뇌전자계 임펄스가 무선전력전송 시스템에 미치는 영향 분석

이창진*, 김세훈** ,고광철
한양대학교*

Influence on Wireless Power Transmission System by Lightning Electromagnetic Impulse

Chang-Jin Lee*, Se-hoon Kim** Kwang-Cheol Ko
Hanyang University*

Abstract - 최근 전기·전자기기의 전원공급에 무선전력전송 시스템의 적용이 고려되고 있다. 근래에 들어 저전력의 휴대용 전기기기를 시작하여 자동차, 열차등 대전력 무선전력전송 시스템 또한 연구되고 있다. 무선전력전송 시스템은 시변자계를 사용하여 전력을 전송하고 있으며, 대전력 시스템의 경우 전송 코일의 크기가 커짐에 따라서 낙뢰에 의한 뇌임펄스에 의해 높은 유도 전압이 발생할 우려가 있다. 낙뢰는 최초 단시간 뇌격과 후속 단시간 뇌격으로 구분할 수 있다. 뇌임펄스는 단시간 뇌격의 상승 시간에 발생한다. 따라서 최초 뇌격의 상승파형을 8/20 [μs]으로 모의 하였으며, 후속 뇌격의 상승파형을 0.2/0.5 [μs]으로 모의 하여 사용하였다. 뇌격 전류는 피뢰 레벨에 따라 최초 뇌격전류는 200, 150, 100 [kA]를 사용하였고, 후속 뇌격전류는 50, 37.5, 50 [kA]를 사용하였다. 무선전력전송 시스템은 송·수신 코일을 간소화 하여 1X1 [m]의 루프로 가정하여 계산 하였다. 그 결과 최초 뇌격에 의한 유도 전압은 400 [V]가 나타났으며, 후속 뇌격에 의한 유도전압은 4 [kV]로 나타났다. 본 논문에서는 루프로 가정하였지만, 무선전력전송 시스템은 턴 수가 있는 코일을 사용하기 때문에 턴 수에 비례하여 고압의 유도 전압이 발생 할 것으로 예상된다.

1. 서 론

무선전력전송 시스템은 배터리를 사용하는 전자기기를 중심으로 많은 연구가 진행되었다. 특히 높은 주파수를 사용하여 작은 전력을 전송하는 소형기기의 연구가 많이 진행되어 사용되고 있다. 저전력 무선전력전송 시스템이 실생활에 사용되면서 대전력 무선전력전송 연구의 필요성이 대두되고 있다. 특히 이동 중 전력 공급이 되는 경우 많은 이점이 발생한다[1]. 자동차의 경우 배터리가 많은 부분을 차지하고 있으므로, 배터리의 무게를 줄여 경량화의 이점을 가진다. 열차의 경우 전차선과 팬타그래프의 유지 보수비용이 없어지는 이점이 있다[2].

대전력 무선전력전송은 크기가 큰 송·수신 코일을 사용하여 전력을 전송하며 실외 설치된다. 그렇기 때문에 근방 낙뢰에 의해 발생하는 뇌전자계 임펄스에 의해 유도 전압이 발생할 우려가 있으므로, 낙뢰 보호를 고려해야 한다. 하지만 무선전력전송 시스템의 이상전압에 대한 연구는 미진한 실정이다.

낙뢰에 의한 보호는 직격뢰에 의한 보호와 뇌전자계 임펄스에 의한 보호로 나누어진다. 직격뢰에 의한 보호는 낙뢰를 확실하게 포착하여 인하도선 또는 구조체를 사용하여 뇌격 전류를 안전하게 대지로 방전시는 방법으로 보호한다. 뇌전자계 임펄스에 대한 보호는 서지 보호기와 외부 차폐를 사용하여 보호한다. 하지만 무선전력전송 시스템의 경우에는 외부 차폐를 사용하면 시스템의 효율이 떨어질 우려가 있다. 따라서 적절한 서지 보호기를 채택하기 위해 유도 전압의 크기를 예측해야 한다.

뇌전자계 임펄스에 의한 유도 전압을 예측하기 위해, 낙뢰의 파형을 최초 단시간 뇌격과 후속 단시간 뇌격으로 구분하였다. 최초 뇌격의 유도전압은 400 [V]으로 계산되며, 후속 뇌격의 유도전압은 4 [kV]로 계산되었다.

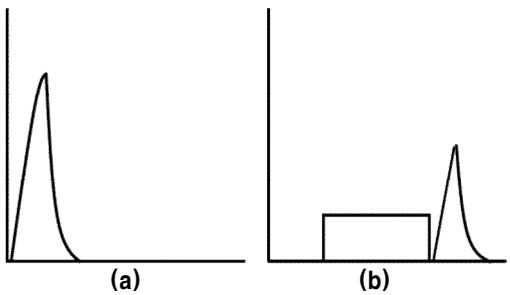
2. 본 론

2.1 뇌전자계 임펄스 파형

낙뢰에 의해 발생하는 뇌전자계 임펄스는 뇌방전의 방향과 뇌격 시간과 연관이 있다. 뇌방전의 방향은 하향 뇌격과 상향 뇌격이 있다. 하향 뇌격은 뇌운에서 대지로 향하는 하향 리더에 의해 전진하며, 상향 뇌격은 높은 구조물에서 뇌운으로 향한다. 상향 뇌격의 발생 빈도는 하향 뇌격 보다 적으므로 상향 뇌격의 영향은 고려하지 않는다.

뇌격은 하나 이상의 뇌격이 발생하며, 지속 시간에 따라서 단시간 뇌격, 장시간 뇌격으로 구분된다. 그리고 뇌격 발생 시간에 따라서 최초 단시간 뇌격, 최초 장시간 뇌격, 후속 장시간 뇌격으로 구분된다. 단시간 뇌격은 지속 시간이 2 [ms]이하이며, 장시간 뇌격은 2 [ms]이상 1 [s]이하의 시간으로 정의한다. 장시간 뇌격의 경우 단시간 뇌격에 비하여 작은 방전 전하를 가지며, 지속시간이 길어 낙뢰에 의한 전계 발생이 적어 무시된다.

따라서 낙뢰에 의해 발생한 뇌전자계 임펄스는 하향 뇌격 중 최초 단시간 뇌격, 후속 단시간 뇌격을 고려하였다. 그림 1은 각각 뇌격의 형태를 보여준다[3].



<그림 1> 뇌임펄스를 발생 하는 뇌격 (a)최초 단시간 뇌격 (b)후속 장시간뇌격과 후속 단시간 뇌격

2.2 피뢰 레벨(Lightning Protection Level)

뇌전자계 임펄스를 결정하는 또 하나의 요소는 뇌격 전류이다. 자연에서 발생하는 뇌격 전류는 뇌운의 고도, 온도, 기압 등의 수많은 변수가 작용한다. 낙뢰에 의해 발생한 뇌격 전류는 변수에 의해 일정하지 않은 값을 나타낸다. 따라서 피뢰 레벨은 자연에서 발생하는 뇌 방전을 초과하지 않는 최대, 최소 뇌격 전류의 파라미터를 확률에 기반으로 정의한다. 예를 들면 피뢰 레벨 Ⅰ의 범위를 벗어나는 뇌격전류의 파라미터가 발생할 확률은 2% 미만이므로, 이를 초과하는 뇌격은 고려하지 않는다. 그러므로 보호하고자 하는 시설의 중요도, 위험성, 공공성 등을 고려하여 적절한 피뢰 레벨에 맞는 피뢰시스템을 설계해야 한다. 표 1은 피뢰 레벨에 따른 최초 단시간 뇌격과 후속 단시간 뇌격의 전류와 발생 확률을 보여준다.

〈표 1〉 피뢰 레벨에 따른 최초 단시간 뇌격과 후속 단시간 뇌격의 전류와 발생 확률

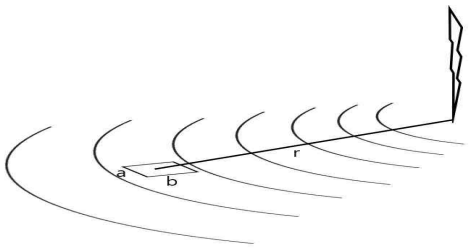
파라미터			뇌격 전류 I[kA]	최대값보다 작을 확률[%]
최초 단시간 뇌격	Lightning Protection Level	Ⅰ	200	99
		Ⅱ	150	98
		Ⅲ~Ⅳ	100	97
후속 단시간 뇌격	Lightning Protection Level	Ⅰ	50	99
		Ⅱ	37.5	98
		Ⅲ~Ⅳ	25	97

2.3 근방 낙뢰에 의한 뇌임펄스 시험 파형

무선전력전송 시스템의 코일에 뇌전자계 임펄스가 쇄교하게 되면, 과전압 또는 과전류가 발생하는 유도 서지가 발생한다. 이 때 발생하는 고전압에 의해서 전자기기의 영구적인 손상이나 비정상적인 동작이 발생할 수 있다.

낙뢰의 뇌격 전류에 의해 발생하는 뇌전자계 임펄스는 주로 급격하게 변하는 상승 구간에서 발생하게 된다. 최초 뇌격 상승 시험 파형은 8/20 [us]를 사용하며, 파두값은 10 [us]의 지속시간과 25 [kH]의 감쇠진동파로 정의한다. 그리고 후속 뇌격 상승 시험 파형은 0.2/0.5 [us]를 사용하여 파두값 0.25 [us]의 지속시간과 1 [MHz]의 감쇠 진동파로 정의하여 계산하였다. 적절한 근사를 위해서 시험에 사용되는 파형의 최고값의 도달 시간과 파두시간은 같은 것으로 가정하였다.

2.4 근방 낙뢰에 의해 발생하는 무선전력전송 시스템의 유도전압



〈그림 2〉 뇌격 근처의 자계 세기

낙뢰에 의한 뇌격 전류를 무한 직선이며, 무선전력전송 시스템이 충분히 먼 거리로 가정하면, 뇌전자계 임펄스를 평면파로 근사 할 수 있다. 또한 주변의 영향에 의해 감쇄가 없는 낙뢰에 의한 자계를 식 (1)로 나타낼 수 있다.

$$H_0 = \frac{i_0}{2\pi r} \tag{1}$$

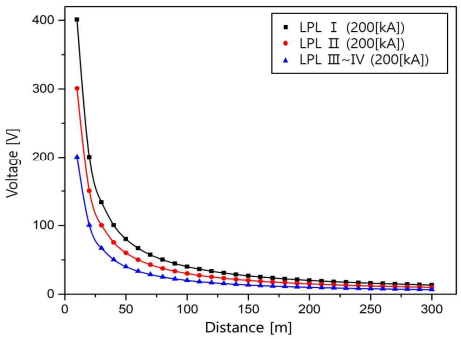
무선전력전송 시스템의 송·수신 코일을 그림 2와 같이 사각형으로 변형시켜, 시변자계의 쇄교자속이 통과하는 면적을 근사화 시킨다. 사각형 면적에 자계의 세기 H_0를 적용하면 루프에 유도되는 전압을 식 (2)로 나타낼 수 있다.

$$U_0 = \mu_0 \cdot a \cdot b \cdot \frac{dH_0}{dt} \tag{2}$$

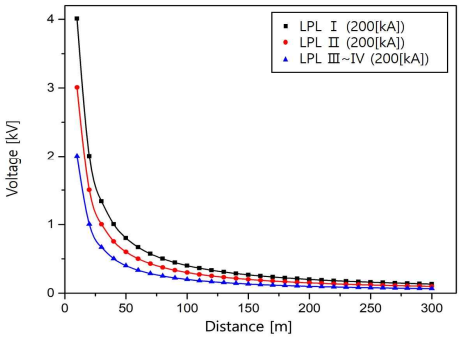
위의 식에서 μ_0는 투자율을 나타내며, a와 b는 사각형의 폭과 길이를 나타낸다[4].

2.5 뇌격의 거리에 따른 무선전력전송 시스템에 유기 되는 전압

본 논문에서는 낙뢰에 의해 무선전력전송 시스템에 유도되는 전압을 거리에 따라 계산하였다. 무선전력전송 시스템의 송·수신 장치를 1X1 [m]의 크기인 루프로 가정하였다. 그리고 최초 단시간 뇌격과 후속 단시간 뇌격의 상승 시간과 피뢰 레벨에 의한 뇌격 전류(Ⅰ~Ⅳ)를 고려하여 유도전압을 계산하였다. 거리에 따른 유도전압은 그림 3과 그림 4에 나타내었다.



〈그림 3〉 최초 단시간 뇌격(8/20 [㎲])에 의한 유도전압



〈그림 4〉 후속 단시간 뇌격(0.2/0.5 [㎲])에 의한 유도전압

최초 단시간 뇌격의 파미값을 근사한 8/20 [㎲]의 파형에 의한 유도전압의 최고값은 약 400 [V]이며, 후속 단시간 뇌격의 파미값을 근사한 0.2/0.5 [㎲]의 파형에 의한 유도전압은 4.01 [kV]로 계산되었다.

3. 결 론

무선전력전송 시스템 근처에 낙뢰가 발생하면 뇌임펄스에 의한 유도전압에 의해 손상이 우려된다. 유도전압은 뇌임펄스의 상승시간과 뇌격전류에 의해 결정되므로, 이를 계산하기 위해 낙뢰의 상승 파형과 뇌격전류의 크기를 산정하였다. 최초 뇌격의 상승을 8/20 [㎲]로 모의하였고, 후속 뇌격 상승을 0.2/0.5 [㎲]로 모의하였다. 뇌격 전류는 많은 변수에 의해서 변화 하므로 확률에 따른 피뢰레벨에 기초하여 결정하였다.

무선전력전송 시스템의 송수신 장치를 1X1 [m]라 가정하고, 피뢰레벨에 정의된 뇌격전류(Ⅰ~Ⅳ)를 사용하여 거리에 따른 유도전압을 계산하였다. 그 결과 최초 뇌격보다 후속 뇌격에 의한 유도전압이 더 큰 것을 확인할 수 있었다. 무선전력전송은 Q-factor의 값을 크게 하는 것이 전송효율 측면에서 유리하다. 따라서 높은 인덕턴스를 얻기 위해 코일의 형태를 사용하므로, 실제 시스템에서는 더 높은 유도전압 발생 할 것으로 보인다.

[참 고 문 헌]

[1]Z. Zhang and K. T. Chau, "Homogeneous wireless power transfer for move-and-charge," IEEE Trans. Power Electron., vol. 30, no. 11, pp. 6213 - 6220, Nov. 2015.

[2]S. Li, C. Mi, "Wireless power transfer for electric vehicle applications", IEEE J. Emerg. Sel. Top. Power Electron., vol. 3, no. 1, pp. 4-17, 2015.

[3]IEC 62305-1, Protection against lightning - Part 1 : General principles

[4]EC 62305-4, Protection against lightning - Part 4 : Electrical and electronic systems within structures