

낙뢰에 의해 발생한 전자기파가 무선전력전송 시스템에 유도 시 부하 전압 분석

(Analysis of the Effect of Electromagnetic Wave Generated by Lightning on Wireless Power Transmission System)

황중홍* · 이창진 · 고광철†

(Jong-Hong Hwang · Chang-Jin Lee · Kwang-Cheol Ko)

Abstract

In this paper, the influence of the electromagnetic wave caused by lightning on the magnetic resonance wireless power transmission system is analyzed. The intrusion process of the electromagnetic wave to the wireless power transmission system is implemented to an integrated circuit model based on relevant researches on the generation and the propagation of the electromagnetic wave by lightning. The integrated circuit model is simulated assuming that the magnitude of the electric field of the electromagnetic wave is 3000kV/m and the electromagnetic wave travels 20m and intrudes to the wireless power transmission system. As a wireless power transmission system, two-coil system and four coil system is used in the simulation. The frequency of both wireless transmission systems is set to 60kHz. The double exponential waveform with 1.2/50 μ s is selected as a lightning impulse. As a result, the voltage of 9.06kV is induced to the two-coil system, and the voltage of 3.96kV is induced to the four-coil system when the lightning causes the electromagnetic wave near the wireless power transmission system.

Key Words : Lighting Impulse, Induced Lighting, Wireless Power transfer, Magnetic Resonance

1. 서 론

무선전력(Wireless Power Transfer, WPT)기술은

사용의 편리성 때문에 많은 연구가 진행 되고 있다. 특히 휴대폰, 청소기, 웨어러블 기기에는 이미 접촉식 무선전력전송 기술이 실생활에 많이 사용하고 있으며, 전기 자동차(Electric Vehicle, EV)분야는 비접촉 무선 전력전송 연구가 많이 진행되고 있다[1-4]. 근래에 이르러 기술의 발전으로 수 십 W 또는 그 이상의 전력을 전송하는 것이 가능 하며, 많은 전기·전자 기기에 사용되고 있다[5].

무선전력전송 시스템에 위협이 되는 것 중 하나는

† Corresponding Author : Professor, Dept. of Electrical Eng., Hanyang Univ., Korea
* Dept. of Electrical Eng., Hanyang Univ., Korea
Tel : 02-2220-0348, Fax : 02-2220-1886
E-mail : kwang@hanyang.ac.kr
Received : 2019. 4. 26. / Revised : 2019. 6. 20., 2019. 7. 15.
Accepted : 2019. 7. 16.

낙뢰에 의한 피해다. 낙뢰는 기기에 큰 피해를 줄 수 있는 요소이며, 이상전압에 의한 사고 중 뇌서지에 의한 사고가 70.8%로 많은 부분을 차지하고 있다[6]. 낙뢰에 의한 피해는 직격뢰에 의한 피해와 유도뢰에 의한 피해로 나눌 수 있다. 직격뢰에 의한 피해는 인화도선과 구조체를 사용하여 보호하고 있으며, 유도뢰에 의한 피해는 바리스터 또는 가스방전관을 사용하여 보호한다. 하지만 낙뢰에 의해 발생하는 전자기파의 영향에 대한 대책은 전무하다. 따라서 낙뢰에 의해 발생하는 전자기파가 무선전력전송 시스템에 미치는 영향 해석이 필요하다.

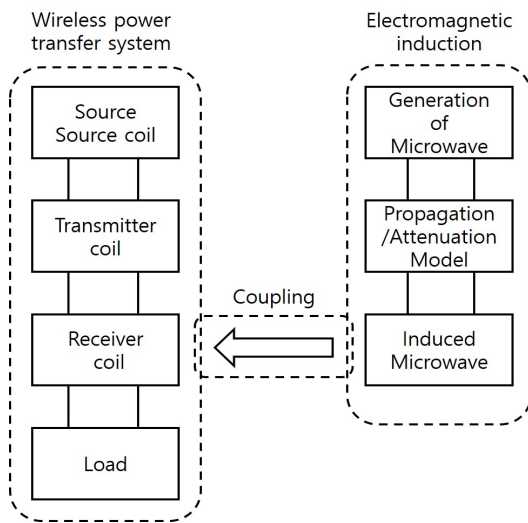


Fig. 1. Schematic diagram of the whole system

본 논문은 낙뢰에 의해 발생한 전자기파가 무선전력 전송 시스템에 미치는 영향을 분석하였다. 낙뢰를 가정하기 위해 이중 지수파형의 1.2/50us 표준 뇌 임펄스 파형을 사용하였으며, 낙뢰에 의한 전자기파의 생성과 거리에 의한 감쇠 그리고 시스템 커플링을 통합한 모델을 구성하였다. 그림 1은 낙뢰에 의해 발생한 전자기파가 무선전력전송 시스템에 유기되는 개략도를 보이고 있다. 시스템에 미치는 영향을 예상하기 위해, 회로 시뮬레이터를 이용하여 시스템 전체를 모델링 하였다. 이를 토대로 유도 서지에 의한 무선전력전송 시스템의 영향을 개략적으로 해석함으로써, 뇌서지 보호에 이용할 수 있다.

2. 회로 시뮬레이션 모델

2.1 자기유도 방식 무선전력전송 시스템

무선전력전송 시스템은 자기유도 방식과 자기공진 방식이 있으며, 연구 또한 활발하게 진행되고 있다. 자기유도 방식은 변압기와 같은 원리로 송수신 코일의 유도 결합을 이용하여 전력을 전송한다. 그림 2는 자기유도 방식의 등가회로를 나타내고 있다. L_1 과 L_2 는 각각 송수신 코일의 인덕턴스이며, R_1 과 R_2 는 각각 송수신 코일의 손실 저항을 나타낸다. 또한 R_s 는 송신부의 전원 저항 그리고 R_L 은 수신부의 부하저항을 나타낸다.

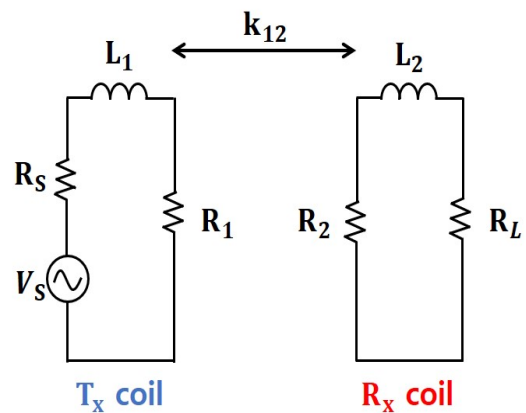


Fig. 2. Equivalent circuit of 2-coil inductive wireless power transfer system

전원에서 공급하는 교류전류가 송신 코일의 자속을 발생시키고, 발생한 자속은 수신 코일의 내부를 쇠고 하면서, 결합계수에 비례하는 유도전압이 발생한다. 결합계수는 전송거리가 증가함에 따라 빠르게 감소하므로, 가까운 거리에서 높은 주파수를 이용하여 전송 효율을 증가시킬 수 있다. 따라서 자기유도 방식은 접촉식 무선전력전송에 사용되고 있다.

2.2 자기공진 방식 무선전력전송 시스템

그림 3은 자기공진 방식의 무선전력전송 시스템의

등가회로를 보이고 있다. Source 코일, T_x 코일, R_x 코일 그리고 Load 코일로 이루어져 있으며, T_x 코일과 R_x 코일 사이에 장애물이 있더라도 전력을 전송할 수 있다. 공진코일은 코일의 지름과 감은 수를 적절히 조절하여 자체 공진(Self-resonance)시키는 방법이 있으며, 코일과 커패시터를 직렬로 연결하여 공진시키는 방법이 있다.

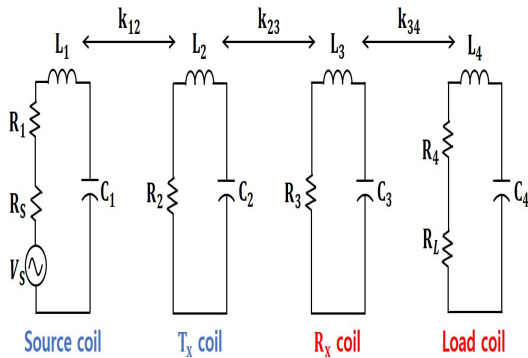


Fig. 3. Equivalent circuit of 4-coil magnetic resonance wireless power transfer system

자기공진 방식은 자기유도 방식과 다른 특징이 있다. 전송 거리가 멀어 결합계수가 작은 경우에 공진주파수에서 가장 높은 전송 효율이 나타난다. 하지만 전송거리가 가까워져 결합계수가 커지는 경우에도 공진주파수에서 전송 효율이 떨어지는 현상이 발생한다. 이 현상이 발생하는 지점의 결합계수를 임계결합계수라고 하며, 임계 결합계수를 기준으로 과결합(Over coupled)과 부족 결합(Under coupled)로 나뉘어진다. 과결합 상태에서 최대 전송 효율은 공진 주파수를 기준으로 높거나 낮은 주파수에 가장 높은 전송 효율을 나타내며, 이 현상을 주파수 분할현상이라고 한다[7]. 따라서 과결합 상태의 거리에서 자기유도 방식에 비해 높은 효율로 전력전송이 가능하다.

2.3 1.2/50 μ s 표준 뇌 임펄스

IEEE에서 표준 뇌임펄스의 파형은 이중 지수형 펄스 형상으로 1.2/50 μ s 임펄스 파형으로 정의하고 있다.

표준 뇌임펄스의 파두시간은 1.2 μ s로 파두부에서 피크값의 30%에서 90%까지의 시간에 1.67배로 정의하며 허용 오차는 $\pm 30\%$ 이다. 파미시간은 50 μ s로 허용오차는 $\pm 20\%$ 이다[8].

$$V(t) = kV_p \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_1}\right) \right\} \exp\left(-\frac{t}{\tau_2}\right) \quad (1)$$

1.2/50 μ s 뇌임펄스 전류 파형을 전압으로 표현하면 식 (1)과 같이 표현할 수 있다[9]. 위 식에서는 t는 시간을 나타내며, V_p 는 피크값을 나타내고 오차는 0.3% 이내이다. τ_1 과 τ_2 는 각각 0.407 μ s, 68.22 μ s이며, K의 값은 1.04이다. 따라서 뇌서지 특성 시험에 대한 이론식으로 사용된다.

2.4 낙뢰에 의해 발생하는 전자기파 모델

낙뢰에 의해 발생하는 전자기파가 시스템에 유도되는 현상을 해석하기 위해 낙뢰의 발생, 거리에 따른 감쇠, 그리고 시스템 커플링으로 3가지 요소를 모델링하였다. 낙뢰에 의한 전자기파를 충분히 먼 거리에서 집중된 전원에 의해 발생하였다고 가정하여 평면파로 근사 하였다. 전자기파의 전력은 식 (2)와 같다.

$$P_l = \frac{1}{4\pi r^2} P_t \quad (2)$$

P_t 는 초기 전자기파의 전력이며, P_l 은 r의 전파거리에서 감쇠된 전력을 나타낸다. 전력과 전계, 자계는 공기의 특성 임피던스(377 Ω)와 관계가 있으며, 식 (2)을 사용하여 전계에 관한 식 (3)로 변환할 수 있다 [10].

$$E_l = \frac{1}{2\sqrt{\pi r}} E_t \quad (3)$$

식 (3)에서 E_l 은 최초 전계의 크기이며, E_t 은 r의 거리에서 감쇠된 전계이다. 전자기파의 입사 각도에 따라 유효 전계로 유도되는 결합을 변압기를 사용하여

회로적으로 구현하였다.

2.5 전체 시스템 회로 모델링

본 논문은 낙뢰에 의해 발생하는 1.2/50 μ s의 표준 뇌 임펄스의 전자기파가 무선전력전송 시스템에 미치는 영향을 분석하였다. 기존에 연구된 낙뢰에 의한 전자기파의 생성, 거리에 따른 감쇠 그리고 기기의 커플링 모델을 사용하였다. 2-코일의 시스템과 4-코일의 시스템의 무선전력전송 모델을 대상으로 시스템을 통합하여 회로 모델링 하였다. 이를 토대로 전자기파가 거리에 따라 감쇠되는 현상을 수동소자를 사용하여 감쇠모델을 구현하였다.

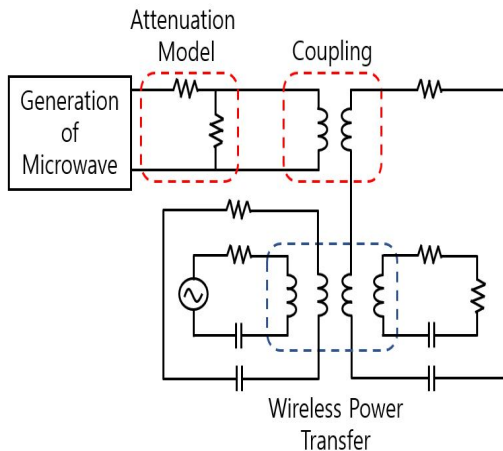


Fig. 4. Circuit for simulating electromagnetic wave induction by lightning

따라서 낙뢰에 의해 발생한 전자기파가 거리에 따라 감쇠하여 시스템에 커플링 되는 현상을 무선전력전송 시스템과 통합하여 회로를 구성하였으며, 그림 4를 통하여 나타내었다.

3. 시뮬레이션

3.1 시뮬레이션 조건

낙뢰는 상향 뇌방전과 하향 뇌방전으로 구분한다.

상향 뇌방전은 높은 구조물에서 뇌운으로 향하는 낙뢰이며, 하향 뇌방전은 뇌운에서 평지나 낮은 구조물로 향하는 낙뢰이다. 발생빈도는 상향 뇌방전보다 하향 뇌방전이 더 많으며, 하향 뇌방전의 뇌격전류가 상향 뇌방전의 뇌격전류 보다 크므로 하향 뇌방전을 기준으로 시뮬레이션 하였다.

낙뢰에 의해 발생한 전자기파가 거리에 따라서 감쇠하여 무선전력전송 시스템에 유도되는 과정을 회로 모델링 하였다. 유도되는 전자기파는 뇌격 지점과 뇌격의 진전속도 등을 고려하였으며, 무선전력전송 시스템의 출력이 균일하게 나오는 400 μ s 지점에서 낙뢰에 의한 전자기파가 유도되었다고 가정하였다. 표 1은 무선전력전송 시스템에 유도되는 전자기파 시뮬레이션 값을 보여준다[11].

Table 1. The value of the electromagnetic wave simulation condition induced in the wireless power transfer system

전자기파 모델	크기	3000kV/m
	펄스폭	1.2/50 μ s
커플링 모델	파형	이중지수분포파
	전파거리	20m
	결합비	0.866

4. 시뮬레이션 결과

본 논문에서는 낙뢰에 의한 전자기파가 무선전력전송 시스템에 유도 되었을 때의 영향을 분석하였다. 그림 5과 그림 6에서 각각 감쇠 전계와 유도 전압의 1.2/50 μ s 임펄스 파형을 보여준다. 감쇠 전계 파형의 피크값은 43.2kV/m, 유도 전압은 36.6kV를 나타내고 있다.

그림 7은 2-코일 무선전력전송 시스템의 수신부에 커플링 된 전압을 보여준다. 낙뢰에 의해 발생한 전자기파가 2-코일 시스템에 내습 시 약 9.06kV의 전압이 유기되며, 41.7kHz의 주파수로 진동하며 감쇠한다.

그림 8은 4-코일 무선전력전송 시스템의 수신부에 커플링 되는 전압을 보여주며, 전자기파 내습 시 약 3.96kV의 전압이 유기되는 것을 볼 수 있다.

낙뢰에 의해 발생한 전자기파가 무선전력전송 시스템에 유도 시 부하 전압 분석

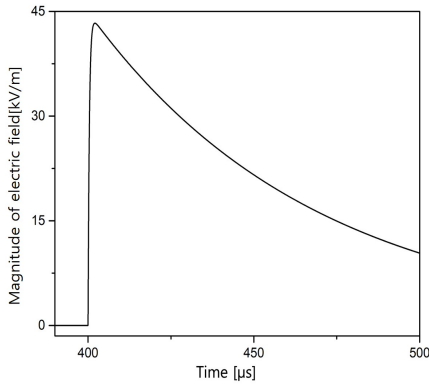


Fig. 5. Waveform of electromagnetic wave (at 20 m apart from the lightning)

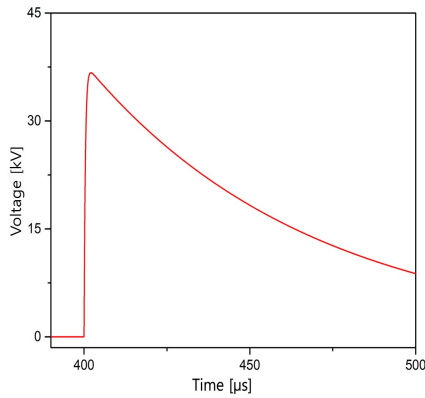


Fig. 6. Voltage waveform of electromagnetic wave induced into the wireless power transfer system

전압은 4-코일 시스템에서 더 낮은 전압이 유도되며, 감쇠 주파수는 55.6kHz로 더 빠르게 진동하며 감쇠하는 것으로 보인다.

5. 결 론

본 논문에서 낙뢰에 의해 발생한 전자기파가 거리에 따라 감쇠하여, 무선전력전송 시스템에 유도되는 과정을 분석하기 위하여 회로 모델링을 하였다. 낙뢰에 의해 20m 떨어진 곳에서 3000kV/m의 전자기파가 발생

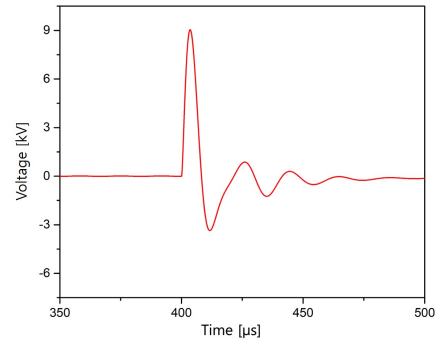


Fig. 7. 2-Coil Wireless Power Transfer System with Two Electromagnetic Waves

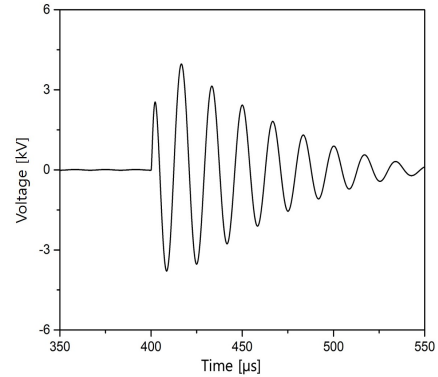


Fig. 8. 4-Coil Wireless Power Transfer System with Two Electromagnetic Waves

하였다고 가정하였으며, 발생과 감쇠의 모델은 기존의 모델을 사용하였다. 뇌 임펄스의 형태는 1.2/50 μ s의 표준 뇌임펄스 파형을 사용하였다. 무선전력전송 시스템은 2-코일과 4-코일 시스템을 대상으로 하였다. 2-코일 시스템에서는 9.06kV의 전압이 부하에 유도되었고, 4-코일 시스템에서는 3.96kV의 전압이 부하에 유도되었다. 이 차이는 4-코일 시스템의 상호 인덕턴스의 영향으로 인하여 나타는 것으로 보인다. 이 통합 모델을 사용하여 낙뢰에 대한 무선전력전송 시스템의 영향 분석에 많은 도움이 될 것으로 보이며, 추가 연구를 통하여 이상전압의 내습 시 보호 회로와 상호 인덕턴스의 영향 분석이 필요하다.

References

- [1] Jae-Hoon Shim, Kyu-Jin Jung., and Jin-Kyu Byun, "Analysis of Coupling Factors for Assessment of Human Exposure to Magnetic Field from Wireless Power Transfer Systems," Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, Vol. 32, No. 3, pp. 59~65, Mar, 2018.
- [2] Min-Jung Kim, Dong-Myoung Joo, Sang-Joon Ann., and Byoung-Kuk Lee, "Two-Stage Inductive Power Transfer Charger for Electric Vehicles," THE TRANSACTIONS OF KOREAN INSTITUTE OF POWER ELECTRONICS, Vol. 22, No. 2, pp. 134~139, Apr, 2017.
- [3] Bryan Esteban, Maher Sid-Ahmed., and Narayan C. Kar, "A Comparative Study of Power Supply Architectures in Wireless EV Charging Systems," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 30, no. 11, November 2015.
- [4] Sanghwan Kim, Chulhun Seo. "Design of Two-Dimensional Resonant Wireless Power Transfer Using 90° Phase Shifted Inputs." Journal of the Institute of Electronics and Information Engineers, 52.2 (2015.2): 70-74.
- [5] Seung-Myung Baek, Dong-Eun Kim., and Jin-Geun Shon, "Analysis of the Efficiency According to Resonant Repeater Application in Magnetic Resonant Wireless Power Transfer System," THE TRANSACTION OF THE KOREAN INSTITUTE OF ELECTRICAL ENGINEERS P, Vol. 67P, No. 4, pp. 221~226, Dec, 2018.
- [6] Sung-Yong Lim and Kyu-Ho Kim, "Transient State Analysis of Faults Caused by Lightning Surge in Distribution Line," The transactions of The Korean Institute of Electrical Engineers, Vol. 65, No. 1, pp. 51~57, Jan, 2016.
- [7] A. P. Sample , D. A. Meyer., and J. R. Smith, "Analysis, experimental results, and range adaptation of magnetically coupled resonators for wireless power transfer", IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 58, no. 2, pp. 544-554, 2011.
- [8] IEEE Power Engineering Society, IEEE Recommended Practice on Surge Testing for Equipment Connected to Low-Voltage AC Power Circuits; IEEE C62.45-2002, p.22.
- [9] IEC 61000-4-5 International Standard, Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-5: Testing and measurement techniques - Surge immunity test, Edition 3.0, 2014.
- [10] David K. Cheng, Field and Wave Electromagnetics 2nd: Plane Electromagnetic Waves, pp.357, Addison Wiley, 1989.
- [11] Sung-Gyen Lee, Kun-A Lee., and Kwang-Cheol Ko, "Analysis on Induced Surge Voltage of Electric Car Line affected by Lightning in Rapid-Transit Railway System," Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, Vol. 29, No. 5, pp. 65~70, May, 2015.

Biography



Jong-Hong Hwang

He received the B.S. degree in the department of nuclear engineering from Hanyang University, Seoul, Korea, in 1988, and the M.S. degrees from Hanyang University, Seoul, Korea, in 2015, where he is currently pursuing the Ph.D degree with the department of electrical Engineering. In 2015, he joined the HDC, Hyundai Development Company, where he is currently a electrical team manager.



Chang-Jin Lee

He received the B.S. degree in the department of electrophysics from Hallym University, ChunCheon, Korea, in 2015, and the M.S. degrees from Hanyang University, Seoul, Korea, in 2017, where he is currently pursuing the Ph.D degree with the Department of Electrical Engineering.



Kwang-Cheol Ko

He received the B.S. degree in electrical engineering from Hanyang University, Seoul, Korea, in 1982, and the M.S. and Ph.D. degrees from Tokyo Institute of Technology (TITech), Tokyo, Japan, in 1986 and 1989, respectively. From 1990 to 1995, he has been an assistant professor at the department of electrical engineering, Gachon University, Gyeonggi-do, Korea. In 1995, he joined the faculty in the department of electrical engineering, Hanyang University, where he is currently a Professor. His research interests include pulsed power technologies and their applications.