

전력선 통신 응용을 위한 저압 덕내망의 채널 특성 분석 기법에 관한 연구

안 남 호, 장 태 규, 황 경 태*
 중앙대학교 전자전기공학부, 듀코테크놀로지스*

A Study on the channel characteristics of the household AC power line used for the low bit rate communication home network

N. H. Ahn, T. G. Chang, and K. T. Hwang*
 School of Electrical Engineering Chung-Ang University, and Duco Technologies*

Abstract - In this paper, the household AC power line network is characterized for the low bit rate powerline communication (PLC) in the frequency range from 10kHz to 450kHz. Various types of electric apparatus and the power lines constitute the network topology, and the PLC channel transfer function and the channel impedance are derived based on the constructed network topology. The channel characteristics derived with the lumped circuit model and the distributed circuit model are compared using the computer simulations. The effect of the wave reflection and signal distortions are also investigated.

1. 서 론

전력선 통신(PLC: Power Line Communication)은 전력을 전달하기 위한 상용의 전력선에 고주파 통신신호를 60Hz 전력신호에 커플링해서 정보를 전송하는 통신 시스템으로 통신을 위한 새로운 채널을 확보해야 하는 비용을 절감할 수 있으며 주변의 많은 콘센트를 통해서 보다 쉽게 정보를 얻을 수 있기 때문에 차세대 통신 시스템으로써 관심이 고조되고 있다.

전력선 통신망은 본래의 전력선이 에너지를 전송하기 위한 선로였기 때문에 기존의 통신 채널에 비해 열악한 요소들을 많이 가지고 있다. 다양한 형태의 잡음과 통신 신호의 왜곡 및 감쇠, 불규칙한 임피던스등이 시간과 응용형태에 따라 변화하기 때문에 신뢰성 있는 통신 시스템을 구성하는 데에는 많은 어려움이 있다. 이러한 열악한 환경을 극복하고 신뢰성 있는 통신시스템 구축을 위해서는 다양한 통신 환경을 반영해줄 수 있는 채널 모델에 기초한 시뮬레이션이 필수적이라 할 수 있겠다.

이에 본 논문에서는 저압 덕내 망에서의 저비트율 전력선 통신을 위해서 34평형 단위세대 아파트의 전력선 망을 기준으로 10-450kHz 주파수 대역에서의 채널 모델링 기법과 임피던스 분석 기법을 제시하였고 시뮬레이션을 통하여 이를 확인하였다.

2. 덕내 전력선 통신 채널 모델링

2.1 덕내 전력선로 모델링

덕내 전력선로망은 일반적으로 덕내 입선에서 여러 개의 간선으로 분리되고, 각 간선들은 다수의 브리지들로 구성되는 트리구조로 이루어져 있다. 다음 그림 1 에서는 본 논문에서 적용한 34평형 단위세대 아파트를 기초로 한 덕내 전력선망의 단면도를 나타내었다. 덕내 전력선망은 그림 1과 같이 단상 2선식으로 분전반에서 차단기를 거쳐 3개의 전열선과 전등선으로 나뉘고, 각각은 다수의 브리지를 포함하는 브리지 탭 환경의 트리 구조로 이루어져 있다. 다음 표 1에 적용한 전력선망의 선로 특성을 나타내었다.

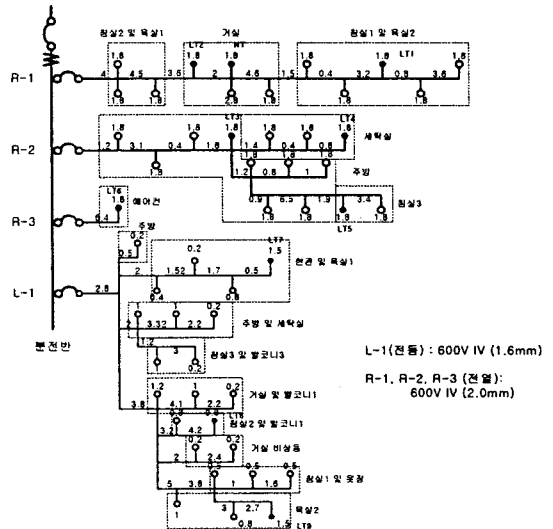


그림 1. 덕내 전력선망(34 평형 단위세대 아파트 기준)

표 1. 덕내 전력선망의 선로 구성

| | 굵기 | 최장직선선로 (m) | 총 길이 [m] | Avg. Characteristic Impedance | Avg. Propagation constant |
|----|----------|------------|----------|-------------------------------|---------------------------|
| R1 | IV 2mm | 30 | 50.8 | 80 - j5.4 | 0.0005 + j0.009 |
| R2 | IV 2mm | 22.2 | 50 | 80 - j5.4 | 0.0005 + j0.009 |
| R3 | IV 2mm | 8.2 | 8.2 | 80 - j5.4 | 0.0005 + j0.009 |
| L1 | IV 1.6mm | 22.6 | 75.44 | 80 - j5.4 | 0.0005 + j0.009 |
| 계 | | | 184.4 | | |

표 1에서와 같이 브리지까지 포함한 총 선로의 길이는 10-450kHz 신호 파장의 27% 에 해당된다. 따라서 distributed circuit을 통한 채널 특성 분석이 가능하며, 선로의 특성 임피던스 및 전파 상수는 단위 거리당 선로정수를 통하여 근사적으로 얻을 수 있다. [2]

2.2 부하 모델링

덕내에서 사용되는 가정용 부하는 통신 신호 주파수 대역의 등가 임피던스와 잡음 소스로 모델링할 수 있다. 가정용 부하는 브리지 탭의 종단 임피던스를 형성하여 임피던스, 신호 왜곡, 잡음 등의 주요한 소스가 된다. 다음 표 2 에 적용한 부하 모델을 나타내었다. [3]

표 2. 가정용 부하의 등가 임피던스 모델(3)

| Apparatus | Impedance model | Apparatus | Impedance model |
|-------------------|-----------------|----------------------|-----------------|
| Refrigerator | | TV monitor #1 | |
| Incandescent lamp | | TV monitor #2 | |
| Foot warmer | | Circuit breaker (On) | |

2.3 브리지 탭 환경의 전력선 통신망 모델링

택내 전력선 채널은 가정용 부하에 의한 브리지 탭 환경의 감쇠 채널로써 전달행렬을(ABCD Matrix) 이용한 distributed circuit 해석이 가능하다.[2] 다음 식 (2-1) 은 선로 특성에 의한 전달행렬을 나타내었다.

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma d) & Z_0 \cdot \sinh(\gamma d) \\ 1/Z_0 \cdot \sinh(\gamma d) & \cosh(\gamma d) \end{bmatrix} \quad (2-1)$$

where, $Z_0 = \sqrt{\frac{R+j\omega L}{G+j\omega C}}$
 $\gamma = \sqrt{(R+j\omega L) \cdot (G+j\omega C)}$

다수의 브리지탭은 각 탭이 위치하는 지점에서의 등가 임피던스로 모델링할 수 있고, 브리지 선로에서 다른 브리지 탭이 존재하는 경우에도 다음 식 (2-2)와 같은 등가 임피던스 $Z_{T,B}$ 로 나타낼 수 있다.

$$Z_{T,B} = Z_{0,B} \cdot \frac{Z_{L,B} + Z_{0,B} \cdot \tanh(\gamma_B d_B)}{Z_{0,B} + Z_{L,B} \cdot \tanh(\gamma_B d_B)} \quad (2-2)$$

식 (2-2)에서와 같이 브리지 탭의 특성은 브리지 선로의 특성뿐만 아니라 종단 임피던스를 형성하는 가정용 부하 특성에 따라 결정되어진다. 이러한 브리지 탭을 포함하는 채널 모델을 다음 그림 2 에 나타내었다.

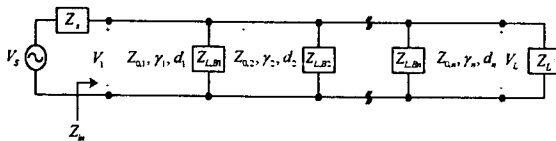


그림 2. 브리지 탭을 포함한 전력선 채널 모델

브리지 탭을 등가 임피던스로 해석하면 그림 2와 같은 채널 모델의 전체 전달행렬은 다음 식 (2-3)과 같이 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} A_i & B_i \\ C_i & D_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & Z_i \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & D_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1/Z_{T,B1} & 1 \end{bmatrix} \dots \begin{bmatrix} A_n & B_n \\ C_n & D_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1/Z_L & 1 \end{bmatrix} \quad (2-3)$$

송수신간의 전달함수 및 채널 임피던스는 식 (2-3)을 이용하여 다음 식(2-4), (2-5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$H = \frac{V_{in}}{V_L} = \frac{1}{A_i} \quad (2-4)$$

$$Z_{in} = \frac{A_i}{C_i} - Z_s \quad (2-5)$$

2.4 전력선 채널 임피던스

전력선 채널 임피던스는 전력선 모델 설계시에 신호 전력을 최대로 전달하기 위한 임피던스 매칭과 관련된 중요한 요소라 할 수 있다. 채널 임피던스는 선로의 특성임피던스와 운전중인 가정용 부하의 임피던스 및 주상변압기 2차측 임피던스등의 조합으로 결정되어지며 구성형태 및 시간에 따라 큰 폭으로 나타난다. 대개 선로

임피던스는 70-100Ω, 가정용 부하는 1-1000Ω로 다양하게 나타나며 주상변압기의 임피던스는 주파수에 비례하는 형태로 나타난다. 이와 같이 많은 변화 요소를 가지는 전력선 채널 임피던스는 평균적으로 다음 식 (2-9) 와 같은 크기를 갖는다.

$$|Z| = 0.005 \cdot f^{0.63} [\Omega] \quad (2-9)$$

3. 시뮬레이션 및 고찰

3.1 시뮬레이션 환경

택내 전력선 통신 채널 특성 분석을 위해서 10-450 kHz의 주파수 대역에서 CEBus표준을 기초로, 주파수 간격은 220Hz로, 샘플링 주파수는 chirp의 8배로 적용하였고, 부하는 랜덤하게 각 nodes에 연결하였다. 전력선 모델은 그림 1에서 거실(전열간선 R-1)에 송신기(NT)가 있고, 수신기(LT)는 침실 및 주방(전열선 및 전등선)에 각각 2-3개를 위치하고 입출력 임피던스는 $Z_{in}=80\Omega$, $Z_{out}=1\Omega$ 으로 적용하여 송수신간 전달행렬을 통한 distributed circuit을 해석하였다. 채널의 감쇠는 다음 식 (3-1) 과 같이 적용하였다.[4]

$$A_{ave} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N A_i$$

$$\sigma_A = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [A_i[dB] - A_{ave}[dB]]^2} \quad (3-1)$$

where, $A_i = |H(jf)|^2, i=1 \dots N$

시뮬레이션은 택내 분전반에서 차단필터(Line Trap)의 사용 유무로 나뉘어 선로망에 의한 distributed circuit과 부하만으로 구성된 Lumped circuit 전달특성 및 임피던스를 구하여 비교하는 방식으로 수행하였다.

3.2 시뮬레이션 결과

택내 전력선 채널이 외부선로와 차단되어 있는 경우의 distributed circuit과 lumped circuit을 해석하여 얻은 채널 전달특성을 다음 그림 3 에 나타내었다.

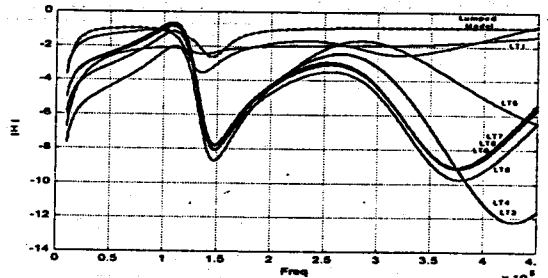


그림 3. Line Trap을 설치한 경우의 Lumped 모델과 Distributed 모델의 수신기 위치별 채널 전달특성 (차단기 영향 배제한 경우)

택내 전력선 채널은 그림 3과 같이 가정용 부하와 브리지 선로의 영향으로 인해 신호 왜곡이 현저하게 발생함을 확인할 수 있다. 이는 택내 총 선로의 길이가 신호 파장의 27% 정도이기 때문에 생기는 다수의 브리지 탭에 의한 반사로 인해 lumped 모델에 비해 평균 3.14[dB]의 감쇠가 추가로 생기며, 특히 신호의 왜곡 현상이 크게 나타나 최대와 최소값이 11.6[dB]의 차이를 나타내게 된다. 이러한 특성은 송수신기 위치에 따라 각각의 특성이 주어진다. LT1, LT2 는 송신기와 같은 R-1전열선에 위치하여 신호 전파 경로가 비교적 짧고 간접적인 브리지 탭의 영향으로 양호한 채널을 보이는 반면, LT3-5 는 R-2전열선에 위치하여 전파 경로상에 직접적으로 연결된 다양한 부하와 브리지 탭에 의한 반사로 신호의 왜곡이 발생함을 확인할 수 있었다. 전등

간선(L-1)에 위치한 LT6-9는 전파 경로가 상대적으로 길지만 브리지 탭 형태로 R-2 전열간선의 다양한 부하의 영향을 받게 되어 R-2 간선의 수신기와 비슷한 왜곡이 생기고 각각은 전등간선의 부하 종류가 한정적이기 때문에 서로 비슷한 왜곡 현상을 겪는 것을 확인하였다. 다음 그림 4는 분전반내에 통신신호 차단필터를 설치하지 않은 경우 차단기 및 외부 회로에 의한 영향을 포함하는 채널 전달 특성이다.

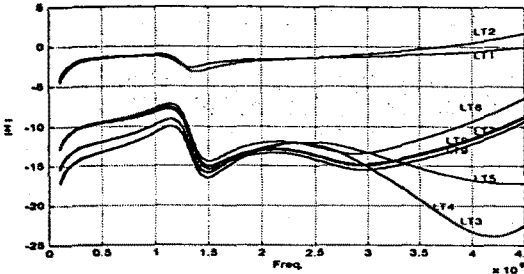


그림 4. Line Trap을 설치하지 않은 경우의 Distributed 모델의 수신기 위치별 채널 전달특성 (차단기 및 외부회로 영향 포함한 경우)

외부 선로의 영향을 반영하기 위해 25mm²의 선로와 식(2-10)과 같은 채널 임피던스를 적용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 대내 분전반까지의 외부 선로는 주상 변압기의 2차측에서 Δ-Y결선으로 나뉘어진 단상으로 보통 100가구와 연결되어 있으며 하나의 변압기는 300가구 정도의 전력을 공급하게 된다. 이러한 외부 회로에 의한 영향으로 그림 4와 같이 10[dB] 이상의 감쇠가 발생하게 된다. 또한 신호 전파 경로상에 차단기와 같은 직렬 임피던스가 있는 경우 120kHz 이상의 신호에 대해서 평균 3.02 [dB]의 감쇠가 추가로 나타난다.

그림 5에서는 채널 임피던스를 나타내었다. 시뮬레이션을 통해 얻은 임피던스와 식(2-10)의 임피던스는 주파수에 증가하는 형태로 나타난다. 이는 전력선로 자체의 인덕턴스, 선로의 skin effect 등으로 인해 고주파일수록 채널 임피던스 특성이 증가하는 형태로 나타난다.

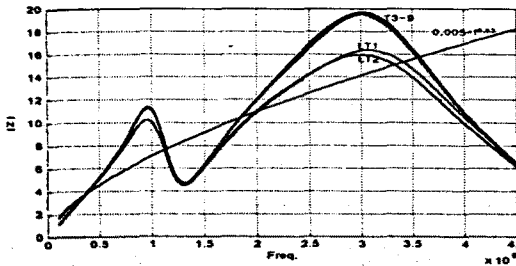


그림 5 송신단에서의 채널 임피던스 특성

다음 표 3에서는 각각의 경우에 해당하는 감쇠특성을 정리하여 나타내었다.

표 3. 채널 감쇠 특성 (CB:차단기, EC:외부회로)

| 위치 | No CB & No EC | | | | With CB & With EC | | | |
|-----|---------------|------|------|-------|-------------------|------|-------|-------|
| | mean | std | min | max | mean | std | min | max |
| LT1 | 2.15 | 0.66 | 1.40 | 6.74 | 1.38 | 0.60 | 0.06 | 4.17 |
| LT2 | 1.9 | 0.60 | 0.79 | 3.56 | 1.12 | 1.14 | -1.69 | 4.53 |
| LT3 | 5.33 | 3.29 | 1.12 | 12.22 | 15.3 | 4.39 | 9.16 | 23.83 |
| LT4 | 5.35 | 3.29 | 1.14 | 12.25 | 15.35 | 4.39 | 9.18 | 23.85 |
| LT5 | 4.07 | 1.83 | 1.66 | 8.71 | 13.99 | 1.98 | 10.04 | 17.21 |
| LT6 | 4.79 | 2.45 | 0.64 | 9.02 | 10.98 | 2.11 | 6.48 | 14.43 |
| LT7 | 4.84 | 2.46 | 0.67 | 9.08 | 12.01 | 2.21 | 7.61 | 14.99 |
| LT8 | 4.91 | 2.47 | 0.72 | 9.15 | 12.15 | 2.25 | 7.70 | 15.11 |
| LT9 | 5.26 | 2.64 | 0.87 | 9.76 | 12.53 | 2.36 | 7.91 | 15.49 |
| 계 | 4.29 | 2.19 | 1.00 | 8.94 | 10.53 | 2.38 | 6.27 | 14.85 |

전력선 채널은 10-450 kHz 대역에서 가정용부하의 등가 임피던스 모델과 선로망의 구성형태에 따른 감쇠특성에 의해 평균 10.53[dB] 가량의 감쇠를 가지며 특히 브리지 탭에 의한 반사의 영향으로 감쇠 폭이 23[dB] 정도까지 나타남을 알 수 있다. 이와 같은 채널 왜곡은 수신신호의 ringing 현상을 일으켜 채널 전송률을 제한하게 된다. 채널 왜곡으로 인한 지연 현상은 전달함수의 역 퓨리에 변환을 위한 등가 임피던스 응답의 rms delay spread 로 대략 1.72μsec 로써 잡음이 없는 환경에서 고성능의 equalizer를 사용하지 않는 경우의 전송률은 대략 290kb/s(≈1/(2 delay spread))이다. 이와 같은 감쇠 폭과 왜곡에 의한 전송률은 채널의 전송률 보다 신뢰성이 더욱 중요한 저속의 제어망과 같은 응용분야에서의 전력선 채널의 활용 가능성을 보일 수 있는 근거가 되며 가격 대비 성능면에서 다른 채널에 비해 우수하다 할 수 있겠다. 위의 시뮬레이션 결과는 한정된 선로모델과 부하모델을 통해 얻은 결과이지만 전력선 모델을 설계하는 과정의 1차적인 기초자료가 될 수 있으리라 판단된다.

4. 결 론

본 논문에서는 저압 대내망에 대한 저비트율 전력선 모델 적용을 위해서 34평형 단위세대 아파트의 선로모델과 가정용 부하의 등가 임피던스 모델을 대상으로 distributed circuit을 해석하여 전력선 채널 특성 분석을 수행하였다.

대내 전력선 채널은 가정용 부하에 의한 브리지 탭 환경의 감쇠 채널로써 거리에 의한 감쇠보다 신호 전파 경로상의 브리지 탭 특성에 의해 신호 감쇠 및 왜곡이 발생함을 확인하였다. 또한 대내 차단기의 영향으로 3.02[dB]의 감쇠가 발생하고, 평균 10.53 [dB]의 감쇠를 보이며 1.72μsec의 rms delay spread를 확인하였다. 이와 같은 감쇠 및 왜곡을 보이는 전력선 통신 채널은 저속의 대내 제어망을 위한 채널로써 비교적 간단한 H/W로 충분한 전송률을 제공하며, 초기 설비 비용이 저렴하기 때문에 다른 통신 채널에 비해 가격 대비 성능면에서 우수하다 할 수 있겠다.

[참 고 문 헌]

- [1] HC Ferrerira, HM Grove, O Hooijen, and AJ. Han Vinck, "Power Line Communications: An Overview", IEEE AFRICON 4th, Volume: 2, 1996, Page(s): 558 -563 vol.2
- [2] Bostoer, T. Van de Wiel, O., "Modelling the low-voltage power distribution network in the frequency band from 0.5 MHz to 30 MHz for broadband powerline communications (PLC)", Broadband Communications, 2000, Proceedings, 2000 International Zurich Seminar on, 2000, Page(s): 171 -178
- [3] Marubayashi, G., Tachikawa, S., "Spread spectrum transmission on residential power line", Spread Spectrum Techniques and Applications Proceedings, 1996., IEEE 4th International Symposium on, Volume: 3, 1996 Page(s): 1082 -1086 vol.3
- [4] Liu, D., Flint, E., Gaucher, B., Kwark, Y., "Wide band AC power line characterization", Consumer Electronics, IEEE Transactions on, Volume: 45 Issue: 4, Nov. 1999, Page(s): 1087 -1097
- [5] Niwa, H., Katayama, M., Yamazato, T.; Ogawa, A.; Isaka, N., "A spread-spectrum system with dual processing gains designed for cyclic noise in power line communications", Spread Spectrum Techniques and Applications Proceedings, 1996., IEEE 4th International Symposium on, Volume: 2, 1996, Page(s): 816 -820 vol.2