

IEC61850기반 변전소 자동화에 필요한 스위치 이더넷 네트워크 설계

김병진, 이진, 황보승욱
현대중공업(주)

김정수, 김희수
한전KDN

The Design of Switched Ethernet Network for IEC61850-based Substation Automation

Beung-Jin Kim, Jin Lee, Seung-Wook HwangBo Jong-Soo Kim, Hee-Soo Kim
Hyundai Heavy Industries Co.,Ltd. Korea Electric Power Data Network

Abstract - IEC61850 which has comes to international standard for substation automation is designed with a station and process bus communication with Ethernet.

In this paper, mentioning difference between official networks and substation networks, authors present the requirements for temperature, humidity and EMI characteristics. The properties which network switch should be satisfied and the technologies which make those requirements possible are also proposed. Additionally, we analysis the traffic pattern of communication services which IEC61850 supports. Based on the pattern, we propose a practical design example of IEC61850 based network for a 154kV substation.

1. 서 론

세계의 전력회사들은 변전소내 설비와 케이블의 결선 수를 줄이고 설치, 시운전, 관리와 운전애 소요되는 비용을 절감시키려는 노력을 하고 있다. 기존의 변전소에 사용된 IED는 마스터인 EMS가 요청하는 데이터를 제공하는 슬레이브(slave) 기능으로만 제한되어왔다. 즉 지금까지의 자동화는 EMS와 IED간의 인터페이스를 DNP3.0이나 IEC60870 같은 국제규격을 사용했고 이 통신 프로토콜을 통해서 오직 EMS에서 필요한 SCADA정보만을 전송하고 lockout, blocking 그리고 보호에 필요한 IED간의 정보는 케이블로 결선될 수밖에 없는 실정이었다. 이것은 IED가 필요에 의해서 자치적으로 정보를 주고받을 수 있는 동등계층이 아니고 마스터로부터 버스 제어의 허가를 기다려야 하는 기존의 마스터-슬레이브 통신방식 때문이다[1].

IEC61850은 Ethernet 기반의 통신 네트워크를 채택하면서 고속의 동등계층 통신을 제공하여 변전소내의 복잡한 결선을 간략화 시키고 지금까지 구현하기 어려웠던 보호방식을 쉽게 구현할 수 있는 방안을 제시하였다. 그러나 기존의 케이블 직접 연결방식에서 디지털 통신기반의 IEC61850을 구현하는데 있어 네트워크 설계과정 중에 간과해서는 안 될 중요한 사항이 있다. 또한 이것은 IEC61850에서 정의하고 있는 디지털 통신기반의 통신 네트워크 설계에 주요하게 고려되어야 하는 새로운 작업이다. 먼저 통신설비나 통신케이블에서 발생할 수 있는 사고에 대한 대안을 제시할 수 있는 신뢰성, 필요한 통신 서비스를 제한된 시간에 만족시킬 수 있는 실시간 보장성, 그리고 사업의 당위성을 제공하는 경제성이 주요하게 고려되어야 한다.

본 연구에서는 이와 같은 사용자의 요구를 만족하는 네트워크 구성에 대해 논의하였다. 우선 통신 네트워크를 설계하기 위해서 다음 예시한 것과 같이 다양한 목표를 설정할 수 있다[3].

- a) 통신장비 고장으로 인한 통신 불능 제거
- b) 통신케이블 단선으로 인한 통신 불능 제거
- c) 동등계층 서비스 지연시간 최소화
- d) 동등계층 서비스의 응답시간의 확정성 획득
- e) 최소의 네트워크 관리
- f) 최소의 통신 케이블 가격

변전소내 통신네트워크는 신뢰성이 최우선이며 실시간성과 경제성도 고려되어야 하기 때문에 a)와 b)요소를 중요하게 다뤄야한다. 통신케이블의 단선사고는 장비고장에 비해 발생할 경우가 매우 드문 일이기 때문에 장비고장에 대한 방안을 우선적으로 고려해야한다. 장비 고장과 같은 문제는 네트워크 토폴로지나 IED의 통신포트 이중화를 통해서 해결할 수 있다. c)나 d)는 실시간성을 요구하는 GOOSE 서비스를 위한 것으로 이더넷 스위치나 통신 케이블의 처리능력에 따라서 결정된다. e)는 이더넷 스위치에서 제공하는 네트워크 관리의 용이성에 대한 문제이며 f) 사항은 통신 케이블 가격의 하락으로 더 이상 고려 대상이 되지 않는다.

본 연구에서는 먼저 변전소 네트워크 구성의 중심인 이더넷 스위치가 가져야하는 중요한 특징과 기술에 대해서 언급하였고 IEC61850에서 정의된 3 가지 통신서비스의 트래픽 패턴을 분석하였다. 이와 같은 정보를 기반으로 실제 한전 154kV 변전소에 적용될 수 있는 네트워크를 설계하였다.

2. 본 론

2.1 변전소 자동화를 위한 이더넷 스위치

대부분의 통신 네트워크가 이더넷에 기반을 두고 있지만, 이더넷이 자동화를 위해 많이 사용되고 있지는 않다. 이는 다음과 같은 설치장소 주변의

전자기적, 환경적인 문제가 주요한 원인이다[3].

- a) 전자계에 의한 전자기적인 열악한 환경
 - b) 운전애 필요한 넓은 온도와 습도 범위
- 전자기적인 간섭(interference) 때문에 통신 케이블은 구리(copper)케이블에서 광섬유로 대체되어야 하며, 스위치는 IEC 61000-4 같은 관련 규정을 만족해야한다. 이와 더불어 환경적인 요건을 만족하기 위해서 IEC 60068-2에 명시된 온도와 습도 조건을 만족해야한다. 물론 이더넷 스위치가 옥내변전소의 제어실에 설치되면 좀 더 완화된 규정을 만족하는 제품을 사용해도 무관하다.

환경적인 요건보다 이더넷을 자동화분야에 도입시키는데 커다란 장애가 된 것은 실시간성의 보장 여부이다. 이더넷이 갖는 CSMA/CD 방식의 버스 접근방식은 정해진 시간 내에 통신서비스를 보장해야하는 자동화 분야에 맞지 않는 것으로 전해져 왔다. 이러한 어려움을 극복하기 위해서 다음과 같은 방식들이 제안되었다[4].

- a) 전이중방식(IEEE 802.3x)을 이용한 충돌저감
- b) GOOSE와 같은 긴급 데이터 서비스(IEEE 802.3p)
- c) 네트워크 망의 장애 감지와 복구(IEEE 802.1w)
- d) 브로드캐스팅 도메인의 감소 방안(IEEE 802.1Q)

이더넷 허브(hub)와 달리 이더넷 스위치는 a)와 b) 사항을 만족하며 설계자는 스위치의 속도를 결정하는 버퍼의 크기와 속도(bandwidth)나 지연(latency) 시간을 신중히 고려해야한다. 네트워크 설계자는 위의 모든 사항을 만족하는 이더넷 스위치를 사용하고, 스위치의 속도를 결정하는 버퍼의 크기나 속도 및 지연시간을 신중하게 고려하여 설계해야 할 것이다.

보통 Spanning Tree Protocol(STP)이라고 알려진 c) 기능을 통해서 케이블이나 통신장비의 장애가 발생한 경우에 미리 준비된 백업 루트나 장비로 데이터를 전송하여 네트워크의 신뢰성을 증대할 수 있다. 따라서 설계자는 사고 발생시 백업 루트를 네트워크에 미리 설정해야 하는데 이러한 기능을 수행할 수 있는 스위치를 관리 가능한 스위치(managed switch)라고 부른다. 이때 얼마나 빠르게 장애를 감지하고 복구하여 정상상태의 네트워크를 구성할 수 있는지가 성능의 평가 기준이다. 빠른 복구는 백업 루틴이 활성화 될 때까지 패킷의 손실을 줄일 수 있다. 일반적인 STP를 사용했을 경우의 장애 복구 시간은 수 분 정도 소요되고, RSTP(Rapid STP)의 경우는 수 초가 소요된다. 산업표준인 eRSTP(enhanced STP)는 수 밀리초가 소요되는 것으로 알려져 있다[4].

일반적으로 VLAN(Virtual LAN)으로 알려진 IEEE 802.1Q는 네트워크의 브로드캐스팅 서비스가 많아지면서 발생하는 망의 붕괴와 지연을 방지하기 위해서 브로드캐스팅의 범위를 나누어서 불필요한 브로드캐스팅 트래픽을 차단한다. 스위치를 몇 개의 도메인으로 분리해서 운영할 수 있는 기능이 그것이다. 브로드캐스팅 트래픽을 분산하여 네트워크 자원을 최적하고 효율적으로 운영하기 위해 VLAN은 라우터와 같은 Layer 3 장비가 필요하고, VLAN 운영을 위한 트래픽의 발생과 다소 복잡한 구성 때문에, 변전소 자동화를 위한 네트워크 설계 시에는 사용하지 않는 것이 일반적이다.

2.2 IEC61850의 서비스 분석

IEC61850 표준에서는 변전소 자동화를 위해 사용되어야 하는 4가지의 통신 프로토콜을 정의하고 있다. TCP/IP에 기반을 두고 있는 MMS와 Ethernet에 기반을 두고 있는 GOOSE(Generic Object Orient Substation Event)와 SV(Sample Value)이다. 그리고, 장비들의 시간 동기화를 위한 SNTP이다. GOOSE와 SV는 IEEE 802.1Q를 사용하여 높은 우선순위를 태깅함으로써 스위치에서 MMS 메시지보다 더 빠른 처리를 가능하게 한다. 그림 1은 IEC61850 표준에서 사용되는 통신 프로토콜 스택을 나타낸다[2].

a) MMS 서비스 : 연결지향 통신 서비스인 TCP/IP와 표준화된 데이터 모델을 기반으로 수행되는 주기적인 데이터 교환으로 대용량 데이터 교환이다.

b) GOOSE 서비스 : 빠른 처리와 전송을 통해 실시간성을 보장하기 위해 정의된 GOOSE 서비스는 Ethernet에 기반을 두며, 멀티캐스팅으로 서비스된다. Ethernet 프레임의 payload에 데이터를 직접 encapsulation하기 때문에 MMS에 비해 송수신 측에서의 encoding/decoding 시간을 단축시켜 빠른 처리시간을 가능하게 한다. 하지만, TCP에서의 확인응답과 같은 매커니즘이 없기 때문에, 신뢰성을 보장하기 위한 방안으로 여러번 전송하는 방법을 사용한다.

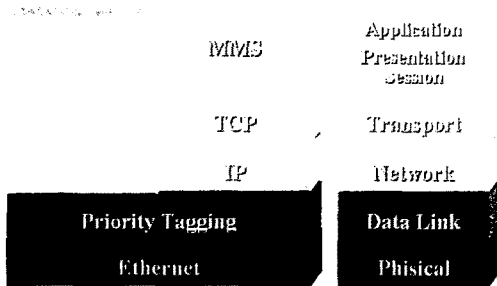
c) SV 서비스 : IEC61850 표준은 전압/전류등과 같은 샘플 값의 전송을 위해 SV서비스를 정의하였다. SV서비스의 구현은 두 가지의 형태가 가능

하다. IEC61850 9-1에서의 MU(Merging Unit)와 IEC61850 9-2에서의 매핑 방법으로 구현된다. IED의 입력으로 사용되는 샘플 값은 실시간성이 보장되어야 하고, 연속적인 대량의 데이터가 이동되기 때문에, 스테이션 버스(station bus)가 아닌 프로세스 버스(process bus)에서 전송되어야 한다.

IEC61850_9_1을 사용하여 고정된 dataset으로 4개의 전류와 전압을 포함한다. 반면 IEC61850_9_2에 대해서는 변전소의 구성 과일에서 dataset 정의에 따라 publisher와 subscriber가 스스로 설정한다. 이 과정은 초기 부팅시에 이뤄지며 효과적인 실행 코드로 구현되어야 한다. 실시간성을 요구하는 연속적인 대용량 데이터 전송 서비스이므로 MMS 서비스가 이뤄지는 스테이션 버스에서 분리된 프로세스 버스를 구성하는 것이 바람직하다. 다음 수식은 샘플링 주파수에 따른 전송 데이터양을 계산한 예를 들어서 128 샘플링을 한 경우에는 이더넷이 한번에 전송할 수 있는 최대전송량(MTU)를 초과하므로 여러 번의 패킷분할이 이뤄진다[5].

$$35(\text{header})+98*12(\text{sampled data/cycle}) = 1211[\text{byte}]$$

$$35(\text{header})+98*128(\text{sampled data/cycle}) = 3171[\text{byte}]$$



<그림 1> IEC61850 전체 통신 스택

2.3 154kV 변전소 네트워크 설계

본 연구에서는 한전의 154kV 표준 변전소에 IEC61850 기반의 변전소 자동화를 적용할 수 있는 네트워크 설계를 제안한다. 전압 레벨을 기준으로 변전소를 세 부분으로 나누고, 해당 부분에서 필요한 IED의 수를 산출하였다. 배전(D/L)에서 보호와 제어를 하나의 IED로 구성한다면, 장비의 수를 급격히 줄일 수 있지만, 현재 한전의 정책에 따라 구성하면 154kV 표준 변전소의 IED 갯수는 표 1과 같이 산출된다. 이렇게 산출된 IED의 수를 바탕으로 신뢰성과 확장성을 고려하여 설계한 네트워크 구성은 그림 2와 같다. 이 구성은 현재 가용(可用)한 장비의 사양(specification)에 근거한 것이다.

전체 네트워크는 스타 형태(star topology)로 구성하였고, 신뢰성을 보장하기 위해 백본(backbone) 스위치 및 백본과 딸단 스위치의 링크를 이중화하였다. 백본과 상위 시스템을 담당하는 스위치 사이는 1G로 연결하였으며, 변전소의 EMI를 고려하여 광케이블(100FX/1000MSX)을 사용하였다. 이것은 구성되는 IED의 수가 많고 그에 따른 스위치의 수가 많기 때문에 스위치의 구성을 링 형태(ring topology)로 사용할 때 발생하는 장애 복구 지연이나 스위치 개수에 따른 지연을 방지하기 위해서이다.

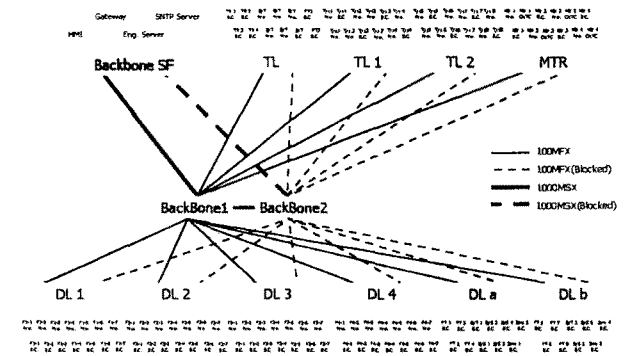
<그림 2>는 변전소 네트워크 구성을 나타내었다. 네트워크 정상상태에서는 실선 케이블로 데이터가 전송되고, 접선 케이블은 차단(blocked)된다. 실선 케이블의 장애나 실선으로 연결된 백본 스위치에 장애가 발생할 경우에는 차단된 접선 케이블이 활성화되면서 장애에 대응된다. 이러한 장애 복구 상황은 STP 혹은 RSTP에 의해 가능한 것이다. 이 프로토콜에 의해 스위치들은 자신들의 상태를 주기적/비주기적으로 송수신하면서 네트워크 장애를 복구한다. 장애 복구 시간이 짧은 RSTP나 산업표준인 eRSTP 사용을 권장한다.

변전소 스위치 야드(warehouse)에 설치될 필드 스위치는 EMI를 비롯한 환경이 뛰어난 이더넷 스위치를 추천하며 백본 스위치와 백본 서버 팜(Server Farm) 스위치는 변전소의 제어실 내부에 설치되기 때문에 필드 스

<표 1> 154kV 변전소를 구성하는 IED

설비명	설비구분	설비수량	보호요소		상태/제어/계측요소		보호IED 수량	제어IED 수량
			기구번호	수량	설비(타입)	수량		
170kV GIS	T/R Bay (M.Tr 1차)	4	(87T) ⁻¹	0	Status/Control/Measure	1	0	4
	T/L Bay ([]는 가공)	8	87, 21, [79,25]	2,[3]	Status/Control/Measure	1	16,[24]	8
	B/T Bay (Bus Pro't)	1	87B, 87B1, 87B2, 27S, 27G	5	Status/Control/Measure	1	5	1
	Bus PT Bay (#1, 2)	1	(21) ⁻¹ , (27S) ⁻¹ , (27G) ⁻¹ , ([25]) ⁻¹	0	Status/Measure	2	0	2
154kV M.Tr	OLTC부 (AVR포함)	4	87T, 51P(N), 51S(N)/59GA(T)	3	Status/Control/Measure, OLTC	2	12	8
25.8kV GIS	Main (M.Tr 2차)	4	(87T) ⁻¹	0	Status/Control/Measure	1	0	4
	D/L (S.Tr 2EA포함)	30	50(N)/51(N), [79]	1	Status/Control/Measure	1	30	30
	Bus Tie	2	-	0	Status/Control/Measure	1	0	2
	Bus Section	6	-	0	Status/Control/Measure	1	0	6
	Bus PT (#1, 2)	4	-	0	Status/Measure	2	0	8
Total							63[71]	73

위치 보다 낮은 등급을 만족해도 가능하다.



<그림 2> IEC61850기반 변전소 네트워크 구성

3. 결론

IEC 61850은 기존의 구리(copper)케이블 결선으로 수행되었던 보호와 제어기능을 네트워크로 수행하면서 통신기능에 대한 의존성이 증대되었다.

본 연구에서는 먼저 변전소 네트워크를 구성하는 목표로 신뢰성과 실시간성 그리고 경제성을 고려해야 한다고 주장하였다. 변전소에 사용되는 이더넷 스위치가 갖춰야 할 내환경적인 요소를 비롯해 실시간 통신에 필요한 IEEE802.3p, IEEE802.3x 그리고 IEEE802.1w 등도 언급하였다. 또한 IEC61850이 제공하는 3가지 통신 서비스의 특징을 분석하였다. 먼저 실시간성을 요구하는 GOOSE와 SV를 위해 우선순위를 높게 설정해야 하며 안정적인 큰 용량의 정보는 TCP/IP 기반의 MMS를 통해 전송해야 한다.

앞서 언급된 내용을 바탕으로 한전 154kV 표준 변전소를 자동화하기 위한 네트워크 구성을 제안하였다. 이러한 구성의 설계를 통해 IEC61850 기반의 변전소 자동화에 고려되어야 하는 사항과 위험 요소를 분석해 보고 이 배경지식을 바탕으로 한전 154kV 변전소 자동화를 설계하였다.

본 논문은 산업자원부 전력산업연구개발사업인 전력IT 기술개발사업의 지원을 받아 수행되었습니다.

[참고 문헌]

- [1] Dan Recker and Jakov Vico, 'Application of peer-to-peer Communication for Protection and Control at Seward Distribution Substation', 2005 IEEE
- [2] F.Engler, T.L. Kern, L. Andersson, B. Kruimer, G. Schimmel and K.S chwartz, 'IEC61850 based digital communication as interface to the primary equipment', Cigre 2004 Paris, B3-205.
- [3] Roger Moore, 'A Comparison of Dispersed Topologies for Ethernet', <http://www.ruggedcom.com>
- [4] RS8000 family datasheet, <http://www.ruggedcom.com>
- [5] UCA International Users Group, 'Implementation Guideline for Digital Interface to Instrument Transformers Using IEC 61850-9-2', <http://www.ucainternational.org>