

지중 저압 전력선의 협대역 전력선통신 채널특성 및 적용성에 대한 연구

유 현 우[°], 윤 경 섭^{*}, 강 수 경^{*}, 최 인 지^{*}, 박 병 석^{*}, 김 일 한^{**}, 김 원 수^{**}

Study on Channel Characteristics and Feasibility of Narrowband Power Line Communication over Underground Low Voltage Power Lines

Hyunwoo Yoo[°], Kyung Shub Yoon^{*}, Sukyung Kang^{*}, Inji Choi^{*}, Byungseok Park^{*}, Il Han Kim^{**}, Wonsoo Kim^{**}

요 약

본 논문은 국내 지중 저압선에 대한 협대역 PLC 기술의 통신 채널 특성과 이를 기반으로 한 적용성 연구결과에 대해 기술한다. 지중 저압선이 매설된 실제 거주지역에 협대역 PLC 채널 측정을 위한 시스템을 구성하였으며, 이를 통해 채널 응답, 잡음 PSD, 선 임피던스를 포함하는 채널 특성을 측정하였다. 측정된 채널 특성을 분석하여 국내 지중 저압선의 채널 특성이 협대역 PLC 적용에 적합한 특성을 띠며, 250kHz 이후 주파수 대역이 특히 양호한 특성을 나타내는 것을 보였다. 이를 기반으로 IEEE P1901.2 규격을 채택, FCC High 대역을 이용하여 네트워크 테스트를 수행하였으며 이를 통해 국내 지중 저압선에 협대역 PLC 기술의 적용이 가능함을 확인하였다.

Key Words : Power Line Communication, Narrowband PLC, Underground Power Line, IEEE P1901.2

ABSTRACT

This paper presents in details channel and noise characteristics over narrow bands below 500kHz based on the field tests over underground low voltage(LV) power lines in residential areas in Korean grid. We show that the channel characteristics of narrowband signals over underground LV power line are decent. We first describe methodology of channel characteristic measurements including channel frequency response, noise, and line impedance, and obtain channel characteristics over the underground LV lines in the residential areas. Also based on the measurement results, we adopt the IEEE P1901.2 standard on the FCC High band, and bring up narrow band power line communication network.

I. 서 론

PLC(Powerline Communication, 전력선 통신)는

전력선을 이용하여 통신신호를 전송하는 통신방식이다. 전력을 공급하기 위한 전력망은 이미 전국에 보급되어 현존하는 인프라 중 가장 광범위한 네트워크

[°] First Author and Corresponding Author : 한국전력공사 전력연구원, uwill@kepcoco.kr, 정회원

^{*} 한국전력공사 전력연구원, 12990020@kepcoco.kr, skkang@kepcoco.kr, change@kepcoco.kr, 정회원, blueon@kepcoco.kr, 정회원

^{**} Texas Instruments, il-han-kim@ti.com, wonsoo.kim@ti.com

논문번호 : KICS2013-05-226, 접수일자 : 2013년 5월 30일, 최종논문접수일자 : 2013년 9월 26일

크를 구성하고 있으며, 따라서 스마트그리드, AMI(Advanced Metering Infrastructure) 시스템 구축을 위한 최적의 통신 솔루션으로 여겨지고 있다.

최근 PLC 기술은 적용 어플리케이션 및 활용 주파수 대역의 확장과 더불어 국내외의 활발한 연구 개발을 통해 전송능력과 시스템 완성도 측면에서 빠른 성장을 보이고 있다. 현재에는 500Mbps급 BPL(Broadband over Powerline, 광대역 전력선 통신) 기술¹¹ 개발이 완료된 상태이며, 그 이상의 고속 PLC 기술 개발^{12,31} 역시 활발히 진행 중이다.

이렇듯 고속 PLC 기술개발이 활발하게 이루어지는 동시에, 역설적으로 저속 협대역 PLC 기술에 대한 관심 또한 함께 높아지고 있는 추세다. 특히 최근 스마트그리드 도입을 앞두고 유럽의 CENELEC, 미국의 FCC, 일본의 ARIB 등과 같은 수십~수백 kHz 이하 주파수 규정 만족, 열악한 통신환경에서 robust한 통신성능 확보 등이 이슈가 되면서 PRIME, G3-PLC와 같은 협대역 PLC 기술에 대한 관심이 높아지고 있다. 이를 근간으로 최근 수년간 ITU-T G.9902(G.hnem), G.9903(G3-PLC), G.9904(PRIME), IEEE P1901.2 등과 같은 협대역 PLC 기술에 대한 표준화 활동 또한 활발하게 이루어져 왔다.

대한민국에서는 2020년까지 2,200만 저압 고객을 대상으로 대규모 원격검침 시스템을 구축할 계획을 가지고 있으나, 지중구간과 농어촌 지역 등 일부 읍영지역에서는 2~30MHz 대역을 사용하는 광대역 PLC 기술의 적용이 어려운 실정이다. 특히 지중 선로에서는 전력선이 지나는 관로를 감싸고 있는 주변 물질로의 신호 누출이 많아 상당히 높은 수준의 신호 감쇄가 발생된다고 알려져 있다^{4,51}. 그간 국내 지중선로에 대한 광대역 PLC 기술의 적용성 확인을 위한 다수의 연구가 수행되었지만, 대부분의 연구는 그 특성이 비교적 뛰어난 고압선로를 대상으로 한 것이다. 고압선 관로는 고압 전력 누출을 막기 위해 차폐특성이 뛰어나며 부하로 인한 잡음의 유입 또한 적어 그 채널 특성이 비교적 우수하다¹⁶⁻⁹¹. 반면 2010년도에 저압선로를 포함하여 이루어진 연구를 통해, 지중구간 저압선로에서는 광대역 PLC 통신성능이 현저하게 떨어지는 것을 확인할 수 있다¹⁰¹. 따라서 지중 저압선로 구간 대상 원격검침 시스템 구축에 적합한 높은 신뢰도를 갖는 통신 솔루션 확보에 대한 노력이 필요한 상황이다.

본 논문에서는 대한민국 지중 저압 전력선 구간 대상 통신 솔루션 확보 노력의 일환으로 수행된 협

대역 PLC 기술의 적용성 연구에 대해 기술한다. 지중 저압 선로를 대상으로 500kHz 이하 주파수 대역에 대해 측정된 채널특성을 기술하고, 이를 통해 협대역 PLC 기술의 적용성을 분석하였다. 또한, 분석 결과를 검증하기 위해 실제 협대역 PLC 네트워크를 구성, 필드테스트를 수행하고 그 결과를 나타내었다.

II. 지중 저압선의 협대역 PLC 채널특성

PLC 신호가 송수신되는 전력선의 채널응답, 감쇄, 잡음, 선 임피던스 등의 채널특성은 임의로 제어 불가능하면서도 PLC 전송능 및 신뢰도에 크게 영향을 주는 환경 요소이다. 따라서 특정 PLC 기술의 적용성 연구를 위해서는 이에 대한 사전 연구가 반드시 선행되어야 한다. 본 장에서는 지중 저압 선로에 대하여 협대역 PLC 채널 대역의 상기 채널 특성을 측정하기 위한 방법과 이를 통해 얻어진 측정 결과에 대해 서술한다.

2.1. 채널특성 측정을 위한 구성 및 방법

지중 저압선의 PLC 채널특성을 측정하기 위한 장비연결 구성 도식도를 그림 1에 나타내었다. MV(Medium Voltage)-LV(Low Voltage) 변압기의 2차 LV측에 모뎀을 연결하여 데이터집중장치로 모델화하고, 각 저압고객측 전자식 전력량계에 모뎀을 연결하여 슬레이브모뎀을 모델화함으로써 실제 AMI 시스템과 동일한 네트워크 구조를 갖도록 구성하였다. 양 측 모뎀에 각각 오실로스코프를 병렬로 연결하여 채널특성 측정 데이터를 취득하였다. 오실로스코프의 프로브는 매우 높은 임피던스를 갖는 것을 사용하여 측정 결과에 영향을 주지 않도록 하였다.

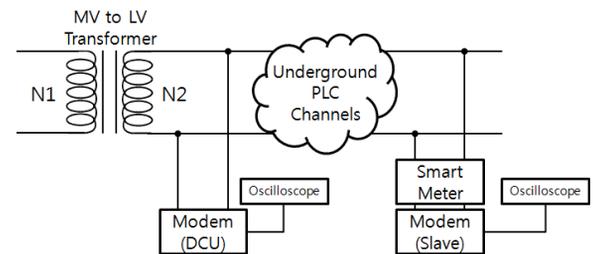


그림 1. 채널 특성 측정 구성
Fig. 1. Channel Measurement Setup

채널 측정은 송신 모뎀에서 기준신호(50~450kHz Chirp 신호)를 발생시켜 송출하고 상대 모뎀에서 수

신되는 신호를 오실로스코프를 통해 저장, Matlab을 이용하여 가공하는 과정을 거친다. 또, 양방향 통신 채널 특성을 모두 파악하기 위하여 데이터집중장치측(슬레이브모뎀으로부터 데이터집중장치 방향 통신 채널)과 슬레이브모뎀측(데이터집중장치로부터 슬레이브모뎀 방향 통신 채널)에서 각각 채널 측정을 수행하였다.

채널 측정을 위해서 대전 유성구 관평동 일대를 테스트베드로 선정하였다. 채널 측정 대상 지역의 위치를 그림 2에 나타냈다. 3개의 동근 사각형은 지상 MV-LV 변압기를 의미하며 각 사각형은 해당 변압기와 지중 전력선을 통해 연결된 전자식 전력량계 설치 가구를 의미한다.

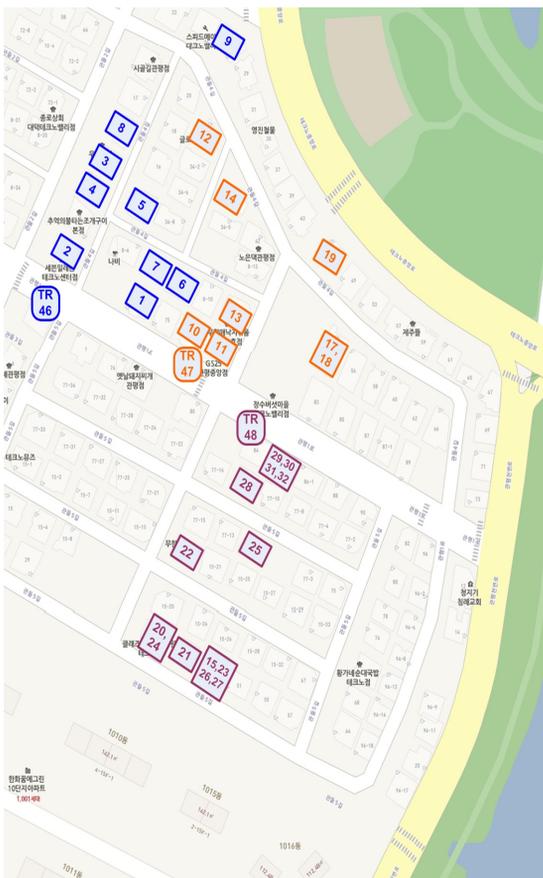


그림 2. 채널 특성 측정 대상 테스트베드
Fig. 2. Map of the test bed for filed measurements

2.2. 채널응답 및 잡음 PSD 측정 결과

우선 협대역 PLC 기술의 적용성 판단기준을 마련하기 위해 시뮬레이션을 수행하고, 종합적인 채널 특성을 나타내는 인자 중 하나인 SNR(Signal to

Noise Ratio)과 통신성능간의 관계를 살펴보았다. 그림 3은 Matlab으로 IEEE P1901.2 FCC 대역 물리계층 규격을 준용하여 수행한 Monte-Carlo 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 시뮬레이션은 AWGN 채널환경을 가정하여 D8PSK(Differential 8 Phase Shift Keying), DQPSK(Differential Quadrature Phase Shift Keying), DBPSK(Differential Binary Phase Shift Keying), ROBO(RObust OFDM) 변조 방식에 대해 수행되었다. 가장 신뢰도가 뛰어난 변조 방식인 ROBO(RObust OFDM) 모드인 경우, -2dB의 SNR에서 10% 이내의 FER(Frame Error Rate)을 나타내는 것을 확인할 수 있다. 일반적으로 10% 이하의 FER이 발생하는 경우, MAC 계층에서 ARQ(Automatic Repeat reQuest) 기능을 통해 에러 발생률을 0%에 가깝게 만드는 것이 가능하다. 따라서 -2dB 이상의 SNR이 확보되는 경우, IEEE P1901.2 기반 협대역 PLC 기술을 이용한 신뢰도 있는 통신이 가능하다 판단할 수 있다.

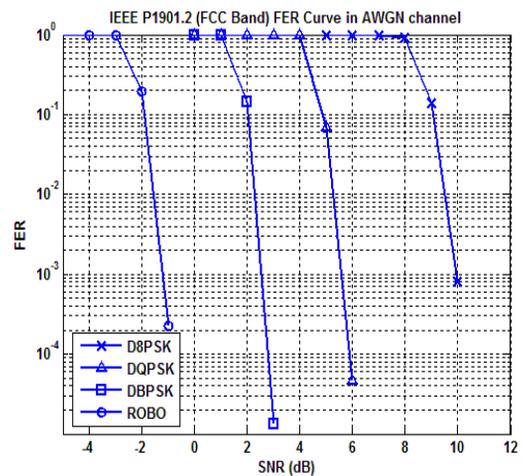


그림 3. AWGN 채널환경 하에서 IEEE P1901.2 시스템의 SNR대비 FER 성능
Fig. 3. FER Performance of IEEE P1901.2 System in AWGN Channel

그림 4와 그림 5는 지점간 거리가 약 100m 정도인 46번 변압기와 11번 계량기간에 측정된 양방향 채널 응답과 잡음 PSD(Power Spectrum Density)를 보여준다. 46번 변압기와 연결된 지역은 대형 식당 및 카센터 등 상업시설이 밀집해 있는 곳으로 다양한 전기기기로부터 유입되는 잡음이 많고, 이로 인해 주파수에 따른 채널특성의 변동이 심한 것을 볼 수 있다. 그럼에도 불구하고 채널특성은 대체적으로 양호한 편으로 나타난다. 일부 대역을

제외하고는 양방향 채널 모두 10dB 이상의 SNR이 확보되어 협대역 PLC 기술 적용에 적합한 채널 환경임을 알 수 있다. 또한 4번 계량기로부터 46번 변압기 방향 채널의 경우에는 주파수가 높아질수록 그 특성이 좋아지는 경향을 띠며, 반대 방향의 채널보다 더 나은 특성을 보인다.

그림 6과 그림 7은 지점간 거리가 약 170m로 비교적 먼 46번 변압기와 6번 계량기간에 측정된 양방향 채널 응답과 잡음 PSD를 보여준다. 앞선 채널 측정 지점에 비해 먼 거리 때문에 열화된 채널 특성을 나타내긴 하지만, 일부대역을 제외하고는 대부분의 대역에서 -2dB 이상의 SNR 확보가 가능한 것을 볼 수 있다. 또한, 측정된 채널특성의 경향 자

체는 앞의 결과와 매우 유사한 모습을 보인다. 높은 주파수 대역에서 그 채널특성이 비교적 좋은 경향을 띠며, 특히 46번 변압기로부터 6번 계량기 방향의 채널에서는 SNR이 0보다 큰 대역이 250kHz 이후의 주파수 대역에서 보다 빈번하게 나타난다. 통신 방향에 따른 채널특성 역시, 6번 계량기로부터 46번 변압기 방향의 채널이 반대 방향의 채널보다 더 나은 경향을 보인다.

그림 8과 그림 9는 지점간 거리가 약 10m 정도로 매우 가까운 47번 변압기와 11번 계량기간에 측정된 양방향 채널 응답과 잡음 PSD를 보여준다. 두 그래프를 통해 볼 수 있듯이 250kHz 보다 낮은 주파수 대역에서는 채널 응답이 비교적 좋지 않고 잡음

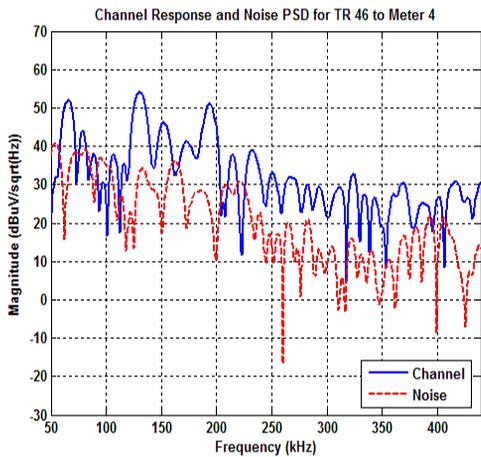


그림 4. 46번 변압기로부터 4번 계량기 방향의 채널 응답과 잡음 PSD
Fig. 4. Channel frequency response and noise PSD from transformer 46 to meter 4

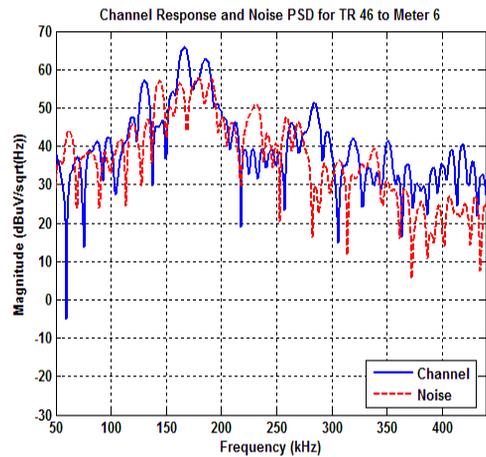


그림 6. 46번 변압기로부터 6번 계량기 방향의 채널 응답과 잡음 PSD
Fig. 6. Channel frequency response and noise PSD from transformer 46 to meter 6

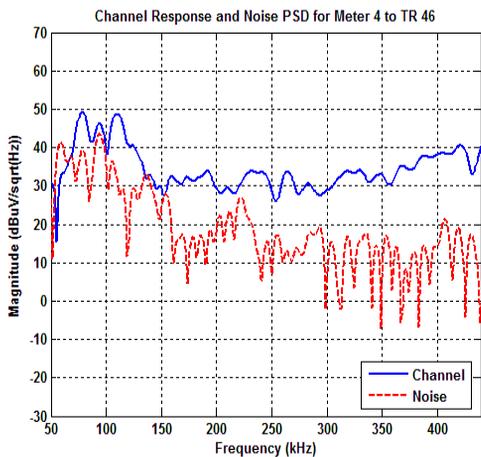


그림 5. 4번 계량기로부터 46번 변압기 방향의 채널 응답과 잡음 PSD
Fig. 5. Channel frequency response and noise PSD from meter 4 to transformer 46

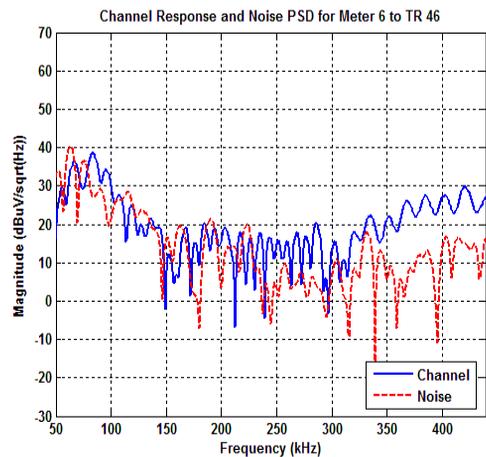


그림 7. 6번 계량기로부터 46번 변압기 방향의 채널 응답과 잡음 PSD
Fig. 7. Channel frequency response and noise PSD from meter 6 to transformer 46

PSD 역시 상대적으로 높다. 반면 250kHz 이상 대역에서는 높은 채널 응답과 상대적으로 낮은 잡음 PSD로 인해 약 40dB의 SNR이 확보되고, 따라서 통신에 적합한 상태임을 알 수 있다. 또한 47번 변압기로부터 11번 계량기 방향의 채널의 경우, 250 kHz 이상 대역에서 반대 방향의 채널보다 채널 응답이 약 10dB 가량 좋지만 약 20dB 정도 높은 잡음 PSD로 인해 SNR은 더 낮은 것을 알 수 있다.

그림 10과 그림 11은 약 170m 떨어진 21번 계량기와 48번 변압기간의 양방향 채널 응답과 잡음 PSD를 보여준다. 47번 변압기와 11번 계량기보다 월등히 멀리 떨어져 있기 때문에 앞의 결과에 비해 안 좋은 채널 특성을 띠지만, 상업시설이 거의

없고 주거지가 대부분인 48번 변압기 지역의 특성상 46번 변압기와 6번 계량기보다 더 나은 채널 특성을 보인다. 마찬가지로 주파수 및 통신 방향에 따른 채널특성의 경향은 앞의 결과들과 매우 유사하다. 250kHz 이후의 주파수 대역에서 비교적 높은 채널응답과 낮은 수준의 잡음 PSD로 약 10~20dB 정도의 높은 수준의 SNR이 확보되며, 계량기로부터 변압기 방향의 채널이 반대 방향의 채널보다 더 높은 SNR 값을 갖는다.

측정 결과를 종합해보면, 500kHz 이하 주파수 대역을 사용하는 협대역 PLC 기술은 대한민국의 지중 전력선에 적합한 통신 솔루션으로 판단된다. 특히, 250kHz 이상 대역을 사용하는 경우, 신호 중계기 없이 170m

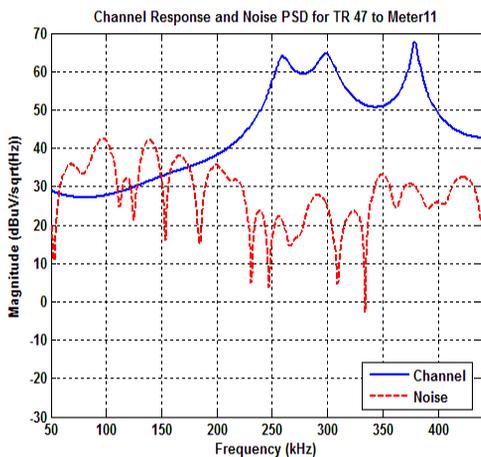


그림 8. 47번 변압기로부터 11번 계량기 방향의 채널 응답과 잡음 PSD
Fig. 8. Channel frequency response and noise PSD from transformer 47 to meter 11

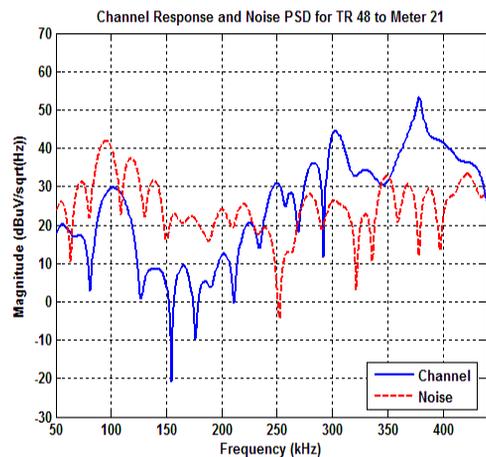


그림 10. 48번 변압기로부터 21번 계량기 방향의 채널 응답과 잡음 PSD
Fig. 10. Channel frequency response and noise PSD from transformer 48 to meter 21

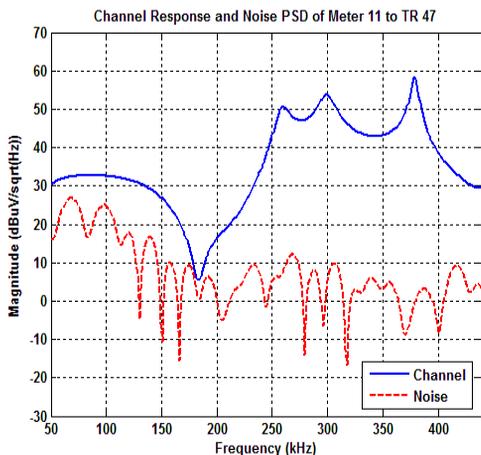


그림 9. 11번 계량기로부터 47번 변압기 방향의 채널 응답과 잡음 PSD
Fig. 9. Channel frequency response and noise PSD from meter 11 to transformer 47

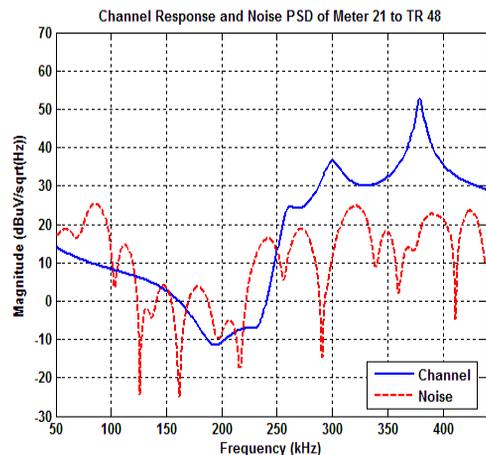


그림 11. 21번 계량기로부터 48번 변압기 방향의 채널 응답과 잡음 PSD
Fig. 11. Channel frequency response and noise PSD from meter 21 to transformer 48

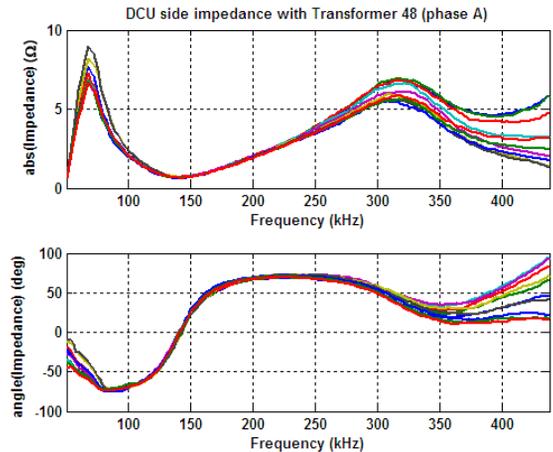
이상 양방향 통신이 가능할 것으로 기대된다. 하지만 양방향 통신 측면에서 지중 전력선의 협대역 PLC 채널은 비대칭성을 보이며, 계량기로부터 변압기 방향의 채널이 반대 방향의 채널보다 더 좋은 특성을 띤다. 이러한 비대칭성의 주된 원인은 계량기 2차 측에 설치된 다양한 종류의 가전제품으로 인해 발생하는 높은 수준의 잡음으로, 전송거리가 멀어질수록 그 비대칭성이 커질 것으로 예상된다.

2.3. 선 임피던스 측정 결과

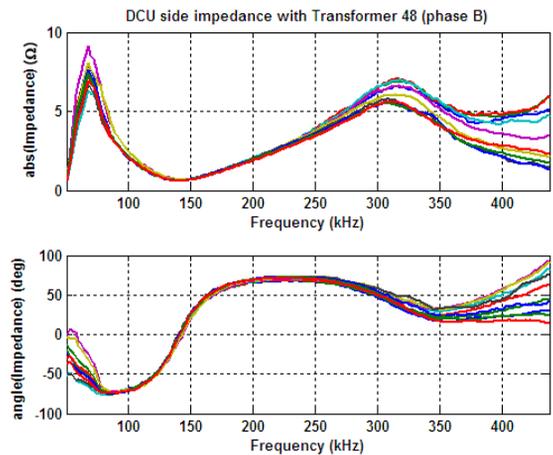
PLC 채널을 특성화하는 또 다른 중요한 요소는 선 임피던스이다. 선 임피던스는 PLC 신호 전송시 소비되는 전력을 결정하는 중요한 인자로, 전력선의 임피던스가 작을수록 신호 송출을 위한 전력 소비가 커진다. 또한 선 임피던스가 클수록 수신단에서 신호감쇄와 왜곡이 적어진다^[11-12]. 하지만 일반적으로 전력선에는 다양한 전기 기기들이 병렬로 연결되어 있기 때문에 통상적으로 매우 낮은 선 임피던스를 가지며, 상당수의 부하가 Inductive 특성을 띠기 때문에 낮은 주파수 대역에서 특히 1Ω 이하의 매우 작은 값을 나타내는 구간이 존재한다^[13].

그림 12는 48번 변압기 측 A, B, C 상에서 10회 이상 연속하여 측정된 선 임피던스 그래프를 겹쳐 나타낸 것이다. 연속된 측정의 시간 간격은 1ms로 하였고, 이를 통해 선 임피던스의 변화 주기인 AC 전력의 Zero-crossing 주기(8.33ms@60Hz) 이상 변화 경향을 관찰할 수 있도록 하였다. 측정결과를 통해 실제 환경에서 선 임피던스는 고정된 값이 아닌, 어느 정도 범위를 갖고 시간에 따라 변화하는 것을 알 수 있다. 특히 100~300kHz 주파수 대역에서는 비교적 그 값이 안정화 되어 그 변화가 크지 않은 반면, 300kHz 이후 비교적 높은 주파수 대역에서는 Inductive 부하의 영향으로 인해 선 임피던스의 변화폭이 점차적으로 커지는 것을 볼 수 있다. 선 임피던스 값은 150kHz에서 1Ω 정도로 낮지만, 250kHz 이후 주파수 대역에서는 약 5Ω 정도로 PLC 신호 전송에 적합한 채널특성의 확보 및 선 임피던스에 비해 충분히 낮은 Source 임피던스를 갖는 PLC 모델 설계가 가능한 수준의 값을 나타낸다.

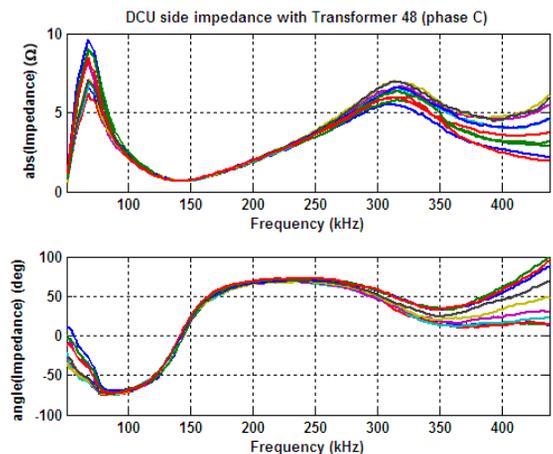
그림 13, 14는 각각 19, 21번 계량기 측에서 측정된 선 임피던스를 나타낸다. 대략적인 경향은 변압기측에서 측정된 선 임피던스와 유사하나, 모든 전력선이 모이는 변압기 측에 비해서는 대체적으로 큰 값을 갖는 것이 특징이다. 150kHz 이후 주파수 대역에서 약 2~17Ω 정도의 선 임피던스를 나타내



(a)



(b)



(c)

그림 12. 48번 변압기측 선 임피던스 (a) A상, (b) B상, (c) C상

Fig. 12. Line Impedance measured at transformer 48 on (a) phase A, (b) phase B, and (c) phase C

며 300kHz 이상 대역에서 선 임피던스의 변화폭 또한 변압기 측에 비해서 크다.

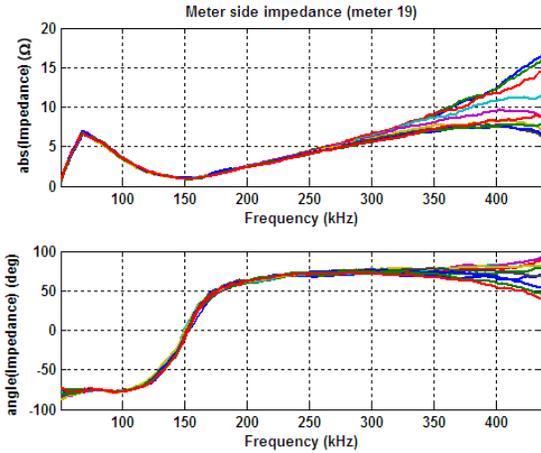


그림 13. 19번 계량기 측 선 임피던스
Fig. 13. Line Impedance measured at meter 19

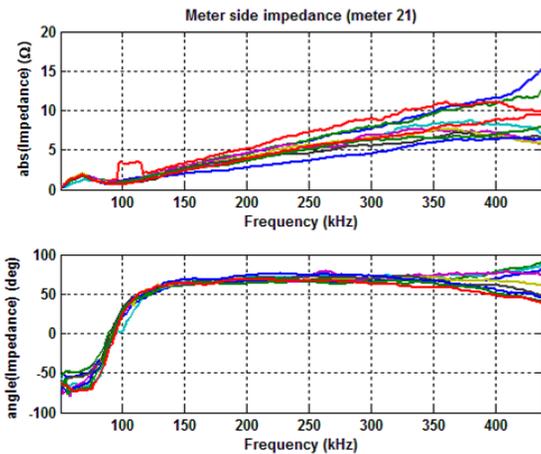


그림 14. 21번 계량기 측 선 임피던스
Fig. 14. Line Impedance measured at meter 21

Ⅲ. 지중저압선 대상 협대역 PLC 네트워크 테스트

앞서 서술된 채널 특성 측정 결과는 국내 지중 전력선 구간의 협대역 PLC 기술 적용 가능성에 대해 긍정적인 지표를 나타내고 있다. 협대역 PLC 기술의 적용성을 보다 구체적으로 확인하기 위하여, 동일 테스트베드에 실제로 협대역 PLC 네트워크를 구성하여 네트워크 테스트를 수행하였다. 본 장에서는 네트워크 테스트를 위한 구성 및 방법과 그 결과에 대해 서술한다.

3.1. 네트워크 테스트를 위한 시스템 구성

2장의 결과를 통해 확인한 바와 같이 500kHz 이하 전 주파수 대역에서 양호한 채널특성이 확보되는 않는다. 따라서 채널특성이 좋은 특정 대역만

표 1. 시험용 협대역 PLC 모뎀 세부 사양
Table 1. Specification of Narrowband PLC Modem for Network Test

Item	Specification
CPU	F28M35H (Concerto Microcontroller)
Standard	IEEE P1901.2
Frequency Band	FCC Band
Memory	EEPROM 2048bits
Power Consumption	Less than 2.5W(DC +12V)
Operating Temperature/Humidity	-20℃~+70℃ / 10%~95%

을 선택하여 통신에 활용하는 Tone Mask 기능을 탑재하고 있는 IEEE P1901.2^[14] 기술을 채택하여 네트워크 테스트를 수행하였다. 네트워크 테스트에 사용된 시험용 협대역 PLC 모뎀은 Texas Instruments사의 F28M35 MCU(MicroController Unit)를 기반으로 설계되었고, 해당 모뎀의 Tone Mask 기능을 통해 FCC High 대역(323~487.5kHz)을 사용하여 PLC 통신을 수행하도록 설정하였다. MAC 계층에서는 IEEE 802.15.4와 IETF RFC4944 기반의 6LoWPAN 메쉬 네트워크 기술을 이용하여 멀티 홉 네트워크가 Plug and Play 방식으로 자동 구성되도록 하였다^[14]. 시험용 협대역 PLC 모뎀의 세부 사양은 표 1과 같다.

상기 기술들이 적용된 PLC 모뎀 중 네트워크 코디네이터 역할을 하는 마스터 모뎀을 47번, 48번 변압기에, 서비스 노드 역할을 하는 슬레이브 모뎀을 10~12, 14, 17~19번 계량기, 21, 22, 25, 29~32번 계량기에 각각 설치하였다. 일반적으로 협대역 PLC 신호는 두 개의 변압기를 통과하지 못하므로, 47번, 48번 변압기에 설치된 두 대의 마스터 모뎀은 각각 독립적인 네트워크를 구성할 수 있다.

각 슬레이브모뎀이 마스터모뎀을 통해 메쉬 네트워크로 구성되는지 여부를 통해 Connectivity를 산정하였으며, 마스터모뎀과 각 슬레이브모뎀간에 1분 주기로 50byte 데이터를 반복 송수신하며 얻어진 전송 성공률을 Delivery Ratio로 정의하였다. 앞서 언급한 바와 같이 Delivery Ratio가 90% 이상 확보되는 경우, ARQ기능을 통해 실질적인 통신성공률을 100%로 끌어올리는 것이 가능하다.

3.2. 네트워크 테스트 결과

첫 번째로 47번 변압기를 중심으로 10~12, 14, 17~19번 계량기를 포함하는 지역을 대상으로 네트워크 테스트를 수행하였다. 해당지역은 거주지 외에 식당 및 자동차 정비소 등 다수의 상업시설이 공존하는 지역으로 대용량 전기설비의 사용이 잦은 곳이다. 그림 15에 네트워크 테스트 대상 지역과 설치된 PLC 모델간에 형성된 네트워크 구조를 나타내었다. 7개의 계량기에 설치된 모든 슬레이브 모델이 변압기측의 마스터 모델과 연결되어 100%의 Connectivity를 확보하는 것이 가능함을 확인하였다. 변압기와 비교적 가까이 위치한 10, 11, 12, 17, 19번 계량기에 설치된 슬레이브 모델은 마스터 모델과 1홉으로 직접 연결되었고, 18번 계량기 설치 슬레이브 모델은 17번 계량기 설치 모델을 통해 2홉으로, 14번 설치 모델은 18, 17번 설치 모델을 통해 3홉으로 연결되었다.



그림 15. 47번 변압기 지역 메쉬 네트워크 구성
Fig. 15. Mesh Network Configuration at Transformer 47 Site

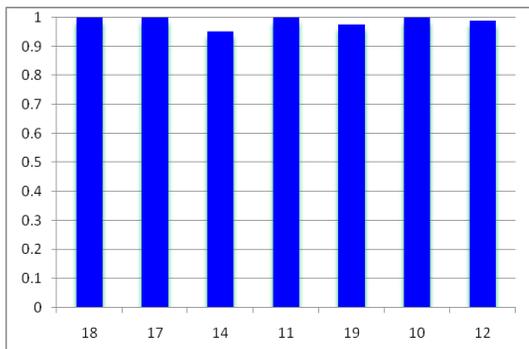


그림 16. 47번 변압기 지역 Delivery Ratio
Fig. 16. Delivery Ratio at Transformer 47 Site

이렇게 구성된 PLC 네트워크를 통해 실제 데이터를 전송하여 Delivery Ratio 측정 테스트를 수행하였고, 그 결과를 그림 16에 나타내었다. X축은 각 모델이 설치된 계량기 번호를 나타내며, Y축은 Delivery Ratio를 1을 기준으로 나타낸다. 3홉으로 연결된 14번 계량기 설치 모델에 대한 Delivery Ratio가 95% 수준으로 비교적 떨어지는 것을 제외하고는 전체적으로 100%에 가까운 Delivery Ratio를 얻을 수 있었다.

상기 두 종류의 네트워크 테스트를 48번 변압기와 21, 22, 25, 29~32번 계량기를 포함하는 지역을 대상으로 추가 수행하였다.

현장에 설치된 PLC 모델들간에 형성된 네트워크 구조를 그림 17에 나타내었다. 47번 변압기 지역에서의 테스트 결과와 다르게 모든 노드가 1홉으로 직접 마스터 모델과 연결되는 것을 볼 수 있다. 이는 해당 지역이 대부분 거주지로만 이루어진 지역으로, 상업시설에서 주로 사용하는 대용량 전기설비



그림 17. 48번 변압기 지역 메쉬 네트워크 구성
Fig. 17. Mesh Network Configuration at Transformer 48 Site

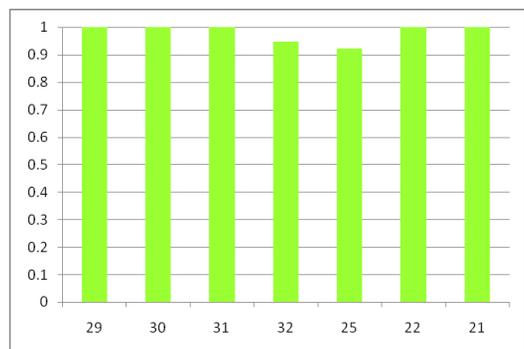


그림 18. 48번 변압기 지역 Delivery Ratio
Fig. 18. Delivery Ratio at Transformer 48 Site

로 인한 잡음 유입이 적어 47번 변압기 지역에 비해 좋은 PLC 채널을 갖기 때문인 것으로 해석된다.

이렇듯 모든 모뎀이 1홉 네트워크로 구성되어 있음에도 불구하고, 그림 12에 나타난 Delivery Ratio 역시 전체적으로 90% 이상의 높은 수준을 보이며 일부 모뎀을 제외한 대부분은 100%를 보인다.

이상의 필드테스트를 통해 국내 지중 저압선에서 협대역 PLC 기술을 이용한 양방향 통신이 가능함을 알 수 있다. 메쉬 라우팅 방식을 통해 모든 설치모뎀이 마스터모뎀과 통신할 수 있었으며, 전체적으로 90% 이상의 Delivery Ratio를 확보할 수 있었다.

IV. 결 론

본 논문에서는 대한민국 지중 저압 전력선 구간에 대한 협대역 PLC 기술의 적용성을 가늠하기 위해, 500kHz 이하 주파수 대역에 대한 채널특성을 측정하고, 이를 기반으로 수행한 네트워크 테스트 결과를 나타내었다.

협대역 PLC 채널 특성은 실제 지중 저압선이 매설된 거주지역에서 필드테스트를 통해 얻어졌으며, 250kHz 이후 주파수 대역에서 중계기 없이 170m 이상 통신이 가능한 정도로 양호한 채널특성이 나타남을 확인하였다. 또한 선 임피던스 역시 일부 대역을 제외하고는 협대역 PLC 모뎀 실제 운용에 적합한 값을 갖는 것을 확인하였다.

이렇듯 측정된 채널 특성은 모두 국내 지중 전력선 구간의 협대역 PLC 기술 적용 가능성에 대해 긍정적인 지표를 나타내고 있다. 협대역 PLC 기술의 적용성을 보다 구체적으로 확인하기 위해 IEEE P1901.2 기술을 채택, 채널 특성이 가장 좋은 FCC High 대역을 통해 직접 네트워크 테스트를 수행하였으며, 100%의 Connectivity와 90% 이상의 Delivery Ratio를 얻어, 협대역 PLC 기술을 이용한 양방향 통신이 실제로 가능함을 보였다.

References

[1] IEEE, *IEEE Standard for Broadband over Power Line Networks: Medium Access Control and Physical Layer Specifications*, IEEE Std. 1901-2010, Dec. 2010.

[2] A. M. Tonello, P. Siohan, A. Zeddani, and X. Mongaboure, "Challenges for 1Gbps power

line communications in home networks," in *Proc. IEEE 19th Int. Symp. Personal, Indoor, Mobile Radio Commun. (PIMRC 2008)*, pp. 1-6, Cannes, France, Sep. 2008.

[3] S. Tsuzuku, I. S. Areni, and Y. Yamada, "A feasibility study of 1Gbps PLC system assuming a high balanced DC power-line channel," in *Proc. IEEE Int. Symp. Power Line Commun. Its Applicat. (ISPLC 2012)*, pp. 386-391, Beijing, China, Mar. 2012.

[4] A. G. Lazaropoulos and P. G. Cottis, "Broadband transmission via underground medium-voltage power lines—Part I: transmission characteristics," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 25, no. 4, pp. 2414-2424, Oct. 2010.

[5] A. G. Lazaropoulos and P. G. Cottis, "Broadband transmission via underground medium-voltage power lines—Part II: capacity," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 25, no. 4, pp. 2425-2434, Oct. 2010.

[6] K.-H. Eom, J.-H. Shin, and S.-J. Lee, "An analysis of characteristics of underground power line communication channel," *J. Inst. Elect. Eng. Korea (IEEK)*, vol. 48, no. 5, pp. 40-45, May 2011.

[7] D.-H. Hyun, I.-J. Choi, C.-S. Kang, and Y.-H. Lee, "The study of the signal propagation characteristics on 22.9 kV underground distribution cable," *J. Korean Inst. Inform. Tech. (KIIT)*, vol. 4, no. 4, pp. 33-39, Aug. 2006.

[8] S.-J. Lee, D.-H. Shin, Y.-H. Kim, J.-J. Lee, and K.-H. Um, "An analysis and modeling of background noise on 22.9kV underground distribution cable for medium-voltage power line communication," *J. Inst. Electron. Eng. Korea (IEEK)*, vol. 33, no. 1, pp. 986-987, June 2010.

[9] Y.-H. Kim, J.-H. Lee, K.-H. Kim, H.-B. Lee, and S.-C. Kim, "A study on the power line communications for smart grid access network system," in *Proc. KICS Summer Conf.*, pp. 354-355, Jeju Island, Korea, June 2011.

[10] J. M. Baek, S. H. Ju, Y. H. Lim, and M. S.

Choi, "Design and evaluation of BPLC-based meter reading network via underground MV line," in *Proc. Korean Inst. Power Elect. (KIPE) Fall Conf.*, pp. 304-305, Seoul, Korea, Nov. 2010.

- [11] J. Anatory, N. Theethayi, R. Thottappillil, M. M. Kissaka, and N. H. Mvungi, "The influence of load impedance, line length, and branches on underground cable power-line communication (PLC) systems," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 23, no. 1, Jan. 2008.
- [12] O. G. Hooijen, "A channel model for the residential power circuit used as a digital communications medium," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 40, no. 4, Nov. 1998.
- [13] PRIME Alliance Technical Working Group, *Draft Specification for Powerline Intelligent Metering Evolution*, PRIME Specification R. v1.3.6, retrieved May, 17, 2012, from <http://www.prime-alliance.org/>.
- [14] IEEE, *IEEE Draft Standard for Low Frequency (less than 500kHz) Narrow Band Power Line Communications for Smart Grid*, IEEE Draft Standard P1901.2/D0.06.07, Aug. 2012.

유 현 우 (Hyunwoo Yoo)



2009년 2월 고려대학교 전파
통신공학과 졸업
2011년 2월 고려대학교 전파
통신공학과 석사
2011년 3월~현재 한국전력공
사 전력연구원, 연구원
<관심분야> 스마트그리드,

AMI, PLC, 통신신호처리

윤 경 섭 (Kyung Shub Yoon)



2009년 2월 한밭대학교 정보
통신컴퓨터공학부 졸업
2011년 2월 한밭대학교 컴퓨터
공학과 석사
2012년 1월~현재 한국전력공
사 전력연구원 연구원
<관심분야> 스마트그리드,
AMI, PLC, 네트워크관리

강 수 경 (Sukyung Kang)



2008년 8월 한양대학교 전자
전기컴퓨터공학부 졸업
2008년 7월~현재 한국전력공
사 전력연구원, 연구원
<관심분야> 스마트그리드,
AMI, PLC, DLMS

최 인 지 (Inji Choi)



2002년 2월 충북대학교 전파
공학과 졸업
2005년 2월 충남대학교 정보
통신공학과 석사
2005년 2월~현재 한국전력공
사 전력연구원, 선임연구
원

<관심분야> 스마트그리드, AMI, PLC, DLMS

박 병 석 (Byungseok Park)



1993년 2월 한남대학교 전자
공학과 졸업
1995년 2월 한남대학교 전자
공학과 석사
2012년 2월 한남대학교 전자
정보통신공학과 박사
1995년 2월~현재 한국전력공
사 전력연구원, 책임연구원

<관심분야> 스마트그리드, AMI, PLC

김 일 한 (Il Han Kim)



2002년 2월 KAIST 전기 및
전자공학과 졸업

2004년 2월 KAIST 전기 및
전자공학과 석사

2004년 7월~2005년 6월 한국
전자통신연구원, 연구원

2008년 12월 Purdue University

Electrical and Computer Engineering 박사

2009년 1월~현재 Texas Instruments, Systems
Engineer

<관심분야> 통신분석, PLC, 정보이론

김 원 수 (Wonsoo Kim)



2001년 2월 고려대학교 전파
공학과 졸업

2003년 2월 고려대학교 전파
공학과 석사

2003년 2월~2005년 7월 삼성
종합기술원 연구원

2010년 12월 University of

Texas at Austin Electrical and Computer
Engineering 박사

2010년 12월~현재 Texas Instruments, System
Applications Engineer

<관심분야> 스마트그리드, PLC, 유무선 네트워킹