

창 립
40주년 화술대회
논문 87-H-20-3

송전선로의 역설락에 의한 전압파형의 통계적 분석에 대한 연구

조 연 욱* , 구 자 윤** , 박 동 욱*
 * 한국전기연구소 , ** 한국과학기술원

A Proposed Statistical Analysis on the Backflashover Voltage Surge Waves on a Transmission Line

Y. O. Cho* , J. Y. Koo** , D. O. Park*
 * Korea Electrotech Res Inst , **Korea Advanced Inst of Science and Tech

ABSTRACT

A probabilistic model to analyze surge voltage waves on a transmission conductor caused by lightning strokes striking a transmission line tower has been proposed.

In this proposed model, a probability space has been constructed. Based on the constructed probability space, random variables denoting the voltage peaks, time to crest, and time to half have been generated. To know the statistics of surge voltage waves, it suffices to find out the cumulative probability distributions of these random variables.

An illustrative numerical example to find out the distributions of the random variables has been carried out using the Electromagnetic Transient Program(EMTP).

1. 서론

뇌 (Lightning)은 방전로가 수 km에 달하는 대전류 과도방전현상이다. 가장 보편적인 뇌의 근원은 뇌운의 분리된 전하이다. 전력계통의 많은 사고는 뇌에 의한 과전압에 의해 기인된다. 전력계통에서는 보호기기를 사용하여 뇌 과전압에 대해서 기기를 보호하고 있지만, 기기 및 보호기기의 사고나 선로고장은 아직도 많이 발생하고 있으므로 뇌에 대한 연구는 이론적, 실험적으로 지난 일세기동안 지속되어 왔을 뿐만 아니라 현재도 많은 연구를 하고있다.

뇌는 직격에 의하여 또는 계통근처에 떨어진 뇌격으로 부터의 유도에 의하여 전력계통으로 침입한다. 직격에 의해 전력계통으로 들어오는 뇌서어지는 전력계통의 뇌에 대한 연구에 가장 중요한 데, 이들 뇌격은 상도체를 직격하거나, 도체를 자패하는 가공지선을 직격할 수 있다. 뇌가 상도체를 직격하는 경우 가공지선이 있는 경우 자패실패라 한다. 뇌가 가공지선이나 절탑에 떨어지는 경우는 절탑의 전위가 급상승하여, 절탑과

상도체 사이를 절연하는 예자가 섬락할 수 있다. 이를 역설락이라 한다.

변전소로 들어오는 역설락에 의한 뇌서어지의 해석은 변전소 내의 각기기의 과전압을 결정하는데 중요하다. 현대 고전압 계통은 상도체를 직격뇌로부터 거의 완전하게 차폐하도록 설계되어 있으므로 대부분의 뇌에 의한 계통사고는 역설락에 의해 일어나기 때문이다. 그러므로 역설락에 의한 뇌과전압을 정확하게 추정하는 것은 계통의 절연설계에 매우 중요한 문제이다.

전기기기의 절연이나 계통의 공기절연이 섬락되는 뇌서어지의 전압은 일반적으로 일정하지 않고 시간의 함수이다. 즉 섬락이 일어나는 시간이 짧을 수록 뇌서어지 섬락전압치가 크다. 그러므로 역설락에 의해 전력계통에 침입하는 뇌서어지에 대한 신뢰성 있는 계통의 절연설계를 위해서는 뇌서어지의 크기뿐 아니라 파형에 대해서도 해석이 가능해야 한다.

실제로 자연에서 일어나는 뇌는 뇌전류로

특성지워질 수 있는데 뇌전류의 크기 및 파형은 근원적으로 확률적 특성을 지니고 있다. 그러므로, 뇌서어지에 의해 역설팅이 일어날 경우 상도체에 침입하는 뇌전압 서어지도 확률적 특성을 가지고 있다. 이러한 이유로 역설팅에 의한 뇌 전압 서어지의 해석은 통계적방법만이 정확하다고 생각된다.

이상과 같은 관점에서, 본 연구에서는 역설팅에 의한 상도체의 뇌전압 서어지의 해석을 위해 확률공간(Probability Space)을 건설하고, 건설된 확률공간 위에 확률함수(Random Variable, RV)를 제안하였다. 서어지의 파형에 대한 통계는 제안한 확률함수의 누적확률분포를 통해 알 수 있으므로, 345kV 송전선로에서의 역설팅에 의한 전압을 EMTP로 구해 그결과를 이용하여 확률함수의 누적확률분포를 구하였다.

2. 뇌 과전압 파형의 통계적 분석

송전선로 정수가 일정한 경우에 송전철탑에 뇌격에 의해 상도체에 침입하는 뇌전압 서어지는 일반적으로 뇌전류의 함수이며, 뇌전압 서어지의 파형특성도 뇌전류에 좌우되므로 아래와 같이 확률공간(S.B.P)를 제안한다.

- 1) S는 뇌전류의 파고치를 원소로 하는 집합 또는 공간. 즉, $S = \{ I \in R = (0, \infty) \}$.
- 2) B는 S의 Borel Field로서, R 내의 구간, 구간들의 Union 및 Intersection을 포함하는 Class이다.
- 3) P는 사건(Event), 즉 B의 원소들의 확률로서 아래와 같은 Anderson-Eriksson 곡선에 대한 근사식을 사용하였다.

$$P\{I \leq I_0\} = 1 - \frac{1}{1 + (I_0/31)^{2.6}}$$

역설팅시(즉, $I \geq I$, 여기에서 I는 역설팅을 일으키는 최소의 뇌전류이다) 변전소에 들어오는 뇌전압 서어지의 파형특성은 일반적으로 파고치, 파두장 및 파미장의 세가지 계수를 사용하며 나타낼 수 있으므로, 위와 같이 형성된 확률공간에서 확률함수 X, Y 및 Z를 도입한다. 확률함수 X, Y 및 Z는 공간 S의 원소인 뇌전류 I에 대한 변전소에 들어

오는 전압서어지의 파고치, 파두장 및 파미장을 나타낸다.

확률함수 X, Y 및 Z의 통계는 그들의 누적확률분포로 나타낼 수 있는데, 확률함수 X의 누적확률분포 F(X)는 아래와 같이 정의된다.

$$F(X) = P\{X \leq X\}.$$

즉, X의 누적확률분포는 확률함수 X가 X보다 적을 확률을 의미하며 확률함수 Y 및 Z에 대해서도 마찬가지이다.

역설팅시 ($I \geq I$), 변전소에 들어오는 뇌전압 파형의 통계는 $I \geq I$ 조건에서 확률함수 X, Y 및 Z의 누적확률분포로 나타낼 수 있으며, 확률함수 X의 $I \geq I$ 조건에서의 누적확률분포는 아래와 같다.

$$F\{X \leq X \mid I \geq I_B\} = \frac{P\{X \leq X, I \geq I_B\}}{P\{I \geq I_B\}}$$

확률함수 Y 및 Z에 대해서도 마찬가지로 정의 할 수 있다.

3. 해석조건

(1) 송전선로 및 철탑

본 연구에서 사용할 345kV 계통의 송전선로의 구조 및 치수는 그림 1과 같다. 송전선로는 두개의 회로로 구성되어 있으며 가공지선은 두개의 도체를 가지고 있다. 그림 1의 선로높이는 평균값이다. 그림 2는 철탑 및 변전소의 선로인입 구조물에 대한 등가회로를 보여주고 있다. 철탑 1번의 최하부 철탑 및 Crossarm의 전위를 계산하기 위해서 철탑 1번의 등가회로는 그림 2(b)와 같이 철탑의 최하부 Crossarm 상부와 하부로 철탑서어지 임피던스를 분리하였다. 그림 1과 같은 선로구조에서는 가장 하부에 있는 상도체의 결합전압이 제일 낮기 때문에 최하부의 상도체의 예자가 가장 스트레스를 많이 받아서 역설팅을 할 확률이 제일 높다. 따라서 보다 뇌 과전압 해석을 용이하게 하기 위해서 본 연구에서는 최하부 상도체 A와 두개의 가공지선만을 가진 선로를 채택하였다.

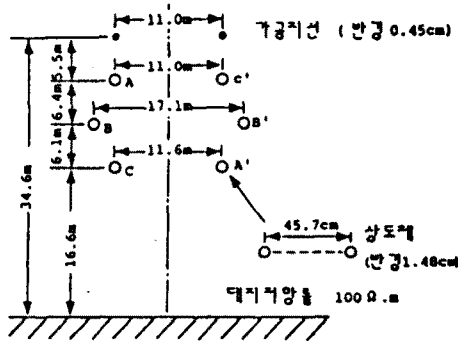


그림 1. 선로구조.
Fig. 1. Line Configuration.

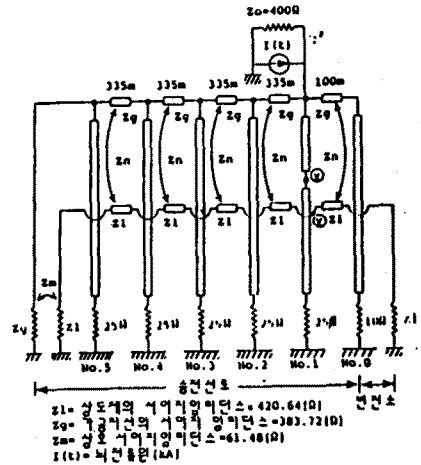


그림 3. 뇌과전압 해석을 위한 단상등가회로.
Fig. 3. Equivalent Circuit of Single Conductor System for Lightning Surge Analysis.

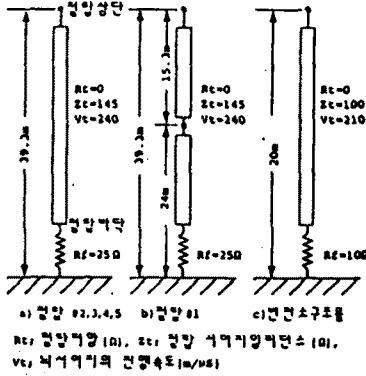


그림 2. 첩탑 및 변전소 구조물의 등가회로.
Fig. 2. Tower and Substation Structure.

(2) 송전선로 모델회로

그림 3은 뇌가 변전소 근처의 1번 첩탑 꼭대기에 떨어질 때의 송전선로의 모델회로이다. 이 모델회로는 뇌전류원, 첩탑, 첩탑저항, 변전소 구조물로 이루어져 있다. 5번 첩탑 끝에 Matching 임피던스 Z_g 및 Z_1 을 가급적선 및 상도체에, 변전소의 상도체에 Z_1 을 각각 연결하여 5번 첩탑 이후에서의 반사파의 영향과 변전소에서의 반사파의 영향을 제거하였다. 변전소에서 1번 첩탑까지의 거리는 100m, 첩탑상호간의 거리는 335m로 하였다. 모델회로의 선로정수 들은 EMTP 계산결과를 사용하였다[1].

(3) 뇌전류원

뇌전류의 파형은 그림 4와 같이 가정하였다.

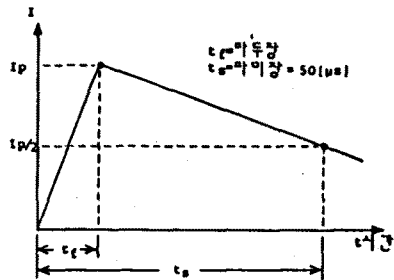


그림 4. 뇌전류 서어지 파형
Fig. 4. Lightning Current Surge Wave

일반적으로 뇌전류의 파두장과 파고치는 상관관계를 가지며 파두부분에서의 뇌전류 상승률과 파고치와의 관계는 그림 5과 같다[2]. 파미장은 일반적으로 파고치에 의존하지 않고 50 μ s 정도이다.

하향 부극성 뇌격의 전류 파고치의 누적확률분포는 ANDERSON-ERIKSSON 식에 대한 LOG 정규 분포 근사식을 사용하였으며, 근사식은 아래와 같다[2].

$$P_I = \frac{1}{1 + (I/31)2.6}$$

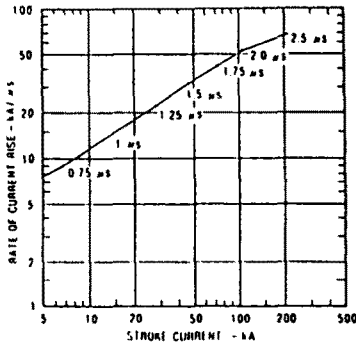


그림 5. 파고치와 전류 상승률과의 상관관계.

그림 내의 수치는 파두장을 나타냄.

Fig. 5. Required Relationships between Crest Current and Rate of Rise.

위식에서 I는 전류파고치(kA)이며 P는 전류 파고치의 누적확률이다.

(4) 역설락

뇌전류 $i(t)$ 가 그림 3의 1번 절탐에 떨어져 절탐전위가 상승하여 역설락이 A 상도체에서 일어나면 그림 3의 X점(최하부 Crossarm)과 Y점(최하부 Crossarm)의 여자선에 연결된 상도체 A이 전기적으로 연결되어 절탐의 전압서여지가 상도체로 침입할 것이다.

상도체로 역설락이 일어나기 위해서는 여자선 사이에 걸리는 전압이 여자선의 설락전압보다 높아야 한다. 여자선의 설락전압은 인가전압의 파형의 함수이며 본 연구에서는 CIGRE의 여자선에 대한 전압-시간 곡선을 사용하였다[3].

역설락이 일어날때 여자선 사이의 공기방전을 모의하기 위해서 공기방전의 상태를 선구방전, Final Jump 및 아-크 상태로 나누어 각각의 상태에 대한 역설락의 회로 임피던스를 아래와 같이 가정하였다 [4].: 0에서 0.45 μ s까지는 무한대 ; 0.45에서 0.65 μ s까지는 300 μ H의 인덕턴스 ; 0.65에서 0.81 μ s까지는 20 μ H의 인덕턴스 ; 0.81 μ s 이후는 0.15 Ω 의 저항.

4. EMTF 운용 결과

그림 3의 X와 Y사이의 스렛치를 동작시키지 않고

여자선 양단간 전압을 EMTF로 계산한 결과 여자선에 설락이 일어나기 위해서는 뇌전류의 크기가 최소 110kA가 되어야 한다는 사실을 규명하였다. 이것을 토대로 크기가 110kA에서 260kA까지의 뇌전류에 대해서 EMTF를 운용하였으며 운용결과 얻은 변전소로 들어오는 전압파형은 그림 6과 같았다.

5. 뇌전압의 확률적특성

EMTF 운용결과와 제2절에서 제안한 통계적 기법을 사용하여 변전소로 들어오는 전압파형의 파고치, 파두장 및 파미장의 누적확률밀도를 구했으며, 그 결과는 각각 그림 7, 8 및 9와 같다. 그림의 누적확률분포로부터 뇌전압의 확률적 특성에 대해서 아래와 같은 결론을 내릴수 있을 것이다.

- 1) 뇌전압 파고치의 분포는 부분적으로 정규 분포를 하고 있으며, 파고치의 평균치는 1600kV, 표준편차는 약 300kV이다.
- 2) 뇌전압의 파두장은 대체적으로 0.26 μ s에서 0.56 μ s까지 균일분포(Uniform Distribution)을 하고 있으며 파두장의 평균치는 0.45 μ s이다. 여자선의 역설락시 선구방전의 지속시간이 0.45 μ s인 점을 감안한다면, 뇌전압의 파고치는 선구방전의 지속시간과 거의 일치함을 알 수 있다.
- 3) 뇌전압의 파미장은 3.75 μ s에서 7.4 μ s까지 분포하고 있으나 7.25 μ s에서 7.4 μ s에 집중되어 있음을 알 수 있다. 그러므로 역설락에 의한 뇌전압의 파미장은 뇌전류에 크게 영향을 받지 않고 7.3 μ s정도로 일정함을 알 수 있다.

6. 결 론

본 연구는 국가 특정연구개발과제 "전기계통의 과도전압연구"의 일환으로서 아래와 같은 점에서 전기기술 발전에 크게 이바지하였다고 믿는다.

- 1) 송전선로의 역설락에 의한 전압파형을 해석하기 위한 확률적 모델을 제안하였다.
- 2) 제안된 확률적 모델에서는 확률공간을 건설하고 건설된 확률공간위에 확률함수를 도입

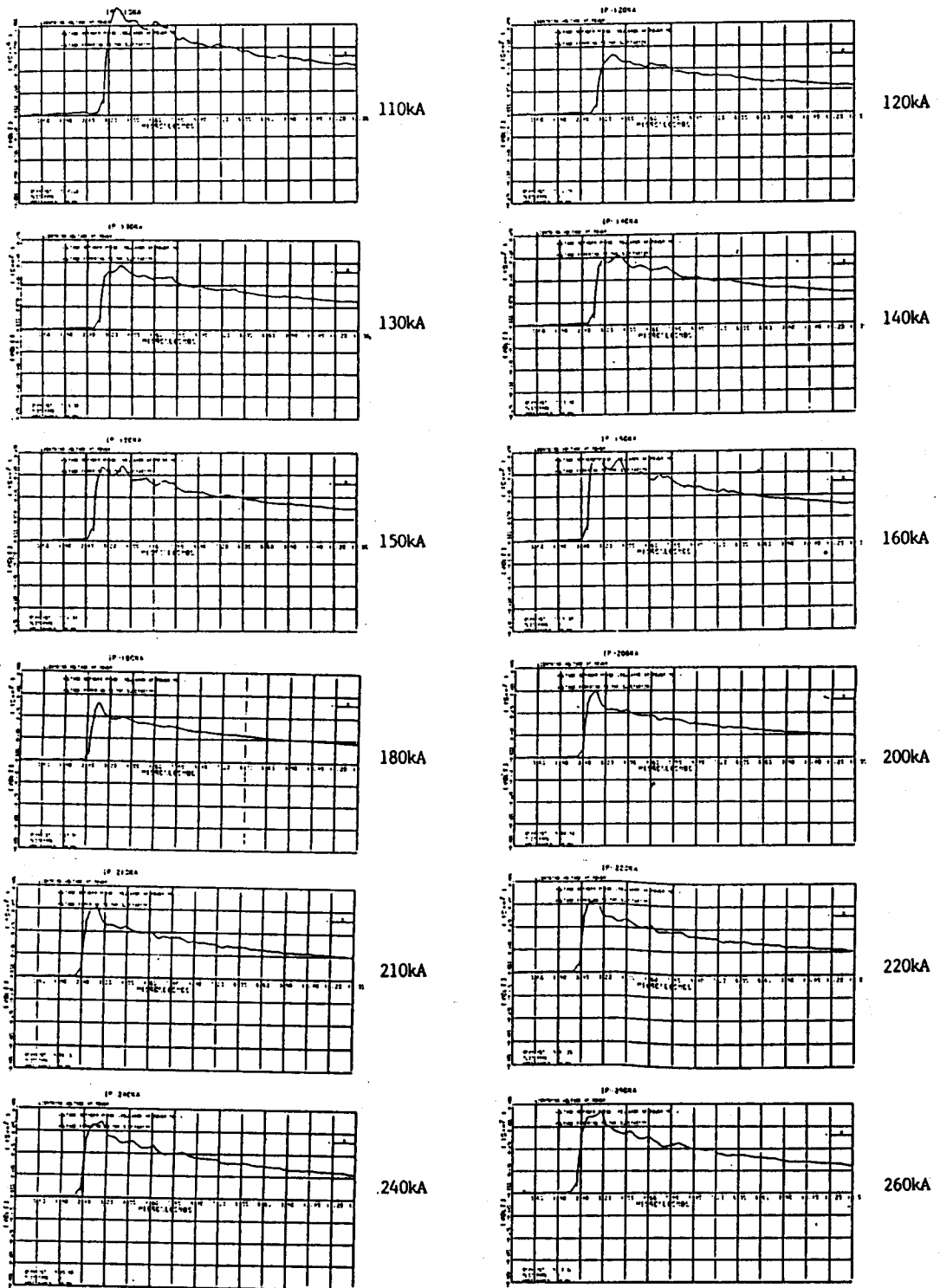


그림 6. 변전소 인입부의 상도체 전압 파형.

Fig. 6. Voltage Waves on the Phase Conductor Entering to the Substation.

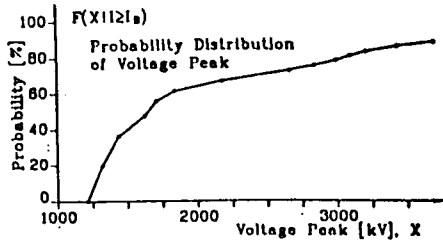


그림 7. 뇌전압 파고치의 누적확률분포.

Fig. 7. Probability Distribution of Peak Voltage.

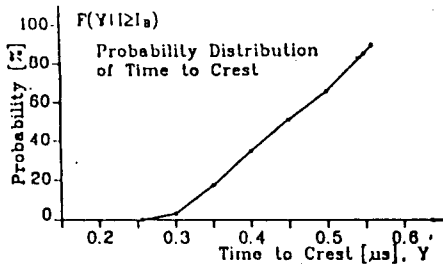


그림 8. 뇌전압 파두장의 누적확률분포.

Fig. 8. Probability Distribution of Time to Crest.

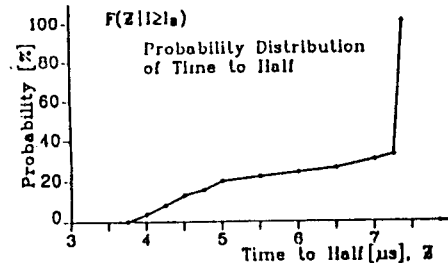


그림 9. 뇌전압 파미장의 누적확률분포.

Fig. 9. Probability Distribution of Time to Half.

[2]. Transmission Line Reference Book, 345kV and Above/Second Edition Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA(1982).

[3]. M.Darveniza, F.Popolansky, E.R.Whitehead, "Lightning Protection of UHV Transmission Lines," *Electra*, No.41 (July 1975):39-69.

[4]. J.Ozawa, et al, "Lightning Surge Analysis in a Multi-Conductor System for Substation Insulation Design", *IEEE Trans., PAS-104* (August 1985) : 2244-2254.

하여 뇌전압 파형을 통계적으로 해석가능하게 하였다.

- 3) 제안한 확률적 모델을 토대로, 345kV 송전선로의 역설각에 의한 뇌전압 파형을 EMTP로 계산하고 파형의 확률적 특성을 구하였다.

참고문헌

[1]. Electromagnetic Transients Program (EMTP) Primer, Westinghouse Electric Corporation Pittsburgh, Pennsylvania(Sep.1985).