

DMT 방식 전력선 통신의 전자파 장애에 관한 연구

최 중 필^o, 신 철 재
 아주대학교 전자공학부
 e-mail: tech179@ajou.ac.kr

The study of emissive electromagnetic interference DMT PLC(Power Line Communication)

Jong-Pil Choi, Chull-Chai Shin
 School of Electrical and Computer Engineering, Ajou University

요 약

In this paper, we studied the radiated electric field of power-line with DMT signal source in the frequency range of 1.7~30 MHz. First, we made the midium voltage power-line communication model for PLC and calculated the current through the power-line using the impedance of the power-line model. Second, we calculated the radiated electric field in power range -50~-30 dBm using the calculated current. Consequently, the calculated emissive electromagnetic field from the DMT signal is similar to the measured result. So this study is applicable to the standard regulation of electromagnetic interference for PLC.

Key words : PLC(Power Line Communication)

I. 서 론

전력선통신(PLC; Power-Line Communication)은 전력선을 통신채널로 사용하는 통신시스템으로써 별도의 막대한 추가비용 없이 통신망의 구성이 가능하고, 전력선이 연결된 곳이라면 어디서든 통신이 가능하다는 점에서 가장 이상적인 통신시스템이라 할 수 있다. 이러한 장점들 때문에 PLC 통신에 관한 연구가 활발히 진행되고 있는 상태이다.^{[1]~[9]} 전력선은 본래 통신을 위해 설치된 것이 아니기 때문에, 전력선 통신 구성을 위해서는 주파수 선택도와 시간에 따른 채널특성의 변화와 전력선상의 높은 감쇠와 잡음 신호등을 고려해야 한다. 현재는 신호의 감쇠나 잡음을 고려하여 전송 전력을 높이려 하는 추세이며, 전송 전력의 상승은 방사전자파의 증가를 야기하게 되고, 이로 인해 타전자기파 이용설비와 기존에 사용되는 통신시스템과의 간섭문제뿐만 아니라 전자파 환경성 문제를 발생 시킨다. 그러므로 전력선 통신이 기술적 안정성과 신뢰성을 가지기 위해서는 이미 규정되어 있는 사용 주파수대역에서 타전자파 이용 설비와의 전자파 환경성 문제해결이 선행되어야 한다. 전력선통신은 무선망에 사용되는 OFDM과 유선망방식의 DMT 방식을 사용하여, 한정된 대역에서 많은 채널을 수용할 수 있는 다중반송전송(multi-carrier)으로 데이터의 고속

전송이 가능하게 되었고, 현재 DMT 방식의 PLC 모델을 이용하여 상용화가 진행되고 있다.^{[1]~[3]}

최근 통신의 발달과 더불어 전자파를 이용하는 기기들이 많아짐에 따라, 통신시스템간의 간섭문제나 인체에 미치는 영향 등을 고려하여 국가나 단체별로 방사되는 전자파의 최대치를 규정하고 있다.^[5] 또한 DMT 통신 방식을 사용할 경우 사용 주파수 전대역에 걸쳐 신호를 전송하기 때문에 넓은 대역에서 전자파가 발생한다. 전자파에 의한 EMI의 기본적인 전자파 장애 경로의 분류에 따라 전력선통신의 전자파 장애는 방사성 전자파의 방출이 중요한 점이 된다. 따라서 전력선통신의 방사전자파가 타전자기기에 미치는 영향을 고려하여 방사되는 전자파의 크기를 규제함으로써, 전송전력을 제한하여야 한다.

본 논문에서는 현재 상용화 진행중인 DMT 통신 방식에 대하여 중전압 선로의 채널을 모델링하여 방사전자파의 전계를 계산 및 측정을 해보았다. 이미 설치되어 있는 전력선의 일부분을 통신 채널로 사용하기 때문에 통신채널로 사용하는 이외의 전력선은 부하로 작용하게 되고, 신호 입력단의 입력 임피던스에 영향을 주게 된다. 따라서 입력 임피던스에 의해 실제 입력되는 전류가 결정이 되고, 전력선에 흐르는 전류에 의해 방사파의 크기가 결정된다. 전력선통신이 가능하려면 SNR을 최소 10 dB 이상

확보해야 한다.^[1] 실제 측정이 이루어진 지역에서 발생하는 전력선의 전도성잡음은 평균적으로 -69 dBm 이므로 통신이 가능한 최소한의 SNR을 만족하기 위해서는 -59 dBm 이상의 전송전력이 필요하다. 그러나 전송 전력이 높아지게 되면 양호한 SNR을 확보할 수 있으나, 방사되는 전자파의 세기 역시 증가하게 되므로 전자파 장애 규정인 FCC의 방사 제한치를 초과한다. 그러므로 본 논문에서는 DMT 방식의 전력선을 모델링하고 이를 바탕으로 전력선의 임피던스를 유도하여 전력선에 흐르는 전류를 계산하였다. 계산된 전류를 이용하여 전력선으로부터 3 m 지점에서 방사되는 전계를 입력신호의 전력 세기에 따라 계산함으로써 통신이 가능한 신호대 잡음비를 만족하는 최소전력에서부터 전자파 장애 규정을 만족하는 최대전력의 크기를 규정하였다. 결과적으로 신호대 잡음비와 전자파 장애 규정을 고려할 때 DMT 입력 신호의 전력은 -40 dBm 정도에서 결정되어야 한다. 이러한 결과는 중전압 전력선 통신에 적용될 입력신호의 전력에 대한 방사파의 전계를 예측 가능하게 함으로써, 전자파 장애 규제 규정화에 도움을 줄 것으로 판단된다.

II. 전력선의 채널모델링

전력선통신에 사용되는 중전압 전력선은 two-wire 전송선로로 가정할 수 있다. 배전에 대부분을 차지하는 ACSR(aluminum cable steel reinforced)은 일반 동축케이블과 달리 유전체가 코팅되어 있기 때문에 유전체의 영향을 고려해 주어야 한다. 인덕턴스와 커패시턴스의 변화는 주파수와 무관하지만 컨덕턴스와 저항은 길이와 주파수에 의존적이므로 표피효과와 주파수의 관계를 고려하여야 한다. 그림 1은 이러한 영향을 고려한 전력선의 등가회로이다. 여기서 R, L, G, C 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.^[8]

$$R = \frac{1}{\pi a} \sqrt{\frac{\pi f \mu_c}{\sigma_c}} (\Omega/m)$$

$$L = \frac{\mu}{\pi} \cosh^{-1}(D/2a) (H/m)$$

$$G = \frac{\pi \sigma}{\cosh^{-1}(D/2a)} (S/m)$$

$$C = \frac{\pi \epsilon}{\cosh^{-1}(D/2a)} (F/m) \quad (1)$$

여기서 a 는 도체의 반지름, D 는 선로사이의 길이, μ, ϵ, σ 와 μ_c, σ_c 는 각각 선로사이의 유전체와 선로를 구성하는 도체의 투자율, 유전율, 도전율 등을 나타낸다. 위의 식에서 주파수가 낮기 때문에 단위길이당 저항은 인덕턴스에 비해 매우 작게 나타나고,

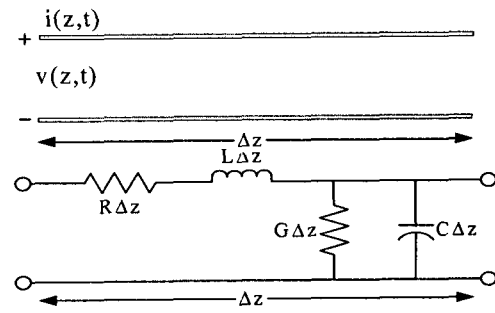


그림 1. 전력선의 등가회로

컨덕턴스 G 는 두 선로가 공기 중에 위치하고 있기 때문에 선로사이 감쇠는 매우 작은 값으로 무시할 수 있다. 따라서 전력선의 특성임피던스는 다음 식과 같고, L, C 의 영향을 크게 받는다.

$$Z = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} \quad (2)$$

측정에 사용한 ACSR 선로의 유전체 코팅 두께는 약 3mm이며, 유효 유전상수가 약 2.3 임을 감안하면, 특성임피던스는 약 500Ω 정도의 값을 가진다.

III. DMT 방식의 전력선 통신

현재 중전압 전력선을 이용한 전력선통신은 그림 2 처럼 나타낼 수 있다. 여기서 전력선의 특성임피던스는 앞에서 구한 500Ω 을 사용하였다. 실제 전기 신호가 흐르고 있는 전력선의 일부분을 택하여 통신 선로로 사용하며 75Ω 의 동축선로를 이용하여 DMT 신호를 전력선에 인가한다. 이 때 전력선의 전도성잡음은 모든 주파수대역에 걸쳐 존재하게 되며, 이것은 방사원으로 작용하여 주파수대역 전구간에 걸친 방사전자파를 유발하게 된다. 그림 2에서 보는 바와 같이 DMT 통신을 위해 설정된 두 전신주의 양쪽으로 연속적인 전력선이 존재하고 시간 및 지역에 따른 부하의 변화를 예상할 수 있다.

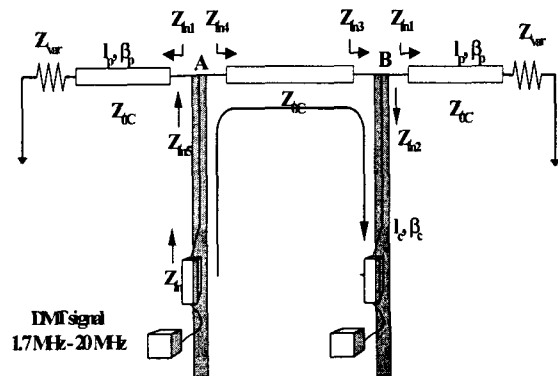


그림 2. 중전압 전력선통신의 구성도

따라서 연속적으로 분배된 전력선과 부하의 임피던스를 Z_{var} 로 표시할 수 있다. 모뎀에서 바라본 입력 임피던스 Z_{in} 은 Z_{in1} 과 Z_{in4} 의 병렬 결합에 75Ω의 동축선로를 직렬로 연결한 값이다. Z_{in1} 은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$Z_{in1} = Z_{0p} \frac{Z_{val} + jZ_{0p} \tan(\beta_p l_p)}{Z_{0p} + jZ_{val} \tan(\beta_p l_p)} \quad (3)$$

그림 2에서 Z_{in3} 는 Z_{in1} 과 Z_{in2} 의 병렬연결로 나타낼 수 있다.

$$Z_{in3} = Z_{in1} // Z_{in2} \quad (4)$$

$$Z_{in2} = 75 \frac{50 + j75 \tan(\beta_c l_c)}{75 + j50 \tan(\beta_c l_c)} \quad (5)$$

위에서 β_p 와 l_p 는 전력선의 전파상수와 길이이고 β_c 와 l_c 는 동축선로의 전파상수와 길이이다. 결과적으로 전송선로에서 우측으로 바라본 임피던스 Z_{in4} 는 다음 식과 같이 표현된다.

$$Z_{in4} = Z_{in1} // Z_{in3} \quad (6)$$

A 지점에서 좌측을 바라보는 임피던스는 Z_{in1} 과 같으며 동축선로에서 바라본 임피던스는 식 (6)과 같다.

$$Z_{in5} = Z_{in1} // Z_{in4} \quad (7)$$

따라서 모뎀에서 바라본 입력임피던스는 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$Z_{in} = Z_0 \frac{Z_{in5} + Z_0 \tanh(\gamma_c \cdot l_c)}{Z_0 + Z_{in5} \tanh(\gamma_c \cdot l_c)} \quad (8)$$

위의 값을 Matlab을 이용하여 계산하여 보면 전력선의 길이가 980m 정도로 매우 길기 때문에 Z_{val} 이 변화하더라도 실제 입력임피던스는 크게 변화하지 않게 되고, 따라서 입사된 신호의 전류는 A 지점에서 Z_{in1} 과 Z_{in4} 의 임피던스에 의해 전류가 분배되어 전류가 흐르게 됨을 알 수 있다.

IV. 전력선의 방사전기장

DMT 신호로 인가된 전압을 입력임피던스로 나누면 전력선에 흐르는 전류를 계산할 수 있다. 이때 전력선에 흐르는 전류(I_t)는 전력선에 존재하는 전도성잡음에 의한 전류(I_n)와 DMT 신호에 의해 발생하는 전류(I_s)의 합으로 나타낼 수 있다.

$$I_t = I_n + I_s \quad (9)$$

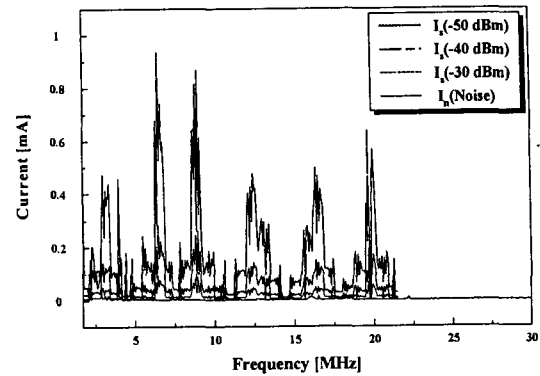
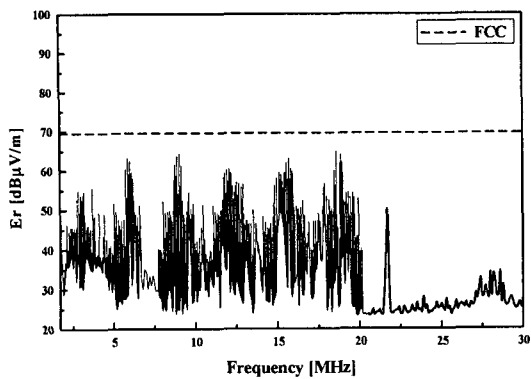


그림 3. 입력신호에 따른 입력 전류의 변화
중전압 전력선의 특성임피던스는 거의 일정하나, 동축선로의 영향으로 인해 모뎀에서 바라보는 입력임피던스는 주파수에 따라 변화하는 특성을 나타내게 된다. 그리고 측정에 사용한 PLC 모뎀은 1.7~20 MHz 대역만을 사용하므로 DMT 신호에 의한 전류는 20 MHz까지만 존재하게 된다. 그림 3은 DMT 신호의 전력크기에 따른 전류 및 전도성잡음에 의한 전류를 나타낸 것이다. 전력선의 길이가 무한하고 두 도선 사이는 80 cm이며, 구해진 전류를 이용하여 전력선으로부터 ρ 만큼 떨어진 지점의 전기장은 식(10)과 같이 구할 수 있다.

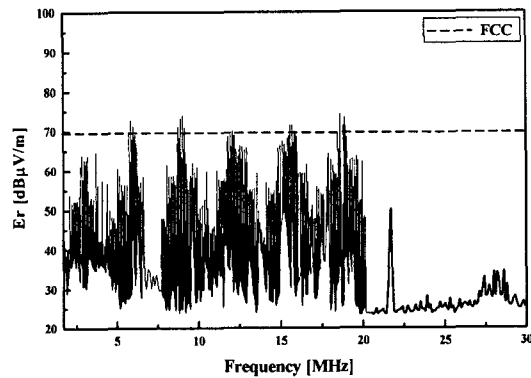
$$E^t = E^i + E^r = -\frac{\beta^2 I_t}{4\omega\epsilon} [H_0^{(2)}(\beta\rho_i) - H_0^{(2)}(\beta\rho_r)] \quad (10)$$

$$E^t = -\frac{\beta^2 I_t}{4\omega\epsilon} \sqrt{\frac{j\beta}{2\pi}} \sin(\beta h \sin \phi) \frac{e^{-j\beta\rho}}{\sqrt{\rho}} \quad (11)$$

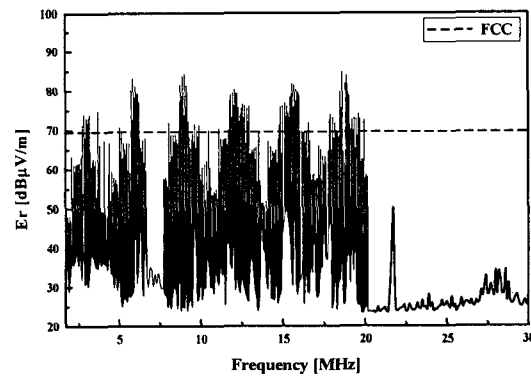
식 (10)에서 $H_0^{(2)}$ 는 한켈 함수(hankel function)를 나타내고, $\beta\rho$ 가 두 선 사이의 길이(h) 80 cm에 비해 매우 크기 때문에 어시토틱 익스펜션(asymptotic expansion)을 사용하여 근사화할 수 있다. 따라서 두 도선으로부터 방사되는 전체적인 방사전기장은 식(11)과 같이 간단하게 표현할 수 있다. 모뎀으로부터 통신신호가 발생하지 않을 경우, 전력선의 전도성잡음은 ambient 상태의 방사전자파를 형성한다. 따라서 PLC 모뎀으로부터 통신신호가 전력선으로 입력될 경우, 전도성잡음과 신호성분에 의한 전류에 의해 방사파가 생성되게 된다. 앞에서 구한 전류를 이용하여 DMT 신호의 전력의 크기에 대한 방사전계를 구하면 그림 4와 같이 나타낼 수 있다. 전력선통신이 가능하기 위해서는 서론에서 말한 바와 같이 SNR이 10 dB 이상을 만족해야하며 전류 I_n 에 의한 방사전계의 평균치가 대략 -69 dBm 이므로, 입력신호의 크기는 최소 -59 dBm 이상이 되어야 한다.^[1]



(a)



(b)



(c)

그림 4 DMT 신호의 전력에 따른 방사전기장.

(a) -50 dBm (b) -40 dBm (c) -30 dBm

그러므로 본 논문에서는 위의 세 경우처럼 입력신호 전력이 -30, -40, -50 dBm의 세 경우에 대해서 계산하였다. 그림 4(c)에서 보듯이 신호전력이 -30 dBm 이상이 되면 전자파 장애 규정인 FCC를 만족하지 않게 된다. 그러므로 DMT 방식의 전력선통신을 위한 통신신호 전력은 -59~40 dBm사이에서 결정되어야 한다.

V. 방사 전자파 측정 및 분석

전자파의 측정에 필요한 주요 계측기로는 EMC 분

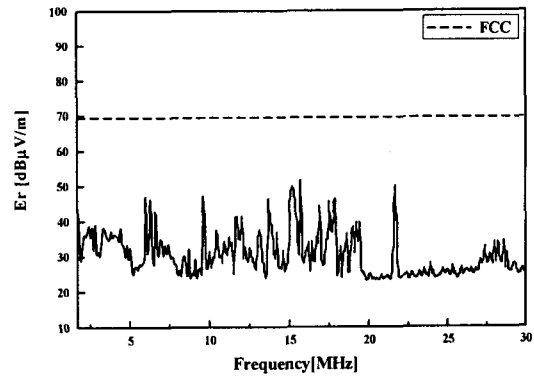


그림 5. 전도성잡음에 의한 방사전기장

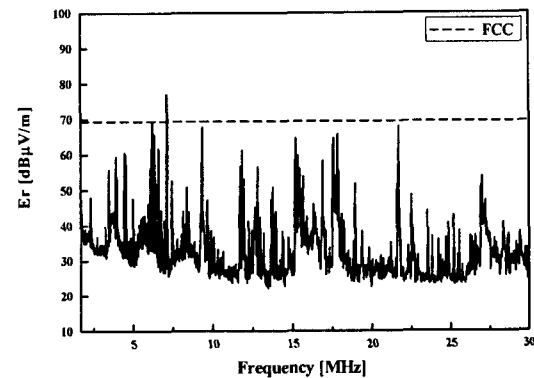


그림 6. Ambient 상태의 방사 전자파 측정치

석기(E7402), active loop안테나(6502 D=60 cm), PLC 모뎀을 사용하였다. 측정법은 3 m법으로 하였으며, 주파수의 범위는 1.7~30 MHz로 하였다. 그림 5는 전력선의 전도성잡음에 의해 발생하는 방사 전계를 나타낸 것이다. 그러나 실제로 Ambient 상태에서의 측정치인 그림 6에서 살펴보면, 전력선의 전도성잡음뿐 아니라 아마추어 무선통신 또는 기타 방송 등 여러 가지 잡음 신호가 포함되어 있다. 본 논문에서는 전력선의 전도성잡음과 DMT 통신신호만을 고려하였기 때문에 계산치와 측정치를 정확한 비교를 위해서는 측정치에서 환경에 의한 전자파를 제외해야 한다.

그림 7(a)는 -40 dBm의 전력을 가지는 DMT 통신신호를 PLC 모뎀을 통해 전력선에 입력시켰을 때, 전력선으로부터 3 m 떨어진 지점에서 계산된 전계측정 결과이며, 그림 7의 (b)는 측정치에서 환경의 영향으로 발생하는 전자파의 전계를 제거한 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 방사되는 전자파의 측정치에서 환경의 영향을 제외한 측정치의 크기는 계산된 결과와 거의 유사한 형태를 가짐을 알 수 있으며, 앞에서 말한 바와 같이 전자파 장애 규정인 69.9 dBμV/m 를 대체적으로 만족하는 것을 알 수 있다.

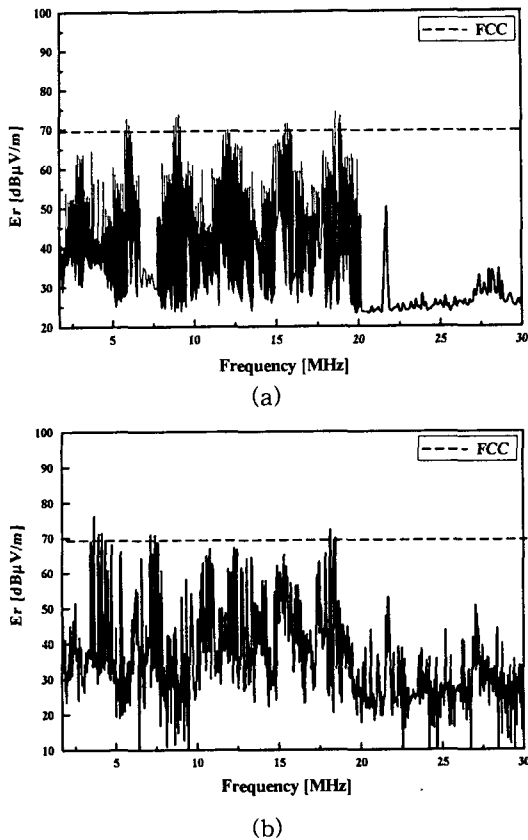


그림 7. -40 dBm DMT 신호시 방사전기장
(a) 계산 결과 (b) 측정 결과

VI. 결론

본 논문에서는 중전압 전력선 모델 및 신호입력 네트워크를 이용해 신호 입력단의 임피던스를 계산하였으며, 계산된 임피던스를 이용해 DMT 방식을 이용한 입력신호 및 전도성잡음에 의한 방사전계를 계산하였다. 방사 전계를 실제로 측정한 결과 외부 환경적 요인에 의한 전계성분을 제외하면 계산결과와 거의 일치함을 알 수 있었다. 이로부터 계산에 의한 방사전계의 예측이 가능하기 때문에 향후 전력선통신의 전자파장에 규정에 많은 도움이 될 것으로 사료된다.

VII. 참고 문헌

[1] D.Grimaldi, S. Rapuano, G. Truglia, "An Automatic Digital Modulation Classifier for Measurement on Telecommunication Networks", IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, pp 957-962,

May 2002.

- [2] T. Esmailian, P.G. Gulak, F. R. Kschischang, "A discrete multitone power line communications system", Acoustics, Speech, and Signal Processing, 2000. ICASSP '00. Proceedings. 2000 IEEE International Conference on , Vol 5, pp 2953-2956, June 2000.
- [3] Yi-Fu Chen, Tzi-Dar Chiueh, "A 100-Kbps Power-Line Modem for Household Applications", VLSI Technology, Systems, and Applications, 1999. International Symposium on, pp 179-182, June 1999.
- [4] Chow, P.S.; Cioffi, J.M.; Bingham, J.A.C. "A practical discrete multitone transceiver loading algorithm for data transmission over spectrally shaped channels", Communications, IEEE Transactions on , Volume: 43Issue: 234,pp 773-775 Feb./March/April 1995
- [5] 김선호, 김상태, 이영철, 신철재, "고속 전력선 통신을 위한 중전압 선로의 방사전자파 측정 및 분석", 한국전자파학회 논문집, 제14권, pp 54-62, Jan, 2003.
- [6] Issa, F.; Chaffanjon, D.; Pacaud, A. "Outdoor Radiated Emission Associated with Power Line Communications Systems", Electromagnetic Compatibility, EMC. 2001 IEEE International Symposium on, Volume: 1, 13-17, pp 521-526, Aug. 2001.
- [7] T. Esmailian, F.R. Kschischang, P.G. Gulak, "Characteristics of In-building Power Lines at High Frequencies and their Channel Capacity", ISPLC 2000, pp 52-59.
- [8] Meng, H. Chen, S. Guan, Y.L. Law, C.L. So, P.L. Gunawan, E. Lie, T.T, "A Transmission Line Model for High-Frequency Power Line Communication Channel", Power System Technology, International Conference on, Vol 2, pp 1290-1295, Oct. 2002
- [9] Constantine A.Balanis, "Advanced Engineering Electromagnetics", John Wiley & Sons, 1989.