크품질표시, 채널선택, 채널할당제거 기능을 가진다.

2) MAC 계층

MAC 계층은 두 개의 서비스를 제공하는데, MAC 계층 데이터서비스와 MAC 계층 관리 엔터티(MLME) 서비스 액세스 포인트 (MLME-SAP)를 위한 MAC 계층 관리 인터페이스 기능이다.

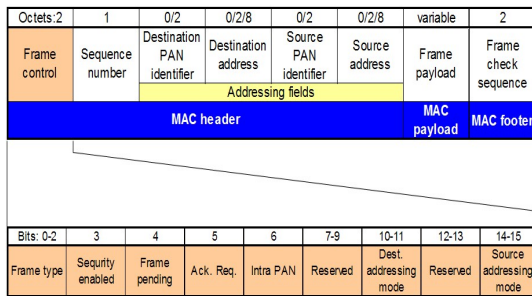


그림 2. IEEE 802.15.4 MAC 포맷구조.
Fig. 2. IEEE 802.15.4 MAC Format Structure

MAC 데이터 서비스는 물리계층 데이터 서비스를 통하여 MAC 프로토콜 데이터 유닛의 송신과 수신을 가능하게 한다. MLME-SAP는 상위계층과 MLME 간의 관리 명령어의 전송을 허용한다. MAC 계층의 특징은 비콘 관리, 채널액세스, 보증 타임슬롯 관리, 프레임 확인, 확인된 프레임의 전달, 연관과 비연관, 보안 메커니즘의 기능을 수행한다. 그림2는 IEEE 802.15.4 MAC 프레임의 포맷을 나타내고 있다.^[5]

3) IEEE 802.15.4 MAC의 동작

IEEE 802.15.4 MAC은 비콘(beacon)을 사용하는 Slotted CSMA-CA 알고리즘과 비콘을 사용하지 않는 Unslotted CSMA-CA 알고리즘을 사용한다. Slotted CSMA-CA 알고리즘은 그림3과 같이 모든 노드들의 Backoff 주기 경계들은 슈퍼프레임 슬롯 경계들과 함께 정렬된다. 그리고 0과 $2^{BE}-1$ 범위에서 backoff 주기가 완료된 랜덤 개수만큼 지연시킨 후, 2번의 CCA(Clear Channel Assessment)를 수행하도록 한다. 1 backoff 주기는 20 symbols이고, 250Kbps의 경우 1 symbol은 4비트와 동일하다. CCA는 8 symbols 시간동안 채널이 사용중인지를 알아본다. 만약, 채널이 사용중이면 BE 값을 증가시킨다.^[6]

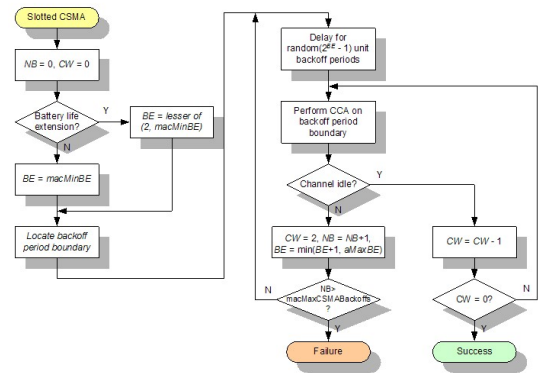


그림 3. IEEE 802.15.4 Slotted CSMA-CA
Fig. 3. IEEE 802.15.4 Slotted CSMA-CA

Beacon을 사용하지 않고 단순한 규칙을 따르는 Unslotted CSMA-CA 알고리즘은 그림4와 같이 0과 $2^{BE}-1$ 범위에서 backoff 주기가 완료된 랜덤 개수만큼 지연시킨 후, 1번의 CCA를 수행한 후 전송을 시도한다. 스마트그리드 시스템에서 장애를 감지하고 빠르게 회로를 차단하기 위해서는 최소 시간의 전송지연이 요구된다. 짧은 전송지연을 위해서는 Slotted CSMA-CA 알고리즘보다는 단순한 규칙을 따르는 Unslotted CSMA-CA 알고리즘이 적합하다. 본 논문에서는 위의 두 가지 경우를 시뮬레이션을 통하여 지연시간을 측정하고 분석한다.

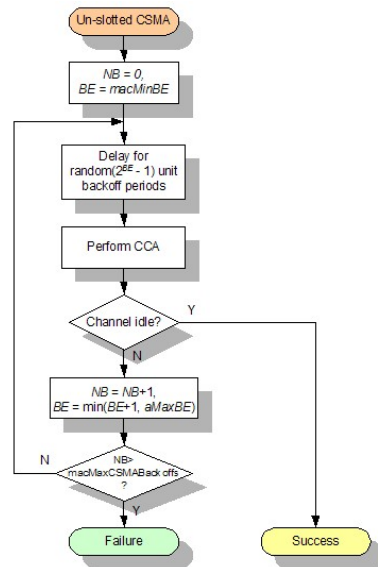


그림 4. IEEE 802.15.4 Unslotted CSMA-CA
Fig. 4. IEEE 802.15.4 Unslotted CSMA-CA

3. 스마트그리드 전송품질 요구사항

스마트그리드 HAN(Home Area Network)의 주요 기술에 따른 대역폭(bandwidth), 보류시간(latency), 요구사항들은 미국 DOE(Department of Energy)가 FERC(Federal Energy Regulatory Commission)와 NIST (National Institute of Standards and Technology)의 자료를 참조하여 발표하였다.^[8] 표 1은 DOE가 발표한 자료 중에서 HAN에서의 지연 요구사항을 정리한 것이다.

표 1. 스마트그리드 지연시간 요구사항
Table 1. Delay requirement of Smart Grid

Smart Grid Functionality	Bandwidth, Latency, Availability
	Most Stringent: 300 kbps/node, 0.02 seconds, 99.99%
AMI	100 kbps/node, 2-15 sec, 99-99.99%
DR	100 kbps/node, 0.5-2 sec, 99-99.99%
DER	100 kbps/node, 0.02-15 sec, 99-99.99%
EV	100 kbps/vehicle, 2 sec-5 min, 99-99.99%

III. 실험 및 결과분석

1. 실험 개요 및 환경 구성

본 논문에서는 IEEE 802.15.4 표준을 적용한 스마트그리드 장애관리시스템에서 선로장애가 발생 할 때, 시스템을 통하여 장애를 인지하고 선로를 긴급 차단하는데 걸리는 전송 지연시간을 측정하고 분석하였다.

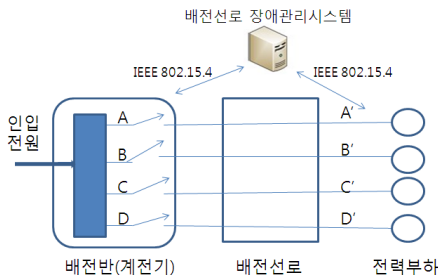


그림 5. 실험 망 구성 개념도
Fig. 5. Simulation Network Configuration

실험 환경구성은 통신망 시뮬레이션 도구인 NS-2.34를 사용하였다. 그림5의 실험 망 구성도와 같이, 배전기에서 부하까지의 직류배전선로에 대하여 각 양단(예를

들면, A지점 과 A'지점 또는 B지점과 B'지점)에서 전압, 전류, 위상과 단말 상태정보 값을 실시간으로 측정하여 장애관리시스템으로 전송한다. IEEE 802.15.4를 통하여 전송하면 장애관리시스템은 수신한 각 배전선로 양단 두 측정값들을 비교하여 일정한 오차범위(20%)내에서 동일하면 정상으로 처리하고, 오차범위(20%)를 벗어나면 배전선로의 장애로 인지하여, 배전기에 있는 계전기에 차단신호를 보내어 해당 직류선로를 즉시 차단하도록 설계하였다.

본 논문에서는 인입 배전기로부터 배전선로를 통하여 접속되는 전력부하 장치는 9개로 하였고, 관리시스템을 포함하여 총10개 통신노드로 구성하였다.

2. 실험 전제조건

본 논문에서는 측정 노드에서 관리시스템으로의 정보 전송은 포인트 투 포인트 방식으로, 노드 간의 라우팅은 고려하지 않았다. IEEE 802.15.4 구현할 때 많이 사용되는 TI사의 CC2420과 같은 칩은 최대 전송거리가 100미터 정도가 되고, IEEE 802.15.4 노드들이 상전을 사용하므로, 노드들의 전송 거리를 100미터로 하였다. 그리고 관리시스템이 장애를 검출하고 해당 배전선로를 차단하기 위한 차단신호를 보내기 위해 관리시스템에도 노드번호를 부여하였다. 배전반 및 부하노드의 선로에서 초당 1024번 측정하고 측정 값은 전압 16비트, 전류 16비트, 단말 상태정보 28비트로 총 60비트의 노드정보로 전송한다. 그림6의 IEEE 802.15.4 패킷포맷 MAC Payload 필드에 노드정보를 실어서 전송한다. 지연시간은 각 노드에서 관리시스템으로 정상적으로 전달된 패킷들에서 측정하였다.

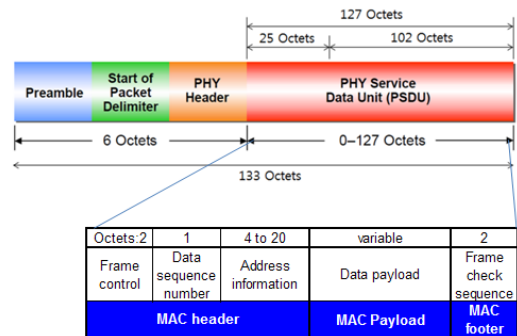


그림 6. IEEE 802.15.4 패킷
Fig. 6. IEEE 802.15.4 Packet

본 논문에서는 장애관리시스템에 전송용 노드번호를 추가하여, 장애관리시스템이 각 측정 노드로부터 장애 정보를 수신하면, 해당 배전반의 계전기에 shutdown 신호를 보내기 위한 번호로 사용하였다. 모든 노드들이 패킷을 1초에 한번 씩 보낼 경우, 장애관리시스템에서도 Shutdown 패킷을 1초에 한 번씩 보낼 수 있게 하였다. 배전선로 장애관리시스템도 $((1\text{초})/(n+1)) * (n+1)$ 시간에 Shutdown 패킷을 보내게 된다.

3. 실험방법 및 결과분석

각 노드에 순서번호를 부여하고 스케줄링을 하여 전송방법과 순서번호를 할당하지 않고 스케줄링 없이 전송하는 방법을 비교하였다. 실험에서는 전송패킷 충돌 발생을 줄이기 위해, 각 노드에 번호를 할당하여 전송하는 Numbered-Unslotted 방식이 패킷 전달율과 지연시간 모두에서 성능이 우수하였다. 예를 들어, 트래픽 부하가 초당 330 패킷 이하일 경우, 0.02초보다 짧은 평균 지연을 나타냈으며, 트래픽 부하가 초당 260 패킷 이하일 경우, 99.99% 이상의 패킷 전달률을 보여준다. 따라서 트래픽 부하가 초당 260 패킷 이하일 때, 미국 DOE의 엄격한 기준을 만족하고 있다.

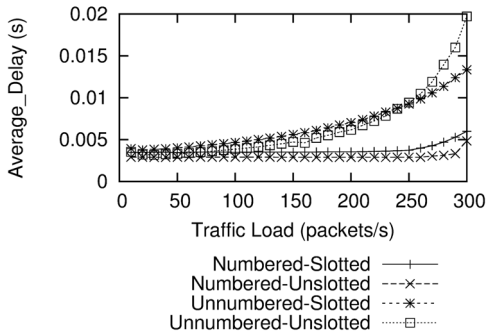


그림 7. 평균 전송지연 비교.
Fig. 7. Comparison of Average Delay

그림 7에서 보는 바와 같이, 각 노드에 순서번호를 부여한 스케줄링 전송방법이 순서번호를 할당하지 않고 스케줄링도 없이 전송하는 방법보다 지연시간이 짧게 나타남을 알 수 있다. 또한 그림8에 나타난 바와 같이, 순서번호 할당방식이 패킷 전달율도 더 좋게 나타남을 알 수 있다.

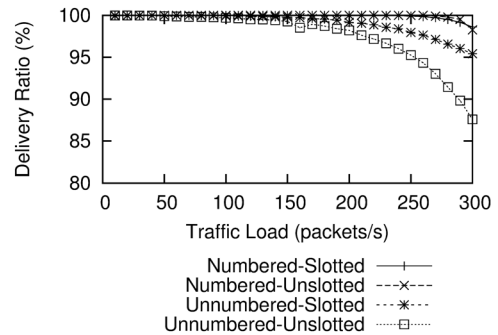


그림 8. 패킷 전달률 비교
Fig. 8. Comparison of Packet Delivery Ratio

IEEE 802.15.4 MAC은 비콘(Beacon)을 사용하는 Slotted CSMA-CA 절차와 비콘을 사용하지 않는 Unslotted CMA-CA 절차로 구분된다. 이에 대한 실험 결과는 그림7과 그림9에서 보는 바와 같이 Unslotted CSMA-CA방식이 지연시간과 패킷 전달률에서 Slotted CSMA-CA방식 보다 우수함을 확인할 수 있다.

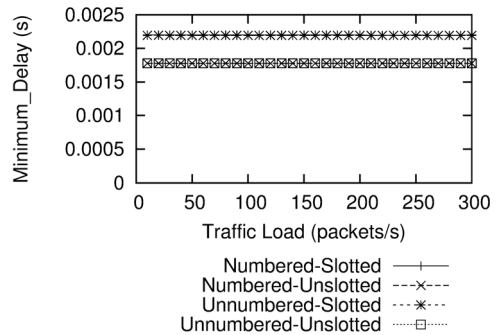


그림 9. 최소 전송지연 비교.
Fig. 9. Comparison of Minimum Delay

IV. 결 론

스마트그리드는 기존의 전력시스템에 첨단 정보통신 기술을 융합하여 전력에너지를 효율적으로 운영하고 관리하기 위한 차세대 전력망이라고 할 수 있다. 최근 신뢰성이 높고, 효율성이 있는 전력망을 통한 전력에너지의 공급과 직류전력을 효율적으로 공급하기 위한 직류배전망에 관심이 높아지고 있다.

본 논문에서는 IEEE 802.15.4 표준을 따르는 스마트그리드 배전선로 장애관리시스템을 시뮬레이션을 통하여

구현하고, 직류 배전선로에서 장애가 발생 시, 장애감지에서 장애선로의 차단까지에 걸리는 전송 지연시간을 측정하고 분석하였다. 실험결과, IEEE 802.15.4 표준에서 각 노드에 번호를 할당하고 Unslotted CSMA-CA MAC 방식을 적용하였을 때, 미국 DOE(Department of Energy)에서 제시한 엄격한 기준을 만족함을 확인할 수 있었다. 본 논문의 연구결과는 IEEE 802.15.4 표준을 이용하여 스마트그리드 전력배전 선로 보호제어시스템의 구축에 기본 자료로 활용이 가능할 것이다.

References

[1] Jung Han Choi, et al 1, "Ultra-broadband Resistive Power Divider for Smart Grid application", The journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, Vol. 12, No.1, 2011. 1.

[2] Kim Hyu Sung, "DC power delivery and circuit disconnect technology", The journal of the Korean Institute of Power Electronics, Vol 15, No 5, 2010. 10.

[3] Ki-Bong Ann, et al 1, "A study on the development of smart electronic panel for home use", The journal of the Korean institute of electrical engineers summer conference", 2010. 7.

[4] Oh Hae Seok, et al 1, "A Study on Development of Small Scale Electric Power Management System for Smart Grid" The journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, vol 13, No.6, 2012.

[5] IEEE 802.15.4-2006 : MAC and PHY specification for LR-WPANs", <http://ieee802.org/15/pub/TG4.html>

[6] Pardeep Kumar, et al 3, "Enhancing IEEE 802.15.4 for Low-latency, bandwidth, and energy critical WSN applications" 2008 international conference on emerging technologies, IEEE-ICET 2008, 2008. 10.

[7] Choon-Sung Nam, et al 2, "A Method to Customize Cluster Member Nodes for Energy-Efficiency in Wireless Sensor Networks", The journal of the Institute of Internet, Broadcasting and Communication, Vol 9, No. 6, 2009. 12.

[8] Department of Energy, "Communications requirements

of Smart Grid technology", U.S.A, 2010. 10.

[9] Chan-Ki Kim, "A study on the Algorithm Detecting DC line Faults", The journal of the Korean Institute of Power Electronics, Vol 9, No 5, 2004. 10.

저자 소개

송 한 춘(정회원)



- 1990년 : 성균관대학교 전자공학과 공학사
- 1994년 : 연세대학교 공학대학원 전자공학과 공학석사
- 1998년 : 성균관대학교 대학원 전자공학과 공학박사
- 1990년 1월~1997년 2월 : (주)데이콤 근무
- 1998년 3월~현재 : 서일대학교 공업계열 정보통신학과 교수
<관심분야 : 정보통신시스템, 인터넷 응용기술>

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
<관심분야 : 컴퓨터네트워크, WSN, WiFi>