

스마트그리드 HAN을 위한 개선된 Unslotted IEEE 802.15.4 알고리즘

황성호^{1*}

¹강원대학교 공학대학 전자정보통신공학부 정보통신공학전공

Improved Unslotted IEEE 802.15.4 Algorithm for HAN in Smart Grids

Sung Ho Hwang^{1*}

¹Division of Electronics, Information & Communication Engineering,
Kangwon National University

요약 스마트그리드 HAN(Home Area Networks)을 위한 IEEE 802.15.4에 대한 많은 연구들이 진행되고 있다. 기존의 Unslotted와 Slotted IEEE 802.15.4는 미국 DOE(Department of Energy)의 엄격한 조건을 거의 만족시키지 못하고 있다. 본 논문에서는 충돌과 지연시간을 줄이고 지연시간 변화도 적게 하는 개선된 알고리즘을 제안하였다. 이를 위해 노드에 번호를 부여하고, 노드 번호 순서에 따라 전송하도록 하였다. 노드에 번호를 부여하면 랜덤하게 전송하는 것보다는 충돌이 발생할 확률이 줄어들기 때문에 Backoff 시간을 0으로 설정하였다. 제안한 Numbered-Unslotted-ZeroBackoff 알고리즘에서, 패킷 크기가 133 octets이고, 초당 180개 이하의 패킷이 발생할 경우, 전달률 99.99% 이상과, 최대 지연, 평균 지연, 최소 지연 모두 0.02 초 이하의 지연이 발생함을 확인하였다. 본 논문에서 제안한 방식이 DOE의 엄격한 조건을 만족함을 확인할 수 있었다.

Abstract There have been many studies on IEEE 802.15.4 for home area networks(HAN) in Smart Grids. Existing unslotted or slotted IEEE 802.15.4 has almost not met strict conditions of the U.S. Department Of Energy(DOE). This study proposed a improved algorithm that reduces collisions, delay time and changes in the delay time. For this purpose, numbers were given to nodes to make the transmission in the order of the node numbers. Since the probability of the occurrence of collisions would decrease compared to random transmission if the nodes were given numbers, Backoff time was set at 0. In the proposed Numbered-Unslotted-ZeroBackoff algorithm, when the packet size was 133 octets and less than 180 packets per second occurred, it was found that packet delivery ratio was over 99.99%, and that all the maximum delay, the mean delay and the minimum delay were less than 0.02 seconds. This paper could confirm that the algorithm proposed in this study met the strict conditions of the DOE.

Key Words : HAN(Home Area Networks), IEEE 802.15.4, Smart Grid

1. 서론

스마트그리드는 기존 전력망에 정보통신 기술을 접목하여 전력을 사용할 때, 공급자와 수요자간 양방향으로

실시간 전력 정보를 교환, 에너지 절약, 신재생에너지 보급 등을 지원하는 차세대 전력시스템 및 관리체계를 의미한다. 스마트그리드는 스마트 미터 중심의 AMI(Advanced Metering Infrastructure), 모니터링기술,

*Corresponding Author : Sung Ho Hwang(Kangwon National University)

Tel: +82-33-570-6403 email: shhwang@kangwon.ac.kr

Received January 6, 2014

Revised (1st February 3, 2014, February 12, 2014)

Accepted March 6, 2014

정보통신기술 통합, 배전망 관리 등으로 구성된다.

IEEE 802.15.4는 저속, 저전력 무선센서네트워크를 위한 대표적인 표준이다. 스마트그리드, 빌딩 자동화, 홈 모니터링, 환경 모니터링, 산업기기 제어 등에서, 무선을 사용하는 IEEE 802.15.4는 저렴한 설치와 관리 비용이 든다. 주어진 환경하에서 올바른 IEEE 802.15.4 네트워크 파라미터 구성과 알고리즘은 성공적으로 동작하는데 매우 중요하다.

본 논문에서는 스마트그리드 HAN 환경 하에서 패킷 손실과 지연 시간을 줄이기 위한 연구를 수행하였다. IEEE 802.15.4 요구사항과 동작알고리즘을 분석하였고, 분석한 조건에 따른 파라미터 영향을 고찰하였으며, 새로운 파라미터 구성 알고리즘을 제안하였다. 성능분석은 최소 지연시간, 평균 지연시간과 전달률을 측정하였다.

2. 관련연구

2.1 스마트그리드

스마트그리드 HAN 주요 기술들은 다음과 같다.

- AMI(Advanced Metering Infrastructure) : 전력회사와 최종 소비자 사이의 정보화 인프라로서 기존의 단방향 중앙집중 전력계통 형태에 신재생에너지 발전설비와 다양한 분산 전원을 연계하고, 각종 센서와 계측기를 설치하여 실시간으로 양방향 통신을 하여 에너지 효율을 높이는 기술이다.
- DR(Demand Response) : 수요 반응 서비스를 통하여 전력 유틸리티 회사는 예비력 부족 등 전력계통 신뢰도 저하나 시장가격 급등이 예상될 때 피크전력이 감소하는 방향으로 소비자의 수요반응을 유도함으로써 전력시스템에 대한 신뢰도 개선과 비용 절감 등의 효과를 확보할 수 있다.
- DER(Distributed Energy Resource and Storage) : 스마트그리드에서 에너지흐름은 전력 유틸리티에서 집으로, 집에서 전력 유틸리티로 또는 집에서 집 등으로 여러 방향이 될 수 있다. 스마트그리드로부터 제공받은 전기로부터 구내에서 생산한 전기를 제외하여, 실시간적으로 측정한다.
- EV(Electric Vehicles) : 전력망 부하 수준에 따라 G2V(Grid to Vehicle)와 V2G(Vehicle to Grid)를 원활히 운영하여야 한다. 골드아워 시간에서도 상당수의 전기차량을 충전할 수 있도록 보다 강건한 스마트그리드가 요구된다.

스마트그리드 HAN의 주요 기술에 따른 대역폭(bandwidth), 보류시간(latency), 요구사항들은 Table 1과 같다[1,2]. 미국 DOE(Department of Energy)가 FERC(Federal Energy Regulatory Commission)와 NIST(National Institute of Standards and Technology) 기관들의 자료를 참조하여 발표하였다. Table 1은 DOE가 발표한 자료를 정리한 Velin Kounev, et al.[2]의 자료 중에서 HAN에 관한 내용만을 정리한 것이다. 엄격한(stringent) 기준을 적용하였을 때, 보류시간은 0.02초이고, 패킷 전달률은 99.99% 이상이어야 한다.

[Table 1] Summary of smart grid functions and their communication network assignments for HAN

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%

2.2 IEEE 802.15.4 전송 알고리즘

IEEE 802.15.4 MAC은 비콘(beacon)을 사용하는 Slotted CSMA-CA 알고리즘과 비콘을 사용하지 않는 Unslotted CSMA-CA 알고리즘을 사용한다[3].

Slotted CSMA-CA 알고리즘은 Fig. 1과 같이 모든 노드들의 Backoff 기간 경계를 슈퍼프레임 슬롯 경계와 함께 정렬한다. 그리고 0과 $2^{BE}-1$ 범위에서 랜덤하게 숫자를 선택하여, Backoff를 수행한 후, 2번의 CCA(Clear Channel Assessment)를 수행한다. IEEE 802.15.4가 250Kbps으로 동작하는 경우 1 symbol은 4비트와 동일하다. CCA는 8 symbols 시간동안 채널이 사용 중인지를 알아본다. 채널이 사용중이면 다시 Backoff 절차부터 수행한다.

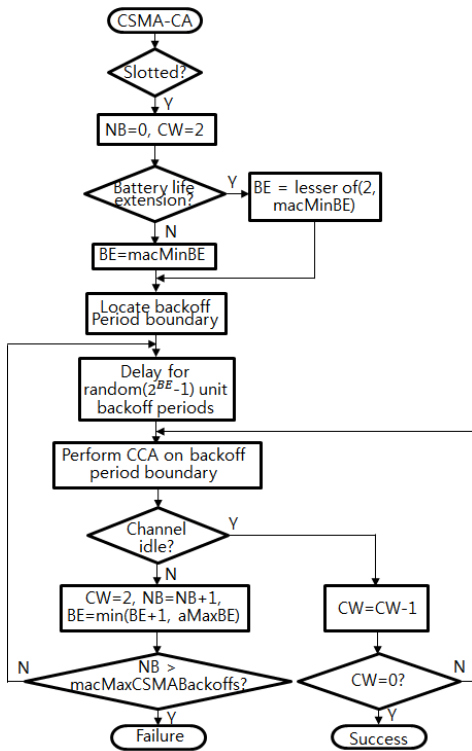
Unslotted CSMA-CA 알고리즘은 Fig. 2와 같이 0과 $2^{BE}-1$ 사이에서 랜덤하게 숫자를 선택하여 Backoff를 하고, 1번의 CCA를 수행한 후 전송한다.

스마트그리드 HAN 환경하에서 짧은 지연을 위해서는 Slotted CSMA-CCA 알고리즘보다는 Unslotted CSMA-CA 알고리즘을 사용하는 것이 더 빠른 전송에 적합하리라 판단된다.

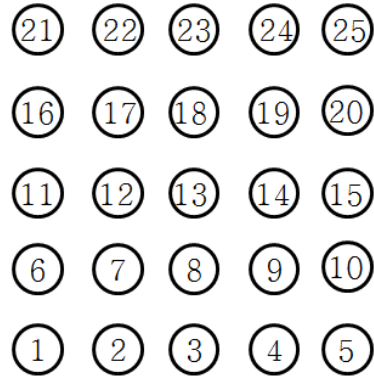
3. 시나리오

충돌과 지연이 발생하는 경우는 보통 은닉노드문제(hidden node problem)과 동시전송에 의한 충돌이 주요 원인이다. 이러한 문제를 해결하기 위한 방안으로 본 논문에서는 각 노드가 전송시간을 달리함으로써 충돌과 지연 발생을 감소시키고자 한다.

각 노드마다 번호를 부여하여 Fig. 3과 같이 배치한다. 부여된 노드 번호에 따라 전송 시간을 스케줄링한다.



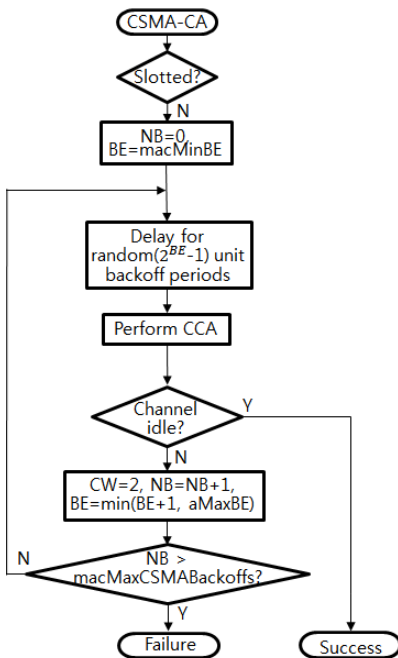
[Fig. 1] Slotted CSMA-CA Algorithm



[Fig. 3] Transmission order of packet

예를 들어 노드 25개가 주기적으로 패킷(packet)을 1초에 한번씩 전송할 경우, 각 노드가 독립적으로 각각 1초에 하나씩 보내는 것이 아니라, (1초)/(노드수)*(노드번호)의 시간에 따라 각기 다른 시간에 전송하는 방식이다.

그리고 Unslotted CSMA-CA 알고리즘을 사용하였다. 이 알고리즘은 Fig. 2와 같이 노드가 전달할 때마다, CCA(Clear Channel Assessment) 이전에, 0과 $2^{BE}-1$ 사이의 범위 내에서 랜덤하게 숫자를 선택하여, unit backoff period에 곱한 값만큼 Backoff 기간을 수행한다.



[Fig. 2] Unslotted CSMA-CA Algorithm

채널액세스시간(Channel Access Time)

$$= (0 \text{과 } 2^{BE}-1 \text{ 사이에서 랜덤하게 숫자선택}) \times aUnitBackoffPeriod + CCA$$

본 논문에서 제안하는 알고리즘은 각 노드마다 번호를 부여하고, 노드별로 서로 다른 시간에 전송하여 충돌을 줄이는 방식이므로, 노드가 전송할 때마다 Backoff 기간을 0으로 설정하여, 즉시 CCA를 수행하도록 한다.

본 논문에서 제안한 알고리즘은 노드 번호를 부여하고, Slotted CSMA-CA보다 더 빠른 Unslotted CSMA-CA를 사용하고, Backoff 기간을 0으로 설정하므로,

Numbered-Unslotted- ZeroBackoff-CSMA-CA 알고리즘이라고 한다.

4. 실험 및 고찰

본 논문에서 사용된 시뮬레이션 도구는 분산 객체 네트워크 시뮬레이터인 NS-2.34를 사용하였다.[4]

시뮬레이션 동안 패킷 크기를 변화시키면서, 최대 133 octets로 설정하였다. IEEE 802.15.4에서 최대 PPDU(PHY protocol data unit) 패킷 크기는 133 octets이다[5].

CSMA-CA 절차를 수행한 후, IEEE 802.15.4 패킷 133 octets 크기를 전송하는데, 278 symbols (패킷 전송하는데 $133 \times 8/4 = 266$ symbols + 수신 노드의 RX-to-TX 반전시간(turnaround time) 12 symbols) 시간이 걸린다. [5-7].

노드 수를 변화하면서 트래픽 부하를 조정하였다. 각 노드들은 초당 10개의 패킷을 발생시키고, 전체 트래픽 발생은 초당 40에서부터 340개의 패킷들로 시뮬레이션을 수행하였다.

성능 평가는 다음과 같이 4개의 알고리즘으로 수행하였다.

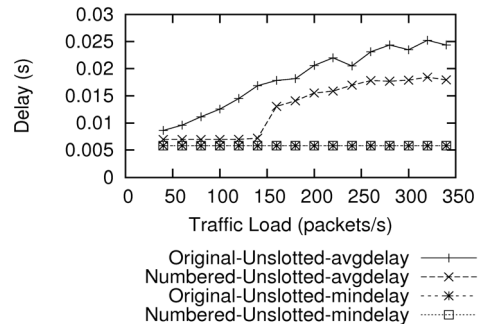
- ① Original-Unslotted-CSMA-CA
 - IEEE 802.15.4 MAC에서 비콘을 사용하지 않음.
 - Backoff 1번과 슬롯에 맞출 필요가 없음.
 - CCA 1번이 필요함.
- ② Numbered-Slotted-CSMA-CA
 - IEEE 802.15.4 MAC에서 비콘을 사용함.
 - Backoff 1번과 슬롯 맞추는 시간이 필요함.
 - CCA 2번이 필요함.
 - 노드 별로 노드 번호를 부여하여, 전송을 스케줄링함.
- ③ Numbered-Unslotted-CSMA-CA
 - IEEE 802.15.4 MAC에서 비콘을 사용하지 않음.
 - Backoff 1번과 슬롯에 맞출 필요가 없음.
 - CCA 1번이 필요함.
 - 노드 별로 노드 번호를 부여하여, 전송을 스케줄링함.
- ④ Numbered-Unslotted-ZeroBackoff-CSMA-CA
 - IEEE 802.15.4 MAC에서 비콘을 사용하지 않음.
 - Backoff 기간을 0로 함.
 - CCA 1번이 필요함.
 - 노드 별로 노드 번호를 부여하여, 전송을 스케줄링함.

사용한 파라미터는 Table 2와 같다.

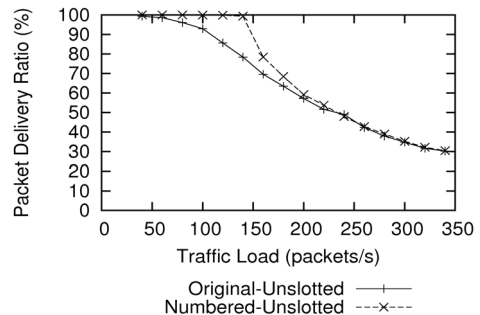
[Table 2] Simulation Parameters setting

Number of Nodes	4 - 34
Packet Transmit Rate/Node	10 packets/s
Traffic Load	40 - 340 octets/s
Packet Size	133 octets

IEEE 802.15.4 MAC에서 Original-Unslotted와 Numbered-Unslotted를 비교분석하였다. Fig. 4는 제공된 부하에 따른 지연을 보여준다. 평균 지연은 Numbered-Unslotted이 Original-Unslotted에 비하여 평균 29.3% 감소하였다. 최소 지연은 Numbered-Unslotted와 Original-Unslotted가 동일한 결과를 보인다. Fig. 5는 제공된 부하에 따른 패킷 전달률을 보여준다. Numbered-Unslotted이 부하 140 packets/s까지는 99%이상의 패킷 전달률을 보였다. 따라서 각 노드별로 패킷을 전달하는 Original-Unslotted 보다는, 노드 별로 번호를 부여하여 전송을 스케줄링하는 Numbered-Unslotted가 좋은 성능을 보여주고 있다.



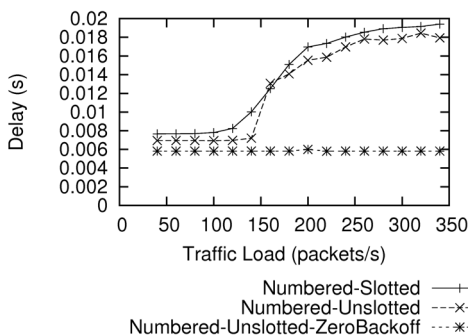
[Fig. 4] Original-Unslotted versus Numbered-Unslotted Packet Delay



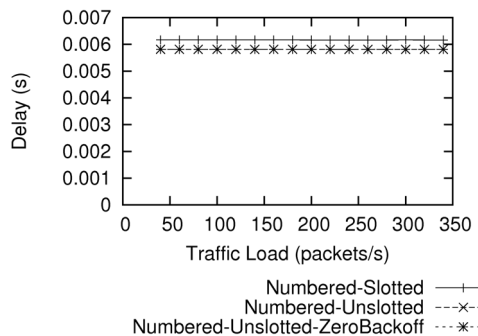
[Fig. 5] Original-Unslotted versus Numbered-Unslotted Packet Delivery Ratio

따라서 노드 번호를 부여하여 스케줄링하는 알고리즘이 더 좋은 성능을 보이므로, 이후부터는 노드 번호를 이용하여 전송을 스케줄링하는 알고리즘들로 성능 분석을 수행하였다.

Numbered-Slotted, Numbered-Unslotted와 Numbered-Unslotted-ZeroBackoff를 비교분석하였다. Fig. 6은 제공된 부하에 따른 평균 지연을 보여준다. 평균 지연은 Numbered-Unslotted-ZeroBackoff가 다른 알고리즘에 비하여 일정한 지연을 보여주고 있다. Fig. 7은 최소 지연을 보여준다. 최소 지연은 비콘을 사용하는 Numbered-Slotted만이 높게 나타났는데, Numbered-Slotted만 2번의 CCA와 슬롯에 맞추는 시간을 소비하고, 다른 알고리즘을 1번의 CCA를 수행하기 때문이다.



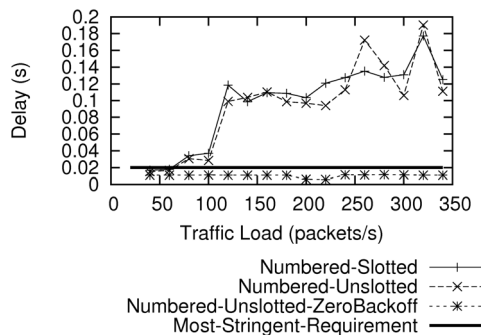
[Fig. 6] Packet Average Delay with Different Algorithm according Traffic Load



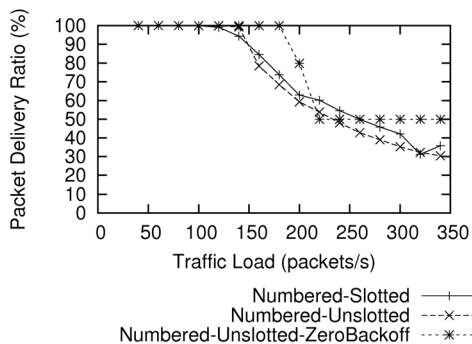
[Fig. 7] Packet Minimum Delay with Different Algorithm according Traffic Load

Fig. 8은 제공된 부하에 따른 최대 지연을 보여준다. 검은 굵은 선이 미국 Department of Energy에서 제시한 기준이다. 엄격한 기준인 0.02초 이하를 만족하는 알고리즘은 Numbered-Unslotted-ZeroBackoff 밖에 없다. Fig. 9는 패킷 전달률을 보여준다. Numbered-Unslotted-

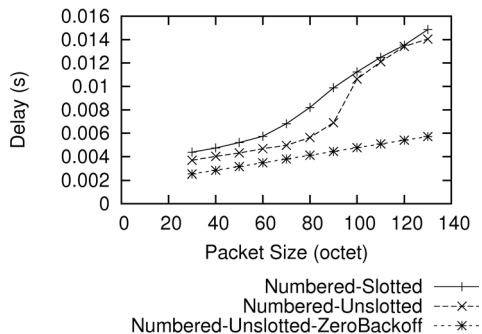
ZeroBackoff만이 부하 180 packets/s까지 99.9%이상의 패킷 전달률을 보여준다. 따라서 트래픽 부하 40 packets/s부터 - 180 packets/s까지 미국 Department of Energy에서 제시한 기준을 만족하는 알고리즘은 Numbered-Unslotted-ZeroBackoff 밖에 없다.



[Fig. 8] Packet Maximum Delay with Different Algorithm according Traffic Load

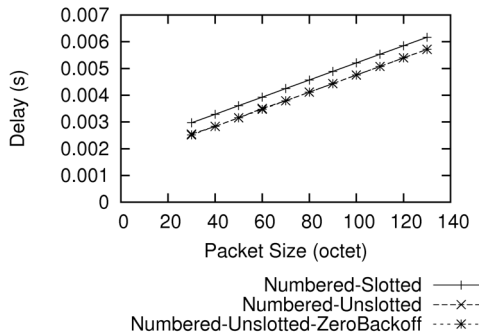


[Fig. 9] Packet Delivery Ratio with Different Algorithm according Traffic Load



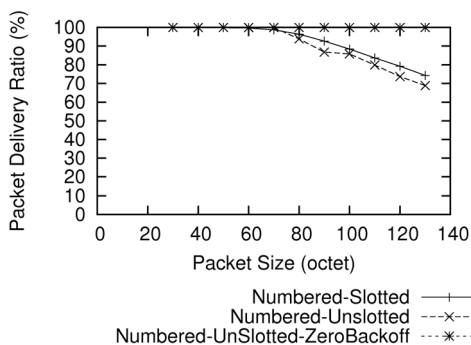
[Fig. 10] Packet Average Delay with Different Algorithm according Packet Size

그리고 트래픽 부하량을 180 packets/s로 고정시키고, 패킷 크기를 30 octets 부터 130 octets까지 변화시키면서 시뮬레이션을 수행하였다. Fig. 10은 패킷 크기 변화에 따른 평균 지연을 보여준다. 평균 지연은 Numbered-Unslotted-ZeroBackoff가 다른 알고리즘에 비하여 낮은 평균지연과 일정한 증가를 보여주고 있다.



[Fig. 11] Packet Minimum Delay with Different Algorithm according Packet Size

Fig. 11은 최소 지연을 보여준다. 최소 지연은 Numbered-Slotted만이 높게 나타났는데, Numbered-Slotted만 슬롯을 맞추는 시간과 2번CCA를 수행하고 반면, 다른 알고리즘을 1번의 CCA를 수행하기 때문이다. Fig. 12는 패킷 크기 변화에 따른 평균 전달률을 보여준다. 패킷 전달률은 Numbered-Unslotted-ZeroBackoff가 다른 알고리즘에 비하여 높은 99.9% 이상의 전달률을 보여주고 있다.



[Fig. 12] Packet Delivery Ratio with Different Algorithm according Packet Size

지연 측정은 전송에 성공한 패킷들에서만 측정이 가능하다. 따라서 정확한 성능 분석을 하려면, 패킷 전달률과 지연을 함께 분석하여야 한다. 트래픽 부하가 180 packets/s 이하에서, Fig. 9와 같이 패킷 전달률이 99.9%

이상이 되고, Fig. 8과 같이 최대 지연이 0.02이하인, Department of Energy의 엄격한 기준을 모두 만족하는 알고리즘은 Numbered-Unslotted-ZeroBackoff 뿐이다.

5. 결론

본 논문에서 스마트그리드 HAN 환경 하에서의 IEEE 802.15.4 MAC을 요구사항과 파라미터 구성 알고리즘을 제안하였다. 충돌을 회피하기 위한 방식으로 노드마다 번호를 부여하여, 번호에 따라 전송시간을 달리하여 전송하였다. 노드 번호에 따른 전송을 함으로서, 충돌을 줄일 수 있었다. 충돌이 발생할 확률이 줄어들었기 때문에 Backoff 시간을 0으로 설정하였다. 성능분석 결과 Original-Slotted-CSMA-CA, Numbered-Slotted-CSMA-CA, Numbered-Unslotted-CSMA-CA 그리고 Numbered-Unslotted-ZeroBackoff-CSMA-CA 알고리즘을 비교분석하였다. 시뮬레이션 결과 패킷크기가 133 octets이고 트래픽 부하 180 packets/s 이하에서, 미국 Department of Energy 엄격한 기준을 충족시키는 것은 Numbered-Unslotted-ZeroBackoff-CSMA-CA 알고리즘 뿐이었다.

본 논문의 실험 결과에서 트래픽 부하가 200 packets/s 이상일 때 패킷전달률이 급격히 떨어지는 구간이 존재하는데, 이에 대한 개선이 필요하다. 향후 연구방향은 Numbered-Unslotted-ZeroBackoff-CSMA-CA 알고리즘을 다양한 스마트그리드 트래픽 입력 환경과 다른 스마트그리드 통신 프로토콜에도 적용해 볼 계획이다. 본 연구의 결과는 장애 발생시 지연에 민감한 DC Relay와 같은 전기기기 개발에 적용할 수 있다고 판단된다.

References

- [1] DEPARTMENT OF ENERGY, "COMMUNICATIONS REQUIREMENTS OF SMART GRID TECHNOLOGIES", October 5, 2010.
- [2] V. Kounev, D. Tipper, "Advanced Metering and Demand Response Communication Performance in Zigbee based HANs", IEEE INFOCOM Workshop, pp.3405-3410, 2013.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/INFCOMW.2013.6562904>
- [3] Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., IEEE Std. 802.15.4-2006, "IEEE Standard for Information Technology – Telecommunication and Information Exchange between Systems – Local and

- Metropolitan Area Networks – Specific Requirements
– Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC)
and Physical Layer (PHY) Specifications for Low Rate
Wireless Personal Area Networks (WPANs)”, New
York: IEEE Press. 2006.
- [4] Network Simulator 2 - NS2, <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>.
- [5] D. Rohm, M. Goyal, H. Hosseini, A. D. Bashir,
“Configuring Beaconless IEEE 802.15.4 Networks
Under Different Traffic Loads”, Advanced Information
Networking and Applications, pp.921-928, 2009.
- [6] Jianliang Zheng and Myung J. Lee, "A Comprehensive
Performance Study of IEEE 802.15.4," Sensor Network
Operations, IEEE Press, Wiley Interscience, Chapter 4,
pp.218-237, 2006.
- [7] Burchfield, T. R., Venkatesan, S., and Einer, D.,
"Maximizing throughput in Zigbee wireless networks
through analysis, simulations and implementations", in
Proc. of the Int. Workshop on Localized Algorithms and
Protocols for Wireless Sensor Networks, pp.15-29,
2007.

황 성 호(Sung Ho Hwang)

[정회원]



- 1991년 2월 : 성균관대학교 전자
공학과 (공학사)
- 1993년 2월 : 성균관대학교 대학
원 전자공학과 (공학석사)
- 1996년 8월 : 성균관대학교 대학
원 전자공학과 (공학박사)
- 1997년 9월 ~ 현재 : 강원대학교
공학대학 정보통신공학전공 교수

<관심분야>

컴퓨터네트워크, WSN, Ad Hoc Network