UDC 621.317.322 : 551.594.221
621.396.677.41

論文

56-B48

CIGRE 形アンテナによる誘導雷電圧の実測結果および検討

正員 山本 賢 司 (大阪大)
正員 松原 一郎 (大阪大)
正員 木下 仁 志 (大阪大)
正員 岡 重 信 (大阪工大)

1. ま え が き

電圧レベルの低い架空線路においては、近傍落雷時に線路上に発生する誘導雷サージはその絶縁を脅かす恐れがあり、配電線などの耐雷設計においては問題の一つとされている。

誘導雷サージは Schonland 氏らによるボイスカメラの観測⁽¹⁾以後、雷放電機構が明らかになるに従い雷放電経路からの誘導に起因するものが重要とされ、内外の研究者^{(2)~(5)}により、種々検討されてきているがまだ十分に解明されていない。

誘導雷サージは、これまで主として理論的な面から検討され、実測面からの検討および実測データなどは極めて少なく、更に実測に基づく理論解析を行なった例はほとんどみられない。本質的に、誘導雷サージは雷放電による地表面付近の電界変化が線路上に電圧を誘起し、これが源となって複雑に進行するものである。従って、この線路伝搬前の原電圧を知ることが根本と思われる。これまでの実測^{(6)~(7)}は数 km 以上の長い線路によるものであり、それらの観測波形には複雑な進行波成分および個々の線路特性が含まれており、一般的な解析が困難と思われる。

著者らはこのような観点から、極めて短い線路ということで、現在 CIGRE が雷放電カウンタに推奨している長さ 14 m、地上高約 5 m の水平に架設されたア

ンテナを用いて昭和 45 年から 49 年の 5 か年間、実測を行なってきた。本報告はその結果、得られた各種雷放電時のアンテナ誘起電圧波形、大地落雷時の主放電による電圧変化の大きさおよびそれらの検討結果などについて示し、更に Chowdhuri 氏が示した解析モデルに基づいた計算と本実測結果の比較検討を行なったものである。

2. 実 測 方 法

実測は測定に便利な大阪大学吹田学舎（万博会場跡北西約 2 km）および関西地区では比較的多雷地区といわれる琵琶湖南側の関西電力湖南変電所の 2 か所にて、45 年～49 年の夏期（6 月中旬～10 月中旬）に行なった。（但し、湖南変電所では 47 年～49 年の 3 か年）

第 1 図は実測に用いた短い線路、即ち CIGRE 形アンテナ（以下アンテナと記す）を示す。第 2 図に実測回路を示す。実測回路は年々改良、変更などを行なったため、多少各年ごとに相違はあるが第 2 図は最終のものを示す。アンテナと大地間には図中に示すように抵抗容量分圧器（立上り時間 0.1 μ s、分圧比約 1/100～1/500）をそう入した。この分圧器特性の詳細は後述する。また、全体の波形と主放電時の速い変化部分

第 1 図 誘導雷電圧実測用アンテナ

Fig. 1. Antenna used to measure voltage induced by lightning discharge.

Results and Discussions of Measurements of Voltage Induced by Lightning Discharge on CIGRE Type Antenna. By Kenji Yamamoto, Member, Ichiro Matsubara, Member, Hitoshi Kinoshita, Member (Faculty of Engineering, Osaka University) & Shigenobu Oka, Member (Faculty of Engineering, Osaka Institute of Technology)

山本賢司：正員，大阪大学工学部電気工学科

松原一郎：正員，大阪大学工学部電気工学科

木下仁志：正員，大阪大学工学部電気工学科

岡 重信：正員，大阪工業大学工学部電気工学科

第2図 実測回路

Fig. 2. Schematic diagram of measuring circuit.

をみるために2台のブラウン管オシロスコープ（以下CROと記す）を用い、後者の場合は4段のマルチトレース掃引を行なわせた。前者の場合、48年より、電圧波形をより適確に捕える方法として2現象ユニットを用い、更に多素子の直記式電磁オシログラフ（以下PCと記す）を用い、これに雷鳴、アンテナ誘起電圧、カメラシャッターX接点の開閉状態とこれを利用したフィルム枚数指示用パルス、雑音チェック用信号、目視による対地、雲間放電識別信号および別に設けたCIGRE形アンテナによるカウンタ出力などを同時記録させ、各信号の同期ならびに落雷地点までの距離測定を行なわせた。雷電光撮影は市販のビデオテープレコーダ（以下、VTRと記す）を使用した。なお、誘起電圧の極性が正、負いずれの場合でもCROが掃引するように第2図中に示すようにトリガー信号発生器を設けた。

3. 実測結果および検討

〈3・1〉 雷放電によるアンテナ誘起電圧波形 第3図は遅い掃引速度（主として20 ms/div～200 ms/divを使用）のCROにより観測された代表的な8つの形のアンテナ誘起電圧波形例を示す。この8つの形の波形は第3図中に示すような各種雷放電によるものであるが、それらは次の事から分類したものである。（1）耳目観測、（2）VTR電光観測、（3）PCにより同時記録された雷鳴の強弱、波形および誘起電圧の大きさとその波形、電圧波形と雷鳴の時間差（例えば雲間および雲内放電では夏期においては雷雲の地上高から考えて、真上にある場合でも1 km以内のもの、即ち時間差として3秒以内のものはありえない）による落雷地点まで距離、（4）Malan & Schonland⁽⁸⁾、北川⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾氏らの過去に得られた電界変化の実測波形例との照合および第1表に示される従来の実測された

[I]～[VII], [VIII]: 上 200V/div, 下 200V/div, 50ms/div
[IV]: 上 1,000V/div, 下 100V/div, 200ms/div
() 内数値は落雷地点までの距離

第3図 代表的なアンテナ誘起電圧波形例

Fig. 3. Typical waveshapes of the induced voltages on antenna.

第1表 雷放電の諸特性

Table 1. Characteristics of lightning discharges.
() 内数値は引用文献番号

対地放電	(イ) Stepped leader の平均速度	0.1～2.6 m/μs	(13)
	(ロ) Dart leader の平均速度	1～21 m/μs	
	(ハ) Stepped leader の大地までの進展時間	平均 20 ms	
	(ニ) Dart leader の大地までの進展時間	平均 1～2 ms	(14)
	(ホ) 多重落雷の放電時間間隔	30～60ms ほど	
	(ヘ) 多重落雷の放電回数	2～4 回が過半数	
	(ト) 主放電電流波高値	平均 45 kA	(11)
	(チ) 主放電電流の進行速度	30～90 m/μs	(12)
(リ) 連続放電の特徴		100 A 程度の電流値、継続時間 40～300 ms。多重雷の半(9)数に含まれる。残光部に K Change を含む。	
(ヌ) 雲間放電の特徴		先行放電と主放電を含まず K Change 放電の複雑な繰返かえしと連続電流の組合せか(9)らなり、その継続時間は数 100 ms 程度。	
(ル) K Change 放電の特徴		雷雲中の負電荷分布の不均一が原因で生じる放電。10 ms 程度の間隔で 1 ms 程度の瞬間的な発光あり。その地表面(9)電界変化は主放電のものに比し、極めて小さい。	

雷放電の諸量および特徴との対比など。特に I～IV 形のは比較的容易に目視による落雷確認が可能であった。

第4,5図は49年8月12日に得られたVTRによる

第 4 図 大地落雷時の雷電光および誘起電圧波形例 (落雷地点までの距離; 約 6.1 km)

Fig. 4. Flash and induced voltage by lightning discharge to ground. (distance; about 6.1 km)

1. CRO (Slow) シャッターパルス, 2. CRO (Fast) シャッターパルス, 3. 誘起電圧 (低感度), 4. 誘起電圧 (高感度), 5. CRO (Slow) 掃引チェックパルス, 6. 雑音チェックパルス, 7. 雷鳴, 8. 予備チャネル, 9. CRO (Slow) 写真枚数チェック信号, 10. 対地, 雲間放電識別信号, 11. フラッシュカウンタ出力

第 5 図 電磁オシログラフの記録

Fig. 5. Record of electro-magnetic oscillograph.

雷電光写真および CRO による誘起電圧波形ならびに、そのときの PC の記録例を示す。第 4 図 (a) の雷電光写真によれば、大地面に対して約 60° の傾き (但し、一方向からみたもの) で落雷している。雷雲底の地上高 (この場合、電光が確認できる高さとした) は、65 m 離れた建造物の長さから算定すると、約 1.6 km となる。(b) の誘起電圧波形をみると最初の 55 ms までの電圧変化 (図中の S 部) は I ~ IV 形の写真にもみられるように、先行放電によるものである。その直後に主放電による急しゅんな正方向への変化 (図中の R 部) があり、典型的な大地落雷時の電圧波形である。第 5 図の PC の記録から、チャネル 4 の電圧波形とチャネル 7 の雷鳴の時間差が約 18 秒であることが判る。これに音速を乗じると約 6.1 km 離れたところの落雷となる。チャネル 10 の電圧パルスの大きさ (図中の G) から識別すると目視によっても大地落雷であったことが確認されている。たまたま、この日はこの一発がこの方向への落雷であったため、観測後約一時間経て VTR 再生画像により、落雷地点の方向を見出し、PC

の記録から算出したその方向 6 km 地点付近の住民より、雷鳴の強さ、電光および落雷の有無などの情報を得た。落雷地点は確認できなかったが、それらの情報による落雷推定地点と PC, VTR から求めた地点はほとんど相違していないことが確認され、今回我々が用いた距離測定は信頼できるものと思われる。なお、チャネル 1 より、この特別に設けたアンテナによる雷放電カウンタが動作していることが確認された。

I ~ IV 形の最初に現れる先行放電による電圧変化 (第 3 図中の S 部) は近傍落雷の場合は負、遠方落雷の場合は正の変化を示している。これは Malan & Schonland 氏らが実測により得た電圧波形およびその検討結果⁽⁸⁾からも既に示されているが、次のように説明される。落雷地点から観測地点までの距離および雷雲地上高に比べてアンテナ地上高は極めて小さい。このためアンテナ付近の電界は地表面電界にほぼ等しい。従って、アンテナ誘起電圧は地表面電界にその地上高を乗じたもので近似される。結局、この場合アンテナ設置点の地表面電界変化によってその様相を把握できる。アンテナは大地へ分圧器抵抗を通して接地されており、先行放電前の極めて緩やかな電荷生成過程においてはアンテナ対地電圧は零の状態になっている。このような状態において、先行放電時には負に帯電された雷雲より負雷リーダが大地に向かって下降する (この最初の下降リーダは段階的に進展するところから、一般には stepped leader と呼ばれる)。このときの地表面電界変化は、負雷リーダによる負の電界変化成分と負雷リーダが抜け出したことによる雷雲電荷減少による正の電界変化成分の二つの和となる。その場合、近傍落雷時には前者の成分が優勢となり地表面電界変化は負 (即ちアンテナ対地電圧は負) となる。一方、遠方落雷時には逆に後者の成分が優勢となり地表面電界変化は正 (即ちアンテナ対地電圧は正) となる。このときの電圧変化の継続時間の多くは 10 ~ 60 ms であったが、これは Malan & Schonland 氏ら⁽⁸⁾の電界記録および第 1 表 (ハ) の時間長から推察しても妥当な値となっている。なお、この先行放電による電圧変化部分の直後に現れる正方向の急しゅんな変化部分 (第 3 図中の R 部) は主放電によるものとなる。主放電による電圧変化が先行放電によるそれに比し、急しゅんとなるのは第 1 表 (イ), (チ) に示されるようにその進行速度が先行放電のそれに比し、極めて速いことによる。主放電による電圧変化が近傍、遠方落雷時いずれも正方向になる理由については後述する。

I, III の形はこの過程が一回のみの単発落雷による

ものであるがⅡ、Ⅳの形の場合は、この後にある時間間隔において同様の過程が続く多重落雷によるものである。但し、二発目以降の先行放電による電圧変化時間（例えば第3図〔Ⅱ〕のD部の継続時間）が極めて短いのは一発目の放電により開拓された雷放電路の存在のため、極めて速く進展する雷リーダ（一般にはDart leaderと呼ばれており、その進行速度は第1表（ロ）に示される）によるためである。第3図の遠方落雷時の波形〔Ⅳ〕ではCROの掃引速度が遅いため、Dart leader 下降時によるものと主放電によるものとが区別できない。なお、多重落雷時の放電時間間隔および放電回数の多くはそれぞれ20~80 ms, 2~4回であったが、これらは第1表（ホ）、（ヘ）に示されるように従来の実測結果にはほぼ一致していた。

今回の大地落雷時の電圧波形はそのほとんどがⅠ~Ⅳ形のものであり、上述のことから考えて我々が実測した地域での夏期雷はほとんどが負極性雷と推察される。

また、このほか、大地落雷時のものにおいてⅤ形の示すように、主放電直後の波尾部分（第3図〔Ⅴ〕の部）で数100 msという極めて長い波尾変化を示すものも得られた。この場合の波形の特徴は、そのような波尾変化が現われるのは全て主放電直後からであり、ほとんどが多重落雷の二発目以降に生じ、一発目の主放電による電圧変化の大きさに比し、この場合のものは第3図〔Ⅴ〕に示すように、かなり小さくなることである。このような特徴は第1表（リ）に示される特徴とよく似ていることからそれは連続放電によるものと推察する。

Ⅵの形はⅢ形の極性を逆にした形である。このような波形は電圧値が比較的小さく、また、まれにしか観測されなかった。これまでの考察からすると正極性の遠方落雷によるものと思われる。

Ⅶ形は全体的に緩やかな変化の中に振幅の比較的小さいスパイク状の急な変化部分を含んでいる。これは北川氏の実測⁽⁹⁾による雲間放電時の電界変化波形と極めて類似していることおよび第1表（ヌ）の特徴、更にこのような波形観測時には特に落雷も確認されていないことなどから雲間放電と考えられる。

Ⅷ形は振幅の極めて小さいスパイク状のものが一つあるいは、ある時間間隔において発生しているものである。これは極めて遠方の多重落雷によるものとも思われるが、先行放電段階の初期継続部分が見出されないことおよび北川氏が示しているK Change放電（第1表（ル）参照）によるものなのか、はっきりしないため現段階では不明なものとした。

以上、得られたアンテナ誘起電圧波形について、観測ひん度が比較的高く、また、特徴的なものを大別し、その代表的なものについて示したが、その他、多様に变化する不明な波形も得られている。

〈3.2〉 大地落雷時の主放電による誘起電圧

〈3.1〉節に示したように本実測では対地放電あるいは、雲間放電の各種雷放電時の誘起電圧波形が得られたが、電力システムの耐雷設計上においては特に対地放電の場合が重要となる。対地放電における重要な過程は先行放電および主放電の二つの過程が考えられる。

主放電時の電圧変化は第3図に示したように、先行放電時のものに比し極めてその変化時間は短く、また大きさも後述するように近傍になれば著しく大きくなる。従って、配電線などにおける誘導雷サージとしてはこの過程によるものが最もか酷になる恐れがあると推察される。このため今回は先ず主放電過程におけるものについて行なった検討結果を以下に述べる。

第6図(a), (b)は第3図に示したⅠ~Ⅳ形の大地落雷時の電圧波形において、48, 49年の実測結果をもとに落雷地点までの距離が明確なものについて、一発目の主放電時の電圧変化の大きさと落雷地点までの距離との関係をプロットしたものである。各年度とも同様の傾向であり重要な点は電圧変化の大きさが近傍落雷になるほど著しく大きくなることである。同一落雷地点までの距離において、その大きさがかなりのばらつきをもっているのは後述する解析モデルの計算結果からも明らかとなるが、主としてその電圧変化の大きさに影響を与える主放電電流の大きさ、波形および進行速度などにばらつきが存在することによる。

主放電による急しゅんな電圧変化の波頭部の様相、

第6図 主放電時の電圧変化の大きさ

Fig. 6. Magnitudes of voltages induced by return strokes.

第7図 主放電時の電圧変化の大きさとその波頭長

Fig. 7. Magnitudes and wave front times of voltages induced by return strokes.

第8図 多段掃引による落雷時の誘起電圧波形

Fig. 8. Waveshapes of induced voltages due to lightning discharges to ground obtained by multiple sweep cathode ray oscilloscope.

特にその時間長を把握する目的で第2図に示した速い掃引速度（主として $1\mu\text{s}/\text{div} \sim 1\text{ms}/\text{div}$ を使用）にセットした CRO により観測を試みたが、主放電以前の電位変化の影響を受けて CRO トリガーのタイミングがとれず落雷地点までの距離が明確に示されたものは得られなかった。第7図は第8図に示すような幾分か速い $1\text{ms}/\text{div}$ および $5\text{ms}/\text{div}$ の4段掃引による落雷時の電圧波形からプロットしたものである。（但し、この場合は微分回路を取付けない状態で観測したものである）図中、点線で囲まれるプロット点において、左上のものは近傍、右下のものは遠方落雷によるものである。但し、その区別は第3図〔I〕～〔IV〕の波形から推定して先行放電による電圧変化の極性から大略区別したものである。←印はその波頭長が相当する横軸の時間長以下であることを示す。この図において、近傍になるほど、電圧変化の大きさが大きくなることは第6図の通りであるが、更にその波頭長が遠方落雷

時のそれに比し短くなり波頭しゅん度がより高くなることわかる。但し、前述したように第7図は $1\text{ms}/\text{div}$ および $5\text{ms}/\text{div}$ の掃引速度による CRO で観測したものであり、更により速い掃引速度のもので十分な実測を要する面がある。

第8図は4段掃引の CRO により観測された近傍および遠方落雷時の電圧波形を示す。図中の水平線は零線であり、掃引は通常上段から下段に向かって順次進む。写真の両側の数字は電圧波形における掃引順序を示す。なお、第8図(c)は(a)の全掃引波形をわかりやすく一つにひきのばして示したものである。この写真より先行放電による緩やかな電圧変化から主放電による急しゅんな正方向への電圧変化の様相を比較的明瞭に把握することができる。

また、先行放電時の緩やかな電圧変化を除き主放電により発生すると予想される変化時間 $100\mu\text{s}$ 以下の電圧波形を捕える目的で分圧器低圧側に設けた微分回路(第2図参照)により観測されたものは、前述の理由および雲間、対地放電の区別が困難であったため、明確な根拠あるデータが得られなかった。なお、観測された電圧波形による結果は波頭長が約 $0.5\mu\text{s} \sim 20\mu\text{s}$ 、その電圧変化の大きさ約 $5\text{V} \sim 500\text{V}$ であった。

4. 主放電による誘起電圧の実測結果と解析モデルによる計算結果との比較

一般に雷放電は自然派生の突発現象であることおよびその規模の大きいことから実測には種々の面で困難が伴う。従って、古くからその時点で知られた雷放電特性を考慮したモデル実験および解析モデルによる理論的検討などが行なわれている。著者らもそのような観点から、実際の配電線への誘導雷サージ検討を行なう際のより妥当なモデルを作成する意味で今回の実測を行なってきた。ここでは我々が得た実測結果と解析モデルによる計算結果との比較検討を行なう。

主放電時の解析モデルはこれまで種々示されているが、現時点では Chowdhuri 氏の提案したもの⁽⁴⁾が最も妥当なものと思われる。このモデルは我が国でも既に用いられており、それによる大地付近の空間のある点における誘起電圧算出式も示されている⁽⁵⁾。主放電時の過程では、負雷リーダが大地に到達した瞬間から雷リーダおよび雷雲の負電荷を中和するために正極性の主放電電流が雷放電路上を上昇すると言われる。Chowdhuri 氏のモデルの特徴は主放電電流を第9図に示すような三角波形として取扱っていることである。更に大地は平たんな完全導体とし、正極性電流が大地面から垂直上方に減衰、変わりもなく一定速度で

第 9 図 主放電モデル

Fig. 9. Return stroke model.

第 10 図 主放電による電圧変化の実測および計算値の比較

Fig. 10. Comparison of magnitudes of induced voltages due to return strokes obtained by measurement and computation.

進行すると仮定している。

第 10 図の曲線群はこの解析モデルに基づき、付録 1 (付 1) 式より求めたものである。但し、このときの計算条件は、主放電電流を参考文献 (4), (5), (11), (12) などから、その波頭長 $t_f = 2 \mu s$ 、波尾長 $t_e = 50 \mu s, 100 \mu s$ 、進行速度 $v_i = 60 m/\mu s$ (光速 c の 20%) と選定し、 P 点地上高をアンテナのそれである 4.7 m として、波高値 I_0 を図中に示すように種々変化させたものである。また、図中のプロット点は第 6 図で示した 48, 49 年の実測結果である。実測した各点はこれらの曲線群と比較すると電流波高値が 5~140 kA の範囲にそのほとんどが存在している。これらの電流値はこれまで実測された範囲⁽¹¹⁾内にあり、このことから、この主放電モデルは実用面からも一応信頼のおけるものと推察される。

第 10 図の結果から、従来、実測されている雷撃電流値の発生ひん度分布⁽¹¹⁾により推定して、数 100 m 以内の近傍落雷には主放電による電圧変化が配電線の

第 11 図 誘起電圧に与える主放電電流の波形、進行速度の影響

Fig. 11. Effects of waveshape and progressing velocity of return stroke current on the induced voltage.

6号 BIL (60 kV) をかなりのひん度で越えうると予想される。第 10 図は地上高 4.7 m の結果であるが、それを配電線の標準的な地上高である 10 m とするとその結果はそれぞれ約 2 倍されることになり、更にそのひん度は高くなる。但し、本結果はあくまでも主放電により生じる線路伝搬前の原電圧に関するものであり、実際の配電線は数 km 以上の長い線路が大部分と思われ、更にそのような線路についての誘導サージにまで拡張した検討を行なう必要がある。

一般に自然雷の主放電電流は波高値のみならず、その波形および進行速度もある範囲内ではばらつきがある。参考文献 (11), (12) によれば $t_f = 0.5 \mu s \sim 10 \mu s$, $t_e = 20 \mu s \sim 240 \mu s$ (但し、JEC-187 規格の表示法では $10 \sim 120 \mu s$ となる), $v_i = 0.1 c \sim 0.3 c$ となる。第 11 図はこれら t_f, t_e, v_i による誘起電圧の変化 (但し、この場合、主放電電流の波形 $2 \times 100 \mu s$, $v_i = 0.2 c$ によるものを基準とした) をみたものである。この結果によると、 t_f によってはほとんど変化しないが t_e, v_i 特に v_i によって比較的大きく影響される。今回の解析モデルでは主放電電流を実測していないので一般によく用いられる標準的な値を使用し、実測結果と比較したものである。

上述のように主放電時には、負雷リーダおよび雷雲内の負電荷を中和するために雷放電路を上昇する主放電電流により地表面では正の電界変化を受ける。このため、アンテナ上に誘起される対地電圧変化は正方向となる。これは先行放電時のように雷雲電荷減少分のような逆極性の効果を及ぼす成分がなく、遠方および近傍いずれにおいても正方向の電圧変化をアンテナに与えることになる。

第 12 図 分圧器を取付けたときの
アンテナ等価回路

Fig. 12. Equivalent circuit of antenna
connecting with potential divider.

5. 波形観測に用いた分圧器に関する検討

アンテナに生じる誘起電圧波形観測において、第 2 図に示す抵抗容量分圧器を用いた。この分圧器の特性はアンテナ誘起電圧に影響するため十分に検討しておく必要がある。この形の分圧器において、波形を忠実に分圧させる基本則は高压部の抵抗および静電容量の積と低压部のそれとを等しくすることである。更に今回の場合は以下に記述するように、できる限り抵抗を大に静電容量を小にする必要がある。第 12 図はアンテナに分圧器を取付けた場合の等価回路を示す。但し、アンテナの大地間漏えい抵抗は降雨時にメガーにより測定した結果、無限大 (500 MΩ 以上) であったことおよび分圧器低压部は分圧比を 1/100 以下としたことから、それらは無視している。 e_0 は分圧器を取付けなかった場合、 e は取付けた場合のアンテナ対地電圧とすると、 e_0 を単位ステップ関数波としたときの e は次式で表わされる。

$$e = C_0 / (C + C_0) \cdot e^{-t/R(C+C_0)} \quad \dots\dots\dots (1)$$

(1) 式から、広範囲の時間領域において $e = e_0$ を満足させるためには、分圧器の対地容量 C がアンテナ対地容量 C_0 に比し、十分小さく、分圧器抵抗 R が十分大きいことを必要とする。今回、 C はできる限り小さくするように務めたが実際にはストレイキャパシタンス (分圧器据付時に約 11 pF) が既に存在し、約 41 pF となった。また分圧器抵抗 R は CRO の入力インピーダンス (10 MΩ) の関係から 51 MΩ とした。分圧比は切換スイッチにより約 1/100 ~ 1/500 まで可変できるものにした。その際、ストレイキャパシタンスの存在のため、実際にはあらかじめ計算で定めた抵抗および静電容量により分圧器を製作し、それに立上り約 0.1 μs のステップ波を印加し、その高压、低压部電圧波形を CRO で観測しながら低压部の抵抗および静電容量値を種々変化させ、直流から立上り約 0.1 μs までの周波数領域について正確に分圧するよう、それらの値を決定した。なお、分圧器の耐圧は 170 kV 以

上 (雷インパルス) であった。

第 12 図の等価回路により、観測された主放電時の電圧変化に対する補正について行なった検討結果を以下に記述する。主放電時の電圧変化における時間長はそのほとんどが 2 ms 以下であり、また第 8 図から大略、直線上昇波的に近似される。いま、第 12 図において e を直線上昇波と仮定し、そのときの e_0 を求めると次式で表わされる。

$$e_0 = \frac{C + C_0}{C_0} \left\{ 1 + \frac{t}{2R(C + C_0)} \right\} e \quad \dots\dots\dots (2)$$

(2) 式において、仮りに $t = 2$ ms としても $e_0/e = 1.2$ 、即ち観測された主放電時の電圧変化に対する補正係数は 1.2 以下となる。第 6, 10 図は対数目盛表示であり、また第 10 図の評価目的からみればそれは無視できるものである。このため第 6, 10 図に示した実測点は特に補正しなかった。

6. む す び

誘導雷サージの基本は、雷放電による地表面付近の電界変化に基づく線路伝搬前の原電圧であるという観点から、CIGRE 形アンテナに誘起される誘導雷電圧の観測を行ってきた。その結果、種々の雷放電による誘起電圧波形が得られたが、特に配電線などの耐雷設計上重要となる大地落雷時の誘起電圧波形はこれまでに示されている理論および実測結果に合致するものであり、更にこれらの波形をもとに主放電による電圧変化と落雷地点までの距離の関係が明らかになる重要なデータが得られた。それによると近傍落雷になるほど、その電圧変化は著しく大きくなる。

また、この実測結果と Chowdhuri 氏の解析モデルに基づき、主放電電流を、その波形: $2 \times 100 \mu s$ 、進行速度: $60 \text{ m}/\mu s$ 、波高値: $5 \sim 140 \text{ kA}$ とした主放電モデルによる計算結果とを比較した場合、よく一致し、そのモデルが実用面においても信頼されうものと評価できた。

更にこれら実測および理論計算の結果から主放電による電圧変化の大きさは数 100 m 以内の近傍落雷においては、配電線の 6 号 BIL (60 kV) を十分、越えるると予想されることが明らかに示された。

但し、今回の実測において、特に主放電による誘起電圧の波頭部分を明確に捕えられなかったことおよび主放電電流の測定を行っていないことなどがあり、今後更に検討する余地がある。

(昭和 55 年 6 月 20 日受付, 56 年 2 月 20 日再受付)

文 献

- (1) 例えば, B. F. J. Schonland, D. J. Malan & H. Collens: *Proc. Roy. Soc., A* **152**, 595 (1935)
- (2) S. Rusk: *Trans. of the Institute of Technology* **120**, (1958)
- (3) 大和: 電力中研技研報告, 電力 61039 (昭 37-2)
- (4) P. Chowdhuri: *Proc. Inst. Elect. Engrs.* **114**, 12, 1899 (1967)
- (5) 横山: 電学論 B, **96**, 561 (昭 51-11)
- (6) 大槻・斎藤・松田・鳳・大山・木原: 電学誌 **72**, 431 (昭 27-8)
- (7) 例えば, 大和・松本: 電力中研技研報告, 電力 65066 (昭 40-11)
- (8) D. J. Malan & B. F. J. Schonland: *Proc. Roy. Soc., A* **191**, 485 (1947)
- (9) 北川: 科学 **38**, 601 (昭 43-11)
- (10) 北川: *J. Geophys. Research* **67**, 637 (1962-2)
- (11) 耐雷設計基準委員会: 電力中研技一研報告, 電力 32, 71037 (昭 46-9)
- (12) C. F. Wagners & A. R. Hileman: *AIEE Trans. Power Apparatus Syst.* **PAS-80**, 10, 622 (1961-10)
- (13) M. A. Uman: *Lightning*, (1969) MacGrow-Hill
- (14) 鎌田・天津・高木: 電学誌 **72**, 65 (昭 27-2)

付 録

1. 主放電電流による誘起電圧 $V_i(t)$ の算出式

$t < \sqrt{x^2 + y^2}/c$ のとき $V_i(t) = 0$

$\sqrt{x^2 + y^2}/c \leq t < t_f + \sqrt{x^2 + y^2}/c$ のとき

$$V_i(t) = e_1(t)$$

$t_f + \sqrt{x^2 + y^2}/c \leq t < t_e + \sqrt{x^2 + y^2}/c$ のとき

$$V_i(t) = e_1(t) + e_2(t)$$

$t_e + \sqrt{x^2 + y^2}/c \leq t$ のとき

$$V_i(t) = e_1(t) + e_2(t) + e_3(t)$$

.....(付 1)

但し, $e_1(t), e_2(t), e_3(t)$ は

$$e_1(t) = -60 \alpha h / \beta \cdot \left\{ (1 - \beta^2) / \beta c \right. \\ \times \left[\ln \frac{t + \sqrt{t^2 + (1 - \beta^2)(x^2 + y^2) / (\beta c)^2}}{\sqrt{x^2 + y^2} (1/c + 1/\beta c)} \right. \\ \left. \left. - (t - \sqrt{x^2 + y^2}/c) / \sqrt{x^2 + y^2} \right] \right\}$$

.....(付 2)

(付 2)式において, $e_2(t)$ は α を $-(\alpha + \gamma)$ に, t を $(t - t_f)$ に, $e_3(t)$ は α を $+\gamma$ に t を $(t - t_e)$ に置換えることによって得られる。

ここで, $\beta = \frac{v_i}{c}$, $\alpha = \frac{I_0}{t_f}$, $\gamma = \frac{I_0}{(t_e - t_f)}$, c : 光速, h : P 点の地上高, I_0, t_f, t_e, x, y などは本文第 9 図参照, t は主放電電流がスタートし始めるときを零とした時間

なお(付 1), (付 2)式の詳細な導出については参考文献(4), (5)を参照されたい。