

Study on Very High-Rate Power Line Communications for Smart Grid

최성수[†] · 오휘명^{*} · 김영선^{*} · 김용화^{**}

(Sungsoo Choi · Hui-Myoung Oh · Youngsun Kim · Yong-Hwa Kim)

Abstract -In this paper, we study on the reliability of Very High-rate Power Line Communication (VH-PLC) for Smart Grid, so that the resultant data rate is over 400Mbps at a physical layer. Firstly, reviewing the research trend of the PLC, we discuss the required techniques for supporting the Smart Grid. Considering a pre-specification with the value of several parameters, we investigate a multi-carrier modulation technique to overcome limitations of higher rate transmission under power line channel environments. Then, we propose a system specification of the VH-PLC in the sense of enhancing two features. One is resolving the problem of the co-existence of the deployed high-speed PLC according to the published standardization of KS X 4600-1 in Korea. The other is getting better performance on the grid adopting the diverse element techniques, such as multi-carrier modulation, a subcarrier utilization mode, a variable rate LDPC (Low Density Parity Check) code, and a time and frequency diversity technique. Further, a simulation tool, composed of an Event-Driven simulator and a Time-Driven simulator, is developed for the purpose of verifying the system performance and continuously cross-checking the test bench signal of the proposed VH-PLC system.

Key Words : Smart grid, Very high-rate Power Line Communications (VH-PLC), KS X 4600-1

1. 서론

최근 녹색기술을 통한 CO₂ 절감 및 에너지효율의 극대화를 위하여 기존 ICT (Information and Communication Technology) 기술들에 대한 융·복합 발전이 가속화되고 있다. 2008년 말부터는 전 세계적으로 스마트 그리드 (Smart Grid; SG) 기술이 주목을 받으며, 녹색기술의 실현을 위한 차세대 멀티미디어 통합용 스마트 그리드 지향 유·무선 전송 기술개발의 필요성이 증대되고 있다[1,2].

녹색 통신기술의 대안 중 하나로 주목받고 있는 고속전력선통신기술은 전기에너지 공급 측면에서 별도의 외부 통신선을 필요로 하지 않고, 전기·정보 설비 환경에서 기 포설된 전력선을 통하여 자유롭게 필요한 정보공유, 제어·관리가 편리한 장점을 지니고 있다. 국내의 경우, 2005년 3월부터 스마트 그리드 전신인 산업자원부 전력IT 사업이 진행되어 24Mbps 국내 보급형 광대역 고속 전력선통신모뎀이 개발되었고, 국가산업표준(KS X 4600-1)과 2009년 국제표준(ISO/IEC 12139-1)으로 제정되었다[3,4]. 이에 따라 보급형 고속 PLC를 이용한 전국적인 원격검침 시범서비스 사업이 활발히 진행 중에 있다. 특히, 국가적으로 2009년 11월 SG 최종 로드맵이 확정된 이후, 2013년까지 실증 및 스마트 미터를 보급하게 되어 있으며, 2020년까지 소비자측 전력망 지능화

완료계획, 2030년까지 국가단위 최초 SG 구축 계획을 하고 있어 앞으로 초고속 전력선통신시스템 기반 관련 시장이 활발해 질 것으로 기대를 모으고 있다[2]. 그러나 현재까지는 특고압, 고압, 저압, 가공, 지중선 등 다양한 전력선 채널 특성 분석과 지능형 전력망, 지능형 소비자, 지능형 운송, 지능형 신재생, 지능형 전력서비스 5개 분야로 나뉜 SG 서비스 환경에 적합한 맞춤형 통신 인터페이스 기술 검토가 부족한 상황이다. 즉, SG 서비스 환경에 따라 요구되어지는 전송속도, 물리적 한계 극복을 위한 전송거리확장, 고신뢰성, 상호공존성, 상호 운영성 및 전기·통신 전과 법·규제 완화 등 전력선통신 기술 영역에서 풀어야 할 숙제가 여전히 많다. 이에 2009년부터 한국전기연구원에서는 SG를 위한 초고속전력선 통신기술에 관한 원천기술 연구를 수행해 오고 있으며 [1,5,6], 지식경제부 기술표준원을 통하여 KS X 4600-1 CB를 확장한 가칭 KS X 4600-2 국가표준화작업을 준비 중에 있다. 한편, 국외의 경우 2009년부터 미국 IEEE, ITU-T와, 유럽연합의 FP7 연구단체 및 표준화기구들을 중심으로 초고속전력선통신 시스템 연구가 진행되고 있다[7].

본 논문에서는 먼저 SG 구축을 위해 검토되고 있는 전력선통신기술 개발현황, SG 환경에서 요구되는 통신 인터페이스 조건 및 그리드 구축 기준에 따른 다양한 전력선통신기술들에 대하여 분석해 본다. 또한 전기에너지 전송 및 관리용 통신수단인 동시에 사용자측 관점에서 다양한 부가서비스를 제공할 수 있는 미래 지능형 전력망의 핵심 통신기술인 초고속 전력선통신 시스템의 예비 사양도출에 대한 검토를 수행한다. 전송속도한계를 극복하기 위한 초고속 전력선 통신 요소기술들과 전체 시스템 사양을 도출하기 위한 개략적인 송수신 기술을 간략히 설명하고, 시스템 목표에 따른 파라미터들을 추출하기 위해 필요한 통신 성능 시뮬레이션

* 정 회 원 : 한국전기연구원 선임연구원

** 비 회 원 : 한국전기연구원 선임연구원

† 교신저자, 정회원 : 기표원, 고속PLC표준기술연구회 PHY에디터

E-mail : sschoi@keri.re.kr

접수일자 : 2011년 2월 18일

최종완료 : 2011년 5월 12일

을 수행한다. 마지막으로 전력선채널과 목표 성능을 실현하기 위한 성능향상 기술의 방안과 초고속 전력선통신 시스템 실현화 가능성을 가늠하여보고, 현재 작업 중인 국가표준안을 기반으로 하는 초고속 전력선통신 PHY 기술을 소개함으로써 결론을 맺고자한다.

2. 스마트그리드(SG)를 위한 전력선통신 기술 현황

그림 1에 나타낸 바와 같이 주파수 대역에 따라 광대역 (Broad Band; BB) 전력선통신시스템과 협대역 (Narrow Band; NB) 전력선통신시스템으로 크게 분류할 수 있으며, 각 국제표준 및 단체규격에 따라 SG 응용분야별로 다양한 전력선통신시스템이 존재할 수 있다.

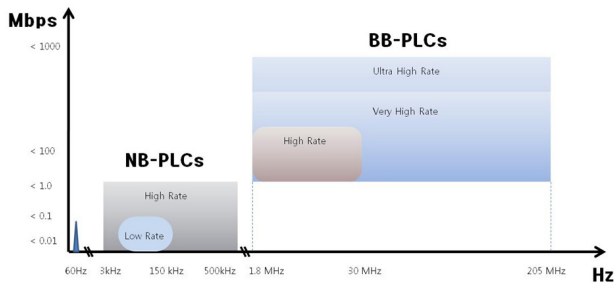


그림 1 주파수 대역별 전력선통신기술의 분류
Fig. 1 Classification of Power Line Communications According to Frequency Bands

• **광대역 전력선통신시스템 (BB-PLC):** 주로 1.8 - 205 MHz의 HF/VHF 주파수범위 안에서 수 Mbps에서부터 수 백 Mbps까지의 PHY 전송률을 제공하는 ISO/IEC 12139-1, TIA-1113, IEEE 1901, ITU-T G.hn(G.9960/ G.9961) 국제 표준을 따르는 광대역 전력선통신기술들과 HomePlug AV, HomePlug Green PHY, HD-PLC와 UPA Powermax 단체 규격을 따르는 광대역 전력선통신 기술들이 여기에 속한다. 또한 스마트그리드 환경에서 미래형 전력선통신확장을 통해 요구되는 400Mbps급 대용량 전송기술로 표준화 작업 중인 초고속 전력선통신(Very High Rate; VHR-PLC) 등이 여기에 속한다.

• **협대역 전력선통신시스템 (NB-PLC):** 주로 3 kHz-500 kHz의 VLF/LF/MF 주파수범위에서 사용되는 NB-PLC 기술은 CENELEC/ FCC/ARIB 대역을 이용하여 저속 또는 고속의 데이터를 전송할 수 있는 통신기술이다. 저속의 협대역 전력선통신기술의 경우, 수 kbps의 데이터 전송률을 제공하는 단일 캐리어 변조기술을 사용하며, ISO/IEC 14908-3 (LonWorks), ISO/IEC 14543-3-5 (KNX), CEA-600.31 (CEBus), IEC 61334-3-1, IEC 61334-5-1 등 국제 표준화규격을 따르는 전력선통신기술과 그렇지 않은 X10, Insteon, HomePlug C&C, SITRED, Ariane Controls 등이 있다. 한편, 고속의 협대역 전력선통신시스템은 멀티캐리어 변조방식을 적용하여 수십kbps에서부터 최대 500kbps 까지 전송률을 높이는 기술이다. 현재 IEEE 1901.2 와

ITU-T G.hnem 등에서 국제표준화가 진행 중이며, 그 외에 PRIME과 G3-PLC 시스템 등이 여기에 속한다.

이들 광대역 및 협대역 전력선통신기술은 양방향 통신 플랫폼지원이 가능한 기술로 센서를 이용해 SG 상의 전류·전압 환경정보를 계측하고 저장, 분석, 제어하거나 사용자 데이터정보를 전력선을 통하여 전송 할 수 있다. 무엇보다도 각 전력디바이스의 기기 및 사용자 인증은 물론 그리드를 통하여 장치오류에 대한 예측정보까지 알 수 있다. 이러한 기능적 잠재능력은 보안통신으로써 강점을 가질 수 있으며, 마이크로그리드, 분산전원과 사용자측 SG 배전망 영역에서 더욱 진가를 발휘할 수 있다. SG 배전망설계를 위해서는 NPT (Network Planning Tool)을 사용하여 주어진 전력망 채널 자체뿐만 아니라 SG 장치들에 대한 배치를 고려해야 한다. 고압배전(MV)망 채널의 경우는 1:1 통신기반의 변압기 간 통신연결성을 고려해야 하고, 저압배전(LV)망은 변압기와 미터기들 간 1:n 통신 토폴로지가 함께 검토되어야 한다. 특히 AMI (Advanced Metering Infrastructure), V2G (Vehicle-to -Grid), DR (Demand Response), 그리고 스마트그린 홈 분야에서 SG 응용서비스를 HAN까지 통합·확장이 가능한 스마트그리드 지향 맞춤형 전력선통신기술(SG-PLC)이 필요하다.

3. 초고속 전력선통신 실현가능성

3.1 통신 성능 목표

본 절에서는 초고속 전력선통신 시스템 구현을 위한 통신성능 달성목표와 예비 사양도출을 통한 실현 가능성을 제시한다. 목표로 하는 데이터 전송속도를 지원하기 위한 전력선통신 채널의 요구사항과 시스템 모델을 구체화시키기 위해 고려하고 있는 기본적인 성능 목표는 다음과 같다.

- DMT(Discrete Multi-Tone) 또는 OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplex) 방식의 멀티캐리어 (Multi-carrier) 변조방식 사용
- 전송속도는 전력선채널 30MHz 대역사용 시 최고 200Mbps, 80MHz 대역사용 시 최고 400Mbps 지원하며 전력선 채널환경에 따라 가변 가능한 데이터 전송률 제공
- 릴레이를 통한 장거리 통신 커버리지 확장 지원
- KS X 4600-1 국가표준을 따르는 고속전력선통신 모델과 상호공존성 제공

3.2 목표달성을 위한 예비사양 도출

현재, 광대역 전력선통신 시스템에 채용하고 있는 대표적인 변조기술은 DMT 또는 OFDM과 같은 멀티캐리어 변조기술이다. 멀티캐리어 변조기술 방식의 가장 큰 장점은 무엇보다도 고속의 데이터를 전송하기에 적합한 변조 기술이라는 점이다. 신호의 반사로 인한 심볼간 간섭을 최소화하기가 용이하고, 협대역간섭 (narrow band interference)에 따른 잡음회피가 가능한 기술이다. 반면에 커다란 첨두치 평균 전력비 (peak-to-average-power-ratio: PAPR)로 송신 파워를 충분히 확보하기가 용이하지 않고, 신호의 블록 처리 방식으로 신호 처리 시간이 긴 단점이 있다. 멀티캐리어 방식의 전송속도는 아래와 같이 표현된다.

$$B_{ps} = B_w \cdot M \cdot \frac{B_u}{B_w} \cdot \frac{T_{FFT}}{T_{FFT} + T_{CP}} \cdot C_r \quad (1)$$

여기에서 B_w 는 전체 신호 대역폭, B_u 는 가드 밴드를 뺀 실제 사용하는 신호 대역폭, M 는 각 부반송파에 실리는 비트 수, T_{FFT} 는 변복조를 위해 사용하는 FFT (Fast Fourier Transform) 처리를 위한 신호의 길이, T_{CP} 는 심볼간 간섭을 회피하기 위한 가드 시간의 길이, C_r 는 에러 정정 부호화기의 부호화율이다. 멀티캐리어 변조 방식은 다음과 같은 전송속도를 저하시키는 오버헤드를 필요로 한다. 즉, 가드밴드, 가드시간, 에러정정 부호화를 위한 추가 시간 등으로 가드밴드는 주변의 채널과의 신호 간섭을 최소화 하기위해 필요하며, 가드시간은 OFDM 심볼간의 신호간섭을 없애기 위해 사용된다. 또한 에러정정 부호화기술은 수신 단에서의 에러를 찾아 정정하기 위해 사용되어진다. 가드 밴드의 크기는 국내·외 지역 전파 관리 규정에 따르기 위한 송신 신호의 측파대(sidelobe)의 크기, 아날로그 회로의 필터링의 용이함 등을 고려하여 정해진다. 본 논문에서 목표로 하고 있는 저주파수 대역인 0-30 MHz대역 중에서 2-28 MHz까지 사용하는 시스템이 있다면 이 시스템의 대역 사용비율은 0.8667 이다. 채널의 길이 때문에 발생하는 심볼간 간섭을 최소화하기 위해 삽입하는 가드 시간 구간은 사용하는 채널의 길이보다 길어야 한다. 전송속도에 대한 영향은 전체 심볼 길이($T_{FFT} + T_{CP}$)에서 가드 시간(T_{CP})이 차지하는 비율에 따라 정해지므로 FFT의 길이(T_{FFT})를 길게 하여 그 영향을 최소화 할 수 있다. 송신된 데이터의 복원은 FFT길이 단위로 처리를 하기 때문에 FFT길이에 비례하여 신호 처리 지연이 발생한다. 또한 부반송파 간의 간격은 FFT길이에 역수($\frac{1}{T_{fft}}$)로, FFT 길이가 길어지면 그 간격이 좁아진다. 이 결과로 송신 성능이 페이즈 변화에 취약해지는 문제가 있을 수 있으나, 베이스 밴드 송신 방식의 전력선통신시스템에서는 그 영향이 미미할 것이다.

수신 단에서의 에러 정정을 위해 송신 데이터에 정해진 규칙에 따라 발생된 패리티 비트를 추가하여 송신을 한다. 추가되는 패리티 비트가 많아질수록 수신 단에서의 에러 정정 성능은 향상 될 수 있으나 데이터의 송신 속도는 저하된다. 채널 상태에 맞추어 각 부반송파의 변조방식을 달리하면 에러 정정의 필요성이 줄어들어 이로 인한 데이터 전송 속도의 저하를 최소화 할 수 있다. 상기의 사항들을 고려하여 30MHz 대역에서 200Mbps 전송 속도와 60MHz 대역에서 400Mbps를 달성하기 위해 필요로 하는 멀티캐리어 변조 기술의 변수 값을 계산해 볼 수 있다. 원래의 데이터 전송 속도의 목표는 80MHz 대역에 400Mbps이나 30MHz 대역에서 200Mbps 전송 속도를 고려하고 계산의 용이함을 위하여 60MHz 대역에서 400Mbps로 목표를 바꾸어 계산을 한다. 60MHz 대역에서 2048개의 부반송파를 사용하여 전송하는 멀티캐리어 변조방식의 변수 값을 고려하여, 표 1에 보인 바와 같이 이에 따른 데이터 전송 속도를 얻는다. 60MHz 대역을 이용한 400Mbps 전송 속도의 달성을 위해 부반송파 변조 방식으로는 최소한 1024QAM을 사용하여야 하며, 부호화율은 7/8 이상으로, 가드시간은 2.13 μ sec 이하로 한다.

표 1 데이터 전송 속도

Table 1 Data Transmission Rate

CR	Modulation	Number of Coded Bit per Symbol	Number of Bit per Symbol	Data Rate (Mbps)		Spectral efficiency (bps/Hz)	
				GI= 4.27 μ sec	GI= 2.13 μ sec	GI= 4.27 μ sec	GI= 2.13 μ sec
1/2	256QAM	13824	6912	180	190.5	3	3.17
2/3	256QAM	13824	10368	270	285.8	4.5	4.76
5/6	256QAM	13824	11520	300	317.6	5	5.29
7/8	256QAM	13824	12096	315	333.5	5.25	5.55
1/2	1024QAM	17280	8640	225	238.2	3.75	3.97
2/3	1024QAM	17280	12960	337.5	357.3	5.62	5.95
5/6	1024QAM	17280	14400	375	397.0	6.25	6.61
7/8	1024QAM	17280	15120	393.75	416.9	6.56	6.94

3.3 예비 통신성능 도출을 위한 모의실험

멀티캐리어 전송 성능 시뮬레이션 결과를 통하여 초고속 전력선통신 실현 가능성을 확인한다. 모의실험을 위한 멀티캐리어 변조방식의 송수신단 블록 구성은 그림 1과 같다. 송신 데이터는 스크램블링(scrambling)을 통하여 연속된 0이나 1을 갖는 특정 송신 신호의 패턴발생 경우를 없앤다. 수신 단에서는 채널 상 발생하는 오류 정정을 위해서 길쌈 부호(convolutional code)를 사용한다. 부호화된 데이터는 수신 단에서 집중된 에러의 분산을 위해 인터리빙(interleaving)한다. 매퍼(Mapper)는 입력된 비트 열을 부반송파의 변조를 위한 QAM 심볼로 변환한다. 각 부반송파의 변조는 IFFT 알고리즘으로 구현이 된다. 심볼 간의 신호 간섭을 최소화하기 위해 CP (Cyclic Prefix)를 삽입하여 송신 신호의 발생을 마무리한다. 채널을 통과한 수신 신호는 신호 검출기에서 패킷의 도착정보가 검출 된다. 이후에 수신 신호 내 심볼 구간의 시작을 찾는 심볼 동기화가 이루어진다. 이 때, FFT 알고리즘을 이용한 신호의 복조를 위해 윈도우(windowing)을 통하여 FFT 길이에 맞는 신호를 분리하는 작업을 수행한다. 수신 신호의 긴 심볼(Long symbol)을 이용하여 복조된 부반송파의 변조 값으로부터 채널의 응답을 추정하며, 송수신단간의 클럭 주파수 차이로 인한 부반송파의 페이즈 오차를 보정한다. 수신된 각 비트의 로그-우도확률(log-likelihood) 함수를 계산함으로써 디매퍼(Demapper) 블록에서 심볼에 해당하는 비트열을 복원한다. 송신단에서 분산된 비트를 원래의 위치로 되돌리는 디인터리빙(deinterleaving)이 이루어지고, 비터비 복호기 (Viterbi decoder)를 이용하여 데이터를 복원한다. 마지막으로 송신단의 스크램블링에 대응하는 디스크램블링을 수행하여 원래의 송신 데이터를 복원한다.

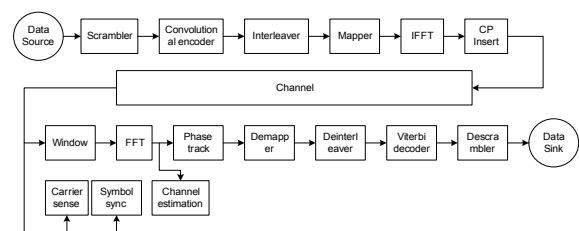


그림 2 멀티캐리어 방식의 송수신 블록 개념도

Fig. 2 Conceptual Block Diagram of Multi-carrier Type Transceiver

수신 성능 시뮬레이션의 결과는 그림 3과 같다. 패킷의 길이를 20,000 바이트, 송수신단간의 클록 주파수 차이가 없으며, 신호의 반사가 없는 AWGN 채널로 가정하였다. 성능 곡선에서 보이는 바와 같이 멀티캐리어 송수신방법을 사용하여 400Mbps를 지원하기 위해서는 표 1에 보인 바와 같이 1024QAM과 7/8 부호화율을 사용하여야 하는데, 이 때 채널의 SNR은 35dB 이상이 되어야 패킷 오류율 1%를 달성할 수 있음을 알 수 있다.

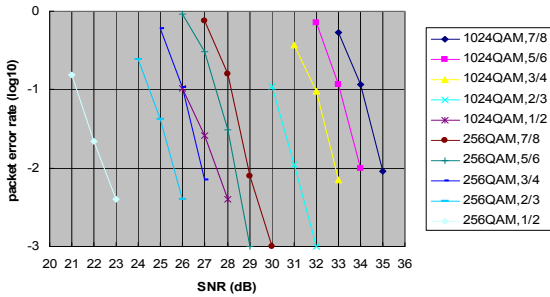


그림 3 패킷 오류율에 대한 시뮬레이션 결과
Fig. 3 Simulation Results of Packet Error Rate

4. 초고속 전력선통신 (VH-PLC) 기술

지금까지 400Mbps급 이상의 전송속도 목표달성을 위한 멀티캐리어 변조방식의 예비사양을 도출하였다. 본 절에서는 실제 전력선 채널모델[8,9]에서 성능열화 극복을 위한 성능향상 기술들을 검토한 후, VH-PLC 물리계층 (PHY) 기술을 간략히 소개한다.

4.1 성능향상을 위한 적용 기술

먼저, 기존 국내 고속 전력선통신 시스템 국가표준인 KS X4600-1과 국제표준규격 ISO/IEC 12139-1을 따르는 24Mbps급 고속전력선 통신시스템과 동일한 전력선채널 상에서 양립할 수 있기 위해서는 제어프레임의 체크시퀀스, 리드-솔로몬(5,3) 부호, 다이버시티 매핑, 위상편이 변조 및 512 샘플 FFT기법을 포함하는 상호공존기술 등이 동일하게 적용되어야 한다[2,3]. 한편, 전력선채널 환경에서 400Mbps급 이상의 전송속도를 안정적으로 달성하면서 채널의 SNR을 최소화하기 위한 방안으로 데이터 프레임 헤더 체크시퀀스를 두고, 데이터프레임헤더 채널부호화로 LDPC (Low Density Parity Check)와 같은 성능이 우수한 부호화기를 사용한다. 이 때, 채널부호화 성능을 결정하는 매트릭스 크기에 따른 시스템의 복잡도를 줄이기 위해 데이터 프레임 정보비트로 부터 24x24 단위행렬의 크기를 순환이동방법으로 생성하는 방법을 고안하여 1/2, 2/3, 3/4, 5/6, 7/8의 다양한 부호화율을 가변 지원토록 한다[10]. 또한 전송속도를 어느 정도 희생해서라도 송·수신 전송 신뢰성을 높이기 위한 방안으로는 채널의 상태에 맞게 부반송파의 변조방식의 가변 및 부호화율을 조정할 수 있는 비트 로딩 기술이 필요하다. 또한 다수의 부반송파를 효과적으로 이용한다. 즉, 시간 및 주파수 다이버시티 데이터 전송 모드를 두는 부반송파 가용모드 기법을 적용하여 전력선채널에서 쉽게 나타날 수 있는 임펄스성 잡음에 효과적으로 대응하도록 한다[11]. 마지막으로 채널의 시간에 따른 변화가 심할 때 크로허버트 복조방법 대신에 성능의 열화를 감수하고서라도 차등 복조방식을 사용한다.

표 2 400Mbps급 초고속 전력선통신 시스템 PHY 기본 사양

Table 2 Specification of the 400Mbps VH-PLC

항목	DMT 심볼 변수값		
	프리앰블	제어프레임	긴 심볼, 데이터 프레임 헤더,
사용대역폭	25MHz	25MHz	75MHz
샘플링주파수	50MHz	50MHz	200MHz
톤 간격	97.65625kHz	97.65625kHz	48.828125kHz
IFFT 간격	512 샘플	512 샘플	4096 샘플
순환접두부 간격	0 샘플	128 샘플	448 샘플
롤오프 간격	16 샘플	16 샘플	-
심볼 간격	512 샘플	624 샘플	4544 샘플
FFT 주기	10.24μsec	10.24μsec	20.48μsec
심볼길이	10.24μsec	12.48μsec	22.72
톤(또는 부채널) 변조	16PSK	DBPSK	BPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM, 256QAM, 1024 QAM

4.2 물리계층 (PHY) 사양

본 시스템의 전체 물리계층의 사양은 표 2와 같다. VH-PLC 모뎀 신호의 DMT 심볼 변수값은 전송 프레임 형태에 따라 세 가지 데이터열 형식으로 나뉜다. 프리앰블 (Preamble)과 제어프레임(Control Frame)으로 구성되는 구분자(Delimiter)는 기존 KS 클래스-A 장치의 표준규격과 상호공존을 위해 고안된 것으로서, KS 클래스-A PLC 장치의 동일한 DMT 심볼 변수값을 갖는다. 긴 심볼(Long Symbol), 데이터 프레임 헤더(Data Frame Header)와 데이터 프레임 (Data Frame)은 최대 75 MHz의 주파수 대역에서 1,536 개의 부반송파가 적용된 DMT 심볼로 구성된다. 부반송파 대역폭은 48.828125 kHz이며, 다중 경로 채널의 영향을 최소화하기 위한 2.24 μsec 길이의 순환 접두부 (Cyclic Prefix)가 추가되어, 각 DMT 심볼의 길이는 22.72 μsec가 된다. 이 DMT 심볼들은 웨이핑을 하지 않은 형태이다. VH-PLC에 사용되는 PSDU 구조는 그림 4와 같다. PSDU는 프레임 바디에 해당하는 데이터 프레임의 포함 여부에 따라 짧은 PSDU와 긴 PSDU로 나뉜다. 짧은 PSDU는 확장 구분자만을 포함하여, KS X 4600-1 PLC 클래스-A 장치와 동일한 프리앰블과 제어 프레임, 그리고 긴 심볼과 데이터 프레임헤더로 구성된다. 프리앰블은 CP가 없는 클래스-A DMT (DMT-A) 심볼 9개로 구성되며, 제어 프레임은 CP를 포함한 DMT-A 심볼 4개로 구성된다. 긴 심볼은 CP를 포함한 클래스-B DMT (DMT-B) 심볼 2개로 구성되며, 데이터 프레임 헤더는 CP를 포함한 DMT-B 심볼 3개로 구성된다. 긴 PSDU는 확장 구분자와 데이터 프레임으로 구성되며, 데이터 프레임은 MPDU에 해당하는 프레임 바디 길이에 따라 가변적인 n 개의 DMT-B 심볼로 구성된다. 데이터 프레임에는 프레임 바디와 블록 패딩, 데이터 프레임 체크 시퀀스가 포함된다.

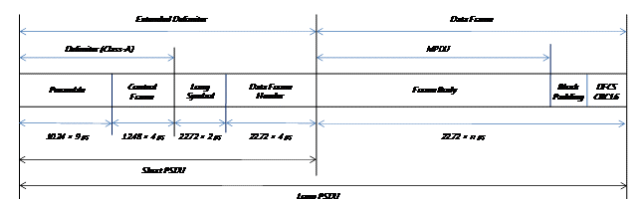


그림 4 PSDU의 구조
Fig. 4 Simulation Results of Packet Error Rate

4.3 VH-PLC 모의실험

앞 절에서 설명된 VH-PLC 사양의 적합성을 검증하기 위하여 통신성능을 검증할 수 있는 평가도구를 개발한다. 즉, C++ 클래스기반으로 개발되어진 ED (Event-Driven) 방식의 시뮬레이터와 Mathworks사 Simulink의 GUI 환경을 기반으로 개발된 TD (Time-Driven) 방식의 시뮬레이터이다. 그림 5는 짧은 PSDU 패킷송신과 데이터 프레임 송신을 위한 송·수신기에 대한 상세 구조도로 각 송신 데이터 프레임의 종류에 따라 독립적으로 실행가능하다. 실제 가정 내 전력선채널을 모델링한 결과와 Rayleigh 분포특성을 갖는 이론적 채널모델링을 통하여 채널블록을 설계하였고[8,9], 송신기의 동작 시나리오에 따라 모의실험되어진다. 그림 6은 ED 방식의 시뮬레이터를 수행한 통신성능을 나타낸 것으로 주어진 통신채널 내에서 물리계층의 최대 전송속도를 보여준다. 신호의 다중경로지연 및 주어진 전력선채널 정보에 따른 수신 데이터의 통신성능과 LDPC 채널코덱의 유무에 따른 통신성능을 함께 보여준다. 모의 실험결과, 대략 28dB의 SNR에서 400Mbps 전송속도를 보장함을 알 수 있다. 채널부호화를 적용하지 않을 경우, 최소 34dB SNR이 보장되어야 최소한의 통신연결성을 보장할 수 있으며, 400Mbps의 전송속도를 제공하기 위해서 37dB 이상의 SNR이 필요함을 알 수 있다. 이처럼 ED 방식의 시뮬레이터는 통신성능에 대한 정적 데이터결과를 분석·접근하는데 용이하여 통신시스템의 모델링 및 초기 개발단계 사양 검증에 유리하다. 반면, TD (Time-Driven) 방식의 시뮬레이터는 연속시간 상에서 송·수신 신호 심볼들에 대한 내부 모듈 별 흐름제어가 가능하고, 시간 및 주파수 영역의 신호응답특성과 함께 샘플단위 전송신호를 확인 할 수 있는 장점이 있어, 초기 시스템 회로 설계 및 구현 검증에 보다 적합하다.

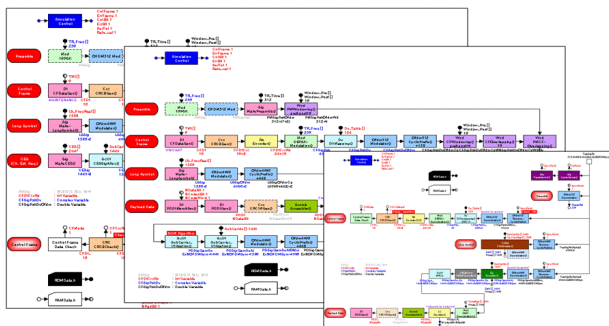


그림 5 ED (Event-Driven) 방식의 초고속 전력선통신 시뮬레이터

Fig. 5 VH-PLC Simulator Based on Event-Driven Type

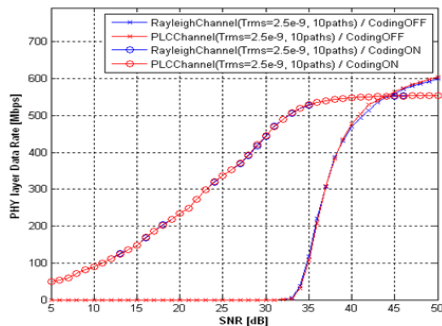


그림 6 ED (Event-Driven) 방식의 시뮬레이터 수행 결과

Fig. 6 Simulation Result Based on Event-Driven Type

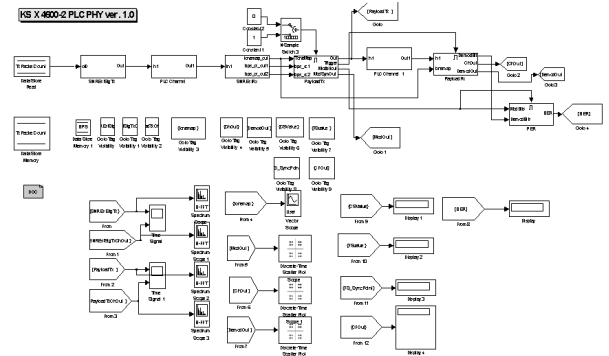


그림 7 TD (Time-Driven) 방식의 초고속 전력선통신시뮬레이터

Fig. 7 VH-PLC Simulator Based on Time-Driven Type

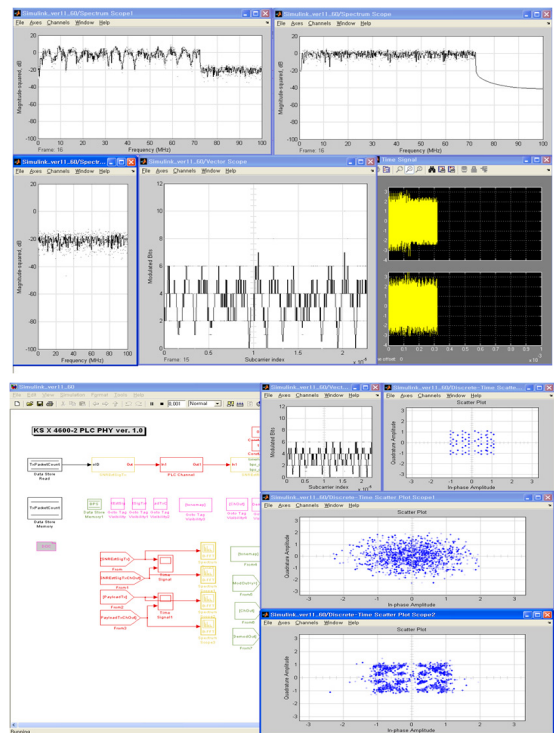


그림 8 TD (Time-Driven) 방식의 시뮬레이터 수행 중 결과

Fig. 8 Simulation Result Based on Time-Driven Type

그림 7은 개발된 초고속 전력선통신 PHY 송수신기를 구성하는 여러 계층 블록들 중 최상위 시스템 GUI를 보여준다. TD방식의 시뮬레이터의 경우, 우선 송신하고자 하는 MPDU 데이터에 대한 입력 테스트벤치는 채널정보를 알기 위해 ROM 타입의 메모리 블록에 임의로 저장된다. MPDU는 저장된 ROM 메모리 블록에서 불러와 이산시간 샘플단위로 DMT 송신기의 입력으로 인가되어지고 현재의 전력선 채널 변화에 따른 채널추정을 거친 후, 실제 통신에 가장 적합한 시스템 파라미터들을 추출하게 된다. 추출된 파라미터들을 기반으로 새롭게 구성된 송신데이터들은 송신기를 통하여 전력선을 통하여 전송된 후 수신기를 거쳐, 최종적으로 송신단에서 보내온 신호를 검출하게 된다. 그림 8은 송·수신되는 신호의 각 주요 임계 또는 관심지점에 대하여 연속적으로 샘플들을 추적·분석 및 모니터링 하는 실시간 상태

를 보여준다. TD방식의 시뮬레이션 결과, 시간영역 및 주파수 영역에서의 전력선에 전송되는 실제 샘플들이 시간흐름에 따라 KS X 4600-1 표준 클래스-A를 따르는 DMT-A 모델장치에서의 전송신호와 함께 공존할 수 있으며, 해당 신호 레벨과 동일하게 수행됨을 보여 주고 있음을 알 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 현재 스마트그리드의 각 분야별 통신 인터페이스로 주목을 받고 있는 전력선통신기술의 역할과 초고속 전력선통신시스템의 실현가능성을 검토하였다. 무엇보다도, 기존 KS 및 ISO/IEC 표준을 따르는 전력선통신시스템과 상호공존이 가능하고, 실제 전력선 채널 변화에 가변 적용할 뿐만 아니라, 빈번히 발생하는 임펄스성 잡음에 의한 영향을 최소화할 수 있는 초고속 전력선통신 시스템 구조를 제안하였다. 시스템의 사양검증을 위해서는 Mathworks사의 Simulink S/W를 사용하여 GUI기반으로 하는 Time-Driven 방식의 시뮬레이터와 C++ S/W를 기반으로 하는 Event-Driven 방식의 상위 시스템 시뮬레이터를 개발하였다. 모의 실험 결과, 목표 통신성능을 만족하는 400Mbps급 초고속 전력선통신 시스템구현에 대한 실현 가능성을 보여주었다. 개발된 두 건의 시스템 상위설계 시뮬레이터들은 향후, 초고속 전력선통신 시스템의 SoC (System-on-Chip) 반도체회로 구현을 위해 반드시 필요한 기초 설계 개발도구로써 그 역할을 담당하게 된다.

참 고 문 헌

[1] 최 성수, "400Mbps급 초고속 전력선통신기술(KS X 4600-2)", 2010 UPLC 비전과 융합기술 세미나자료, 한국전기연구원, pp.3-17, 2010년 4월.

[2] 지식경제부, "스마트그리드 로드맵", 2010. 1.

[3] 산업자원부 기술표준원, "정보기술-전기통신과 시스템 간의 정보교환-전력선통신 (PLC) -고속PLC 매체접근 제어(MAC) 및 물리층 (PHY) -제1부: 일반요구사항, KS X 4600-1", 2007년.

[4] ISO/IEC 12139-1, Power Line Communications (PLC) - High Speed PLC Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY), Part 1: General Requirements, July 2009.

[5] 최 성수, 오 휘명, 김 용화, 김 영선, "스마트그리드를 위한 초고속 전력선통신 시스템 실현에 관한 연구", pp.300-301, 대한전기학회, 대한전자공학회 정보 및 제어 통합학술대회, 2010년 10월.

[6] 최 성수 외, "400Mbps급 초고속 전력선통신 시스템의 상위 시뮬레이터 설계", pp.302-303, 대한전기학회, 대한전자공학회 정보 및 제어 통합학술대회, 2010년 10월.

[7] S. Galli and O. Logvinov, "Recent Developments in the Standardization of Power Line Communications Within the IEEE," *IEEE Commun. Mag.*, pp.64-71, Jul. 2008.

[8] H. M. Oh, S. Choi, Y. Kim, J. Lee, and K. C. Whang, "A systematic Approach to Analyzing Multipath Parameters from PLC Channel Response", *IEEE Trans. Power Del.*, pp.2339-2345, Oct. 2008.

[9] Y. Kim, "Multipath Parameter Estimation for PLC Channels Using the GEESE Algorithm", *IEEE Trans. Power Del.*, pp.2339-2345, Oct. 2010.

[10] 오 휘명, 최 성수, 김 영선, 김 용화 "채널 상태에 따른 정보 비트율 가변에 적응적인 LDPC부호기 및 복호기 구조", 특허출원: 10-2010-0114072, 대한민국, 2010년 11월.

[11] 김 용화, 최 성수, 오 휘명, 김 영선, "임펄스성 잡음의 영향을 감소시키기 위한 다중 반송파 기반의 패킷 송신 방법, 특허출원: 10-2009-0037431, 대한민국, 2009년 4월.

저 자 소 개



최 성 수 (崔 聖 守)

1996년 경원대학교 전자공학과 졸업(공학사). 1998년 광주과학기술원 (GIST) 정보통신공학과 졸업(공학석사). 2002년 미네소타대학교 박사조교. 2003년 GIST 정보통신공학과 졸업(공학박사). 2003년~현재 한국전기연구원 선임연구원. 2004년~현재 과학기술연합대학원대학교 조교수(겸임).



오 휘 명 (吳 輝 明)

1998년 연세대학교 전기공학과 졸업. 2000년 동 대학원 전기컴퓨터공학과 졸업(공학석사). 2009년 동 대학원 전기전자공학과 졸업(공학박사). 2001년~2005년 한국전기연구원 연구원. 2006년~현재 한국전기연구원 선임연구원.



김 영 선 (金 永 善)

1997년 한양대학교 전자통신공학과 졸업(공학사). 1999년 광주과학기술원 (GIST) 정보통신공학과 졸업(공학석사). 2004년 GIST 정보통신공학과 졸업(공학박사). 2003년~2005년 LG전자 선임연구원. 2005년~현재 한국전기연구원 선임연구원



김 용 화 (金 容 華)

2001년 서울대학교 전기공학부 졸업(공학사). 2007년 서울대학교 전기·컴퓨터공학과 졸업(공학박사). 2007년~현재 한국전기연구원 선임연구원