全天候型分割可搬式インパルス電圧発生装置 の開発と接地抵抗非線形特性試験への適用

正員 森本 淳生 (関西電力)

正員 林田 弘 (関西電力)

正員 関岡 昇三 (関西テック)

非会員 磯川 正彦 (関西テック)

非会員 樋山 達哉 (ニチコン)

正員 森 均 (ニチコン)

Development of All-Weather-Type Mobile Impulse Voltage Generator and Its Application to Experiments on Nonlinearity of Grounding Resistances

Atsuo Morimoto, Member, Hiroshi Hayashida, Member (Kansai Electric Power Co., Inc.),

Shozo Sekioka, Member, Masahiko Isokawa, Non-member (Kansai Tech Corporation),

Tatsuya Hiyama, Non-member, Hitoshi Mori, Member (Nichicon Corporation)

This paper describes a newly-developed impulse voltage generator (IG). It has the features as follows:

- (1) The IG consists of 3 components (a 1.6MV unit, a 1.4MV unit and a base box) for the sake of mounting on 10t trucks, therefore it is easy to move it to a test field.
- (2) Capacitors, discharge gaps and a control unit are enclosed in a shelter of fiber reinforced plastics, then it is possible to use the IG in all weathers.
- (3) The IG can generate several ten kA when a load is a few ten Ω .
- (4) Composition of the circuits for lightning/switching impulse voltage/current tests can be easily done by changing the damping and discharge resistance cassettes. Control and data acquisition are made by a personal computer.

As the application of the IG to an outdoor test, the paper presents the characteristics of resistances of a 77kV substation grounding and a concrete pole when applying a high impulse current. The resistances are dependent on the crest value of the applied current.

キーワード: インパルス電圧発生装置, 大電流試験, 耐雷設計, 接地抵抗

1. 緒言

電力会社として、需要家に高品質で安定した電力を供給するという立場から、電力系統において脅威である雷の性状把握とその対策等について十分検討することが要求されている^{(1)~(3)}。

最近の各所での活発な雷観測⁽⁴⁾やEMTPを用いたシミュレーション手法の高度化⁽⁵⁾、酸化亜鉛形避雷器の高

性能化⁽⁶⁾などの成果により、従来の耐雷設計について見直しをしているところである^{(7)~(9)}。これら、新しい耐雷設計について研究や検証を行うためには、より実雷に近い状態における実験が望まれている。それには、誘雷実験による方法⁽¹⁰⁾とパルスパワー発生装置を用いる方法⁽¹¹⁾が考えられる。前者については、冬季雷に多く見られる長波尾雷などの極めて大きなエネルギーを持った電流に対する検討を行うことができるが、再現性がなくデータ数につい

ても多くを期待できないことから種々のパラメータについて十分な検討を行うことができないという短所がある。一方、後者については、発生装置が大きなものとなるため固定して用いられるのが普通である。ところで、電力設備は鉄塔や発電所など、屋外に建設されていることが多いとともに規模が大きくそれらが有機的に結びついている。そのため、電力設備を対象とした実験は現地で行うことが要求される。筆者らは、現地で限られた時間内に種々のパラメータの影響について検討する必要があることから、パルス発生装置を用いる方法を採用した。また、装置としての実績および取り扱いやすさの点から、コンデンサ型のインパルス電圧発生装置が適しているものと考えた。

本論文では以上の観点から、新たに開発した、容易に遠隔地に移設可能であり、天候の影響を受けず、また、数10 kAの実雷相当のインパルス電流を発生することができる全天候型分割可搬式インパルス電圧発生装置の概要について述べる。さらに、本装置を用いた実験例として、変電所接地網および配電用コンクリート柱のインパルス大電流特性について述べる。

2. 全天候型分割可搬式インパルス電圧発生装置

〈2.1〉 開発目的と開発課題 新たに開発したインパルス電圧発生装置（以下新IGと称する）は、500kV変電所など実設備について試験・検証を行うことができることおよび実雷相当の実験を行うことができることを目的としている。このことから、新IGの仕様として以下のものを想定した。

表1 新IGの目的と要求仕様
Table 1. Demands and specifications of newly-developed IG.

目 的	要 求 仕 様
①変電所など、実設備での試験・検証ができる。	分割可搬型とし機動性をもたす。
②数10kAの実雷相当の試験ができる。	総電荷量が大きく内部インピーダンスが小さい。
③天候に左右されず試験ができる。	耐候性で防湿防水形とする。 (全天候型)
④500kV機器の耐電圧試験ができる。	充電電圧が大きく回路変更が容易なものとする。
⑤制御・計測が容易にできる。	人間が操作・判断する部分が少ない。

〈2.2〉 新IGの仕様選定理由と概要 新IGは、インパルス電圧発生装置としての機能の他に大電流を発生する、すなわちインパルス電流発生装置(ICG)の機能も備え持つ。

表1に示す要求仕様に従い開発した本装置の仕様に関する選定理由と概要を以下に述べる。

(1)分割可搬型 新IGは、目的①より実際の電力設備について試験および検証を行うことを目的としている。電力設備は山間部などに建設されていることが多いことからトラックに搭載して現地に輸送する必要がある。また、充電電圧は目的④より数MV必要であるから、新IGの高さは10m以上となるため複数のユニットに分割して輸送しなければならない。従って、新IGは横倒しによるトラック輸送に耐える機械的強度を有するとともに分割および再組立作業が安全かつ容易に実施できる構造とした。また、分割した各ユニットの寸法は、公道を許可無く走行できる軽車両の保安基準(高さ3.8m以内、幅2.5m以内)を満たすように選定した。新IG本体以外に、開閉インパルス用波頭調整器を兼ねたCR分圧器も分割可搬型とし、新IGの制御および計測を行う制御室もそれぞれトラック輸送可能とした。

最大充電電圧は、500kV送電線におけるアークホーンの標準雷インパルスに対する50%フラッシュオーバー電圧が約2.2MV⁽¹²⁾であることから、これに利用率や裕度などを考慮して3MVとした。この値は500kV発電機機器の試験電圧1.8MV⁽¹³⁾に対しても十分な値である。

重量物を運搬する際に、一般に4tトラックまたは10tトラックが用いられている。4tトラックを用いる方が大型運転免許を必要とせず、また小回りが利くため輸送手段として望ましい。しかしながら最大充電電圧を3MVとしたとき、表2に示す通り総重量は21.8tとなる。従って4tトラックを用いた場合には分割数が6となり、10tトラックを用いた場合の分割数3に比べ分割数が2倍となることにより、分解や組立などにおける作業効率が著しく低下するとともに接続箇所が増えることによる故障発生頻度の増大を招く恐れがある。従って、新IGの輸送には10tトラックを用いることとし、本体は、1.4MVユニット、1.6MVユニットおよび充電器や始動ギャップなどからなる台箱の3つに分割した。また、将来ユニット追加により増容量可能な構造とした。

図1に関西電力総合技術研究所高電圧実験室における設置状況を示す。また、図2に総合技術研究所から関西電力山崎実験センターへ運搬および据付を行った際の状況を示す。なお、この際の運搬および据付はそれぞれ7時間程度で完了した。

(2)小型軽量で大容量の単位コンデンサ 目的②において発生電流波高値が大きいほど、より電圧階級の高い系統について検討を行うことができる。しかしながら、超高压系統を対象とした場合、想定雷撃電流は100kA以上となり極めて大きな装置が必要となる。よって、装置開発にあたり送電系統において大部分を占める154kV以下の系統における想定雷撃電流60kA⁽⁸⁾を目標値とした。

インパルス大電流を発生させるためには、充電電圧が大きいとともに、回路のインダクタンスが小さく静電容量が大きい必要がある(付録参照)。しかしながら充電電圧を大きくしようとすれば、多数のコンデンサを直列に接続す

図1 全天候型可搬式インパルス電圧発生装置
Fig.1. All-weather-type mobile impulse voltage generator.

(a) 側面図

(b) 断面図

図3 新IG構造図
Fig.3. Construction of newly-developed IG.

(a) 搬入

(b) 組み立て

(c) 据え付け完了

図2 総合技術研究所から山崎実験センターへの新IG移設状況
Fig.2. Transportation of newly-developed IG from Technical Research Center and installation at Yamasaki Test Center.

る必要があり装置が大きくなる。新IGは先に述べたように分割可搬式により機動性をもたすことを目的としているためできるだけ容積を小さくしなければならない。従って、単位コンデンサの大きさは、可搬型とするための物理的な制限内で作業スペースおよび絶縁距離を確保するためにできるだけコンパクトでなければならない。同時にICGとしての機能を持たすために静電容量は大きいものが必要である。このため、絶縁油およびコンデンサ薄紙に誘電率が高く絶縁耐力の大きなものを使用し、エネルギー密度を従来品の15%増とすることにより小型化を図った。また、IG内部回路の残留インダクタンスの低減については、IG動作時において段間に発生する寄生振動を抑制するために必要な制動抵抗器として折り返し金属箔抵抗を内蔵したコンデンサを用いることにより、インダクタンス成分の主たる要因の1つである制動抵抗におけるインダクタンスを1個当たり3 nH（従来品の約1/10）に低減⁽¹⁴⁾した。さらに、60 kAのインパルス大電流が流れた際に生じる電磁力に耐えることができるように、コンデンサブッシングや各部の取り付けを強固にした。以上により静電容量3 μ F、充電電圧100 kV、充電エネルギー15 kJ、エネルギー密度0.11 kJ/lの単位コンデンサを開発した。

図3に新IGの側面図および断面図を示す。また、図4に60 kAのインパルス大電流が発生させた際の測定結果を示す。

(a) 正極性

(b) 負極性

図4 インパルス大電流測定結果 ($I_{max}=60$ kA)
Fig. 4. Measured results of high impulse current ($I_{max}=60$ kA).

(3)全天候型 充電部を16 mm厚のFRP製外壁で密閉するとともに内部に乾燥器および空調設備を備え付けた。これにより、雨天時などにおいても安定した始動放電が可能であり、悪天候によって実験を中断あるいは中止するこ

となく行うことができる。

(4)放電始動特性の向上 数10 kAのインパルス大電流が発生させた際に放電ギャップ（銅タングステン合金製）の表面金属がアークにより蒸発し、周囲の空気・炭酸ガスなどと結合してできた金属酸化物と金属粉が電極の表面に付着して放電ギャップ間の耐電圧が低下することがある。この対策として、放電洗浄装置⁽¹⁵⁾を備え付けている。この装置は、大電流放電を行った後に、放電ギャップ間に短絡電流を数mA以下に制限した直流高電圧を印加することにより耐電圧低下部で放電させ電極表面を滑らかにすることにより絶縁耐力を回復させるものである。なおIG本体内部に備え付けた乾燥器・空調設備も放電始動特性の向上に役立っている。

(5)回路変更方式 制動抵抗および充電抵抗はカセット式となっており、雷インパルス回路と開閉インパルス回路の変更はこのカセットを交換することにより行うため、回路変更を容易に行うことができる。また、インパルス大電流発生回路は、制動抵抗カセットを短絡用カセットに交換することにより作成する。

(6)制御および計測 新IGの制御および計測は光伝送を用いることにより、外部ノイズに対する信頼度を確保した。また、充放電指令やギャップ間隔の制御などはパーソナルコンピュータによる対話型として操作を容易に行うことができる。運転モードは、単発運転と自動運転（自動繰り返し、自動昇圧、50%フラッシュオーバー電圧測定）のモードを用意し、機器などの耐圧試験が容易に実施できるようにした。自動繰り返し試験時における表示画面例を図5に示す。

IG-3000 REPEATING OPERATION

図5 表示画面例（自動繰り返し試験）
Fig. 5. Example of sketch of CRT in controlling newly-developed IG (automatic repeating test).

測定結果は、デジタイザーに取り込んだデータをCRT画面に表示すると共に、プロッタやディスク装置へ記録することができる。制御および測定系に関するブロック図を図6に示す。

図6 制御・計測系ブロック図

Fig. 6. Block diagram of control and measurement system.

以上より、新IGの仕様のまとめを表2に示す。

表2 新IGの仕様

Table 2. Specifications of newly-developed IG.

最大充電電圧	± 3000kV
合成静電容量	0.1 μ F
単位コンデンサ	3 μ F 100kV×30台
最大充電エネルギー	450kJ
最大放電電流	60kA
発生波形	雷インパルス±1.2/50 μ s 開閉インパルス±250/2500 μ s
全天候屋外型	3分割トラック輸送方式
重量・寸法	
1400kVユニット	7.2トン(4.9m)
1600kVユニット	8.2トン(5.4m)
台箱	6.4トン(2.3m)
総重量	21.8トン(12.6m)

3. 接地抵抗非線形特性試験への適用

本章では、新IGの特徴であるインパルス大電流を発生させた試験の例として、77kV系変電所を模擬した接地網⁽¹⁶⁾⁽¹⁷⁾ならびに配電用コンクリート柱⁽¹⁸⁾における接地

抵抗非線形特性試験のあらましについて述べる。一般に急峻波電流に対して接地抵抗は過渡特性を持っているため接地インピーダンスと表現すべきであるが、通常、接地抵抗と表現されているため、本稿でも接地抵抗と呼ぶことにする。

これらの実験を行った山崎実験センターにおける実験配置図を図7に示す。

図7 実験場配置図

Fig. 7. Experimental arrangement.

本実験における新IGの接地は、長さ1.5mの接地棒を

1.5×1.5m間隔で70本打ち込みそれらを連結したものを使用した(定常抵抗4Ω)。なお、実験場所での大地固有抵抗は約200Ωmであった。また、印加線は、半径15mmのアルミパイプ8本を半径250mmのリング上に配置した複導体を使用することによりインダクタンスを低減するとともにコロナの発生を防止している。

〈3.1〉 変電所接地網 77kV系変電所における接地網を想定し、接地網のインパルス大電流特性および接地網上に布設した制御ケーブルに発生する電圧を測定した。

接地網(定常抵抗3.6Ω)印加電流および印加点電位の測定波形例を図8に示す。ただし、電位測定はノイズをできるだけ小さくするため実験場所から約200m遠方の接地点から印加線と平面上で直交するように地表面に沿わした⁽¹⁹⁾電圧補助線(1V/2mm²)を抵抗分圧器を介して印加点と接続して行った。

図8 接地網大電流特性試験測定例
Fig. 8. Example of high current characteristics of mesh type grounding.

接地抵抗は過渡特性を持っているため、図8から明らかに、電圧と電流の間には位相のずれがある。本稿では簡単のため、(1)式で定義したインピーダンスを用いて、印加電流波高値が接地抵抗に与える影響について述べる。

$$Z = \frac{\text{印加点電位波高値}}{\text{印加電流波高値}} \quad \dots \dots \dots (1)$$

(1)式による接地網接地抵抗の電流波高値依存特性を図9に示す。これより、印加電流波高値が大きくなると抵抗が低下していくのがわかる。また、極性による差異は見受けられない。

図9 接地網接地抵抗電流波高値依存特性
Fig. 9. Impedance characteristic of mesh type grounding as a function of the crest current.

接地網に40kA(図8参照)を印加し、CVV-Sケーブルの終端において心線と金属シース間にツェナーダイオード(制限電圧10V)を挿入したときに、ツェナーダイオードの端子間に発生した電圧を図10に示す。ただし、制御ケーブルの金属シースは、印加点側では接地網に接続し終端は開放した。また、心線は両端を開放した。図10より、2回目の電流印加時にツェナーダイオードが絶縁破壊したことがわかる。ツェナーダイオードは低圧制御回路を保護するためによく用いられており⁽²⁰⁾、また、低圧制御回路障害の実態調査結果においてダイオードに関する障害が多数を占めている⁽²¹⁾。今回、接地網電流の誘導によりダイオードを絶縁破壊できたことにより、低圧制御回路障害に関する実規模相当の検討を行うことができる。

図10 制御ケーブル誘導電圧
Fig. 10. Induced voltages on control cable.

〈3.2〉 コンクリート柱 コンクリート柱の塔頂において、むき出しにした鉄筋に電流を印加したときの印加電流および塔頂電圧の測定例を図11に、(1)式によるコンクリート柱の電流波高値依存特性を図12に示す。コンクリート柱のサージインピーダンスは200Ωであり地上高が10mであること⁽¹⁸⁾から、インダクタンスは20/3 μHとなる。従って、波頭長が数μsである印加電流に対してコンクリート柱のインダクタンスが塔頂電圧に与える影響は数Ω程度となり、接地抵抗40Ω⁽¹⁸⁾に対してかなり小さいため、電圧の大部分は接地抵抗による電圧降下であると考えられる。なお、塔頂電圧の測定はCR分圧器を用いて行い、新IGの回路として雷インパルス回路と大電流インパルス回路を用いた。

図11 コンクリート柱大電流特性試験測定例
Fig. 11. Example of high current characteristics of concrete pole.

図12 コンクリート柱の電流波高値依存特性
Fig. 12. Impedance characteristic of concrete pole as a function of the crest current.

図9と図12を比較すると、接地網に比べコンクリート柱の方が電流波高値依存性が高いことがわかる。これら、印加電流が大きくなるにつれ接地抵抗が低下するのは、土中放電によるもの⁽²²⁾と考えられる。

以上、新IGを用いた大電流試験の例を示したが、短波尾ではあるものの現地試験において40kAの電流を発生させることができた。このときには、能力の60%程度であった。また、コンクリート柱における試験では標準雷インパルス波形に近い場合についても10kAまで印加しており、従来検討できなかった雷電流領域における現地実験を容易に行うことができるものと考えられる。

4. 結言

本稿では、新たに開発した全天候型分割可搬式インパルス電圧発生装置の概要とその適用例について述べた。本装置は、遠隔地に運搬可能であり、天候の影響を受けないことから、変電所などの現地試験に適しているとともに数10kAのインパルス大電流が発生できる特徴を有している。今後は、新設の変電所や送電線などにおけるフィールド試験、環境の変化が絶縁特性に与える影響等について本装置を適用していきたいと考える。

最後に、本装置を開発するに当たり、関西電力関係各位、関西テック 杉本 修 理事ならびにニチコン 田 実 顧問には御援助ならびに貴重な御意見を賜りました。また、電力中央研究所 三宅久仁彦 塩原実験場々長には全般に渡り貴重な御意見を賜りました。これらの方々に謝意を表します。

(平成7年1月5日受付、同年5月1日再受付)

参考文献

- (1) 電中研耐雷設計委員会送電線分科会：「送電線耐雷設計ガイドブック」，電中研報告 175031 (1976)
- (2) 電中研耐雷設計委員会配電線分科会：「配電線耐雷設計ガイドブック」，同上 175030 (1976)
- (3) 電中研耐雷設計委員会発変電分科会：「発変電耐雷設計ガイドブック」，同上 175034 (1976)
- (4) 雷観測調査専門委員会：「最近の雷観測技術と今後の課題」，電気学会技報 第487号 (1994)

- (5) 雨谷：「過渡現象解析プログラム E M T P の最近の動向」，電学誌 vol. 113(11)，pp. 936-944 (1993)
- (6) 酸化亜鉛形避雷器の特性評価試験法調査専門委員会：「酸化亜鉛形避雷器の特性と評価試験法」，電気学会技報 第474号 (1993)
- (7) 酸化亜鉛素子の線路保護への適用調査専門委員会：「送電用避雷装置の開発状況と適用効果」，同上 第367号 (1991)
- (8) 横山：「架空配電線の直撃雷対策」，電学論 B vol. 114(6)，pp. 564-568 (1994)
- (9) 絶縁設計合理化専門委員会：「絶縁設計の合理化」，電気協同研究 第44巻3号 (昭63)
- (10) 櫻野・饒庭・石橋・堀井：「冬季ロケット誘雷に伴う配電線誘導電圧ならびに架空地線による抑制効果の測定」，電学論 B vol. 105(4)，pp. 331-338 (1985)
- (11) 原・秋山：高電圧パルスパワー工学 (1991) 森北出版
- (12) 河野：系統絶縁論 (1984) コロナ社
- (13) 「試験電圧標準」，JEC-193 (1974)
- (14) 田・寺村：「低インダクタンス C R 複合部品」，特許，No. 1748018
- (15) 田・樋山：「衝撃電圧・電流発生装置」，特許公開No. 昭64-26370
- (16) 森本・林田・関岡・福岡・長岡・雨谷：「77kV 変電所接地網インピーダンスのインパルス大電流特性」，平成7年度電気学会全国大会 1608
- (17) 関岡・福岡・森本・林田・長岡・雨谷：「接地網電流による制御ケーブル誘導電圧の測定」，平成7年度電気学会全国大会 1609
- (18) 関岡・山本・横山：「コンクリート柱のインパルス大電流特性に関する実験的検討」，高電圧研究会 HV-94-176 (1994)
- (19) 郷津・森田・東狐・神山・井上：「接地抵抗過渡特性測定法に関する実証試験結果」，放電・高電圧研究会 ED-91-150，HV-91-67 (1991)
- (20) 低圧制御回路絶縁設計専門委員会：「低圧制御回路絶縁設計」，電気協同研究 第32巻2号 (昭51)
- (21) 長谷川・東狐・金森・伊井・関岡：「発変電所における低圧制御回路の雷害実態調査結果の分析」，平成2年度電気学会全国大会，1218
- (22) A. M. Mousa: "The Soil Ionization Gradient Associated with Discharge of High Currents into Concentrated Electrodes"，IEEE Trans., vol. PWRD-9(3) pp. 1669-1677 (1994)
- (23) 鶴見・河野・山本・河村：高電圧工学 (1981) 電気学会

付 録

インパルス大電流の式

インパルス電流発生回路がRLCの直列回路で表されるとき、電流波高値 i_{max} は(付1)式で表される⁽²³⁾。

付図1 インパルス電流波形係数
App. fig. 1. Coefficient of impulse current.

$$\left. \begin{aligned} i_{max} &= \frac{E}{R} f(a) \\ a &= \frac{4L}{CR^2} \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (付1)$$

ただし、E：充電電圧、f(a)：付図1で表されるaの関数

(付1)式より、電流波高値は充電電圧に比例する。また付図1より、aが小さい程、すなわちCが大きくLが小さいほど電流波高値が大きくなることが分かる。従って、大電流を得るためには、総電荷量(=CE)を大きくし内部インダクタンスをできるだけ小さくする必要がある。

森本 淳生 (正員) 1947年11月14日生。66年3月関電学園卒業。同年4月関西電力㈱入社。同社総合技術研究所にて雷害および鳥害に関する研究に従事。現在、中央送変電建設事務所変電工事係長。

磯川 正彦 (非会員) 1959年9月7日生。78年3月大阪府立布施工業高等学校電気科卒業。同年4月㈱関西テック入社。主として、高電圧、雷サージに関する研究に従事。現在、同社技術応用部副長。

林田 弘 (正員) 1946年4月29日生。70年3月同志社大学工学部電気工学科卒業。同年4月関西電力㈱入社。現在、同社総合技術研究所発電設備研究室(水力変電)主幹。主として、水力変電設備に関する研究に従事。

樋山 達哉 (非会員) 1944年6月26日生。68年3月同志社大学工学部電気工学科卒業。同年4月日本コンデンサ工業㈱(現ニチコン㈱)入社。主に直流高電圧・インパルス電圧発生装置の開発・設計に従事。現在、同社草津工場特機部特機技術一課長。

関岡 昇三 (正員) 1963年12月30日生。86年3月同志社大学工学部電気工学科卒業。87年7月㈱関西テック入社。主として、電力系統における雷サージ解析に関する研究に従事。日本大気電気学会会員。

森 均 (正員) 1958年3月2日生。80年3月東京工業大学工学部電気・電子工学科卒業。82年3月同大学大学院理工学研究科修士課程(電気・電子工学専攻)修了。同年4月日本コンデンサ工業㈱(現ニチコン㈱)入社。主に高電圧・パルス大電流発生装置の開発・設計に従事。現在同社草津工場特機部特機技術一課技師。