

EPON을 기반으로 한 해상 풍력 단지 통신망 구조

정진호*, 양원혁*, 김영천°

EPON Based Communication Network Architecture for Offshore Wind Power Farm

Jin-Hyo Jung*, Wonhyuk Yang*, Young-Chon Kim°

요약

최근 풍력 발전 단지가 대형화 해상화됨에 따라 이를 모니터링하고 제어하기 위한 통신망의 중요성이 높아지고 있다. 본 논문에서는 해상 풍력 단지에서 사용하는 기존 Ethernet 기반의 통신망의 문제점인 지연시간, 데이터 처리 오버헤드 및 풍력 발전기 간 데이터 전송의 공평성 문제를 해결하기 위하여 EPON(Ethernet Passive Optical Network) 기반의 통신망 구조를 제안하고 성능 평가를 수행한다. 제안한 구조는 OLT(Optical Line Terminal)를 중앙 제어 센터에 설치하고 해상의 풍력 발전기에 ONU(Optical Network Unit)를 설치하여 점 대 다점 통신망을 구성하는 토폴로지이다. EPON 기반 토폴로지는 수동소자를 사용함으로써 망 구성 비용이 저렴하고 관리가 용이하며 높은 신뢰성과 데이터 전송의 공평성을 보장할 수 있다. 제안한 통신망 구조의 성능을 평가하기 위하여 OPNET Modeler를 이용하여 IEC 61850 표준을 기반으로 한 풍력단지를 모델링한다. 시뮬레이션 결과는 기존 이더넷 기반의 통신망과 지연시간, 오버헤드 및 전송의 공평성 관점에서 비교 분석한다.

Key Words : Wind Power, EPON, SCADA, IEC, Network Architecture

ABSTRACT

In recent, the communication networks of wind power farm are becoming crucial technologies for monitoring and controlling the large-scale offshore wind power farm. In this paper, EPON based communication network architectures are proposed in order to combat the problems of conventional Ethernet based communication network such as delay, data processing overhead and the fairness of data transmission among turbines in offshore wind power farm. The proposed architecture constructs the point to multi-point network by using OLT and ONUs installed in central control center and wind turbines respectively. The EPON based communication network architecture has low cost, high reliability, and fair transmission capability. To evaluate the performance of proposed architectures, the wind power farm based on IEC 61850 is modelled by using OPNET The simulation results are analyzed and compared with conventional Ethernet based communication network in terms of the overhead, delay and fairness of data transmission.

I. 서론

최근 화석 에너지 사용에 따른 환경 및 화석 에

너지 문제를 해결하기 위해 신재생 에너지인 풍력 에너지가 많은 주목을 받고 있다. 풍력 에너지는 뛰어난 경제성과 친환경적 전력생산 과정, 무한 전력

※ 이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2012-0009152)

♦ 주저자 : KT 네트워크관제센터, jinyo.jung@kt.com, 정회원

° 교신저자 : 전북대학교 IT정보공학부 스마트그리드연구센터, yckim@jbnu.ac.kr, 종신회원

* 전북대학교 BK21 사업단, whyang@jbnu.ac.kr

논문번호 : KICS2012-10-472, 접수일자 : 2012년 10월 1일, 최종논문접수일자 : 2013년 1월 11일

생산성 등의 장점을 인정받아 전 세계적으로 연 평균 30%의 성장률을 보이고 있다^{1,2)}.

풍력 에너지 생산을 위한 풍력발전은 풍속, 풍향, 풍량 등 풍황 조건에 의존적이므로 육상보다 해상에 수십에서 수백 개의 풍력 발전기 연결하는 대형 해상 풍력단지로 조성되는 추세이다. 따라서 풍력 단지 운영자가 대형화 및 해양화되는 풍력 단지를 원격 제어를 통해 효율적인 모니터링과 제어를 위해 통신망의 역할이 중요해지고 있다^{3,12)}.

해상 풍력단지의 물리적 통신 구조는 통신선과 전력선을 같이 설치하기 때문에 전력계통의 구조에 의존적이다. 따라서 해상 풍력단지의 통신망 구조는 전력계통 구조와 유사하게 일반적으로 방사형, 순환형 및 성형 구조로 구성된다⁴⁾. 또한 전기 변전소 자동화(Electrical Substation Automation) 표준안인 IEC 61850에서 풍력 발전기, 풍력 단지, 중앙 제어 센터와 풍력 단지 통신으로 구분되는 계층적 통신 구조를 권고하고 각 계층 및 장비 · 장치를 다 대 다점으로 연결하는 버스형 통신 구조를 권고한다⁵⁾. 하지만 버스형 통신 구조는 전력계통 구조 상 요구될 수 있는 링형, 성형 등의 구조를 수용하기 어렵고 망 자원을 공유하기 때문에 중부하(heavy traffic) 상황에서 트래픽 지연 시간과 트래픽 손실이 증가하는 등 서비스 품질(Quality of Service : QoS)을 보장하기 어렵다. 만일 허브를 이용한다면 다양한 통신망 구조를 구축할 수 있지만 풍력발전기 사이의 거리가 최소 수 m에서 수 km인 대단위 풍력단지에서는 허브의 거리 제약으로 인하여 망 구축에 어려움이 있다. 또한 스위치 이더넷 기반 통신 구조는 원격 단말 장비(Remote Telemetry Unit : RTU)가 중앙 제어 센터와 통신을 위해서는 물리적으로 중앙 제어 센터와 해당 장비 사이에 위치한 다른 풍력 발전기의 통신 장비들을 통해야만하므로 데이터 전송 오버헤드를 증가시키고 풍력 발전기 간 전송 기회의 불공평성을 야기하여 적합하지 못하다. 따라서 대단위 풍력단지 전력계통에 의존적인 물리적 통신 구조와 IEC 61850의 논리적 통신

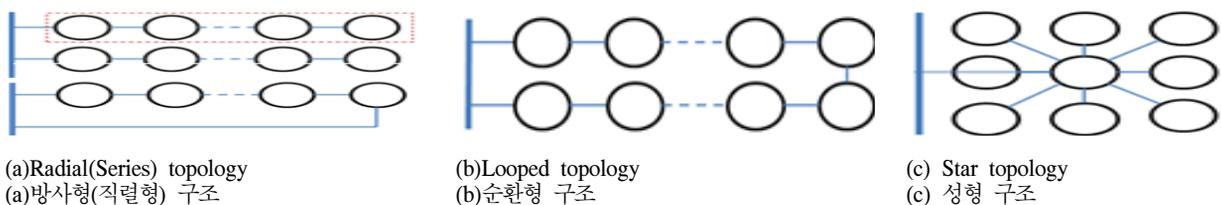
구조의 요구사항을 만족시킬 수 있는 중앙 계층 장치와 원격 단말 장비가 점 대 다점으로 연결하면서도 QoS를 보장할 수 있는 통신 구조가 필요하다^{6,7)}.

따라서 본 논문에서는 효율적인 해상 풍력 단지를 위한 EPON 기반의 통신망 구조를 제안하고, 이에 대한 성능을 평가한다. 제안한 통신망 구조는 해상 풍력 단지 전력계통 구조와 IEC 61850의 논리적 통신 구조에 맞게 OLT를 중앙 계층 장치에 설치하고 ONU를 풍력 발전기에 설치하여 분배기를 이용하여 연결하는 점 대 다점 구조로 구성되며 EPON 구조의 특징인 분배기를 활용하여 해상 풍력 단지의 전력계통 구조에 적합한 방사, 순환 및 성형 구조를 가질 수 있다. 제안한 구조를 사용함으로써 기존 보더 저렴한 운영 및 유지가 가능하며 해상 풍력 단지의 점 대 다점 통신망 요구사항과 중부하에서 요구하는 QoS를 만족시킬 수 있다. 제안한 EPON 기반 통신망 구조의 성능평가를 위해서 OPNET Modeler를 이용하여 기존 Ethernet 기반 및 제안한 통신망 시뮬레이터를 구현하였다. 또한 이전의 망 전송 부하만을 고려한 트래픽 환경과 다르게 실제 풍력 단지의 모니터링을 위해 사용되는 SCADA(Supervisory Control and Data Acquisition)의 감지/기록⁸⁾ 장치를 고려한 트래픽 모델을 적용하여 데이터 전송 오버헤드, 전송 지연 및 공평성 관점에서 성능을 평가하고 분석한다.

II. 풍력 단지 통신망

2.1. 풍력 단지 통신망의 전력 계통 구조

풍력단지 통신망은 통신선과 전력선이 함께 설치되기 때문에 통신망의 물리적 구조를 설계하기 위해선 전력계통 물리적 구조를 고려해야 한다. 따라서 풍력단지 통신망 요구사항을 분석하기 위해서는 전력계통의 물리적 구조가 중요하다. 전력계통 물리적 구조는 그림 1과 같이 방사형, 순환형, 성형 구조로 구성된다⁴⁾.



(a) Radial (Series) topology
(a) 방사형(직렬형) 구조

(b) Looped topology
(b) 순환형 구조

(c) Star topology
(c) 성형 구조

그림 1. 풍력 단지 전력계통 구성 방법
Fig. 1. Power line construction for wind power farm

그림 1 (a)는 방사형 구조로서 10여개의 풍력 발전기가 공급 장치(Feeder)에 일렬로 연결되어 동일 계층을 이루는 구조이다. (b)는 순환형으로 직렬형 구조에서 전력선의 신뢰성을 보장하기 위해 우회 전력선을 공급 장치에 연결하는 구조이다. (c)는 성형으로 중앙 풍력 발전기를 중심으로 공급 장치가 중앙 풍력 발전기와 동일 계층을 이루는 풍력 발전기를 점 대 점으로 연결되는 구조이다.

대단위 풍력단지 전력계통 구조는 그림 2와 같이 수개의 소규모 전력계통이 공유된 공급장치에 연결되면서 중규모 전력계통을 이루고 수개의 중규모 전력계통이 공유된 공급 장치에 연결되면서 대단위 풍력단지를 이루는 계층적 구조를 갖는다^{4,5)}.

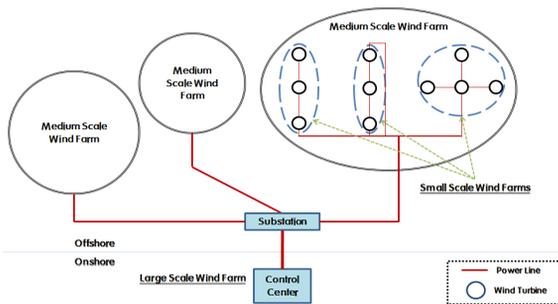


그림 2. 풍력단지 전력계통 구조
Fig. 2. Power line structure of wind power farm

2.2. 전력 및 풍력 단지 통신망 표준

IEC 61850 표준에서는 풍력단지와 같이 전력계통 배전환경을 고려한 전력 자동화 시스템에서 서로 다른 사업자 간의 통신망의 논리적 구조 표준을 권고하고 있다. IEC 61850에서 정의한 통신망 구조는 풍력 발전기 내부 통신망, 풍력 단지간의 통신망, 중앙 제어 센터와 풍력 단지 통신망으로 구분되는 계층적 통신망 구조를 연결하기 위해 다 대 다 통신이 가능한 구조를 지향한다. IEC 61850를 고려한 버스형 구조 기반의 전력 자동화 시스템의 통신 계층은 스테이션 레벨, 베이 레벨, 프로세스 레벨의 3개 계층으로 구분되며 각 계층은 다음과 같은 특징을 고려하여 풍력단지 통신망 구조를 설계해야 한다.

- 프로세스 레벨 : 변전소의 센서/트랜스듀서 데이터를 베이 레벨의 장치에 전송, 베이 레벨에서 명령 수신 및 이에 따른 스위치 레벨 제어, 풍력 발전기의 감지/기록 정보 및 중앙 제어 센터의 명령을 처리
- 베이 레벨 : 베이의 데이터를 수집 및 전력회

로 동작, 각 베이 레벨 디바이스는 자신이 속한 베이의 데이터뿐만 아니라 외부 베이의 데이터를 수집 및 명령 수행, 풍력 발전기 간의 통신망을 통한 보호 및 제어와 정보를 교환

- 스테이션 레벨 : 프로세스 관련 기능과 인터페이스 관련 기능으로 구분, 프로세스 관련 기능은 각 주요장치에 명령 정보를 전송 및 데이터를 수집, 인터페이스 관련 기능은 HMI(Human Machine Interface) 및 TCI(Thyristor Controlled Inverter)를 통해 변전소 관리, 중앙 제어 센터와 풍력 발전기 통신망

III. EPON 기반 해상 풍력 단지 통신망 구조

3.1. 해상 풍력 단지 통신망 요구사항 분석

현재 IEC 61850은 풍력단지 통신망 구조를 3계층 논리적 구조로 구분하고 다음 같은 요구사항을 만족시킬 수 있는 이더넷 기반 통신망을 권고하고 있다⁵⁾.

- 모든 장치는 이더넷 기반이며 점 대 점 통신이 가능해야 함
- 모든 데이터는 중앙으로 집중되어야 함
- 계통 구조 상 인근 노드와 통신하는 경우 요구 시간 내에 데이터가 전송되도록 통신 구조를 가져야 함
- MMS, GOOSE, SV 등의 통신 서비스들을 활용할 수 있어야 함
- 통신 네트워크 문제 발생에 대한 백업 구조를 구비해야 함

버스형 구조는 다 대 다 통신이 가능하므로 이러한 요구사항을 만족시킬 수 있으며 직렬 구조 전력 계통에 적합한 통신 구조로 중앙 제어 센터와 원격지 단말 장비를 다 대 다점으로 연결하여 빠른 전송 속도를 보장하는 장점을 갖는다. 하지만 버스형 구조는 링형, 성형이 요구되는 전력계통 구조에 적용이 어렵고 전송 자원을 CSMA/CD 방식으로 공유하기 때문에 중부하 상황에서 패킷 지연 시간이 증가하거나 패킷 손실이 발생하는 등 서비스 품질을 보장하기 어렵다. 이러한 문제를 해결하기 위해 사용하는 스위치 이더넷은 전이중 방식의 통신 구조로 풍력 발전기를 점 대 점으로 연결하기 때문에 물리적 구조가 유연하여 다양한 전력계통 구조를 수용할 수 있는 장점이 있을 뿐만 아니라 전이중 통신 방식으로 통신망의 신뢰성을 보장할 수 있다. 그러나 스위치 이더넷 기반 통신망은 중앙 제어

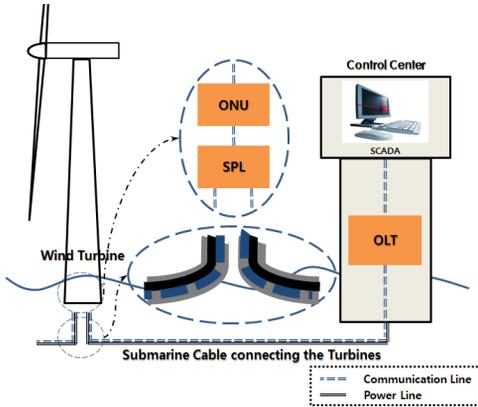


그림 3. EPON 기반 통신망 구조
Fig. 3. EPON based communication architecture

센터와 점 대 점으로 연결되지 못하는 풍력 발전기는 중앙 제어 센터와 점 대 점으로 연결되는 풍력 발전기를 통해서 트래픽을 송/수신하기 때문에 중앙 제어 센터와 전송 기회를 동등하게 보장받지 못한다. 또한 중앙 제어 센터와 점 대 점으로 연결되는 풍력 발전기는 인접 풍력 발전기의 트래픽을 전송해주는 데이터 전송 오버헤드가 발생한다. 따라서 풍력단지 전력계통 구조와 IEC 61850의 논리적 통신 구조의 요구사항을 만족시키면서도 전송의 공평성과 통신의 신뢰성을 보장할 수 있는 통신망 구조가 필요하다. 또한 해상 풍력 단지 통신망은 다음과 같은 요구사항을 추가적으로 만족 할 수 있어야 한다.

- 모든 풍력 발전기 통신 장비에 중앙 제어 센터와 동등한 전송 기회를 보장해야 함
- 다양한 전력계통 구조를 수용해야 함
- 중부하 상황에서도 통신 신뢰성을 보장해야 함

3.2. EPON 기반의 통신망 구조

본 논문에서 제안하는 EPON 기반의 통신망은 LAN 에뮬레이션 기능을 통해 점 대 점 통신을 구현할 수 있어 계통 구조 상 인근에 있는 노드와의 통신에서 요구되는 시간 내에 데이터를 전송할 수 있으며, 중앙 제어 센터나 변전소에 OLT를 설치하고 ONU를 풍력 발전기에 설치하여 OLT와 ONU를 분배기를 이용하여 연결하는 점 대 다점 통신망으로 구성할 수 있다. 그림 3은 이러한 사항을 고려한 EPON 기반 통신망 구조를 보인다. 제안한 통신망 구조에서는 제어센터(Control Center)에 위치한 OLT와 풍력 발전기에 위치한 ONU는 통신 케

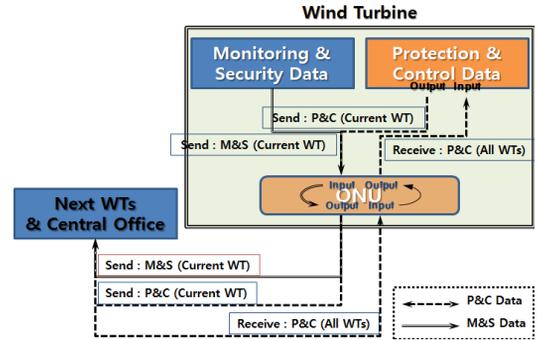


그림 4. EPON 기반 통신망의 트래픽 흐름
Fig. 4. Traffic flow of EPON based communication network

이블로 연결된다. 이때 통신 케이블은 각 풍력 발전기에 위치한 분배기에서 분배되어 이웃 풍력 발전기에 위치한 통신장비와 연결된다. 따라서 해상 풍력 단지에서 요구하는 데이터의 중앙 집중이 가능할 뿐만 아니라 모든 풍력 발전기 통신 장비에 중앙 제어 센터와 동등한 전송 기회를 보장할 수 있다. 그리고 OSI 7계층의 2계층에 해당하는 기술로 MMS, GOOSE, SV 등의 통신 서비스를 지원할 수 있으며, 우회 경로를 고려한 물리적 통신망 설계가 가능하여 통신 네트워크 문제 발생 시 백업 구조로 이용할 수 있으며 다양한 전력계통 구조도 수용할 수 있다. 또한 MPCP(Multi Point Control Protocol)를 이용하여 상향 전송 자원을 공유하기 때문에 중부하 상황에서도 신뢰성이 침해되지 않는다.

그림 4는 제안하는 EPON 기반의 통신망에서 트래픽 흐름을 보인다. 스위치 이더넷 기반 통신망은 자기 노드(풍력 발전기)에서 발생한 보호, 제어 정보(Protection & Control Data : P&C Data) 및 모니터링(Monitoring & Security Data : M&S Data) 트래픽뿐만 아니라 인접한 노드(Current WT)에서 발생한 동일한 트래픽을 수신하여 다음 노드(Next WTs)로 전송하게 되므로 각 노드에 트래픽이 중첩되며 중앙 제어 센터(Central Office)와 가까운 노드일 경우 동일 라인 혹은 모든 노드의 트래픽을 수신하게 되어 모든 노드(All WTs)에서 생성되는 트래픽을 전송하는 데이터 전송 오버헤드가 발생할 수 있다. 스위치 이더넷의 데이터 전송 오버헤드는 식 (1)과 같이 정의될 수 있다.

$$Overhead_{ethernet} = \frac{Transit\ Traffic\ of\ WT}{Total\ Traffic\ of\ WT} \quad (1)$$

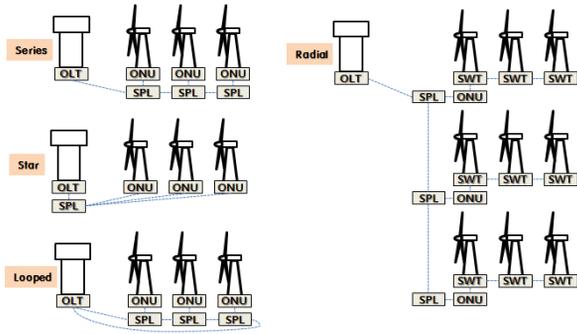


그림 5. EPON 기반 통신망 구조
Fig. 5. EPON based communication network topology

그러나 EPON 기반 통신망은 자신 노드만의 모니터링 트래픽과 보호 및 제어 트래픽을 OLT에 보내고 동일 계층 모든 풍력 발전기의 보호 및 제어 트래픽을 OLT를 통해 수신하게 된다. 따라서 EPON 기반의 통신망은 현재 풍력 발전기의 트래픽만을 전송하면 되기 때문에 인접 풍력 발전기에 의한 데이터 전송 오버헤드는 발생하지 않지만 상향 전송 자원을 MPCP를 통하여 송수신하기 때문에 제어메시지의 크기만큼의 데이터 전송 오버헤드가 발생한다. EPON의 전송 오버헤드는 식 (2)와 같이 정의할 수 있다.

$$Overhead_{EPON} = \frac{Traffic\ of\ Control\ Message}{Total\ Traffic\ of\ WT} \quad (2)$$

이러한 EPON 기반의 통신망 구조와 데이터의 흐름을 이용하여 직렬형, 성형, 순환형, 방사형 등 다양한 전력계통 구조와 함께 사용할 수 있는 점 대 다점 구조를 구성할 수 있다. 그림 5는 풍력 단지 전력계통 구조의 통신망 구성의 예를 보인다. EPON 기반의 통신망 구조는 직렬형, 성형, 순환형, 방사형 구조 모두 분배기를 통해 점 대 다점으로 구성되기 때문에 모든 풍력 발전기가 점 대 다점으로 중앙 제어 센터와 연결된다. 방사형의 경우 ONU가 소규모 풍력단지의 트래픽을 수용하기 때문에 스위치 이더넷 기반 통신의 특징과 EPON 기반 통신망의 특징을 모두 갖는다.

그림 6은 직렬형 통신망에서 스위치 이더넷 기반 통신망과 EPON 기반 통신망의 논리적 통신 구조를 보인다. 그림6과 같이 스위치 이더넷 기반 통신망에 선 풍력 발전기 WT8의 트래픽이 중앙 제어 센터로 전송되기 위해선 WT7부터 WT1까지 모든 스위치를 거치기 때문에 지연 시간이 WT1보다 크다. 반면 EPON 기반 통신망은 모든 풍력 발전기가 직접

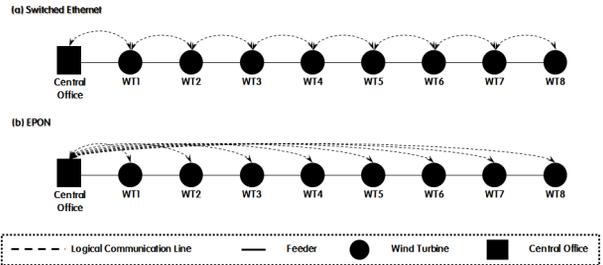


그림 6. 직렬형 구조에서 논리적 통신 구조
Fig. 6. Logical communication topology for serial structure

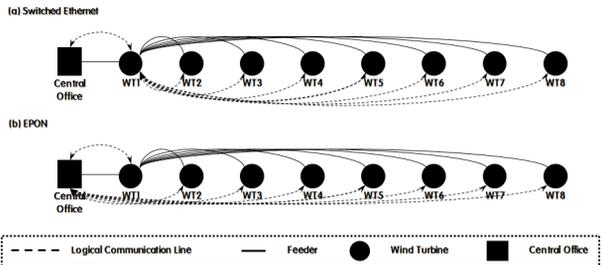


그림 7. 성형 구조에서 논리적 통신 구조
Fig. 7. Logical communication topology for star structure

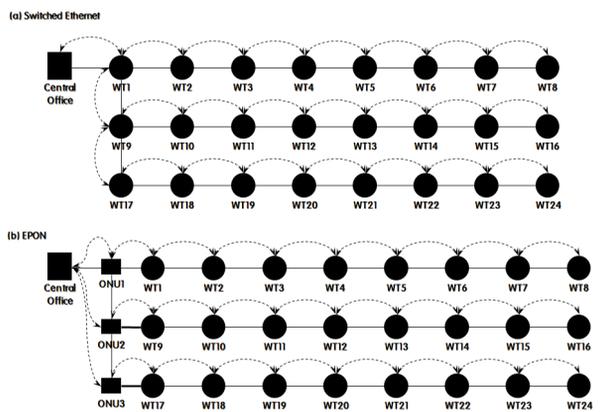


그림 8. 방사형 구조에서 논리적 통신 구조
Fig. 8. Logical communication topology for radial structure

적으로 중앙 제어 센터와 연결될 수 있다.

그림 7은 성형 구조 통신망에서 스위치 이더넷 기반 통신망과 EPON 기반 통신망의 논리적 통신 구조를 보인다. 스위치 이더넷 기반 통신망은 WT2부터 WT7까지 WT1과 점 대 점으로 연결된다. 이를 위해 WT은 점 대 점으로 연결하기 위해 풍력 발전기 마다 서로 다른 포트에 통신선을 연결해야만 하기 때문에 다수의 포트를 가진 고가의 스위치 장비를 이용해야만 한다. 반면 EPON 기반 통신망은 물리적 구조에 상관없이 중앙 제어 센터와 풍력 발전기를 점 대 다점으로 연결할 수 있다.

그림 8은 방사형 구조에서 스위치 이더넷 기반

통신망과 EPON 기반 통신망 구조를 보인다. 이더넷 스위치 기반 통신망은 수개의 소단위 직렬형 풍력단지를 공유된 공급 장치에 연결하여 방사형 중단위 풍력단지를 이루게 된다. 따라서 직렬형 통신망이 갖는 특징과 같이 WT8, WT16, WT24는 각각 WT1부터 WT7까지, WT9부터 WT15까지 WT17부터 W23까지의 풍력 발전기를 거쳐서 중앙 제어 센터로 트래픽을 전송할 수 있다. 게다가 WT9와 WT17로 전송된 동일 계층의 트래픽은 WT1을 통해 중앙 제어 센터로 전송되기 때문에 WT1에서 수용해야 하는 전체 트래픽은 3개의 직렬형 풍력단지에서 생성된 트래픽과 같다. 반면 EPON 기반의 통신망은 WT1, W9, WT17이 수용해야 하는 동일 계층의 데이터 전송 오버헤드는 스위치 이더넷과 같지만 ONU를 이용하여 중앙 제어

트래픽이 몰려 패킷 지연 시간 증가할 뿐만 아니라 패킷 손실이 발생하여 통신 서비스 품질을 보장할 수 없다.

3.3. SCADA 시스템을 고려한 트래픽 모델

기존의 풍력 단지를 위한 통신망 성능평가는 단순한 모니터링 데이터 혹은 평균 입력 부하를 이용하여 실시되었다. 그러나 풍력단지는 SCADA 시스템을 이용하여 원격에서 운영되며 운영에 필요한 데이터 또한 충분히 고려하여 망의 성능을 평가해야 한다. 따라서 풍력 단지 통신망의 성능을 평가하기 위하여 풍력 단지 SCADA 시스템에서 발생하는 트래픽의 종류를 분석하고 필요한 트래픽을 생성하기 위한 트래픽 모델이 요구된다.

SCADA 시스템은 기능에 따라 Balance of plant, Turbine, Security로 구분한다. Balance of Plant는

표 1. SCADA 시스템을 고려한 트래픽
Table 1. Traffic model with SCADA system for wind power farm

Item	Function	Destination	Computation Method	Data
Command	Turbine	WT (Downstream)	Internet traffic	7250 bps
Detection			IEC-61400-25	225,602 byte/sec
Video	Security	Central control center (Upstream)	$128*240(\text{Pixel})*9(\text{bit/pixel})*15(\text{frames/sec})$	4.147 Mbps
Audio			$64\text{kbps} * 4 \text{ channels}$	256 kbps
P & C	Balance of Plant	Central control center and WT (Upstream)	P&C IED + CB IED	76816 byte/sec

센터와 연결되기 때문에 인접 소단위 풍력단지의 트래픽을 수용하지 않아도 될 뿐만 아니라 동일 계층 풍력 발전기끼리 공유해야 하는 보호 및 제어 정보, 지연 시간을 감소시킬 수 있다. 위에서 언급한 소/중단위 풍력단지는 대단위 풍력단지를 구성하기 위한 기본 구조가 된다.

이러한 EPON 기반 통신망 구조는 모든 통신망을 스위치 이더넷으로 구성하는 통신망과 비교하여 다음과 같은 장점을 갖는다. 먼저 대/중단위 풍력단지는 동일 계층에 위치한 풍력 발전기간의 보호 및 제어 정보를 공유하지 않고 중앙 제어 센터의 명령 정보에 의해 운영된다. 따라서 풍력 발전기에서 수집된 정보와 중앙 제어 센터의 명령 정보를 스위치 이더넷 기반 통신망 보다 빨리 전송할 수 있는 EPON 구조가 풍력단지 관리에 적합하다. 또한 모든 스위치 이더넷 기반 통신망을 이용하여 망을 구성할 경우 풍력 발전기의 수가 증가하면 트래픽 중앙 제어 센터와 점 대 점으로 연결되는 스위치가 수용해야 하는 데이터 전송 오버헤드는 풍력 발전기의 수만큼 증가하기 때문에 전송 용량 이상의 트

풍력 발전기 보호 및 제어 기능으로 풍력 발전기 MU(Merge Unit) IED에서 수집되는 전압/전류 정보를 CB(Circuit Breaker) IED와 공유하며 과전류/과전압 시 풍력 발전기를 보호(Protection & Control)하며 Turbine는 풍력 발전기를 모니터링하고 제어 센터의 제어명령을 수행한다. Security는 풍력 발전기 상태를 영상 또는 음성정보 수집한다.

본 논문에서는 풍력 발전기는 Balance of Plant SCADA를 위한 각 1개의 IED를 가지며 발생하는 트래픽은 76,800byte/sec의 MU IED 트래픽과 16byte/sec의 CB IED 트래픽을 고려하였고 Turbine SCADA를 위한 트래픽은 명령과 감지를 위한 데이터로 IEC 61400-25에 따른 데이터를 고려하였다⁹⁾. Security SCADA는 웹 카메라나 마이크로폰과 같은 장치¹¹⁾를 이용하므로 다음과 같이 멀티미디어 압축 기술을 고려하지 않은 1개의 네트워크 비디오 레코더와 4개의 마이크로폰을 고려하였다. 이에 비디오 트래픽은 프레임의 크기를 128(Height) * 240(Width) 픽셀(pixel)로 초당 15 프레임(frames/sec)을 전송하며 해상도(Resolution)는 9 비

트/픽셀(bit/pixel)을 고려하였다. 따라서 비디오 트래픽의 데이터양은 식 (3)와 같다. 오디오 트래픽은 1개의 채널(Channel)은 64Kbps로 4개의 채널을 이용하도록 고려하였다. 따라서 오디오 트래픽 데이터의 양은 식 (4)과 같다.

$$\begin{aligned}
 Datarate_{video} &= (Height * Width) * Resolution * Frames / Second \\
 &= (128 * 240)_{pixel} * 9_{bit/pixel} * 15_{frames/sec}
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

$$\begin{aligned}
 Datarate_{audio} &= Resolution * \# of Channels \\
 &= 64_{kbps} * 4_{channels}
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

표 1에 SCADA 시스템을 고려하여 계산된 트래픽 양을 보였다.

IV. 성능평가 및 분석

본 장에서는 제안한 풍력 단지를 위한 EPON 기반의 통신망 구조의 성능평가를 수행한다. 성능평가를 위하여 OPNET Modeler를 이용한 풍력단지 통신망 모델을 구현하고 다음과 같은 관점에서 시뮬레이션을 수행하였다.

- 풍력 발전기 모니터링 정보 지연 시간
- 중앙 제어 센터 명령 정보 지연 시간
- 풍력 발전기 보호 및 제어 정보 지연 시간
- 풍력 발전기 데이터 전송 오버헤드

이를 위한 시뮬레이션 환경은 표 2와 같으며 발생 트래픽은 표 1에서 보인 SCADA 시스템을 고려한 트래픽 모델을 사용하였다.

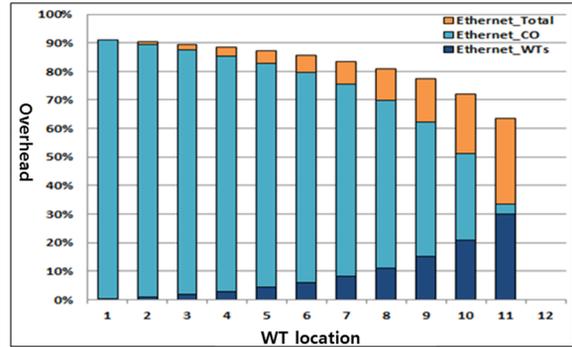
표 2. 시뮬레이션 파라미터 값
Table 2. Simulation parameters

Item	Value
Simulation Time	60s
Number of Control Center	1
Number of WT	12
Transmission Capacity	1Gbps
Propagation & Proc. Time	0
Topology	Serial, Star
Maximum Queue Size	Infinite
Switching(Ethernet)	Store & Forward
BW Allocation(EPON)	Fixed-BA
BW Allocation Period(EPON)	2ms
Control Message(EPON)	512bit
Guard Band(EPON)	5μs

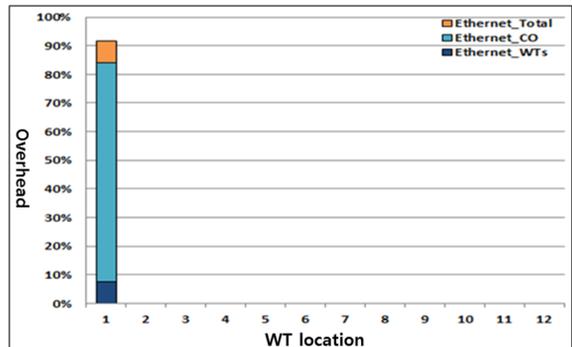
그림 9 (a)는 직렬형 구조의 스위치 이더넷 기반 통신망에서 각 노드의 데이터 전송 오버헤드이다.

이 구조에서 WT1부터 WT11까지 데이터 전송 오버헤드는 이웃 노드에서 생성된 트래픽이며 최대 92%에 달한다. 그림 9 (b)는 성형 구조의 스위치 이더넷 기반 통신망으로 모든 노드에서 생성되는 트래픽이 WT1로 전송되기 때문에 데이터 전송 오버헤드만 92%를 차지한다.

그림 10 (a)는 직렬 구조에서 스위치 이더넷 기반 통신망과 EPON 기반 통신망의 데이터 전송 오

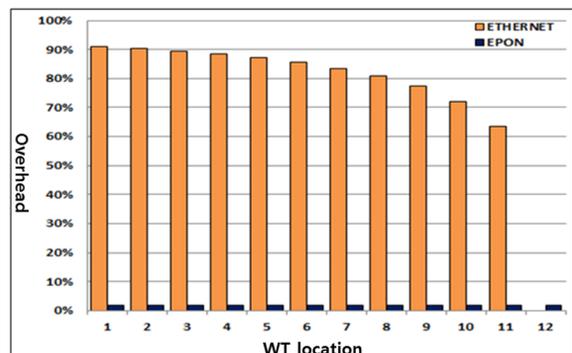


(a) Serial topology
(a) 직렬형 구조

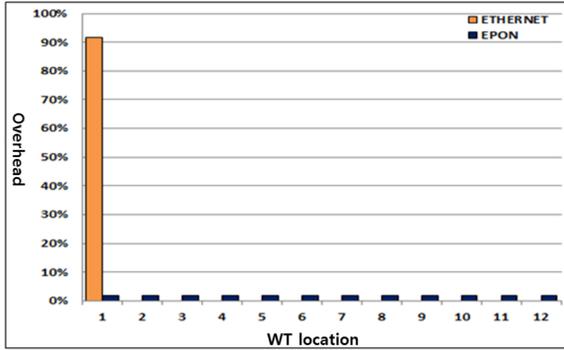


(b) Star topology
(b) 성형 구조

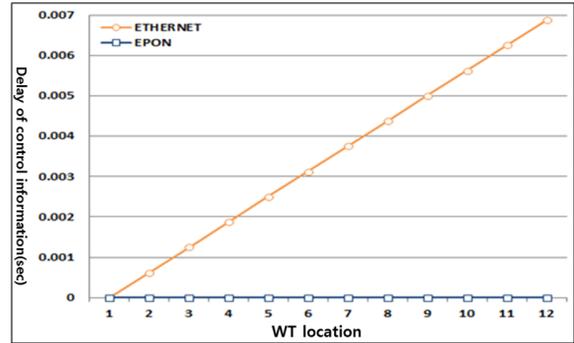
그림 9. 이더넷 기반 통신망의 데이터 전송 오버헤드
Fig. 9. Data transit overhead in Ethernet



(a) Serial topology
(a) 직렬형 구조

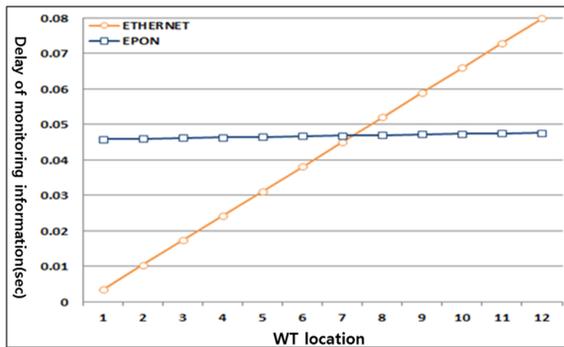


(b) Star topology
(b) 성형 구조

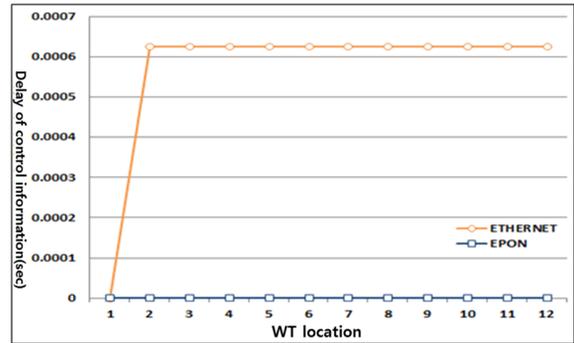


(a) Serial topology
(a) 직렬형 구조

그림 10. 데이터 전송 오버헤드의 비교
Fig. 10. Comparison of data transit overhead

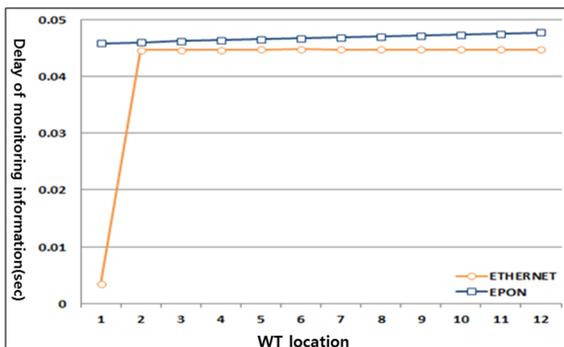


(a) Serial topology
(a) 직렬형 구조



(b) Star topology
(b) 성형 구조

그림 12. 명령 정보 지연 시간
Fig. 12. Delay of control information



(b) Star topology
(b) 성형 구조

그림 11. 모니터링 정보 지연 시간
Fig. 11. Delay of monitoring information

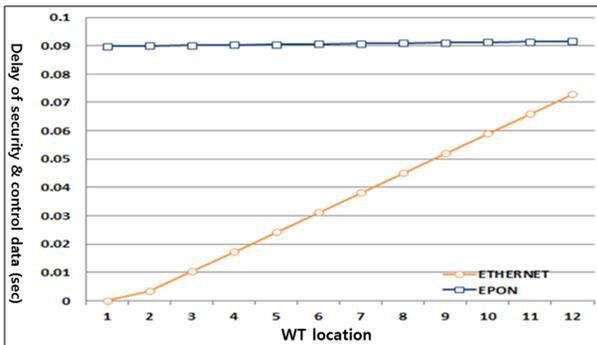
버헤드를 보인다. 이더넷 기반 통신망에서 WT12는 인접 풍력 발전기에 WT12에서 생성된 트래픽 이외에는 전송을 요구하는 트래픽이 없는 반면 WT1부터 WT11까지는 인접 풍력 발전기의 트래픽에 의한 데이터 전송 오버헤드가 전체 전송 트래픽의 65% 이상을 차지함을 알 수 있다.

그림 10 (b)는 직렬 구조에서 스위치 이더넷 기반 통신망과 EPON 기반 통신망의 데이터 전송 오버헤드를 보인다. 성형 구조는 WT1을 중심으로 중앙 제어 센터와 다른 풍력 발전기가 점 대 점으로 연결되기 때문에 WT1로 모든 풍력 발전기 트래픽이 전송된다. 따라서 WT2부터 WT12까지는 현재 트래픽에서 생성된 트래픽만을 전송하면 되기 때문에 데이터 전송 오버헤드는 발생하지 않지만 WT1의 경우 92%에 달하는 데이터 전송 오버헤드를 수용해야 한다. 반면 EPON 기반 통신망은 직렬형 구조와 성형 구조와 상관없이 제어메시지에 의한 일정한 데이터 전송 오버헤드를 발생시키고 전체 트래픽의 3% 수준으로 매우 낮다. 이처럼 스위치 이더넷 기반 통신망은 EPON 기반 통신망과 비교하여 망이 수용해야 하는 데이터 전송 오버헤드가 92%까지 증가시키는 단점을 갖는다.

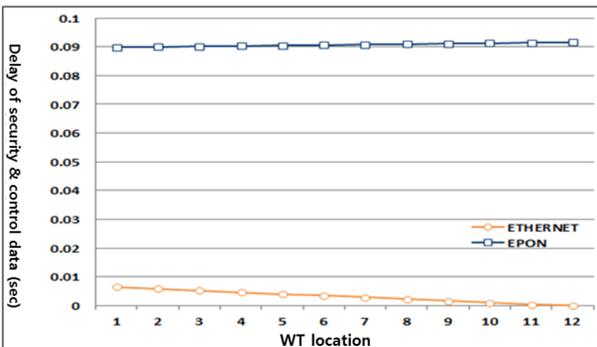
그림 11 (a)는 직렬형 구조의 풍력 발전기에서 생성된 모니터링 정보에 대한 지연시간을 보인다. 스위치 이더넷 기반 통신망의 경우 모든 풍력 발전기의 위치에 따라 지연 시간이 다르다. 이는 스위치 이더넷 기반 통신망에서는 모든 풍력 발전기가 중

양 제어 센터와의 공정한 전송 기회를 보장받지 못하기 때문이다. 반면 EPON 기반 통신망은 모든 풍력 발전기가 동일한 지연 시간을 보인다. 그림 11 (b)는 성형 구조에서 풍력 발전기에서 생성된 모니터링 정보의 지연 시간을 보인다. 직렬형 구조와 마찬가지로 풍력 발전기의 위치에 따라 서로 다른 전송 시간을 보인다.

그림 12 (a)는 직렬형 구조에서 중앙 제어 센터에서 생성된 명령 정보의 지연 시간을 보인다. 스위치 이더넷 기반 통신망은 중앙 제어 센터와 현재 풍력 발전기 사이의 통신을 위해 중간에 연결된 모든 풍력 발전기를 모두 거치기 때문에 전송 지연 시간이 일정히 증가하는 반면 EPON은 모든 풍력 발전기에서 0초에 가까운 지연 시간을 갖는다. 그림 12 (b)는 성형 구조에서 중앙 제어 센터에서 생성된 명령 정보의 지연 시간을 보인다. 직렬형 구조와 마찬가지로 모든 풍력 발전기는 WT1을 통해 데이터를 전송 받기 때문에 그만큼 지연 시간이 증가한다.

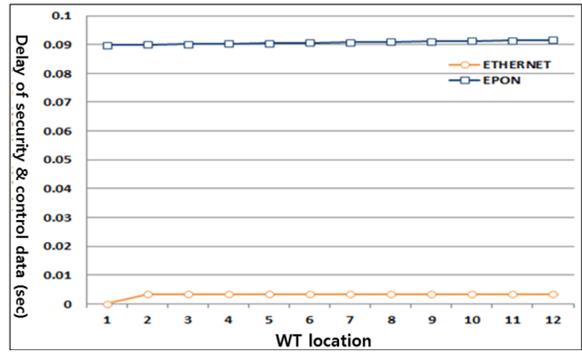


(a) Wind turbine 1
(a) 풍력 발전기 1

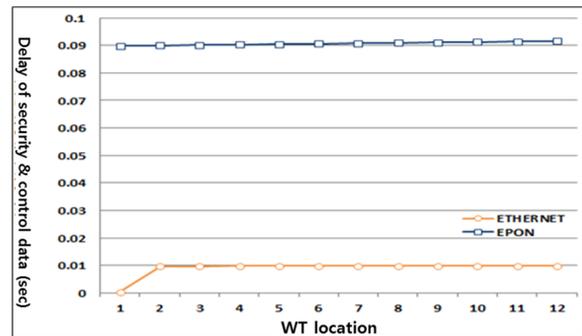


(b) Wind turbine 12
(b) 풍력 발전기 12

그림 13. 직렬형 구조의 보호 및 제어 정보 지연 시간
Fig. 13. Delay of security and control data at serial topology



(a) Wind turbine 1
(a) 풍력 발전기 1



(b) Wind turbine 12
(b) 풍력 발전기 12

그림 14. 성형 구조의 보호 및 제어 정보 지연 시간
Fig. 14. Delay of security and control data at star topology

그림 13 (a)는 직렬형 구조에서 WT1의 보호 및 제어 정보가 이웃 노드로 전송될 때 지연 시간을 보인다. 스위치 기반 통신망과 EPON기반 통신망에서 모두 이웃노드의 수에 따라서 지연시간이 증가하지만 증가폭이 스위치 기반 통신망이 큼을 알 수 있다. 그림 13 (b)는 직렬형 구조에서 WT12의 보호 및 제어 정보가 이웃 노드로 전송될 때 지연 시간을 보인다. 스위치 기반 통신망에서는 WT12와 제어 센터 사이트의 이웃 노드의 수에 비례하여 시간이 감소하지만 EPON기반 통신망에서는 그림 13 (a)와 동일한 정보 지연 시간이 발생한다.

그림 14 (a)는 성형 구조에서 WT1의 보호 및 제어 정보가 이웃 노드로 전송될 때 지연 시간을 보인다. 스위치 기반 통신망과 EPON기반 통신망에서 모두 이웃노드의 수에 따라서 지연시간이 증가하지만 증가폭이 스위치 기반 통신망이 큼을 알 수 있다. 그림 14 (b)는 성형 구조에서 WT12의 보호 및 제어 정보가 이웃 노드로 전송될 때 지연 시간을 보인다. 스위치 기반 통신망에서는 WT12와 제어 센터 사이트의 이웃 노드의 수에 비례하여 시간

이 감소한다. 그림 13, 14 결과를 통해 보호 및 제어 정보에 대한 SLA(Service Level Agreement) 정책을 적용한다면 해당 정보를 지연 시간이 감소시킬 수 있을 것이다.

V. 결 론

최근 풍력 발전 단지가 대형화 해상화됨에 따라 이를 모니터링하고 제어하기 위한 통신망의 중요성이 높아지고 있다. 이에 본 논문에서는 EPON을 기반으로 한 해상 풍력발전 단지 통신망 토폴로지를 제안하였다. 이를 위해 해상 풍력 단지 전력계통 구조와 IEC 61850의 논리적 통신 구조에 맞는 요구 사항을 분석하고, 도출된 요구 사항을 충족시킬 수 있도록 OLT를 중앙 제어 센터에 설치하고 ONU를 풍력 발전기에 설치하여 분배기를 통해 점 대 다점으로 연결하는 구조를 제안하였다. 제안한 구조의 성능 평가를 위하여 SCADA 시스템의 기능을 고려한 트래픽 모델을 구현하고, 이를 OPNET modeler를 이용한 통신망 시뮬레이터에 적용하였다. 성능 평가 결과 제안한 통신망 구조는 기존 이더넷 기반 통신망 토폴로지와 비교하여 상대적으로 균일한 지연 특성과 공평한 데이터 전송 기회를 보장할 수 있었으며 다른 풍력 발전기의 트래픽에 의한 데이터 전송 오버헤드를 감소시킬 수 있었다.

References

[1] World Wind Energy Association, "World wind energy report 2010," Apr. 2011.

[2] Global Wind Energy Council, "Global wind statistics 2010," Feb. 2011.

[3] IEC 61400-25, "Communications for monitoring and control of wind power plants"

[4] S. Dutta, and T. J. Overbye, "A clustering based wind farm collector system cable layout design," in *Proc. PECE*, pp.1-6, Feb. 2011.

[5] IEC 61850, "Communication networks and system in substations"

[6] A. Raza, K. Ullah, S. Ahmed, S. Ahmed, H. S. Jang, and H. S. Yang, "Baseline efficiency in EPON based architecture to

inter-network Substations," in *Proc. IEEE CCC*, pp.1-6, Feb. 2009.

[7] A. Raza, K. Ullah, S. Ahmed, S. Ahmed, H. S. Jang, H. S. Yang, "Gigabit ethernet based substation under IEC 61850 standard," in *Proc IEEE CCC*, pp.1-6, Feb. 2009.

[8] A. L. Pattener, "SCADA and communication networks for large scale offshore wind power systems," in *Proc. RPG*, pp.1-6, Sep. 2011.

[9] M. A. Ahmed, W. H. Yang, Y. C. Kim, "Simulation study of communication network for wind power farm," in *Proc. ICTC*, pp.706-709, Sep. 2011.

[10] A. L. Pattener, "SCADA and communication networks for large scale offshore wind power systems," in *Proc. RPG*, pp.1-6 Sep. 2011.

[11] J. P. Verhoef, P. J. Eecen, R. J. Nijdam, H. Korterink, and H. H. Scholtens, "WT-Bird : a low cost solution for detecting bird collisions", in *Proc. ECN Publication*, pp.1-46, Apr. 2004.

[12] M. A. Ahmed, and Y. C. Kim, "Two-tiered communication network architecture for standalone wind turbine," in *Proc. KICS Winter Conf.*, pp. 51, Feb. 2012.

정진호 (Jin-Hyo Jung)

한국통신학회 논문지 제37권 제2호 참조
2010년 8월~2012년 8월 전북대학교 컴퓨터공학과
2012년 8월~현재 KT 네트워크관제센터 매니저

양원혁 (Wonhyuk Yang)

한국통신학회 논문지 제35권 제7호 참조
2008년 3월~2012년 8월 전북대학교 전자정보공학
부 박사
2012년 9월~현재 전북대학교 BK21사업단 박사 후
과정

김영천 (Young-Chon Kim)

한국통신학회 논문지 제35권 제7호 참조