

다중경로 분석을 위한 전력선 네트워크 기술 방법에 관한 연구

오취명\*, 최성수\*, 이원태\*, 김관호\*  
한국전기연구원\*

A Study of Power Line Network Description Method for Multi path Analysis

Hui-Myoung Oh, Sung-Soo Choi, Won-Tae Lee, Kwan-Ho Kim  
KERI(Korea Electrotechnology Research Institute)

**Abstract** - To improve the reliability of power-line communication systems, the measurement and analysis has been proceeded in many power-line channel environments. In spite of the wired channel, power line channel has many multi-paths that are changing with load-variation, line-interconnection, impedance mismatching and so on. We accordingly need an analysis method based on the multi-path channel impulse response. Recently, a method to describe the homogeneous power-line network has been published[1]. In this paper, the modified method that can describe both the homogeneous and non-homogeneous power-line network has presented.

신호의 전달 과정은 다중경로로 표현되며, 이러한 다중 경로 현상을 모델링할 때 효과적인 임펄스 응답이 보다 용이하게 활용된다. 식 (1)은 일반적인 다중경로 모델로 표현된 채널의 임펄스 응답 특성 식이다.

$$h(t, d) = \sum_{n=1}^N a_n \delta(t - d_n) r_n e^{j\theta_n} \quad (1)$$

여기서,  $a_n$ 은 경로 전달에 의한 신호 감쇠지수,  $d_n$ 은 경로 지연,  $r_n$ 은 반사 및 투과에 의한 신호 감쇠지수,  $\theta_n$ 은 반사 및 투과에 의한 위상차이며, 각각은 전력선의 전파정수(propagation constant)  $\gamma = \alpha + j\beta$  및 임피던스 변화에 따라 식 (2), (3) 및 (4)와 같이 표현된다.

$$a_n = \prod_{i=1}^R e^{-\alpha_i l_i} \prod_{j=1}^T e^{-\alpha_j t_j} \quad (2)$$

$$d_n = \sum_{i=1}^R \frac{l_i}{v_i} + \sum_{j=1}^T \frac{t_j}{v_j} = \sum_{i=1}^R \frac{l_i}{w/\beta_i} + \sum_{j=1}^T \frac{t_j}{w/\beta_j} \quad (3)$$

$$r_n e^{j\theta_n} = \prod_{i=1}^R \rho_i \prod_{j=1}^T \tau_j \quad (4)$$

여기서,  $\rho_i$ 는 반사계수,  $\tau_j$ 는 투과계수이며, R은 반사 회수, T는 투과 회수이다. 그리고  $l_i$ 와  $t_j$  및  $\alpha_i + j\beta_i$ 와  $\alpha_j + j\beta_j$ 는 반사 및 투과 과정에서 통과하는 전력선의 길이와 전파정수이다.

이와 같은 전력선 채널의 다중경로 해석은 실제 신호의 전달 현상이라는 측면에서 채널을 규정하고 통신 신뢰도를 향상시키는데 필수적이다.

3. 전력선 네트워크 기술 방법

2.1 전력선 채널 네트워크 요소

전력선 채널 네트워크를 효과적으로 표현하기 위해 다음과 같은 요소들을 정의하자.

- 노드 : 전력선이 분기 및 접합된 지점( $n_1 \sim n_N$ )
- 포트 : 부하가 연결된 지점( $p_1 \sim p_M$ )
- 선 : 노드와 노드 및 노드와 포트 사이의 연결 ( $l_{n_1}$  또는  $l_{n_p}$ )

그림 1은 위의 정의에 따라 일반적인 전력선 채널 형태를 나타낸 것이다.

한편, 전력선 채널은 네트워크 구조적 측면에서 다음과 같은 특성을 가지며, 이러한 특성은 옥내 전력선 환

1. 서 론

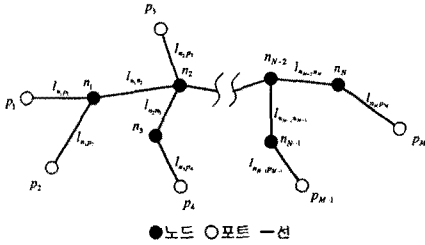
전력선 통신 기술은 지속적인 기술개발을 바탕으로 지난 5년간 급격한 발전을 이루어 현재는 실용화 단계에 있다. 실제로 정보화 선진국에서는 홈네트워크 및 유비쿼터스 사회를 지향하는 기본 기술로서, 정보화 후진국에서는 인터넷 보급과 VoIP를 통한 전화망 등의 솔루션 기술로 주목받고 있다. 그러나 전력선 통신 기술이 미래 사회의 중심 기술로서 자리매김 하기 위해서는 통신 신뢰성 확보가 필수적이며, 근본적인 채널 해석 연구가 바탕이 되어야 한다.

전력선 통신 채널은 기본적으로 데이터 전송용이 아닌 전기 에너지 전달에 적합하도록 설계된 전력선으로 구성되어 있기 때문에, 잡음과 고주파 신호 감쇠는 물론 토폴로지 구조와 다양한 부하기기의 영향을 배제시키기 어렵다. 이미 다양한 측정과 분석을 바탕으로 전력선 통신 채널은 주파수 증가에 따라 신호의 감쇠량이 증가하며, 유선 채널임에도 불구하고 무선 환경과 같은 다중경로 현상이 존재함이 알려졌다. 전력선 채널의 물리적 다양성과 가변성 문제로 아직까지 채널 특성에 대한 표준화된 규명이 이루어지지 못하고 있는 실정이다.

본 논문에서는 전력선 통신 채널 해석을 위한 효과적인 방안의 일환으로서, 전력선 통신 채널의 다중경로 특성 해석을 목적으로 homogeneous 전력선 네트워크의 토폴로지 구조와 전력선 및 부하 임피던스를 바탕으로 하는 전력선 네트워크 기술(description) 방법[1]을 소개하고, non-homogeneous 전력선 네트워크로 확장할 수 있는 방안을 제시하고자 한다.

2. 전력선 채널 다중경로 해석

전력선 채널에 대한 다중경로 해석은 시간영역에서의 임펄스 응답 해석과 주파수 영역에서의 전달 함수 해석으로 수행된다[2]. 채널의 임펄스 응답과 전달 함수는 서로 푸리에 변환 관계이므로 두 가지 방식을 통해 얻어지는 결과는 동일하다. 그러나 일반적인 통신 시스템에서



●노드 ○포트 -선  
그림 1. 일반적인 전력선 채널 구조

경에서는 특별히 항상 만족한다[1].

- 각 포트는 하나의 노드에만 연결된다.
- 포트 간에는 선으로 직접 연결되지 않는다.
- 내부적인 폐회로(loop)가 존재하지 않는다.
- N개의 노드와 M개의 포트가 존재할 경우 선은 N+M-1개가 된다.

### 2.2 Homogeneous 전력선 네트워크

전력선 네트워크에 있어서 homogeneous란 동일한 전력선으로 구성된 것을 의미하며, 전력선 토폴로지나 전력선의 길이 및 연결된 부하는 가변적이지만, 동일한 케이블을 이용함으로써 전력선의 특성 임피던스가  $Z_0$ 로 일정하게 가정된다. N개의 노드와 M개의 포트를 가지는 homogeneous 전력선 네트워크는 다음과 같은 행렬로 기술된다.

- $C_{NP}$  : 노드와 포트 사이의 연결 상태 행렬

$$C_{NP} = \begin{bmatrix} c_{n_1 p_1} & c_{n_1 p_2} & \dots & c_{n_1 p_M} \\ c_{n_2 p_1} & c_{n_2 p_2} & \dots & c_{n_2 p_M} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{n_N p_1} & c_{n_N p_2} & \dots & c_{n_N p_M} \end{bmatrix} \quad (5)$$

여기서,  $c_{n_i p_j}$ 는  $n_i$ 와  $p_j$ 가 연결되면 1, 아니면 0이다.

- $C_{NN}$  : 노드와 노드 사이의 연결 상태 행렬

$$C_{NN} = \begin{bmatrix} c_{n_1 n_2} & c_{n_1 n_3} & \dots & c_{n_1 n_N} \\ c_{n_2 n_1} & c_{n_2 n_3} & \dots & c_{n_2 n_N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{n_N n_1} & c_{n_N n_2} & \dots & c_{n_N n_N} \end{bmatrix} \quad (6)$$

여기서,  $c_{n_i n_j}$ 는  $n_i$ 와  $n_j$ 가 연결되면 1, 아니면 0이다.

- $L_{NP}$  : 노드와 포트 사이에 연결된 선의 길이 행렬

$$L_{NP} = \begin{bmatrix} l_{n_1 p_1} & l_{n_1 p_2} & \dots & l_{n_1 p_M} \\ l_{n_2 p_1} & l_{n_2 p_2} & \dots & l_{n_2 p_M} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ l_{n_N p_1} & l_{n_N p_2} & \dots & l_{n_N p_M} \end{bmatrix} \quad (7)$$

여기서,  $l_{n_i p_j}$ 는  $n_i$ 와  $p_j$  사이의 전력선 길이이다.

- $L_{NN}$  : 노드와 노드 사이에 연결된 선의 길이 행렬

$$L_{NN} = \begin{bmatrix} l_{n_1 n_2} & l_{n_1 n_3} & \dots & l_{n_1 n_N} \\ l_{n_2 n_1} & l_{n_2 n_3} & \dots & l_{n_2 n_N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ l_{n_N n_1} & l_{n_N n_2} & \dots & l_{n_N n_N} \end{bmatrix} \quad (8)$$

여기서,  $l_{n_i n_j}$ 는  $n_i$ 와  $n_j$  사이의 전력선 길이이다.

- $Z_P$  : 포트에 연결된 부하 임피던스 행렬

$$Z_P = \begin{bmatrix} Z_{p_1} & & \\ & Z_{p_2} & \\ & & \ddots \\ & & & Z_{p_M} \end{bmatrix} \quad (9)$$

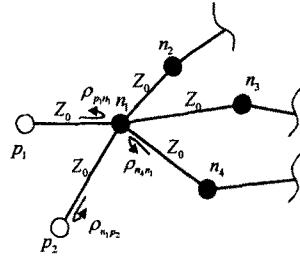


그림 2. 노드 및 포트에서의 반사계수

homogeneous한 전력선의 특성 임피던스  $Z_0$ 와 부하 임피던스로 각 노드 및 포트의 반사계수(그림 2)를 행렬로 표현하면 다음과 같다.

- $R_{NP}$  : 노드에서 포트에 진행하는 신호에 대한 반사계수 행렬

$$R_{NP} = C_{NP} \cdot D_{\rho_{NP}} \quad (10)$$

여기서,  $D_{\rho_{NP}}$ 는  $n_i$ 에서  $p_j$ 로 진행하는 신호에 대해 식 (11)과 같이 정의되는 반사계수들을 대각 성분으로 갖는 대각행렬이다.

$$\rho_{n_i p_j} = \frac{Z_{p_j} - Z_0}{Z_{p_j} + Z_0} \quad (11)$$

- $R_{NN}$  : 노드에서 노드로 진행하는 신호에 대한 반사계수 행렬

$$R_{NN} = C_{NN} \cdot D_{\rho_{NN}} \quad (12)$$

여기서,  $D_{\rho_{NN}}$ 는  $n_i$ 에서  $n_j$ 로 진행하는 신호에 대해 식 (13)과 같이 정의되는 반사계수들을 대각 성분으로 갖는 대각행렬이다.

$$\rho_{n_i n_j} = \frac{2 - s_j}{s_j} \quad (13)$$

여기서,  $s_j$ 는  $n_j$ 에 연결된 전력선의 수이며 식 (14)와 같다. 식 (13)은 신호가 입력되는 선을 제외한  $s_j - 1$ 개의 병렬 임피던스인 식 (15)로부터 구해진다.

$$s_j = \sum_{k=1}^M c_{n_j p_k} + \sum_{k=1}^N c_{n_j n_k} \quad (14)$$

$$Z_{parallel} = \frac{Z_0}{s_j - 1} \quad (15)$$

- $R_{PN}$  : 포트에서 노드로 진행하는 신호에 대한 반사계수 행렬

$$R_{PN} = C_{NP}^T \cdot D_{\rho_{PN}} \quad (16)$$

포트에서 노드로 진행하는 신호에 대한 반사계수는  $C_{NP}$ 의 전치행렬과  $D_{\rho_{PN}}$ 로부터 얻어진다.

### 2.3 Non-Homogeneous 전력선 네트워크

non-homogeneous 전력선 네트워크는 전력선 토폴로지와 전력선 길이 및 연결된 부하들뿐만 아니라 전력선 자체의 특성 임피던스도 가변적이다. 이는 옥내의 전력선 네트워크에서 실제 사용되는 전력선 케이블의 종류가 다르기 때문이다. 따라서 non-homogeneous 전력선 네트워크를 기술하기 위해서는 2.2절에서 소개된 전력선 네트워크 기술 방법에서 식 (5)부터 (9)는 전력선의 특성 임피던스와 무관하므로 그대로 사용되고, 다음과 같이 전력선 특성 임피던스 행렬이 추가된다.

- $Z_{NP}$  : 노드와 포트 사이에 연결된 선의 특성임피던스 행렬

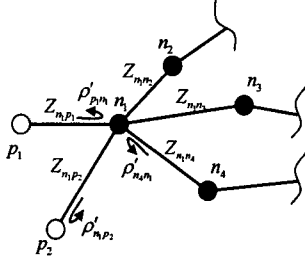


그림 3. 노드 및 포트에서의 수정된 반사계수

$$Z_{NP} = \begin{bmatrix} Z_{n_1 p_1} & Z_{n_1 p_2} & \dots & Z_{n_1 p_M} \\ Z_{n_2 p_1} & Z_{n_2 p_2} & \dots & Z_{n_2 p_M} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{n_N p_1} & Z_{n_N p_2} & \dots & Z_{n_N p_M} \end{bmatrix} \quad (17)$$

여기서,  $Z_{n_i p_j}$ 는  $n_i$ 와  $p_j$  사이의 전력선 특성 임피던스이다.

•  $Z_{NN}$  : 노드와 포트 사이에 연결된 선의 특성임피던스 행렬

$$Z_{NN} = \begin{bmatrix} Z_{n_1 n_1} & Z_{n_1 n_2} & \dots & Z_{n_1 n_N} \\ Z_{n_2 n_1} & Z_{n_2 n_2} & \dots & Z_{n_2 n_N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{n_N n_1} & Z_{n_N n_2} & \dots & Z_{n_N n_N} \end{bmatrix} \quad (18)$$

여기서,  $Z_{n_i n_j}$ 는  $n_i$ 와  $n_j$  사이의 전력선 특성 임피던스이다.

또한, 각 노드 및 포트에서의 반사계수(그림 3)는 다음과 같이 수정된다.

•  $R'_{NP}$  : 노드에서 포트에 진행하는 신호에 대한 반사계수 행렬

$$R'_{NP} = C_{NP} \cdot D'_{\rho_{NP}} \quad (19)$$

여기서,  $D'_{\rho_{NP}}$ 는  $n_i$ 에서  $p_j$ 로 진행하는 신호에 대해 식 (11)과 같이 정의되는 반사계수들을 대각 성분으로 갖는 대각행렬이다.

$$\rho'_{n_i p_j} = \frac{Z_{p_j} - Z_{n_i p_j}}{Z_{p_j} + Z_{n_i p_j}} \quad (20)$$

•  $R'_{NN}$  : 노드에서 노드로 진행하는 신호에 대한 반사계수 행렬

$$R'_{NN} = C_{NN} \cdot D'_{\rho_{NN}} \quad (21)$$

여기서,  $D'_{\rho_{NN}}$ 은  $n_i$ 에서  $n_j$ 로 진행하는 신호에 대해 식 (22)와 같이 정의되는 반사계수들을 대각 성분으로 갖는 대각행렬이다.

$$\rho'_{n_i n_j} = \frac{\parallel S_{n_j | n_i} - Z_{n_i} \parallel}{\parallel S_{n_j | n_i} + Z_{n_i} \parallel} \quad (22)$$

여기서,  $\parallel S_{n_j | n_i}$ 는 다음과 같이 정의된다.

- $S_{n_i}$  :  $n_j$ 에 연결된 임피던스  $Z_{n_i n_j}$  및  $Z_{n_i p}$ 의 집합
- $S_{n_j | n_i}$  :  $S_{n_j}$ 에서  $Z_{n_i n_j}$ 를 제외한 집합
- $S_{n_i | p}$  :  $S_{n_i}$ 에서  $Z_{n_i p}$ 를 제외한 집합
- $\parallel S$  :  $S$  집합내의 원소 임피던스의 병렬 합

•  $R'_{PN}$  : 포트에서 노드로 진행하는 신호에 대한 반사계수 행렬

$$R'_{PN} = C_{NP}^T \cdot D'_{\rho_{PN}} \quad (23)$$

포트에서 노드로 진행하는 신호에 대한 반사계수는  $C_{NP}$ 의 전치행렬과  $D'_{\rho_{PN}}$ 으로부터 얻어진다.

추가적으로 투과계수  $\tau$ 는 반사계수  $\rho$ 와 다음과 같은 관계가 성립되므로, 투과계수 행렬은 식 (25), (26)과 같이 표현할 수 있다.

$$\tau = 1 + \rho \quad (24)$$

•  $T'_{NP}$  : 노드에서 포트에 진행하는 신호에 대한 투과계수 행렬

$$T'_{NP} = C_{NP} \cdot (I + D'_{\rho_{NP}}) \quad (25)$$

여기서,  $I$ 는  $D'_{\rho_{NP}}$ 와 동일한 차원의 단위행렬이다.

•  $T'_{NN}$  : 노드에서 노드로 진행하는 신호에 대한 투과계수 행렬

$$T'_{NN} = C_{NN} \cdot (I + D'_{\rho_{NN}}) \quad (26)$$

여기서,  $I$ 는  $D'_{\rho_{NN}}$ 과 동일한 차원의 단위행렬이다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 전력선통신 채널을 해석하는 근본적인 방법 개발의 일환으로, 채널의 다중경로 해석을 위한 전력선 네트워크 기술 방법을 소개하였다. 최근 발표된 논문에서는 동일한 전력선을 이용하여 구성된 homogeneous 전력선 네트워크에 대한 기술 방법이 소개되었으나, 일반적인 전력선 채널 환경은 다양한 전력선들로 조합된 non-homogeneous 전력선 네트워크이므로, 이러한 non-homogeneous 전력선 네트워크를 효과적으로 기술할 수 있는 방식을 제시하였다.

그러나 앞에서 제시된 방법은 부하 및 전력선 연결 상태가 일정하게 유지되는 정상상태(steady-state)의 전력선 네트워크에는 효과적으로 적용 가능하지만, 실 전력선 채널 환경에서의 다양한 변화를 해석하는 데에는 아직도 보완해야 할 부분들이 있다. 따라서 전력선 채널 환경의 변화에 따라 적응적으로 대응할 수 있는 전력선 네트워크 기술 방법에 대한 연구가 진행 중에 있다.

#### [참 고 문 헌]

- [1] D. Anastasiadou and T. Antonakopoulos, "Multipath Characterization of Indoor Power-Line Networks", *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 20, No. 1, Jan. 2005
- [2] Hui-Myoung Oh, et al, "Wideband Channel Impulse Response Measurement Method Using PN Sequences for the Medium Voltage Power Distribution Line Channel", *Proceedings of ISPLC2004*, pp. 74-78, 2004