

전자장 수치해석을 이용한 전력선 통신용 비접촉식 Blocking Filter 해석

한상준, 박일한, 김병성, 이세희, 변진규, 나완수
 성균관대학교 전기전자 및 컴퓨터공학부

Analysis of Non-contacted type Blocking filter
 for Power Line Communication by using FEM

Sang-joon Han, Il-han Park, Byung-Sung Kim, Se-Hee Lee, Jin-kyu Byun, Wan-soo Nah
 Dept. of Electrical and Computer Eng. Sungkyunkwan Univ.

Abstract - 본 논문에서는 전력선 통신 시스템의 전송 신호가 비수용가로 전송되는 현상을 차단하기 위한 비접촉식 Blocking Filter를 유한요소법을 이용하여 해석하였다. 새로운 통신망 시스템이 연구되면서 기존의 전력케이블 망을 이용한 전력선 통신방식에 대한 연구가 이루어졌으나, 전력선 통신이 서비스 지역 이외에 다른 지역으로 통신신호들이 전송될 수 있는 문제점이 제기되었으며, 또한 지정된 지역 내에서 최적화된 통신환경의 구성이 요구되었다. 따라서 본 논문은 타 지역으로의 신호 간섭을 차단하기 위한 비접촉식 Blocking Filter의 기본 모델을 제시하였으며, 이러한 비접촉식 Blocking Filter를 유한요소법을 기초로 한 전자장 수치해석 기법과 전송선 이론을 도입하여 신호 전송 특성을 해석하였다.

정할 수 있다. 여기서 이러한 네트워크를 간단한 회로로 표현하면 그림 3과 같다.

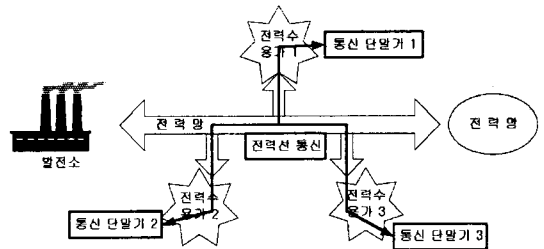


그림 1. 전력선 통신망의 기본 개념도

1. 서론

21세기 들어 새로운 통신 네트워크 망으로 전력선 통신 시스템이 연구되어져 왔다. 이러한 전력선 통신시스템은 전력선이 연결된 곳이면 어디든 통신이 가능하다는 장점을 가지고 있다[1]. 그러나 전력선 통신이 필요한 지역 이외에 다른 지역으로 통신신호들이 전송될 수 있는 문제점이 생기면서, 일정 지역 내에서의 통신환경이 전력선망으로 이루어지더라도 다른 지역으로의 무수히 많은 전력선망이 연동됨으로 인해 신호 품질에 큰 영향을 주게 되었다[2]. 이러한 불필요한 통신망의 연동을 막고 통신네트워크 이외의 다른 지역으로의 통신을 차단하기 위해서는 외부 전력선망으로 빠져나가는 경로부분에 추가로 적절한 필터가 설계되어 적용되어야 한다. 그러나 전력선이라는 특성상 대규모 전력이 흐르는 상태에서 일반적인 인덕턴스와 커패시턴스로 구성된 필터를 선로사이에 추가하기는 용이하지 않으며, 또한 전력선 케이블의 절단 및 설비의 추가 구성에 따르는 안전사항도 보장하기 어려워진다. 이에 전력이 연결된 상태에서 손쉽게 적용할 수 있는 비접촉식 필터의 개발이 요구된다. 따라서 본 논문은 이러한 비접촉식 필터의 몇 가지 모델을 제시하였고 이들 필터 모델이 적용된 선로에 대한 전자장 수치 해석 및 통신 선로 이론을 적용하여 필터가 적용된 구간에서의 전력전달의 감쇄 특성을 해석하였다[3,4,5].

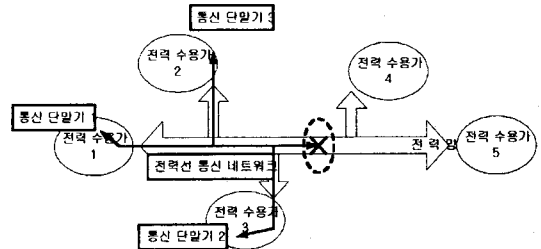


그림 2. 통신 네트워크의 형성과 비서비스지역 차단

2. 본론

2.1 전력선 통신선로와 Blocking Filter

일반적인 전력선 통신망의 개념은 그림 1과 같은 형태를 가지고 있다. 즉 전력이 전달되는 망을 경로로 해서 송신기가 임의의 전원단자에서 송신신호를 보내면 전력선이 깔려있는 임의의 전원단자에서 신호를 수신하게 되어있다[1,2]. 다시 이를 통신 네트워크가 형성되는 부분과 배제되는 부분으로 나누게 되면 그림 2와 같이

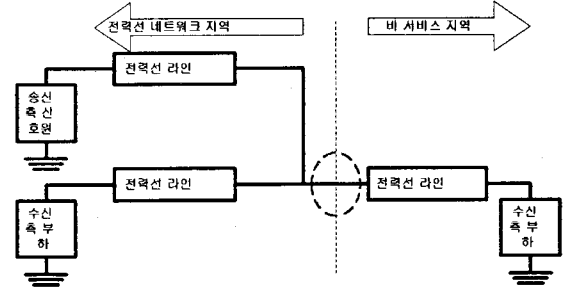


그림 3. 서비스지역과 비서비스지역의 기본 회로도

이와 같은 회로에서 실질적으로 필터를 적용하게 되는 부분은 점선부분이 될 것이며 본 논문에서는 이 부분에 대한 전력전달의 감쇄를 검토하였다. 여기서 전력선 통신신호로 사용되는 캐리어 주파수는 보통 1MHz ~ 30MHz 범위 정도에서 설계되어져 왔는데, 이와 같은 주파수 대에서 효과적인 필터의 역할을 하기 위해서는 60Hz 전원 주파수대에서는 전력을 통과시키고 1MHz 대 이상에서는 전력을 차단하는 저역 통과 필터가 되어야 한다[1].

2.2 Transmission line theory

이와 같은 간단한 회로 모델을 해석하기 위해서 전송선 이론을 도입한다.

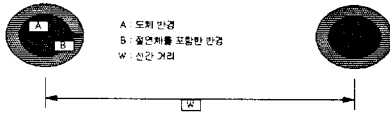


그림 4. 평행 2선식 전송선로 단면도

먼저 전송선로를 2선식 선로로 표시하게 되면 그림 4와 같이 단면도로 나타낼 수 있다. 이와 같은 전송선로에 TEM 파가 전송하는데 여기서 두 도체간에 다음과 같은 단위길이 당 회로정수들이 모델링된다[3,6].

- R : series resistance per unit length. Ω/m
- L : series inductance per unit length. H/m
- G : shunt conductance per unit length. S/m
- C : shunt capacitance per unit length. F/m

이와 같은 회로에서 단위길이 당 각각의 회로정수에 대한 전압 전류 방정식을 풀면 진행파의 해는 다음 식과 같이 된다.

$$V(z) = V_0^+ e^{-\gamma z} + V_0^- e^{+\gamma z} \quad (1a)$$

$$I(z) = I_0^+ e^{-\gamma z} + I_0^- e^{+\gamma z} \quad (1b)$$

이때 γ 를 전파정수라 하여 다음과 같이 각각의 회로정수들로 표현된다.

$$\gamma = \alpha + j\beta = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} \quad (2)$$

이와 함께 특성 임피던스를 다음과 같이 각각의 회로정수들로 정의하게 된다.

$$Z_0 = \frac{R + j\omega L}{\gamma} = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} \quad (3)$$

그러나, 실제 전송선의 대부분의 경우가 무손실 전송선으로 간주되므로 이때 $R = G = 0$ 로 놓을 수 있다. 따라서 다음과 같이 전파정수와 특성임피던스는 다음과 같이 간략화 될 수 있다[6].

$$\beta = \omega \sqrt{LC} \quad (4)$$

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (5)$$

이와 같은 변수들의 관계로 단위길이 당 전송선로의 전송행렬 즉 ABCD-matrix를 다음과 같이 정의하게 된다.

$$\begin{bmatrix} V_{in} \\ I_{in} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \beta l & jZ_0 \sin \beta l \\ j\frac{1}{Z_0} \sin \beta l & \cos \beta l \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{out} \\ I_{out} \end{bmatrix} \quad (6)$$

이와 같은 이론을 기초로 그림 3과 같은 회로의 전송선 부분 및 필터가 적용된 전송선 부분해석에 적용하게 된다[4,5,6].

2.3 전자장 수치해석

이때 실제 그림 4와 같은 전력선에 대한 전파정수와 특성임피던스를 적용하기 위한 식 (4)와 식 (5)들이 단위길이 당 L 과 C로 표현이 되어져 있으므로, 이들을 구하기 위해서 다음과 같은 적분을 수행한다. 즉 전자기장 에너지 적분법에 의한 단위길이 당 인덕턴스와 단위길이 당 커패시턴스를 다음 식으로 정의하며 이들에 대한 각각의 자기장과 전기장의 단면적 적분을 전자장 수치해석 기법으로 구할 수 있다[7].

$$L = \frac{1}{|I_0|^2} \int_S \vec{B} \cdot \vec{H}^* ds \quad (7a)$$

$$C = \frac{1}{|V_0|^2} \int_S \vec{D} \cdot \vec{E}^* ds \quad (7b)$$

다시 식 (7a), (7b)를 실제 전자장 수치해석을 적용하기 위한 식으로 바꾸면 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$L = \frac{1}{|I_0|^2} \sum_{e=1}^N \frac{1}{\epsilon_r} |\vec{B}_e|^2 \quad (8a)$$

$$C = \frac{1}{|V_0|^2} \sum_{e=1}^N \epsilon_r |\vec{E}_e|^2 \quad (8b)$$

여기서 I_0, V_0 는 양 도체간 걸린 전압과 전류이며, e 로 정의되는 N개의 요소에 대해 각 요소별 \vec{E}_e, \vec{B}_e 는 유한요소법으로 구해진다[8,9].

2.4 해석 모델의 설정

본 논문에서는 필터해석을 위한 실제 모델을 다음과 같은 두 가지 모델로 정했다.

제 1 모델은 그림 5와 같은 반 원통형 필터를 모두 4개를 사용해서 양쪽 라인에 위아래를 붙인 형태로 되어 있다. 또 제 2 모델은 그림 6과 같은 형태로 크게 위와 아래 편으로 묶어 전력선을 한꺼번에 감싸 안는 형태가 되게 하였다.



그림 5. 제 1 필터

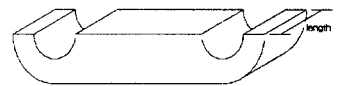


그림 6. 제 2 필터

이들 필터는 모두 $\mu_r = 650$ 인 선형자성체 물질로 가정하였으며, 위아래 절편을 붙였을 때 생기는 실제 공극을 고려하여 위아래 절편 사이 공극을 0.2mm 로 정했다. 또한 필터의 전선이 통과하는 내경은 6.35mm, 외경이 14.3mm 이며, 필터 길이는 초기에 50mm로 정했다. 이와 같은 필터를 이용해서 그림 4의 단면을 가지는 기본 길이 100mm의 전력선에 적용했다. 전력선 규격은 도체 직경 $a = 1.5mm$ 이고, $\epsilon_r = 3.5$ 인 절연체 두께가 포함된 전선 외경 $b = 3.4mm$ 이며 선간거리 $w = 50mm$ 이다.

2.5 전파정수와 특성임피던스 계산

각 모델별 필터가 적용된 전송선에 대한 수치해석 결과인 등포텐셜 분포도를 그림 7과 그림 8에 나타내었다.

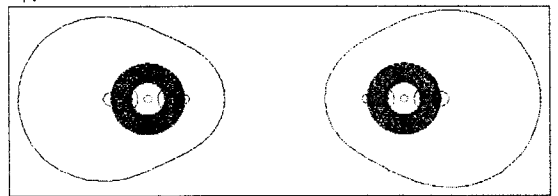


그림 7. 필터 모델 1 에 대한 등포텐셜 분포도

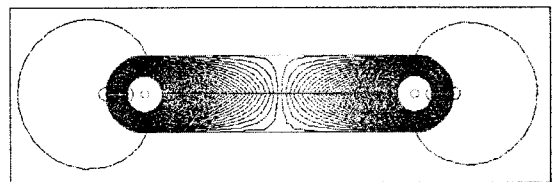


그림 8. 필터 모델 2 에 대한 등포텐셜 분포

위의 각각의 경우의 수치해석에 따른 단위길이당 인덕턴스 및 단위길이당 커패시턴스 그리고 특성임피던스 및 전파정수의 값들을 표 1에 보였다.

표 7. 각 모델의 회로정수 값 비교

회로정수 해석모델	단위길이당 C [pF/m]	단위길이당 L [H/m]	특성임피던스 [Ω]	전파정수 ×2πf
기본전송선	7.958	1.631	452.766	3.603e-9
제 1 모델 필터 적용	7,961	25.856	1802.124	14.347e-9
제 2 모델 필터 적용	7.966	39.547	2228.113	17.749e-9

2.6 주파수 대에 따른 필터의 특성 변화

전자기장 수치해석에 의해 얻어진 데이터를 전송선 이론을 적용해서 새가지 방법에 따른 필터 특성 결과를 각각 그림 9, 그림 10, 그림 11에 보였다. 첫째 방법은 필터의 길이와 동일한 전선길이 50mm의 전송선에 각 모델의 필터를 적용했으며 이에 따른 그림 9는 각각의 필터에 대한 필터 종단 부하전력의 감쇄를 주파수대에 따른 그래프로 보였다. 두 번째 방법은 100mm 길이의 전선에 50mm 길이의 필터가 가운데에 적용되어 앞뒤로 25mm씩 전선이 나와있는 경우이며 이에 따른 전선의 종단 부하 전력의 감쇄를 주파수 대에 따른 그래프를 그림 10에 보였다. 세 번째 방법은 제 1 모델 필터의 길이를 25mm, 50mm, 75mm, 100mm로 변화시켰을 때의 경우이며 마찬가지로 감쇄정도를 주파수 대에 따른 그래프로 그림 11에 보였다.

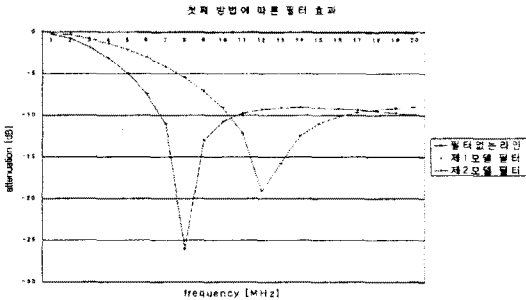


그림 9. 50mm 길이의 전선에 적용된 길이 50mm의 각 필터의 주파수 응답

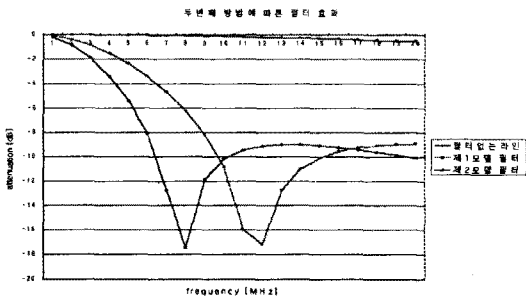


그림 10. 100mm 길이의 전선에 적용된 길이 50mm의 각 필터의 주파수 응답

첫째 방법에 의한 결과를 보면 전선의 선간에 생기는 공간을 자성체 물질로 채웠을 때 보다 큰 감쇄효과를 얻을 수 있음을 보여주고 있으며, 첫째 방법과 둘째 방법의 차이점으로 필터만의 효과에 대해서 실제 길이가 긴 전선의 일부분에 적용된 필터는 그 효과가 많이 완만해짐을 볼 수 있었다.

서번제 방법에 따른 필터 효과

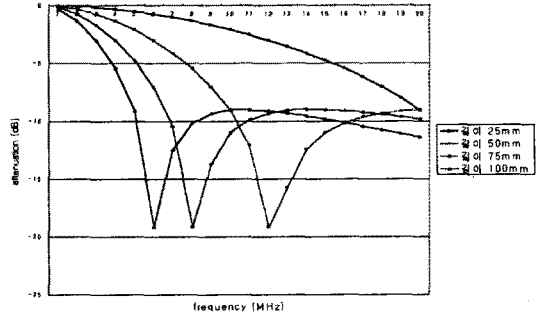


그림 11. 길이 25mm, 50mm, 75mm, 100mm의 각 필터의 주파수 응답

또한 필터가 전선의 길이 전반에 걸쳐 적용되는 길이가 길면 길수록 보다 낮은 주파수 쪽에서 큰 감쇄효과를 보였다. 그러나, 그림 11에서 자세히 보면 길이가 선형적으로 증가해도 최대 감쇄점의 주파수 위치는 선형적으로 감소하지 않음을 볼 수 있다. 이는 실제 동일한 길이의 필터를 라인에 직렬로 이어 붙이더라도 그에 따른 효과는 선형적으로는 증가하지 않음을 보여주는 것이다.

3. 결 론

본 논문에서 두 모델의 필터에 대해 유한요소법을 이용한 전자기장 수치해석으로 파라미터를 계산하여 전송선 이론을 바탕으로 필터의 주파수 응답을 해석하였다. 전력선 통신신호가 통과하는 상용 주파수의 전력선 주위에 쉽게 설치 가능한 이같은 비접촉식 필터는 전력선의 선간에 보다 많은 공간을 비투자율이 큰 물질로 구성할수록 필터의 감쇄정도가 커짐을 보였으며, 필터 길이가 커질수록 선형적으로 그 효과가 증대되지 않음을 보였다. 또한 실제 필터길이에 비해 긴 전송선로에 필터를 적용하는 경우가 일반적이므로 이에 대한 필터의 효과는 완만한 -10 dB 내외의 주파수 응답을 보일 수밖에 없음을 보여주고 있다. 또한 특성 임피던스가 급격히 변하는 필터의 경계부분에 대한 통신신호의 반사효과도 추가로 고려되어야 하며 실제 많은 경우의 손실에 대해서도 고려되어야 한다.

앞으로의 연구는 이러한 시뮬레이션 해석을 바탕으로 실제 몇 가지 주파수 특성을 가지는 페라이트 물질로 제작된 필터를 이용해서 실험을 수행할 것이며, 보다 큰 감쇄 특성을 얻기 위해 다른 회로소자를 이용한 복합 필터의 구성에 대해 연구를 수행할 것이다.

[참고 문헌]

- [1] T. Esmailian, "A discrete multitone Power Line Communications system", 2000 IEEE, p2953-2956. 2000
- [2] Shinji TSUZUKI, "Measurement of Japanese Indoor Power-line Channel". ISPLC2001 Channel Modelling I. p79-84. 2001
- [3] J. Yazdani, "Power Lines Analysing Tool (PLAT) for channel modelling". ISPLC2001 Analysing Tools. p21-28. 2001
- [4] T.C.Banwell, S. Galli, "A New Approach to the Modeling of the Transfer Function of the Power Line Channel". ISPLC2001. Cable Modelling. p319-324. 2001
- [5] T.C.Banwell, S. Galli, "On the Symmetry of the Power Line Channel". ISPLC2001 Cable Modelling. p325-330. 2001
- [6] David M. Pozar, "Microwave Engineering". 2nd edition. 1998
- [7] David J. Griffiths, "Introduction to Electrodynamics". 2nd edition. 1989
- [8] J. Tinsley Oden, "Finite Elements an Introduction". volume I. 1981.
- [9] 임달호, "전기계의 유한요소법". 동명사. 1987