스마트 그리드를 위한 IEEE 802.11s 기반 무선 메쉬 네트워크

준회원 정 지 선*, 김 재 범*, 정회원 고 영 배*, 이 상 염**

IEEE 802.11s based Wireless Mesh Networks for Smart Grid

JiSun Jung*, Jae-Beom Kim* *Associater Members*,
Young-Bae ko*, Sang-Youm Lee** *Regular Members*

요 약

본 논문은 높은 확장성 및 효율성을 바탕으로 최근 다양한 응용 분야에서 통신 기간망 기술로 주목받고 있는 "무선 메쉬 네트워크"를 스마트 그리드 환경에 적용하는 방안에 대해 다룬다. 스마트 그리드(Smart Grid)란 기존 전력망에 IT 통신기술을 도입하여 실시간으로 전력 정보를 모니터링하고 전력의 흐름을 제어함으로써 에너지 효율을 극대화할 수 있는 "차세대 지능형 전력망"이다. 무선 메쉬 통신망을 스마트 그리드에 적용하기 위해서는 높은 수준의 신뢰성 및 QoS(Quality of Service) 지원이 가능한 동시에 대용량의 전력 관련 데이터를 효율적으로 처리할 수 있어야 한다. 또한 상호 호환성 및 확장성을 고려하여 국제 표준 기반의 설계가 필수적이다. 본 논문에서는 이러한 요구사항을 만족하기 위하여 IEEE 802.11s 표준 기반의 스마트 그리드 메쉬 네트워크를 제안하고, ns-3 시뮬레이터를 이용한 성능 검증을 통해 그 타당성을 입증하였다. 또한, 무선 메쉬 네트워킹 기술을 스마트 그리드에 적용했을 때 요구되는 주요 연구 주제에 관해 조사하고 개선 방안들을 제시하였다.

Key Words : Smart Grid; Wireless Mesh Network; IEEE802.11s; ns-3

ABSTRACT

We present the concept of applying Wireless Mesh Networking (WMN) technology into Smart Grid, which is recently rising as a potential technology in various areas thanks to its advantages such as low installation costs, high scalability, and high flexibility. Smart Grid is an intelligent, next-generation electrical power network that can maximize energy efficiency by monitoring utility information in real-time and controlling the flow of electricity with IT communications technology converged to the existing power grid. WMNs must be designed for Smart Grid communication systems considering not only the high level of reliability, QoS support and mass-data treatment but also the properties of the traditional power grid. In addition, it is essential to design techniques based on international standards to support interoperability and scalability. In this paper, we evaluate the performance of IEEE 802.11s based Smart Grid Mesh Networks by conducting preliminary simulation studies with the ns-3 simulator. We also outline some challenging issues that should be reviewed when considering WMNs as the candidate for Smart Grid communication infrastructure.

※ 본 연구는 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임 (2010-0016189)
* 아주대학교 컴퓨터 공학과 유비쿼터스 네트워크 시스템 연구실({jisun, jaebeom}@uns.ajou.ac.kr, younko@ajou.ac.kr)
** KEPCO Research Institute 녹색성장연구소(wifi2@kepco.co.kr)
논문번호 : KICS2010-06-240, 접수일자 : 2010년 6월 1일, 최종논문접수일자 : 2010년 8월 24일

Ⅰ. 서 론

최근 차세대 통신 기간망 기술로 무선 메쉬 네트워크가 각광받고 있다. 무선 메쉬 네트워크는 메쉬 노드 간에 멀티 홉 경로를 구성하여 데이터를 전송하므로 네트워크 확장이 용이하고 유지, 보수가 쉬운 장점이 있다. 또한, 자동화된 환경설정과 낮은 관리 비용을 바탕으로 무선 인터넷 접속, 재난 공지, 보안, 군 등 다양한 응용 분야에서 활용되고 있다. 이미 해외에서는 도시 범위의 대규모 통신 인프라로 구축된 다수의 실증 예를 가지고 있다[1].

이러한 무선 메쉬 네트워킹 기술이 유용하게 적용될 수 있는 차세대 응용 분야의 하나로 스마트 그리드(Smart Grid)를 들 수 있다. 스마트 그리드란 공급자 중심의 기존 전력망에 실시간으로 정보 교환을 하는 양방향 유/무선 통신기술을 융합한 지능형 전력 시스템이다. 이는 공급자와 소비자 간의 상호 작용을 통하여 실시간으로 전력 정보를 교환하고 전력을 효율적으로 제어함으로써 전력 소모와 비용을 줄이고 신뢰성을 극대화할 수 있다[2,3].

스마트 그리드 환경에서는 기존 전력산업에서 필요로 하는 다양한 정보를 전달하고 효율적으로 처리할 수 있어야 한다[2]. 그와 동시에 통신, 가전, 자동차, 에너지 등의 각종 산업이 스마트 그리드 환경과 융합하여 새롭게 발생하는 여러 데이터를 처리해야 한다. 이와 같이 스마트 그리드 통신망을 통해 다양한 종류의 데이터가 대량으로 발생하여 수시로 전송됨에도 불구하고, 이 모든 데이터를 손실 없이 효율적으로 전송해야 한다. 이러한 스마트 그리드 특성을 고려하여 무선 메쉬 네트워킹 기술을 스마트 그리드에서 활용하고자 하는 노력들이 시도되고 있다.

현재 Tropos, Trilliant와 같은 기업들이 스마트 그리드를 위한 무선 메쉬 네트워크 제품군을 개발하고 있다[4,5]. 그러나 이들이 출시한 제품들은 독자적으로 개발한 기술에 근거하기 때문에 개방성 및 상호 호환성에 문제가 있다. 따라서 국제 표준을 토대로 한 연구 개발이 필요하며, 이러한 측면에서 무선 랜 메쉬 네트워크의 표준을 바탕으로 한 "IEEE 802.11s 기반 스마트 그리드 메쉬 네트워크"가 적합한 대안이 될 수 있다[6].

IEEE 802.11s 표준은 멀티 홉 기반의 근거리 통신망을 구성하여 인터넷 서비스 및 여러 산업 분야에서 통신 서비스를 제공하는 무선 네트워크 기술이다. IEEE 802.11s 표준에서는 무선 메쉬 노드들 간의 효율적인 멀티 홉 데이터 전송을 위하여 HWMP(Hybrid Wireless Mesh Protocol)라고 불리는 MAC 계층의 경로 설정 기법을 정의하고 있다. 이는 기본적으로 게이트웨이를 중심으로 트리 형태 경로를 주기적으로 갱신하는 방법과 데이터를 전송할 때 경로가 없는 경우 반응적으로 경로를 구성하는 방법을 결합한 하이브리드 형태의 경로 설정 기법을 제안한다.

이러한 IEEE 802.11s 무선 랜 메쉬 네트워크 기술을 가지고 있는 고속 통신 능력과 확장성, 자동 관리 등의 특성을 고려하였을 때, 대용량 데이터가 수시로 발생하는 스마트 그리드의 통신 기간망 구성에 적합하다고 볼 수 있다. 하지만, 아직까지는 전력망의 특성에 대한 고려가 부족한 것이 현실이다.

본 논문에서는 ns-3 시뮬레이션을 이용한 성능 분석을 통하여, IEEE 802.11s 기반 무선 메쉬 네트워킹 기술의 스마트 그리드 환경 적용 가능성을 검증하였다. 또한 이 때 발생할 수 있는 문제점을 파악하고, 이러한 문제점을 해결하기 위한 주요 연구 이슈에 대해 고찰한다.

Ⅱ. 스마트 그리드 통신 기간망 및 관련 연구

스마트 그리드는 그림 1과 같이 전력망을 구성하는 소비자 기기, 소비자 통신 기기, 에너지 제공자, 송배전 시스템의 상호 운용 및 통신을 통하여 에너지를 효율적으로 사용할 수 있게 한다. 본 장에서는 이러한 스마트 그리드 통신 기간망의 구조와 특성을 분석하고, 무선 메쉬 네트워크의 활용 방안에 대해서 기술한다.

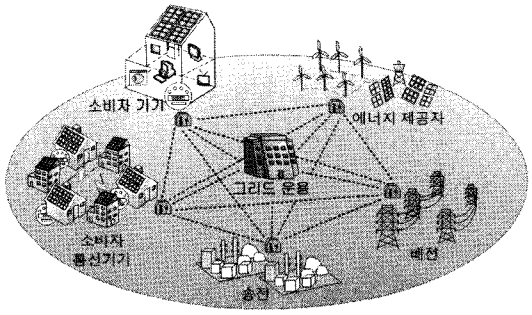


그림 1. 스마트 그리드 구성도

2.1 스마트 그리드 통신 기간망

스마트 그리드의 통신기간망은 그림 2와 같이 구성된다. 먼저, 지능형 미터기(Smart Meter)를 중심으로 하여 하나의 가정 내를 통신 범위로 하는 HAN (Home Area Network)이 존재하며, 각 가정에서 발생한 데이터를 취합하기 위한 지역 범위의 네트워크를 구성하는 NAN(Neighborhood Area Network)과 최종

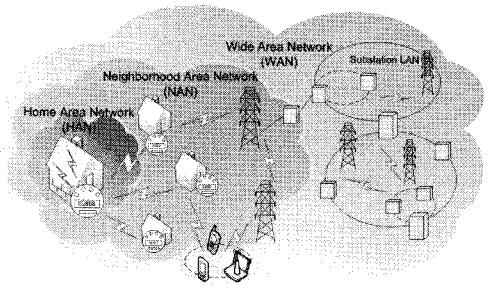


그림 2. 스마트 그리드 통신 기간망 구조

적으로 전체 네트워크를 총괄하는 WAN(Wide Area Network)으로 구성된다[7].

HAN에서는 AMI(AMI: Advanced Metering Infrastructure)를 기반으로 하여 각종 기기가 사용하는 전력 정보를 가정에 설치된 지능형 미터기에 전송하여 주기적으로 수집하고 관리하게 된다. 수집된 정보는 전력을 공급하는 공급자에게 전달되어야 하며, 이를 위해 우선 지역단위로 데이터를 통합하는 계층인 NAN으로 전달된다. HAN에서는 비교적 데이터 크기가 작은 검침 정보나 전력 소모 정보를 처리하기 때문에 고성능 통신 수단을 활용할 필요가 없다. 따라서 ZigBee, PLC 와 같은 저 전력 네트워크 기술이 활용될 수 있다[3]. 이러한 HAN을 위하여 IEEE P2030, IEEE 802.15.4와 같은 표준의 활용이 논의되고 있다.

NAN과 WAN의 통신시스템은 HAN에서 검침된 계량 정보 뿐 아니라 원격 검침 단말, 스마트 폰 등의 다양한 단말들을 위한 서비스를 지원한다. NAN에서는 HAN에서 취합한 정보 및 NAN 자체에서 발생한 데이터를 상위 계층인 WAN으로 전송한다. 또한 상위 WAN에서 보낸 전력비용 정보나 전력 공급량 등의 데이터를 분배하여 다시 하위 HAN으로 전송하는 양방향 통신의 특성을 가진다. NAN 영역에서는 이러한 특성을 반영하여 양방향의 고속 통신이 필요하며, 고성능을 보장할 수 있는 네트워크가 요구된다. 따라서 업링크와 다운링크의 통신 대역폭이 비대칭인 3G나 WiMax 통신망은 이에 적합하지 않을 수 있다[8, 9].

WAN 영역은 NAN 영역의 정보를 취합한 집중장치(concentrator)에서 지능형 전력정보관리시스템(MDMS)과 같은 상위 시스템까지의 구간을 정의한다. 전력정보관리시스템은 하위 계층에서 전송된 대용량 데이터들을 기반으로 전력자원을 통합 관리한다[10]. 따라서 이러한 전력정보관리시스템으로의 통신망을 구성하는 WAN은 HAN 및 NAN에서 발생하는 여러 데이터를 처리함과 동시에 WAN 자체에서 사용하는 여러 어플리케이션 간에 통신을 지원해야 하므로 초고속 광대역 통신 능력을 요구한다.

이러한 NAN 영역과 WAN 영역을 위한 통신 기술에 관한 정의는 현재 다양한 무선 네트워크를 사용할 수 있다는 지침만 있을 뿐 실제 구체적인 표준은 아직 정의되어 있지 않다. 그렇기 때문에 초고속 통신을 요구하는 NAN 영역과 WAN 영역의 통신망을 구축하는 하나의 방법으로 고속 통신이 가능한 무선 랜 기반의 메쉬 네트워크를 고려할 수 있다.

2.2 NAN/WAN 스마트 그리드를 위한 무선 메쉬 네트워크

해외에서는 여러 기업에서 스마트 그리드 통신 기간망으로 무선 메쉬 네트워크에 기반한 솔루션을 제안하고 있다. 실제 Tropos, Trilliant와 같은 기업들은 Gridcom 과 SecureMesh를 통하여 무선 메쉬 네트워크를 NAN과 WAN 통신망으로 활용하고자 하고 있다.

Tropos사에서 개발한 Gridcom은 여러 네트워크 기술을 복합적으로 사용하여 계층적인 하이브리드 네트워크를 구축한다. 특히, 스마트 그리드의 통신 기간망 구조에서 WAN에 해당하는 영역을 IEEE 802.11에 기반한 메쉬 네트워크를 이용하여 초고속 백본 망을 구축한다.

Trilliant사의 SecureMesh는 다 계층 구조를 통하여 WAN 단위에서 무선 메쉬 네트워크의 서비스를 제공한다. IEEE 802.11a/g 표준을 기반으로 하위 계층에서 전달되는 SCADA, 자동화 및 여러 종류의 데이터를 위한 최대 54Mbps의 전송 속도를 제공한다. SecureMesh는 보안 및 신뢰성에 초점을 두어 QoS 지원 및 안전한 데이터 전송을 보장하는 기술을 제공한다.

무선 메쉬 네트워킹 기술을 스마트 그리드에 적용한 대표적인 두 회사는 IEEE 802.11 기반의 무선 랜을 이용하고 있지만, 독자적인 라우팅 등을 적용하여 메쉬 네트워크를 구성하고 있다. 따라서 타사 제품과 혼합된 네트워크 구축 시 상호 호환성에 문제가 발생할 수 있다. 이러한 문제를 해결하고자 무선 랜 메쉬 네트워크의 표준인 IEEE 802.11s 표준화가 진행 중에 있으며, 현재 마무리 단계에 있다. 따라서 본 논문에서 제안하는 바와 같이, 스마트 그리드의 NAN과 WAN 통신기간망에 IEEE 802.11s 표준을 적용함으로써 개방성 및 상호 호환성을 확보할 수 있다[6].

Ⅲ. IEEE 802.11s 기반 스마트 그리드 메쉬 네트워크 성능 분석

본 장에서는 스마트 그리드 시스템을 구성하는 통

신 기간망에서 사용되는 각종 어플리케이션에 대하여 설명한다. 또한 이에 기반한 스마트 그리드 환경을 *ns*-3 시뮬레이터 상에 구축하여, IEEE 802.11s 무선 메쉬 네트워크의 성능을 분석한다.

3.1 스마트 그리드 어플리케이션

스마트 그리드에서 주로 사용하는 어플리케이션을 전력용 통신 시스템을 바탕으로 아래와 같이 분류할 수 있다.

- AMI[11]: 전기, 가스, 수도 등의 사용 측정 데이터 및, 고객정보 등을 고객 또는 전력회사에 전달하기 위한 시스템이다. 가정의 전력기기 모니터링 및 제어는 HAN에서 처리하지만 통합 데이터와 공급자와 소비자 간의 정보 전달은 NAN과 WAN에서 처리된다.
- Supervisory Control And Data Acquisition (SCADA): 집중 원격 감시 제어 시스템으로 전력설비 및 여러 시설에 대한 상태를 감시하고 제어하는 시스템이다. 이 시스템에서는 전력설비 감시를 위해 주기적인 데이터 전송이 발생되며, 설비 또는 회선 사고 시 제어를 위해 신속한 데이터 전달 및 이에 따른 신뢰성 확보가 필요하다. 이 서비스는 자동 전력 분배 시스템, 자동적인 Line Switch 기능 시스템, 에러 및 결함 문제를 위한 자동 시스템으로 나누어진다.
- Distribution Automation System (DAS)[12]: 배전단의 전력설비를 원격에서 관리, 감시하기 위해 운영되는 시스템이다. 기존 배전자동화 시스템은 단순 제어 및 간단한 상태 정보를 처리하기 위해 사용되었으나 최근 스마트 그리드로의 전력망이 진화함에 따라 스마트 배전시스템에서는 IEC61850 표준을 기반으로 고속의 대용량 데이터 전달이 가능하여야 한다.
- Substation Video Monitoring: 실시간으로 변전소 주변의 영상 정보를 제공하여 각종 범죄를 예방하기 위한 시스템으로 시각화된 정보가 관리자에게 제공된다. [13]과 같은 예를 살펴보면 노드 당 300kbps 정도의 비디오 데이터가 발생한다[13].
- Power Quality Monitoring: 실시간으로 전력품질을 모니터링 하여 주기적으로 운영시스템에 전달한다. 최근 고품질의 전력에 대한 요구가 증가함에 따라 대용량의 데이터 전달이 요구된다.
- Mobile Workforce Service: 현장 직원들이 사용할 수 있는 통신 백본으로 직원들 간 또는 직원과 중앙 시스템과 통신이 제공된다. 이 경우 사용자간 음성 및 비디오 등 다양한 데이터가 발생할 수 있다.
- Power Trading Info: 전력의 현재 가격 및 정보를 소비자에게 제공해주는 시스템이다. 주기적으로 가격 정보가 갱신되며, 필요에 따라 소비자가 정보를 요청할 수 있다.

실제 소비자 및 전력 공급자의 필요에 따라 더욱 더 다양한 어플리케이션들이 적용될 수 있다. 스마트 그리드는 위에 설명한 모든 어플리케이션 및 향후 추가되는 서비스를 지원할 수 있어야 하며, 이를 효율적으로 하기 위해 다양한 연구 및 노력이 필요하다.

3.2 스마트 그리드 환경 시뮬레이션 결과

본 절에서는 스마트 그리드 환경에서 IEEE 802.11s 표준을 기반으로 한 무선 메쉬 네트워크의 성능을 분석하기 위하여 ns-3 시뮬레이터를 사용하였다[14]. *ns*-3은 무선 랜 메쉬 네트워크의 표준인 IEEE 802.11s가 타 시뮬레이터에 비해 비교적 충실하게 구현되어 있는 오픈 소스기반의 최신 시뮬레이터이다. 본 시뮬레이션을 위한 주요 변수의 설정은 표 1과 같다.

메쉬 노드는 단일 홉 간격의 격자(Grid)구조로 배치되어 NAN/WAN 범위의 네트워크를 구성한다. 하나의 메쉬 노드는 50개의 HAN 노드에 해당하는 데이터를 처리하며, 이 때 발생하는 트래픽은 표 2와 같다[11,-13]. 각각의 메쉬 노드는 토폴로지의 가운데에 위치한 게이트웨이에게 데이터를 전달한다. 트래픽의 종류는 크게, 요청이 있을 때 반응적으로 발생하는 Power Quality, Power Trading 트래픽과 주기적으로 데이터를 전송하는 SCADA, AMI, Video Monitoring 트래픽으로 나눌 수 있다.

반응적으로 발생하는 트래픽인 Power Quality와

표 1. 시뮬레이션 환경

구분	내용
시뮬레이션 시간	600s
Radio Type	802.11a
메쉬 노드 수	16, 25, 36, 49
Topology	Grid (4x4. 5x5, 6x6, 7x7)

표 2. 스마트 그리드 트래픽

	우선순위	패킷크기	발생간격
Power Quality Monitoring	높음	35B	반응적
Power Trading Info Update	높음	1400B	반응적
SCADA	높음	320B	주기적 (0.1초)
AMI	낮음	5B	주기적 (18초)
Substation Video Monitoring	낮음	1024B	주기적 (0.0267초)

Power Trading은 각각 10~30sec, 100~300sec를 기준으로 Uniform random distribution에 기반하여 발생시켰다. 주기적 방법 트래픽에서 SCADA는 0.1초 간격으로 320B가 발생하며, AMI는 18초 간격으로 3B가 발생하고, Video Monitoring은 0.0267초 간격으로 1024B가 발생하며, 이는 초당 300Kbps에 해당한다. 여기서, 변전소 감시를 위한 Video Monitoring 데이터는 전체 노드의 10%만 발생시킨다[15, 16, 17].

그림 3과 그림 4는 노드의 개수가 변화함에 따라 패킷 전송률과 지연시간을 어플리케이션 종류 별로 비교하였다. 메쉬 노드가 4x4로 구성되었을 때에는 95%이상의 패킷 전송 성공률을 보장할 수 있었고, 지연시간도 매우 낮은 것을 볼 수 있다. 그러나 그림 3에서 패킷 전송 성공률은 네트워크의 크기가 커질수록 감소함을 확인할 수 있다.

이 시나리오에서는 모든 노드가 트래픽을 발생시키므로 노드의 수가 증가함에 따라 트래픽의 양이 급격하게 증가한다. 노드의 수가 7x7일 경우, 노드의 수가 4x4일 경우보다 3배 이상의 트래픽이 발생하여 게이트웨이에 처리해야하는 데이터양이 급격히 많아지고

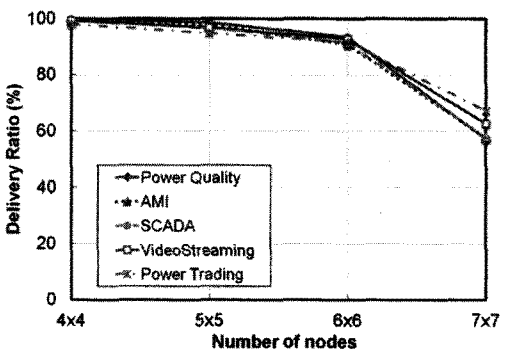


그림 3. 어플리케이션 별 패킷전송률 결과

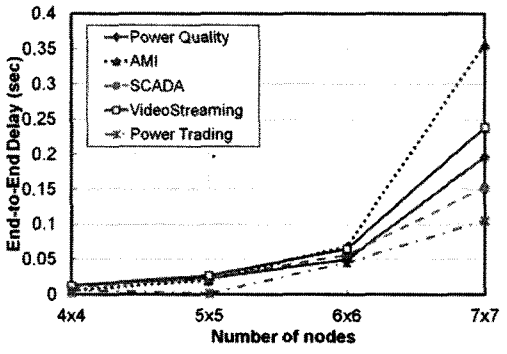


그림 4. 어플리케이션 별 지연시간 결과

혼잡상황이 더 악화된다. 그 결과, 위의 그래프와 같이 네트워크 전체의 평균 패킷 전송 성공률이 99.51%에서 59.09%로 심하게 줄어들고 평균 지연시간은 9.9ms에서 210.4ms까지 증가하는 것을 확인 하였다. 스마트 그리드 환경에서는 넓은 범위를 포함하고 대용량 데이터를 효율적으로 전송해야 되므로 높은 성능을 필요로 한다. 또한, 스마트 그리드에서 전력 관련 데이터들은 다른 데이터들과 달리 고신뢰성으로 전송 되어야한다. 따라서 스마트 그리드에서 무선 메쉬 네트워킹 기술을 적용하였을 때 특히 우선순위가 높은 전력 관련 데이터들은 네트워크의 크기가 증가하여도 높은 패킷전송률과 낮은 전송시간을 보장할 수 있는 기법이 필요하다. 또한, 대용량 데이터를 처리할 수 있는 높은 처리량과 데이터를 목적지까지 전송시킬 수 있도록 신뢰성을 높이는 기법이 필요하다.

Ⅳ. 스마트 그리드를 위한 IEEE 802.11s 기반 무선 메쉬 네트워크 주요 연구 이슈

무선 메쉬 네트워크의 경제성 및 확장성을 바탕으로 여러 제조사들이 무선 메쉬 네트워크를 스마트 그리드 통신 기간망으로 활용하고자 노력하고 있다[18]. 그러나 아직 전력망의 특성을 고려하여 스마트 그리드에서 요구하는 다양한 조건들을 완벽하게 만족시키기에는 부족함이 있다. 본 장에서는 무선 메쉬 네트워크 표준인 IEEE 802.11s를 스마트 그리드 환경에 도입하였을 때 발생할 수 있는 문제점을 파악하고 그에 따른 주요 연구 이슈에 대하여 설명한다.

4.1 고신뢰성 (High Reliability)

스마트 그리드 환경에서는 공급자와 소비자 간의 서로 정보를 전송하고, 전력 시스템을 원격으로 관리할 수 있다. 이런 정보들은 전력계통의 안전성과 밀접하게 연관되어 있다.

공급자는 실시간으로 소비자가 사용하는 전력 및 전자 제품의 유형 등 다양한 정보를 반영하여 부하 량에 따른 안정된 전력을 제공할 수 있다. 또한, 발전, 송배전 시스템과 같은 전력 계통 정보에 따라 전력시스템 동작을 관리한다. 소비자는 전기 에너지 가격, 품질 등의 실시간 정보들을 토대로 스스로 전력 사용 시간을 조절하고, 사용하고 있는 전기 제품들에 공급되는 전기 품질을 정할 수 있다. 이러한 정보들은 에너지 효율 관리와 연관되어 있기 때문에 반드시 정확하게 전송되어야 한다.

무선 메쉬 네트워크에서는 신뢰성을 보장하기 위한

다양한 기법들이 존재하고 있다. 앞에서 설명한 것과 같이 스마트 그리드 환경에서는 중요한 정보가 전송되므로 100%에 가까운 신뢰성을 보장하여야 한다. 더 높은 신뢰성을 높이기 위해서 다음과 같은 기술들이 사용될 수 있다.

- **전송률 제어 기법:** 데이터의 전송 속도를 제어하여 신뢰성을 높일 수 있다. 데이터 전송이 원활하지 않을 경우 전체적으로 전송 속도를 낮추어 모든 데이터가 전송될 수 있게 한다. 또한 우선순위가 낮은 데이터의 전송을 억제하여 우선순위가 높은 데이터가 신속하게 전송될 수 있도록 한다.
- **효율적인 재전송 기법:** 여러 문제로 인하여 데이터 전송이 실패하여 데이터 패킷이 전달되지 않았을 때, 이를 신속하게 감지하고 재전송을 통하여 신뢰성을 높일 수 있어야 한다. 반면, 심한 패킷 재전송은 혼잡 상황 및 전송 지연 시간을 증가시킬 수 있기 때문에 이를 효율적으로 제어하는 알고리즘이 필요하다.

4.2 고성능 (High performance)

스마트 그리드가 활성화됨에 따라 전력 계통의 품질 정보 뿐 아니라 품질 정보를 이용한 다양한 어플리케이션이 활용될 수 있다. 실제 고품질의 전력을 제공하기 위해 실시간으로 품질 모니터링을 수행하며 이로 인해 대용량의 데이터가 발생한다. 이러한 대용량 데이터를 신뢰성 있게 전송하기 위하여 보다 높은 데이터 처리량이 요구된다. 이러한 기능을 제공하기 위하여 아래와 같은 해결책이 제시될 수 있다.

- **다중 경로 설정:** 다중 경로를 설정하여 데이터를 서로 다른 경로로 전송하여 많은 데이터를 빠른 속도로 전송할 수 있다. 또한, 무선 메쉬 네트워크의 특징을 살려 다중 게이트웨이로 가는 다중 경로를 이용하여 데이터를 전송할 수 있다. 처리량 향상을 위해서는 다중 경로 사이의 간섭이 발생하지 않도록 경로를 구성하기 위한 기법이 필요하다.
- **다중 채널 사용 기법:** 다중 채널을 사용하여 네트워크의 처리량을 높이고, 메쉬 노드 간 간섭하지 않는 채널을 선택하여 라디오 간섭을 줄일 수 있다. 이는 노드 간 히든 노드 문제를 해결하고 대역폭의 사용량을 증대시킬 수 있다. 네트워크 환경에 따라 단일 라디오 다중 채널, 다중 라디오 단일 채널, 다중 라디오 다중 채널 등을 사용할 수 있다. 또한, 이러한 환경을 고려한 매트릭을 사용하여 라우팅 경로를 구성하고 채널을 할당하는 알고리즘이 필요하다. 뿐만 아니라 채널이 중복되어 사용되는 경우 다른 채널을 할당할 수 있어야 한다.
- **고속 PHY 기술의 적용:** 무선 랜 표준인 IEEE 802.11n 은 600Mbps 의 전송률을 제공할 수 있다. IEEE 802.11n을 기반으로 하여 메쉬 네트워크를 구축할 경우, 메쉬 네트워크의 특성 및 멀티 홉 네트워크의 특성으로 인하여 발생할 수 있는 효율 감소 및 문제점들을 해결할 수 있다.

4.3 서비스 품질 (Quality of Service: QoS)

스마트 그리드 환경에서는 소비자의 전력 사용 정보가 반영되어 전력요금제가 실시간으로 변동된다. 실시간 요금제를 바탕으로 소비자는 전력요금이 비싼 피크 부하시간에는 전자제품들의 사용을 줄이고 저렴한 시간대를 이용하여 경제적으로 사용할 수 있다. 그러므로 에너지를 경제적으로 사용하기 위해서 전력계통의 데이터를 실시간으로 처리할 수 있는 기법이 필요하다.

전력계통 데이터뿐만 아니라 감시 체계 데이터 등 다양한 데이터가 전송될 수 있다. 데이터 타입은 감시, 제어, 스트리밍 등이 있으며 각각 다른 패킷 크기와 전송 우선순위를 가지고 있다. 이러한 특성에 따라 각 전송 패킷의 양과 요구 시간이 다르다. 효율적인 데이터 전송을 위하여 각각 데이터의 특성과 우선순위를 고려하여 처리하는 기법이 필요하다. 위 문제를 해결할 수 있는 기법들은 다음과 같다.

- **다중 큐의 활용:** IEEE 802.11e 는 각 데이터의 우선순위에 따라 분류되어 있는 여러 개의 큐를 이용한다. 이를 통하여 우선권이 높은 데이터가 먼저 전송될 수 있는 기법을 제시한다. 하지만 802.11e 기법은 단일 홉 기반으로 디자인되어 있기 때문에 이를 멀티 홉 기반의 메쉬 네트워크에 적합하도록 알고리즘을 수정하는 것이 필요하다.
- **리큐잉 기법:** 우선순위가 높은 데이터는 대개 실시간적인 특성을 가지고 있기 때문에 정해진 특정 전송 시간 안에 전송되어야 한다. 이러한 데이터가 큐 안에 대기하고 있을 경우, 큐잉 지연 시간을 줄이기 위해서 큐의 순서를 우선순위나 전송 시간에 따라 재배치하는 기법을 활용할 수 있다.

4.4 자가 구성 (Self-Configuration)

각 메쉬 노드는 전력 정보의 이용시간 분포, 전력 사용량 등을 자동적으로 계산하여 처리하여야 한다. 이러한 정보들은 에너지 공급과 맞물려 에너지가 제대로 분배되지 않으면 집, 회사 등에서 진행하고 있는

작업이 원활하게 이루어지지 않게 된다.

또한 인력 자원을 줄이고 네트워크의 견고성을 증대시키기 위하여 여러 면에서 네트워크의 속성 및 작업을 자동화시킬 수 있어야 한다. 특히, 다음과 같은 자동화 시스템은 네트워크의 효율성을 증가시킬 수 있다.

- 자동 망 구성 기법: 모든 작업이 원활하게 수행되기 위하여 스마트 그리드 메쉬 망에 접속되어 있는 장치들은 스스로 망 구성을 해야 한다. 접속이 원활하지 않는 망에 연결된 메쉬 노드들은 자동적으로 전송이 원활한 곳으로 연결하여야 한다.
- 자동 망 회복 기법: 네트워크의 환경의 변화로 에러가 발생하거나 메쉬 노드 자신에게 문제가 발생하였을 경우 이를 신속하게 감지하고 복구할 수 있는 기법이 필요하다. 문제를 감지한 경우 경로를 지역적으로 재구성하거나 게이트웨이에게 보고하는 방법 등 전체적인 재구성 작업을 자동적으로 실시할 수 있는 알고리즘이 필요하다.

4.5 보안성 (Security)

스마트 그리드 환경은 다양한 장소에서 접근하여 실시간으로 에너지 정보를 확인하고 검침할 수 있도록 한다. 해당 정보를 접근하는 위치가 다양하면 다양할수록 정보가 누설될 확률도 증가한다.

누설된 정보는 다양한 형태로 변형되어 배전 또는 발전 정보와 같은 전력 계통에 전송될 수 있다. 전력 시스템에 영향을 미치면 원활한 전력공급이 어려우며, 필요하지 않은 잉여 에너지를 발생시켜 막대한 에너지 손실을 불러온다. 또한, 누설된 정보를 이용하여 개인의 이득을 추구하거나 개인의 사생활을 침해할 수 있다. 따라서 무선 메쉬 네트워크에서 보안을 고려한 다양한 어플리케이션을 통하여 소비자 및 공급자에게 신속히 전송할 수 있어야 한다.

- 보안 표준 적용 기법: 무선 메쉬 네트워크는 802.11에서 제공하는 802.11i 기반의 MAC 표준과 WiFi WPA/WPA2 등의 무선 보안 프로토콜을 적용할 수 있다. 스마트 그리드에서 보안은 개인의 사생활뿐만 아니라 국가의 에너지와 연관이 되기 때문에 믿을 수 있는 표준을 따르는 것이 필요하다.
- 보안 인증 적용 기법: 사용자 및 기기의 인증을 통하여 정당한 사용자인지, 목적 대상에 맞는 제품인지 인증할 수 있는 기법들이 필요하다. WPA, RSN 알고리즘과 같은 무선 랜 상에서 패킷의 보안성을 유지하는 encryption, decryption 하는 방법들이 고안되어야 한다.

4.6 확장성 (Scalability)

스마트 그리드 환경에서는 수백 개의 장치들이 네트워크에 연결되어 공급자와 소비자 사이에 다양한 정보들을 교환한다. 소비자들은 이러한 정보들을 집 안에서 뿐만 아니라 집 밖에서도 다양한 모바일 장비들을 통하여 집 안의 전력 상황을 조절할 수 있다. 또한 공급자는 각 가정, 회사 등에서 사용한 전력 상황을 원격으로 검침할 수 있다.

한정된 장소뿐만 아니라 다양한 장소에서 처리할 수 있도록 망을 구성해야 한다. 하지만 많은 장비를 유선으로 연결하여 망을 구성하는 것은 많은 비용을 불러온다. 이에 반하여 무선 메쉬 네트워크는 멀티 홉 구성이 가능하여 한 대의 유선장비로 여러 장비의 접속을 가능하게 한다. 이에 따라 저비용으로 확장할 수 있다. 하지만 멀티 홉 구성으로 이루어진 인프라가 단일 홉과 같은 효율을 가져올 수 있어야 한다.

V. 결 론

최근 스마트 그리드의 통신 기간망으로 무선 메쉬 네트워크의 활용성이 대두되고 있다. 본 논문에서는 스마트 그리드 통신 기간망 구조에 대해 알아보고, 무선 메쉬 네트워킹 기술을 스마트 그리드 통신기간망에 적용한 사례에 대해 알아보았다. 또한 스마트 그리드를 구성하는 다양한 어플리케이션들을 분석하고 이를 토대로 시뮬레이션 환경을 조성하여, IEEE 802.11s 기반의 무선 메쉬 네트워크의 성능을 분석하였다. 이에 따라서, 현재의 무선 메쉬 네트워킹 기술이 스마트 그리드에 적용되었을 때 발생할 수 있는 문제점과 해결해야 할 이슈에 대한 방향을 제시하였다. 본 논문을 통해 제시한 신뢰성, 처리량, 서비스 품질, 자가 구성, 보안성, 그리고 확장성의 개선을 통해 무선 메쉬 네트워킹 기술이 스마트 그리드 통신 기간망에 효과적으로 적용될 수 있는 기초를 마련할 수 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

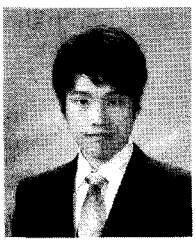
[1] M. J. Lee, et al, "Emerging Standards For Wireless Mesh Technology," *IEEE Wireless Communications*, Vol. 13(2), pp. 56-63, Apr. 2006.

[2] 고동수, "녹색성장 구현을 위한 지능형 전력망 (Smart Grid) 도입전자통신의 발전에 관한 연구", *산업연구원 ISSUE PAPER*, 2009.6
[3] Electric power Research Institute(EPRI), "Report to NIST on the Smart Grid Interoperability Standards Roadmap," Jun. 2009.
[4] "Tropos Grid Com: A Wireless Distribution Area Network for Smart Grids," *Tropos Network white paper*, Jun 2009.
[5] "Smart Grid Solution: Multi-Tier Smart Grid Architecture," *Trilliant, http://www.trilliantinc.com/solution/multi-tier-architecture.*
[6] IEEE P802.11s D5.0 "Amendment: Mesh Networking," Apr. 2010.
[7] Sonoma innovation Draft 1.1 Document, "Smart Grid Communication Architectural Framework - Smart Grid Interoperability Standards IP Protocol & Wireless/AMI," Aug. 2009.
[8] 3GPP TS 36.101 V8.2.0 "3rd Generation Partnership Project," May. 2008.
[9] BP Tiwari "WIMAX 2.0 for Operators," Mar. 2010.
[10] 도윤미 외 7명, "스마트 그리드 기술 동향: 전력망과 정보통신의 융합기술," *전자통신동향분석*, 24(5), Oct. 2009.
[11] K. Hopkinson, et al, "Quality-of-Service Considerations in Utility Communications networks," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 24(3), pp. 1465-1474, Jul. 2009.
[12] "HAMAR1: hamian Fan Automatic meter reading system," *Hamian Fan White Paler, http://www.hamianfan.com/Documents/RD/Hamian_Automatic_meter_reader.pdf*
[13] P. Gill, et al, "YouTube traffic characterization: a view from the edge," *ACM Internet Measurement Conf.*, Oct. 2007.
[14] ns-3.8, "The ns-3 network simulator," www.nsnam.org, May, 2010.
[15] 전력거래소, "가전기기 보급률 및 가정용전력 소비행태 조사," Dec. 2006.
[16] 전력거래소, "2008년도 상용자가발전업체 조사분석," Jun. 2009.
[17] 한국전력공사, "간추려 본 한국전력," Dec. 2009.
[18] "Mesh Networks in Communications Winner in Utility Survey," *http://www.smartgridnews.com/artman/publish/Technologies_Communications_News/Mesh-Networks-Is-Communications-Winner-in-Utility-Survey-1645.html*, Dec. 2009.

정 지 선 (Jisun Jung) 준회원

2009년 2월 아주대학교 전자공학과
2009년 3월~현재 아주대학교 컴퓨터공학과 석사 재학 중
<관심분야> 스마트그리드, 무선 메쉬 네트워크, 데이터 통신

김 재 범 (Jae-beom Kim) 준회원



2010년 2월 한국산업기술대학교 컴퓨터공학과
2010년 3월~현재 아주대학교 컴퓨터공학과 석사 재학 중
<관심분야> 컴퓨터 네트워크, 임베디드 시스템, 모바일 컴퓨팅

고 영 배 (Young-Bae Ko) 정회원

1991년 2월 아주대학교 전자계산학과
1995년 2월 아주대학교 경영대학원 경영정보학과 석사
2000년 7월: 텍사스 A&M 대학 컴퓨터공학과 박사
2000년~2002년 미국 IBM T.J 왓슨 연구소 전임연구원
2002년 9월~현재 아주대학교 정보컴퓨터 공학부 부교수
<관심분야> Mobile Ad Hoc Networks, Wireless Mesh Networks, 스마트 그리드, 사물지능통신, 군 전술네트워크 등

이 상 염 (Sang-Youm Lee) 정회원

1996년 2월 동국대학교 전자공학과

2007년 2월 충남대학교 정보통신공학과 석사

1984년 12월~현재 KEPCO Research Institute 녹색성장연구소 책임연구원

<관심분야> 스마트그리드, AMR/AMI