배전자동화시스템의 Ethernet Network 보호절체 메커니즘 연구

유남철, 이성호
한전KDN(주) 전력IT연구원

A Study on the Ethernet Network protection switching mechanism for DAS

Nam cheol Yu, Sung Ho Lee
KDN R&D Department

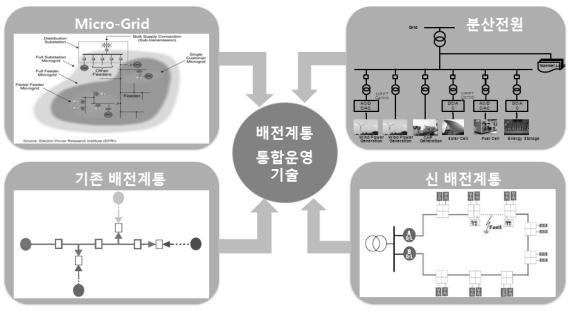
Abstract - 확장성과 유용성 그리고 간편성과 가격 효율성 측면에서 발전을 거듭하고 있는 이더넷은 가장 광범위한 커버리지를 확장해 가고 있으며 최근 전력시스템에도 그 적용성을 넓히고 있다. 또한 이미 표준화가 이루어진 기술과 많은 사용자로 인한 기술적 이해도가 높고 쉽게 구현할 수 있다는 점에서 최근 스마트그리드의 표준 인터페이스와 네트워크 표준으로 활발한 연구가 진행 중이다. 그러나 모든 통신망이 그러하겠지만 특히 이더넷 통신망의 경우 안정적인 동작과 중단 없는 서비스를 통하여 통신망의 효율성을 극대화하기 위해서는 통신망의 고장이나 성능의 저하에 대응하기 위한 관리방안이 필요하다고 하겠다. 따라서 논문에서는 이더넷 기반 링형 네트워크에서의 보호절체 메커니즘과 배전자동화 시스템에 대한 적용을 위한 다양한 적용기술에 대해 기술하고자 한다.

1. 서 론

전통적인 배전자동화시스템은 주장치에 설치된 각종 어플리케이션을 위하여 현장의 FRTU[1]로 하여금 각종 데이터를 취득하게하고 그 정보를 주장치로 전송하도록 하는 구조이며 이를 위해 주장치는 시간을 분할하여 타임슬롯으로 구분하고 각 타임슬롯을 FRTU에 할당하여 FRTU로 하여금 타임슬롯이 할당되는 시간동안 전송망을 점유시켜 데이터를 전송시키는 TDM[2]방식을 사용하는 구조이다. 따라서 이러한 전통적인 TDM 방식의 Server-Client 구조의 통신망에서는 모든 데이터 트래픽이 Client 역할의 Server와 Server 역할의 FRTU에서 발생됨으로써 FRTU와 FRTU간에는 데이터의 전달 수단이 없을뿐더러 Requesr/Response에 따른 전송 시간지연이 발생함으로 이벤트 위주의 시스템에는 부적절하다고 할 수 있다. 또한 최근의 배전자동화시스템에서는 통신네트워크를 이용한 고속 보호협조와 더 나아가 Self-Healing 기능이 중요한 이슈로 등장하고 있다. 따라서 이러한 향상된 기능을 적용하고 네트워크 차원의 통신서비스가 완벽히 지원되기 위해서는 Peer to Peer 구조의 통신구조가 가능한 이더넷 방식의 통신네트워크가 필요하지만 이더넷의 기술적 한계인 신뢰성을 보장하지 못하는 문제와 이더넷망의 링 보호절체시 Recovery time이 SONET[3] / SDH[4]에서 요구하는 50ms를 만족시키는 것이 중요한 목표라고 할 수 있다.

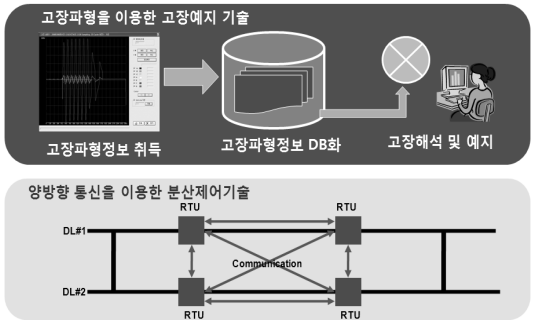
2. 본 론

배전자동화시스템을 중심으로 분산전원, MircoGrid, DC그리드 등 새로운 계통방식이 출현하고 배전계통이 복잡해짐과 동시에 양방향 전력조류가 증가함에 따라 분산전원의 계통 및 연계를 확대하고 효율적인 운영을 위해 배전자동화 시스템에 대한 IEC61850 국제표준이 적용되고 있다. 또한 기존의 배전자동화시스템은 수지상 방식의 계통구성에서 상시 개방점을 변경함으로써 부하를 평준화하고, 손실을 최소화하는 등의 부가기능을 수행하는 수동적 배전시스템(Passive distribution System)이라고 한다면 앞으로의 배전시스템은 Loop 또는 Mesh방식으로 운영되고 다수의 분산전원과 마이크로 그리드 등의 새로운 발전원이 연계됨에 따라 전압 및 무효전력제어 등 배전계통의 운영에 더 다양한 제어 요소가 추가되면서 능동형 배전시스템(Active distribution System)으로 전환될 것이므로 통신네트워크 또한 IEC61850 국제표준을 만족하면서 지능화되고 실시간 통신이 가능한 이더넷 기반의 통신망으로 변화가 필연적이라고 할 수 있다. 그러나 이더넷 기반의 통신네트워크를 이용한다고 해도 고속 실시간 통신과 끊김 없는 통신서비스 및 전송 신뢰성이 확보되지 못한다고 하면 위에서 열거한 여러 가지의 향상된 전력서비스는 그 신뢰성에 심각한 문제가 발생할 것이다. 이러한 통신네트워크 차원의 실시간성, 전송지연특성, 신뢰성 등의 요소를 보장하는 가장 중요한 기술적 배경은 이더넷 링 보호절체에서 찾을 수 있다. 전력시스템과 유사한 개념의 산업용 이더넷 네트워크에서도 시스템의 신뢰성과 실시간성을 위해 범용의 이더넷을 사용하기 보다는 통신시스템별로 차별화되고 폐쇄적인 링 보호절체 메커니즘을 적용하여 사용하고 있다.



〈그림 1〉 스마트배전운영기술

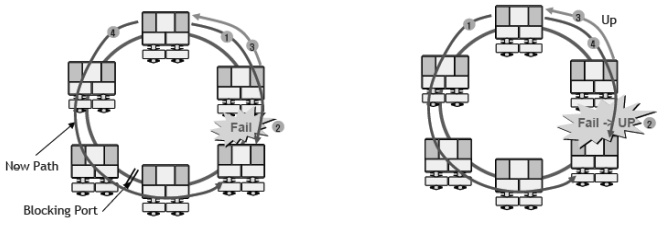
이와 같이 산업용 이더넷이 전용의 링 보호절체 메커니즘을 적용하는 이유는 범용의 이더넷에서 보장하는 STP[5], RSTP[6], MSTP[7] 또한 SONET/SDH 수준의 RPR 등과 같은 링 보호절체 프로토콜이 제공하는 수준이 최대 50ms로 엄격한 산업망에서 요구하는 성능을 만족하지 못하기 때문이라고 할 수 있다.



〈그림 2〉 배전자동화시스템의 진화방향

2.1 산업용 이더넷

리얼타임 산업용 이더넷은 리얼타임 성능에 따라 다음과 같이 3가지 등급으로 분류되는데 첫째 Class 1은 100ms의 반응시간을 가지는 TCP/IP 통신 기반의 표준시스템으로써 표준 이더넷에 추가적인 변형 없이 TCP/UDP/IP 프로토콜 스택을 사용하며 EtherNet/IP, MODBUS/TCP/ P-Net, BNET/IP등이 해당한다. 둘째 Class 2는 10ms의 반응시간을 가지는 PLC[8] 또는 PC기반 제어 시스템으로 표준 이더넷에 대하여 자체적인 프로토콜 스택을 반영하여 리얼타임을 확보하는 것으로 H/W에 대한 변형이 없으므로 소프트 리얼타임(Soft Real Time)이라고 하며 Ethernet Powerlink, Tcnet, EPA, PROFINET CBA 가 있으며 셋째 Class 3은 1ms 이상의 반응시간을 충족하는 모션 컨트롤 등이 있으며 수정된 이더넷을 사용하며 특히 배선비용의 절감을 위해 Star Topology 대신 Bus 또는 Ring Topology를 사용한다. 따라서 이것을 하드 리얼타임(Hard Real Time)이라고도 한다. 이 방식에는 EtherCat, PROFINET, RAPIEnet 등이 있다. 그러나 산업용 이더넷도 기존의 필드버스와 마찬가지로 상호운용성에 대한 어려운 과제를 안고 있다. 이는 각 벤더에 따른 보호절체와 관련된 프로토콜의 폐쇄성으로 인해 산업용 네트워크는 현재 상호 협력과 제휴를 모색하면서 세계시장에서의 시장 확대를 위한 마케팅 활동을 활발하게 추진하고 있다.[1][2][3]

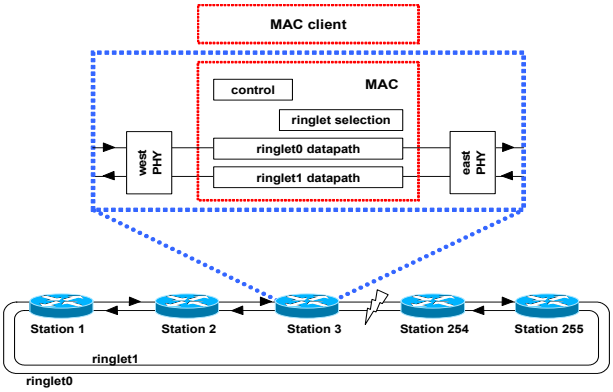


<그림 3> 산업용 이더넷의 링보호절체

이러한 산업현장의 자동화가 확산으로 출현한 산업용 이더넷 스위치는 데이터 에러에 의한 손실이 산업현장의 경제성과 직결되기 때문에 신뢰성을 확보하면서 데이터를 신속하고 정확하게 전송하기 위해 이중화와 링 토폴로지를 및 이에 따른 회선보호절체 프로토콜을 대부분 선택하고 있으며 보호절체를 위한 프로토콜로는 IEEE의 STP, RSTP를 기본으로 적용하고 있지만 STP와 RSTP의 긴 Recovery time은 실시간 데이터 전송과 신뢰성을 가지기에는 한계가 분명하기 때문에 별도로 Listening, Learning 과정을 생략하고 BPUD[9] 패킷의 기능을 대체한 비표준화된 보호절체 프레임을 작성하여 50ms 이내의 링크 절체기능을 수행하여 신뢰성을 유지하고 있다.

2.2 IEEE 802.X 계열 이더넷 링 보호절체

IEEE802계열의 이더넷 링 보호절체 메커니즘 중에서 저속급인 STP와 RSTP를 제외하고 가장 최신의 솔루션인 RPR[10]의 경우 하나의 스테이션 물리계층은 그림 4에서와 같이 두 개의 이웃하는 물리계층 장치(West PHY, East PHY)로 구성되어져 있다. 이 두 개의 물리계층 장치는 각각 두 링에 동시에 접속되어진다. 동쪽의 물리계층 장치(East PHY)는 외부 링으로 트래픽을 전송하고 내부 링으로부터 트래픽을 수신한다. 서쪽의 물리계층 장치(West PHY)는 동쪽의 물리계층 장치와 반대로 동작한다. 또한, 모든 스테이션들은 IEEE 802 48-bit MAC 주소를 한 개씩 가지고, 그 주소로써 링에서 서로 구분되어진다. RPR에서 두 개의 링에 동시 접속되어 있는 모든 스테이션들은 링을 공유하고 있으므로 RPR의 링은 마치 이더넷과 같이 브로드캐스팅의 동작을 하게 된다. 하지만 링에 어떠한 장애가 발생하여 "프로텍션 알고리즘(Protection Algorithm)"이 구동되면, 두 개의 링은 마치 하나의 링으로 동작하여 전체 링이 하나의 브로드캐스팅과 같은 동작을 하게 된다.[4]

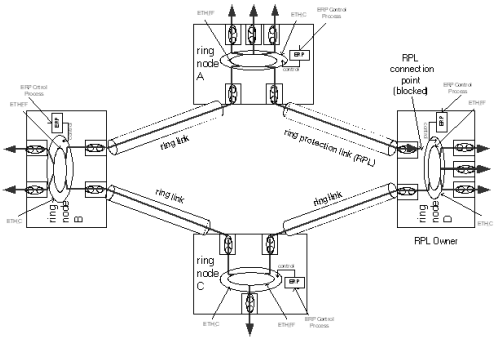


<그림 4> RPR 스테이션의 구성

2.3 ITU-T G.8031/G.8032 링 보호절체 표준

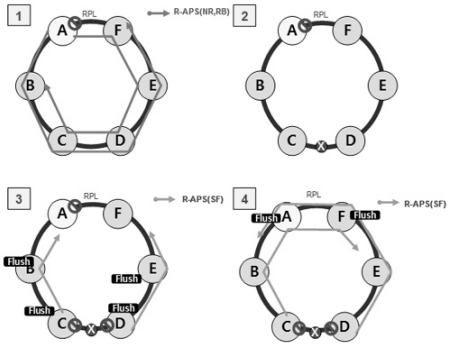
이더넷 보호절체와 관련된 표준화는 IEEE802.17 워킹그룹과 ITU-T의 SG13 (Next Generation Network)과 SG15(Optical and other Transport Infrastructure)에서 진행되고 있으며 주요 분야는 차세대 이더넷 전달망에 대한 표준화와 네트워크 사업자망에 이더넷을 적용하기 위해서 요구되는 이더넷 보호/절체기술에 대한 표준화를 진행 중이다. 따라서 최근 ITU-T에서 제정 공표한 이더넷 링 보호 표준과 관련된 G.8031 및 8032는 이더넷으로 링망을 구축하여 SDH/SONET 수준의 신뢰성(50ms이내 절체)을 보장하고 있으며 G.8032 권고는 IEEE 802.1, 802.3에서 권고하는 표준 칩셋을 그대로 사용할 수 있도록 함으로써 전용의 물리계층 칩셋을 사용해야 하는 IEEE802.17(RPR)보다 비용절감의 효과가 크다고 할 수 있다.[3][5]

G.8032 표준은 보호절체시 모든 전달 테이블 정보를 초기화함으로써 이후 정보 갱신을 위한 트래픽이 급격하게 증가하고 패킷유실 또는 전달 지연으로 서비스 품질이 저하되는 현상을 방지하기 위해 간접적 이더넷 MAC 주소학습을 위한 선별적 FDB[11] advertisement 동작을 수행하도록 하고 있으며 이더넷 프레임 형식, 전송속도, 기존의 이더넷 장비



<그림 5> ITU-T G.8032

와 모든 종류의 전송속도(10M/100M/1G/10G)에 대해 그대로 적용할 수 있다. 그림 6의 상태 1번은 정상상태를 나타내고 있으며 이더넷의 주요한 원칙중의 하나인 루프 없는 망을 이루기 위해 논리적인 Blocking이 노드 A에 설정되어 있으며 이러한 정상상태를 알리는 보호절체 메시지가 링에 알려지게 된다. 상태 2번은 노드 C와 D 사이에 장애가 발생한 상황을 보이고 있고, 상태 3번은 장애를 발견한 노드 C와 D가 장애가 있는 포트를 Blocking하고 이를 알리는 메시지를 전달하게 되는 상황을 나타내고 있다. 이때 이 장애메시지를 받은 다른 노드는 정상상태에서 알려진 망 전달 정보를 모두 삭제하고, 노드를 지나는 패킷의 발신주소와 이것이 유입된 포트를 기억함으로써 새로운 망 전달 정보를 학습하게 된다. 상태 4번은 장애메시지가 루프방지를 위한 Blocking 노드에 도달하게 되면, 기존의 Blocking을 해제하고 가지고 있던 망 전달 정보를 모두 삭제하여 링보호절체 동작을 완료하게 된다. 이러한 동작이 50 ms 이내에 이루어지게 되어 SDH/SONET 수준의 보호절체가 이루어지게 된다. 장애가 복구되면 장애 복구 메시지가 노드 C와 D에서 전송되어 일정 시간 후 A 노드가 다시 루프방지를 위한 Blocking을 이루어 정상상태로 복원하게 되고, 정상상태 메시지가 노드 C와 D에 이르게 되면, 노드 C와 D가 Blocking을 해제하여 링의 복원이 이루어지게 된다.[3][5]

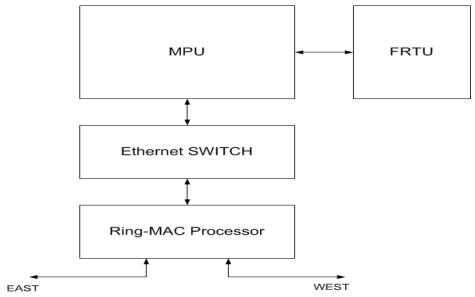


<그림 6> G.8032 동작절차

2.4 배전자동화용 이더넷 링 보호절체

전력시스템중 넓은 커버리지와 다량의 제어디바이스를 보유한 배전자동화 시스템은 이더넷 전송기술을 적용할 경우 많은 고려사항이 있으나 그 중 이더넷의 기술적 한계를 어떻게 극복 또는 회피하는가가 중요한 관건이다. 그 중에서 이더넷 링 보호절체는 많은 성능 향상이 있어왔던 기존의 국제표준으로도 부족함이 많이 있는 것이 사실이다. 넓은 커버리지와 많은 제어 디바이스로 인한 전송지연과 링 구조 및 보호절체의 문제는 FRTU의 지능화된 기능 구현을 위한 Peer to Peer 통신에 심각한 문제점을 야기한다고 할 수 있다. Blocking된 상태의 통신회선이 활성화될 때까지의 시간지연이 발생한다는 것은 그 시간동안 FRTU의 상태정보를 전송하지 못한다는 것을 의미하므로 국제표준에서 제시하는 가장 최단 시간인 50ms는 통신 네트워크 차원에서는 짧은 시각이지만 전력시스템의 입장에서는 50ms는 3Cycle이라는 긴 시각이므로 이 시간동안의 통신두절은 전력시스템의 보호협조기능을 포기하는 것과 같다고 할 수 있다.

따라서 배전자동화용 이더넷 링 보호절체는 국제 표준을 따르기 보다는 자체적인 메커니즘을 적용하여 절체지연시간을 최소화하는 것이 필요할 것이다. 표1은 기존 시스템과 스마트배전 시스템의 이더넷 보호절체 시간을 비교한 것으로 최근의 배전지능화시스템에서 적용된 IEEE802.17 RPR이 50ms로 가장 빠른 절체시간을 가지고 있지만 스마트배전에서는 Hardware적인 접근법을 통한 Proprietary ring을 적용하여 fault recovery time을 0ms까지 단축시켰다.



<그림 7> FPGA 기반의 보호절체

그림 7은 0ms의 보호절체 시간을 구현하는 FPGA[12] 기반의 프로세스로 호스트 포트에서 패킷을 수신한 경우 이 패킷을 링에 전송하며 링에 전송하기 이전에 링맥 및 패킷ID를 추가하여 East / West 포트로 각각 전송한다. 또한 East/West 광포트에서 수신된 패킷을 각각 West/East 포트로 포워딩하며 주어진 조건에 의해 호스트로 포워딩과 망에서 제거하는 역할은 수행 한다.

<표 1> 배전자동화시스템의 이더넷 보호절체 시간

비고	기존시스템					스마트 배전
	디지털변전			DAS	IDAS	SDMS
	STP	RSTP	e-RSTP	RPER	RPR	K-Ring
국제 표준	IEEE802.1D	IEEE802.1W	*	*	IEEE802.17	*
동작 절차	Block 20s Listening 15s Learning 15s Forwarding	Learning 15s Forwarding	Learning 15s Forwarding	*	Insertion Forwarding Stripping	KEPCO Version
소요 시간	<50,000ms	<5,000ms	<50ms	<50ms	<50ms	0ms

3. 결 론

이더넷 보호절체와 관련된 표준화에 대해서는 국내외의 수동적인 대응으로 인해 많은 제작사 또는 서비스 별로 서로 다른 표준과 프로토콜로 인해 장치간 통합이 불가능한 상황이다. 이를 위해 IEEE802.17에서 이더넷 MAC계층에서의 통합을 위해 RPR 프로토콜을 제정하여 이더넷 보호절체를 SONET/SDH수준의 신뢰성을 보장하고자 하였으나 전용의 칩셋을 적용해야 하는 점, 기존 시스템을 활용할 수 없는 점 등 그 한계로 인해 적용범위가 제한적이었으나 최근 ITU-T SG15에서는 기존시스템과 호환성을 유지하면서 종단간 경로에 대한 이중화 기능을 정의하는 이더넷 링 보호절체에 대한 G.8032를 국제표준으로 확정하여 발표하였다. 프레임의 형식과 전송속도, 교환방식 등 기존 시스템에 대해 S/W 업그레이드만으로도 적용이 가능한 G.8032가 산업용 스위치 분야에서는 경제성과 효율성 측면에서 장점이 있지만 전력시스템용으로 링크 보호절체 시간이 다른 프로토콜과 동일하게 존재한다는 점에서는 단점일 수 밖에 없으며 링절체 지연시간이 없는 전력시스템을 위한 전용의 링보호절체 프로토콜이 필요하다 하겠다.

[참 고 문 헌]

[1] IEEE 802.1 Working Group, http://grouper.ieee.org/groups/802/1/
[2] IEEE 802.3 Working Group, http://grouper.ieee.org/groups/802/3/
[3] ITU-T Study Group 15, http://www.itu.int/ITU-T/studygroups/
[4] 한국이더넷포럼, IEEE 802 표준화기구 동향 분석서 Ver. 2007.
[5] ETRI, 이더넷링 네트워크에서의 보호절체방법, 대한민국, 10-2008-0089285.

[용 어 정 의]

1) FRTU : Feeder Remote Terminal Unit
2) TDM : Time Division Multiplex
3) SONET : Synchronous Optical NETwork
4) SDH : Synchronous Digital Hierachy
5) STP : Spanning Tree Protocol
6) RSTP : Rapid STP
7) MSTP : Multiple STP
8) PLC : Programmable Logic Controller
9) BPUD : Bridge Protocol Data Unit
10) RPR : Resilient Packet Ring
11) FDB : Filtering DataBase
12) FPGA : field programmable gate array