

# 高電圧試験装置の最新技術動向

Latest technology trend of high voltage testing equipments

田中 和彦\*      土屋 昇\*  
K. Tanaka      N. Tsuchiya  
安達 繁\*      相根 豊\*  
S. Adachi      Y. Sagane

## 概要

日新電機グループの1つである(株)NHVコーポレーションでは、高電圧試験装置について世界的に定評のあるヘフリー・テスト社(スイス)およびハイポトロニクス社(米国)の代理店販売を行っており、インパルス電圧/電流試験装置、交流/直流試験装置、インパルス解析装置ほか各種の高電圧試験装置と計測装置を取り扱っている。今回、これらの高電圧試験装置と計測装置に関連する最新の技術動向について紹介する。

## Synopsis

NHV Corporation which is one of the Nissin group companies represents Haefely Test AG (Switzerland) and Hipotronics Inc. (USA) in Japan with an established worldwide reputation. We sell various high voltage testing equipments and measuring instruments, such as Impulse Voltage / Current Generator, AC / DC Test System, Digital Impulse Analyzing System, etc. This time we introduce the latest technical trend of these equipments and instruments.

### 1. まえがき

今日までの電力系統の高電圧化に伴う各種電力用機器の高電圧化と大容量化、及び付随する関連規格の改定・追加等に対応する為に、これらの機器のルーチン試験や製品開発に不可欠な高電圧試験装置についても、多くの技術開発が行なわれてきた。本稿では、代表的な試験装置であるインパルス試験装置と交流試験装置に関する以下の技術内容について紹介する。

#### (1) インパルス試験装置

インパルス電圧試験装置のオーバーシュート補正回路

インパルス電流試験装置のクローバギャップシステム

#### (2) 交流試験装置

共振形(可変リアクトル方式)交流試験装置の回路構成と特徴

また、上記の試験装置と組み合わせて使用されている代表的な計測装置として、以下の装置について紹介する。

インパルス解析装置

部分放電測定器

### 2. インパルス電圧試験装置のオーバーシュート補正回路

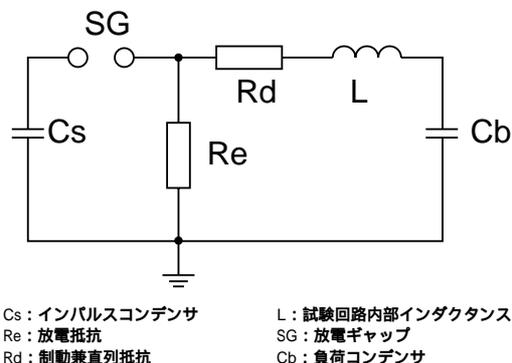
#### 2.1 はじめに

電力用機器の電気絶縁性能検証のために、雷インパルス電圧試験が一般的に行なわれている。雷インパルス電圧は、コンデンサ、放電ギャップ、抵抗等で構成されたインパルス電圧試験装置(以下IVG)により発生させている。試験時に発生する雷インパルス電圧波形は規格で決められており、標準雷インパルス電圧の場合は波頭長が $1.2\mu\text{s} \pm 30\%$ 、波尾長が $50\mu\text{s} \pm 20\%$ 、オーバーシュート率が5%以下である。一般的なIVGの等価回路を図1に示す。

#### 2.2 オーバーシュートの低減方法

IVGで規定の電圧波形を発生させることが可能な試験対象機器の最大負荷静電容量は、理論的に最大許容オーバーシュート率(5%)で制限される。インパルス電圧試験回路にインダクタンス要素が無い場合には電圧振動は生じないが、実際の試験回路には図1の等価回路でLと示す試験回路の内部インダクタンスが存在する為、これによって電圧波形に振動が生じオーバーシュートが発生する。

\*(株)NHVコーポレーション



Cs: インパルスコンデンサ  
Re: 放電抵抗  
Rd: 制動兼直列抵抗  
L: 試験回路内部インダクタンス  
SG: 放電ギャップ  
Cb: 負荷コンデンサ

図1 IVG等価回路図

オーバーシュートを低減させるために、IVGの構成素子や装置全体の構造設計を工夫しIVG内部の残留インダクタンスを極力小さくする方法が従来より行われている。

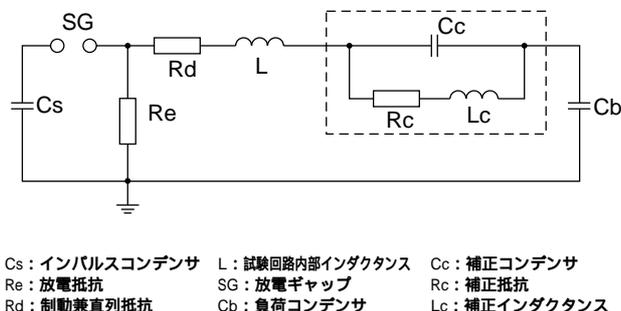
しかし、この方法による試験回路全体のインダクタンスの低減率は15%程度であり、オーバーシュートの改善効果があまり大きくないのが実情であった。

### 2・3 オーバーシュート補正回路

ヘフリー・テスト社では、試験回路内部のインダクタンスを低減する従来の方法とは全く異なり、受動素子を試験回路に追加することにより供試品への印加電圧波形の電圧振動を大幅に抑制する補正回路方式を考案し採用している。オーバーシュート補正回路を付加したIVGの等価回路図を図2に示す。

IVGの基本回路に対してオーバーシュート補正用コンデンサCcを直列に接続し、インダクタンス内蔵の抵抗(Rc + Lc)をCcと並列に接続する。オーバーシュート補正回路の設置事例を写真1に示す。この回路構成により、図2の点線内のオーバーシュート補正用素子と供試品の静電容量によって、ローパスフィルタが形成される。

この結果、インパルス電圧の波頭部分に発生する周波数の高い振動成分を波尾部の周波数の低い振動成分



Cs: インパルスコンデンサ  
Re: 放電抵抗  
Rd: 制動兼直列抵抗  
L: 試験回路内部インダクタンス  
SG: 放電ギャップ  
Cb: 負荷コンデンサ  
Cc: 補正コンデンサ  
Rc: 補正抵抗  
Lc: 補正インダクタンス

図2 オーバーシュート補正付IVG等価回路図

に比べて大きく減衰させることができる。また、ローパスフィルタの減衰効果により、電圧が急激に上昇する波頭部分での供試品印加電圧のはね上りを抑制することができる。このような効果によりオーバーシュートを大幅に抑制することができるので、同じ蓄積エネルギーをもつIVGにおいては補正回路を追加することにより、規定の電圧波形を発生できる供試品の負荷静電容量範囲を2~3倍程度まで拡張可能である。

オーバーシュート補正回路には、ヘフリー・テスト社が特許を取得している図2の直列補正回路方式以外に、補正用素子を負荷コンデンサと並列に接続する並列補正回路方式がある。

本稿で紹介している直列補正回路方式は並列補正回路方式に比べて以下の点で性能的に優れている。

同様な条件において負荷静電容量範囲は10%程度大きい。

出力電圧の発生効率13%程度高い。

補正コンデンサの容量を約30%に小さくでき軽量化が図れる。

許容負荷静電容量の大幅な拡大と出力電圧発生効率の高さにより、直列補正回路方式のオーバーシュート補正回路は大容量の負荷に適した方式として各所で採用されている。

## 3. インパルス電流試験装置のクローバーギャップシステム

### 3・1 RLC回路方式(従来方式)

インパルス電流試験装置(以下ICG)では、避雷器の放電耐量試験、制限電圧試験などで要求される4/10μs、8/20μsの電流波形を発生させるために、従来はコンデンサ-インダクタンス-抵抗を直列に接続したRLC回路が採用されている。抵抗値とサージインピーダンス( $\sqrt{L/C}$ )値の比により、波頭長、波尾長が決定され規定の波形が発生する。高圧主回路の等価回路を図3に示す。

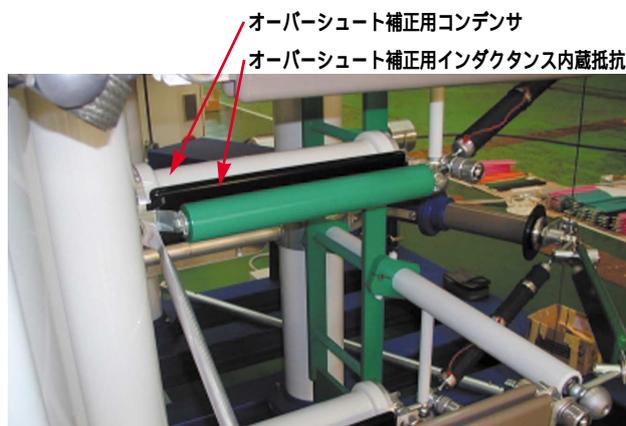


写真1 オーバーシュート補正回路

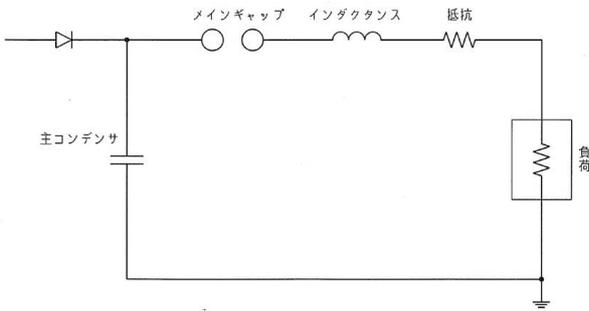


図3 RLC回路方式ICG 等価回路図

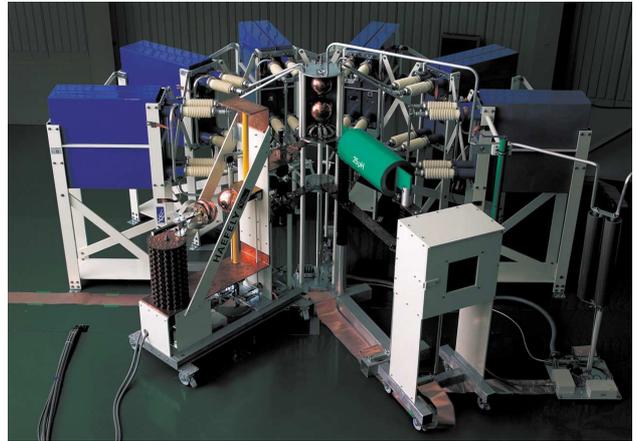


写真2 クローバー回路方式ICG (10 / 350 μs , 200kAp)

### 3・2 クローバー回路方式

サージ保護デバイス (SPD) の直撃雷用試験のように、長波尾の電流波形 (10 / 350 μs) が要求される場合、RLC回路方式ではコンデンサ静電容量もしくは充電電圧をかなり大きくする必要がある。また電流値が大きな場合、抵抗によるエネルギー損失が大きくなり、ICGとしてMJを超えるエネルギー定格が必要となって、装置規模、コストが膨大なものになる。このような問題を解決する手段として、ヘフリー・テスト社ではクローバー回路方式のICGを開発し、近年、世界各国に多くの装置を納入している。世界最大級の出力定格 (10 / 350 μs , 200kAp) を有するICGを写真2に示す。

クローバー回路の特長は、クローバーギャップにより電流通電回路を切り替えて電流波形の波頭部と波尾部を発生させる点にある。その動作原理は以下である。

まず、メインギャップの導通により主コンデンサ - インダクタンス - 負荷の通電ルート (図4の①) が形成され、主コンデンサに蓄積されたエネルギーは負荷において一部消費されるが、ほぼ全てがインダクタンスに移行する。この過程で  $0.4 \sqrt{L/C}$  で決まる時間幅の波頭部が発生する。

次に、全てのエネルギーがインダクタンスに移行 (電流がピーク値に到達) したタイミングでクローバーギャップの短絡動作を行うと、インダクタンスを電源とするインダクタンス - 負荷の通電ルート (図4の②) が形成される。この過程で、時定数  $L/R$  の時間幅の波尾部が発生する。回路定数の整合を図ると、負荷以外の抵抗 (エネルギー消費) 成分を必要としなくなるので、主コンデンサに蓄積されたエネルギーはほとんど負荷に供給されることになり、RLC回路方式に比べエネルギー効率が大幅に改善しICGのエネルギー

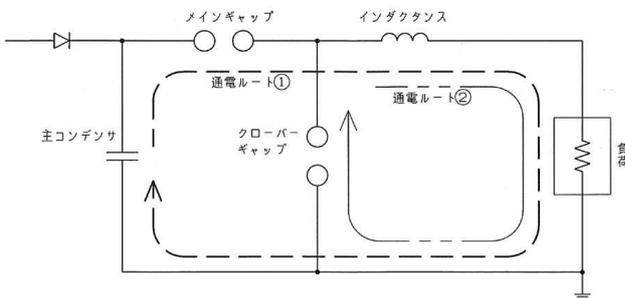


図4 クローバー回路方式ICGの等価回路図と発生波形

定格を大幅に低減することができる。

クローバーギャップを駆動するために3点ギャップ調整用駆動機構、およびトリガ用インパルス電圧発生装置が必要となるが、要求される通電電流値が大きな場合（目安として50kAp以上）では、エネルギー効率の顕著な優劣により、これらの付帯機器を含めた装置全体のコストはRLC方式に比べて安価になり経済的にも優れている。

図5にヘフリー・テスト社製クローバー回路方式ICGのブロックダイアグラムを示す。主要構成機器は、充電器、主コンデンサ、メインギャップ、クローバーギャップ、クローバートリガ用インパルス電圧発生装置、波形調整用インダクタンス、電圧測定用分圧器、電流測定用パルスCT、電圧/電流波形解析システム、充放電コントロールユニットである。

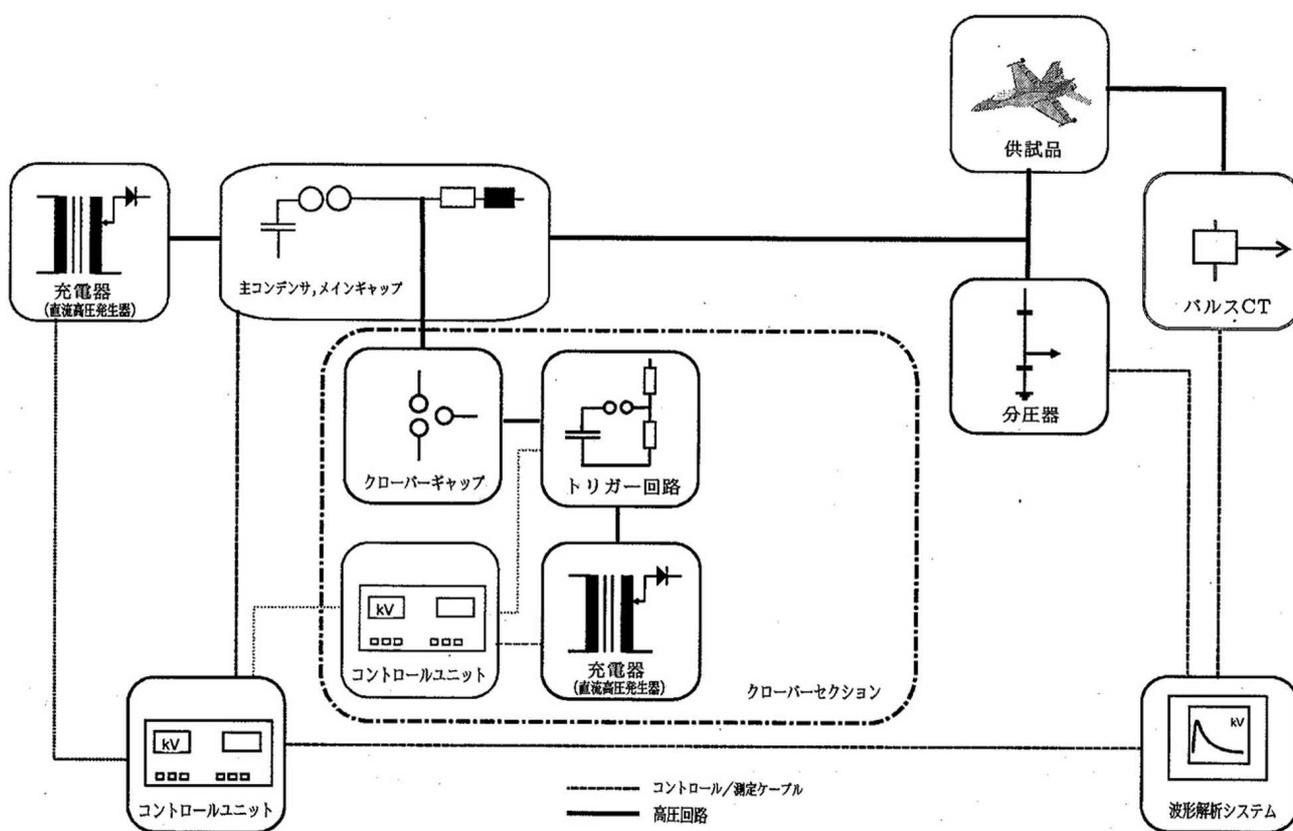


図5 クローバー回路方式ICG 構成機器ブロックダイアグラム

#### 4. 共振形（可変リアクトル方式）交流試験装置の回路構成と特徴

交流試験装置は、受変電機器（変圧器、開閉装置など）やケーブルなど交流の電力系統に用いられている各種の機材について、規格で定められた所定の耐電圧試験を実施することおよび、それらの機材の製品開発試験を行うことを主目的として、重電機器メーカーやケーブルメーカーを中心に幅広く用いられている。

交流試験装置の回路構成として用いられている方式は二つに大別される。

古くから用いられている回路構成は図6に示すものであり、入力電圧（容量の大きな試験設備においては3.3kVまたは6.6kVが用いられる場合が多い）を所定の試験電圧レベルまで昇圧する試験用変圧器（T. Tr）、負荷（試験対象機材）側の容量性無効成分（進相成分）を補償し入力電源容量をできるだけ少なくするために入力回路に並列接続される補償用リアクトル（C. Re）、負荷に印加する試験電圧を可変設定するための電圧調整器（V. R）、負荷への通電を入り切りするための遮断器（C. B）などから構成されている。負荷側の進相成分は試験対象機材に応じて変化するので、タップ付きのC. Reを用いて負荷側の進相成分に応じた最適なタップを選択する、または容量の異なる大小のC. Reを複数台準備し負荷側の進相成分に応じた最適なC. Reの組合せにて入力回路

に並列接続する方法が採られている。

上記の回路構成においては、選択できるC. Reのインダクタンス値が段階的な値となり負荷側の進相成分を完全にキャンセル（補償）することができないので、無効成分を含んだ入力電源容量としてある程度の規模が必要になるという問題があった。

負荷側の進相成分を完全にキャンセルし、入力電源容量としては有効成分のみを供給するだけでよい回路方式として図7にAC試験システムのブロックダイアグラムを示す共振形の回路構成がある。この回路構成においては、インダクタンス値の連続可変機能と、入力電圧の昇圧機能を併せ持った高圧可変リアクトルがキーコンポーネントとなっており、図6の回路構成におけるT. Trの機能とC. Reの機能を1台の機器で併せ持ちながら、更にインダクタンス値の連続可変機能により負荷側の進相成分に応じた最適な（進相成分を完全に補償する）インダクタンス値にオートチューニングすることが可能となる。ヘフリー・テスト社とハイポトロニクス社においては、この方式を採用した交流試験装置の製作について数十年の実績を有しているが、近年の交流試験装置に対する高電圧化、大容量化へのニーズに対応するべく製品開発を進めて来ている。

以下に、共振形交流試験装置の基本原則と製品概要について述べる。

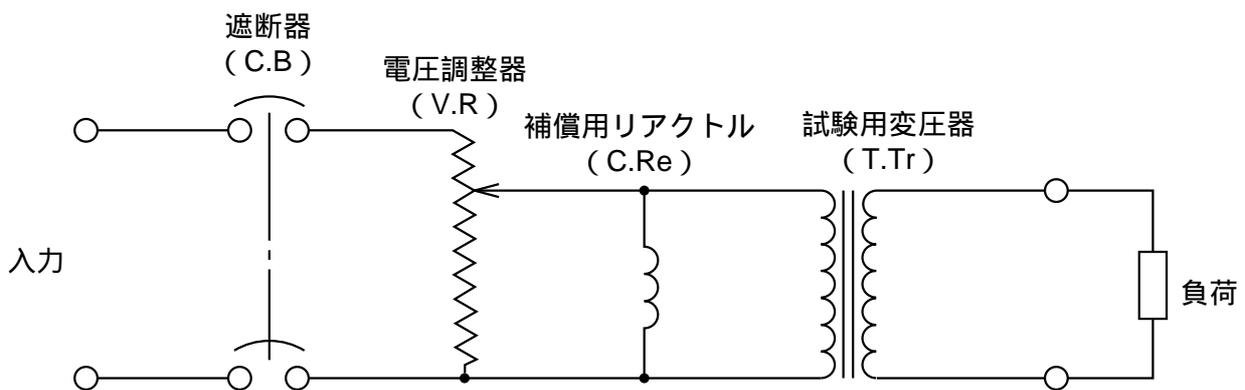


図6 交流電圧試験装置回路図（古典的方式）

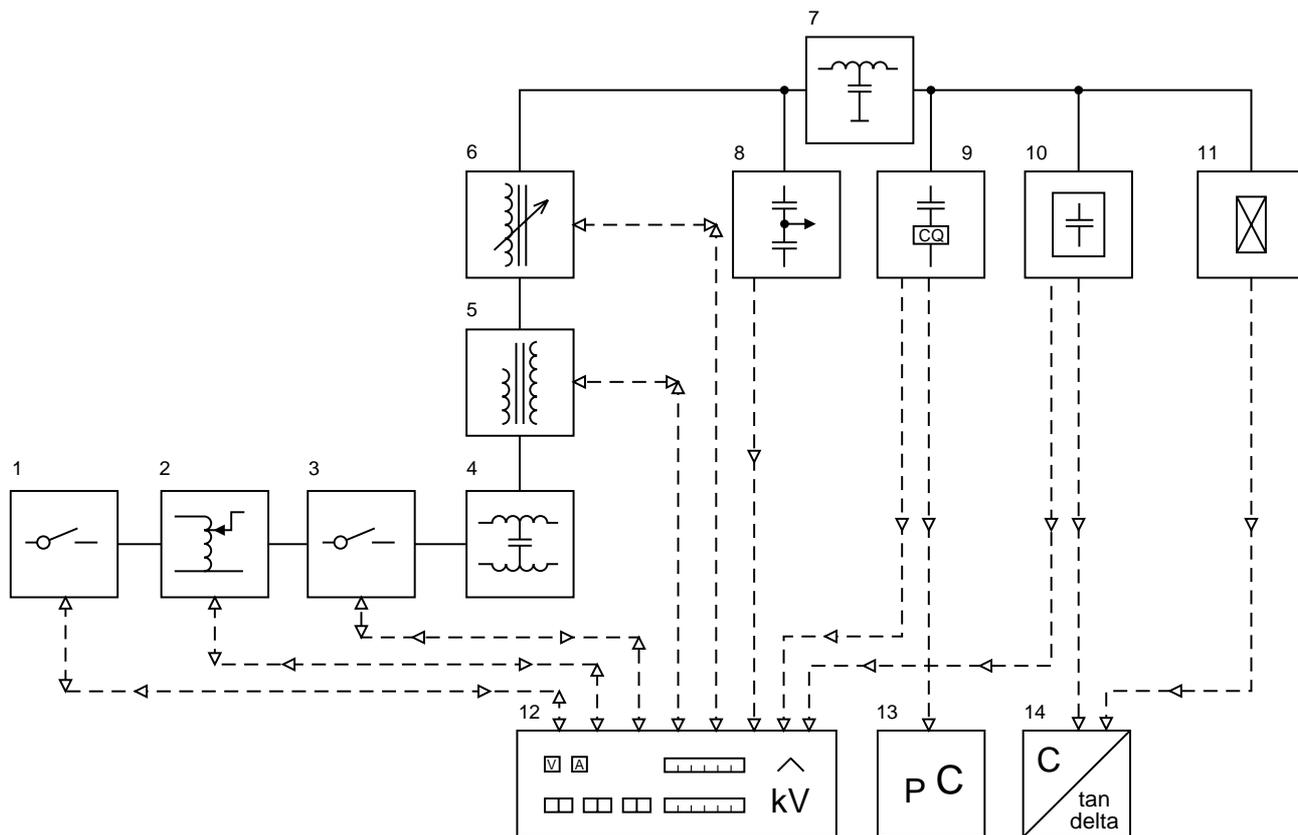


図7 直列共振形AC試験システム ブロックダイアグラム

- |                       |                        |
|-----------------------|------------------------|
| 1. パワーサーキットブレーカ       | 8. AC分圧器 (ベースロードキャパシタ) |
| 2. レギュレータトランス (電圧調整器) | 9. カップリングキャパシタ         |
| 3. パワーコンタクター          | 10. 標準コンデンサ            |
| 4. パワーラインフィルター        | 11. 供試品                |
| 5. エキサイタトランス (励磁用変圧器) | 12. コントロールユニット         |
| 6. 高圧可変リアクトル          | 13. 部分放電測定器            |
| 7. 高圧フィルター            | 14. C&tan 測定器          |

#### 4・1 基本原理

共振形交流試験装置の回路構成を単純化したものを図8に示す。

入力電圧は電圧調整器 (V. R) により所定の出力電圧 (試験電圧) に対応した電圧に調整され、励磁用変圧器 (E. Tr) を経由してこれと直列に接続された高圧可変リアクトル (V. Re) に供給される。V. Reはモーター駆動により内部の鉄心 (磁気回路) に設けられた空隙 (U型の上下鉄心ブロック間の隙間) の寸法を可変調整することによりインダクタンス値を連続可変 (空隙大: インダクタンス小 空隙小: インダクタンス大) することができるようになっており、負荷側の進相成分 (キャパシタンス成分) を完全にキャンセルするインダクタンス値に調整される。また、E. Trより供給される入力電圧をV. Reにより所定の試験電圧に昇圧して負荷に与えている。

この回路構成を等価回路で表すと図9となる。

入力電圧 (V<sub>ext</sub>) と出力電圧 (V<sub>out</sub>) の関係は次式となる。

$$\left| \frac{V_{out}}{V_{ext}} \right| = \frac{1}{\sqrt{(RC)^2 + (\omega^2 LC - 1)^2}} \quad \dots(1)$$

この式において  $\omega^2 LC = 1$  (直列共振条件) となるようにV. Reのインダクタンス値を調整すればV<sub>ext</sub>とV<sub>out</sub>の関係は次式となる。

$$\left| \frac{V_{out}}{V_{ext}} \right| = 1 / RC = L / R = Q \quad \dots(2)$$

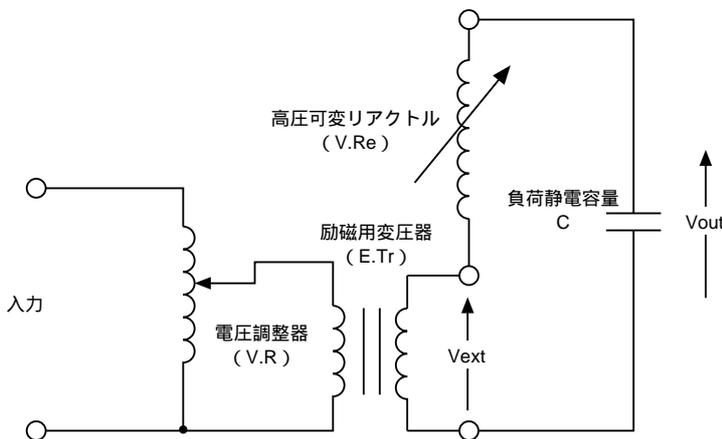


図8 直列共振形交流試験装置回路図

QはQ値 (Quality Factor) と呼ばれている回路の性能を表す指標値であり回路全体のリアクタンス成分 (L) と損失成分 (R) の比率であるが、V. Reが持っているリアクタンス成分と損失成分がQ値を支配している。

Q値は出力容量 (P<sub>out</sub>) に対して必要な入力容量 (P<sub>in</sub>) の比率を表す数値でもあり、

$$Q = P_{out} / P_{in} \quad \dots(3)$$

の関係にある。

製品において実現しているQ値は通常40以上であるので、共振形の交流試験装置は非常に効率のよいシステムを提供することができる。

この他にも、共振形の試験装置では、耐電圧試験中に負荷側での絶縁破壊が生じた場合に負荷側が低インピーダンスの抵抗成分に変化し共振条件から外れる結果、(1)式から判るように、出力電圧が瞬時に自律的に低下し負荷に与えるダメージを軽減することができる。

このような優れた特徴を有することにより、高圧可変リアクトルを用いた共振形交流試験装置は高電圧の交流耐電圧試験を必要とする産業界において幅広く用いられている。

#### 4・2 製品概要

高圧可変リアクトルの構造により、鉄製容器に本体が収納され出力をブッシングにより引出しているタンクタイプと、円筒形鉄製容器の上下にFRP製絶縁筒を取り付けて高電圧絶縁を行っているコンパクトなシリンダータイプがある。

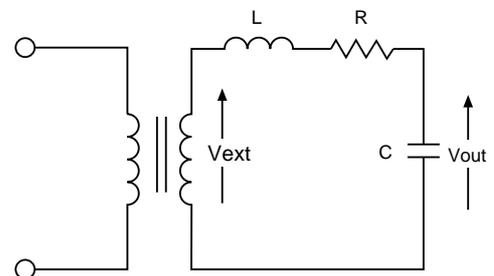


図9 直列共振方式等価回路図

タンクタイプの交流試験装置については、出力電圧が最大400kV、出力容量が最大10MVAまでの製作実績がある。写真3にタンクタイプの高圧可変リアクトルの製作例を示す。

シリンダータイプの交流試験装置については、単機の性能として出力電圧が最大400kV、出力容量が最大14MVAまでの製作実績がある。シリンダータイプについては単機を垂直方向に積み重ねてカスケード接続することにより大きな出力電圧を得ることが可能であり、国内向けに納入した実績としては、単機の性能が300kV12MVAのものを7段カスケード接続して定格出力電圧2100kV、定格出力電流40Aのものが最大であり世界的にも記録的な製品となっている。写真4にシリンダータイプの高圧可変リアクトルの製作例を示す。



写真3 タンクタイプ共振形交流試験装置



写真4 シリンダータイプ共振形交流試験装置

## 5. 各種計測器

### 5.1 はじめに

前述の各種高電圧試験装置で発生した電圧、電流の測定、これらの波形観測、各種パラメータ（時間、効率、損失等）の計算のために、電圧計、電流計、オシロスコープ等の汎用計測器が使用されてきた。しかしながら、最近では国内外の各種高電圧試験規格における測定パラメータの規定で複雑な計算が必要となるものが多くなり、汎用の測定器では充分に対応できないため、デジタル技術を多用した専用測定器の必要性が高まってきている。本稿では代表的な計測装置について紹介する。

### 5.2 インパルス解析装置

インパルス解析装置はインパルス電圧や電流の測定に使用されるもので、電圧測定用分圧器や電流測定用シャント抵抗等と組み合わせて使用される。分圧器や分流器で測定器に入力可能なレベルまで下げた電圧信号を取り込み、制御・計算用コンピュータと測定部のデジタイザを組み合わせたシステムで自動計算し、画面上へ計測された波形を表示すると共に、ピーク電圧（電流）、波頭/波尾時間、オーバーシュート率（ $\%$ ）、波頭部分の振動周波数等の各種パラメータを正確に演算し表示させている。

今後数年以内にインパルスの波形解析に関する国内規格の改定も予定されており、今まで以上に波形パラ

メータの計算が複雑となる為、インパルス試験の実施に際しては、この種の測定器は必須になると考えている。写真5にヘフリー・テスト社製のインパルス解析装置の外観写真を示す。同社では試験対象物に要求される測定性能により12ビット、120Ms/sのHiAS743と10ビット、100Ms/sのDiAS733の2タイプをラインナップしている。これらの製品は国内の多くのお客様にご使用頂いており、試験時間の短縮、省力化に大きく貢献しご好評いただいている。

### 5.3 部分放電測定器

高電圧機器の部分的な欠陥に起因して耐電圧試験中に発生することがある微小な部分放電は、その発生箇所や継続時間によっては運転中の機器の絶縁性能劣化の進行を早め寿命を大きく縮める原因となる。機器の出荷前検査ではこれら放電発生有無を十分に確認し、その結果により適切な処置を行うことが必要である。

この種の微小放電は放電電圧が数 $\mu$ Vと極端に小さく、その検出には特殊な回路を有した測定器を使用する必要がある。このような測定用に製品化されたものが部分放電測定器（検出器）と呼ばれるものである。

部分放電測定システムは、試験対象機器の部分放電を検出する為に高圧側に接続される結合コンデンサ、部分放電を検出する検出インピーダンス、放電信号を取り込み画面上に画像もしくは数値データで表示させる測定器本体から構成されている。



写真5 インパルス解析装置

前述のように部分放電は部分的な欠陥による放電（電圧降下）であり、この電圧降下のレベルは直接的には計測できない為、試験前に外部から基準となる模擬信号（校正パルス）を入れて測定器を含めた試験回路全体を校正し、見かけの放電電荷量（単位はpC）として計測している。

部分放電測定は主に交流電圧で使用される機器について実施されている。検出された部分放電は放電の発生する部位によりその発生位相が異なる為、多くの測定器では交流電圧の位相信号に重畳する形で部分放電の信号を表示している。図10に部分放電測定器のモ

ニター画面を示す。

写真6、7にヘフリー・テスト社及びハイボトロニクス社の製品外観写真を示す。写真6はルーチン試験用のタイプ DDX9101であり、このほか研究用途として発生パターンの2D及び3D表示を可能にしているタイプDDX7000シリーズ、電力ケーブル等の故障点評定機能を持ったタイプDDX8000シリーズ等をラインナップしている。また、写真7はDDX9101をベースに3相変圧器の相同時測定を可能にした多チャンネルタイプのDDX9121シリーズである。

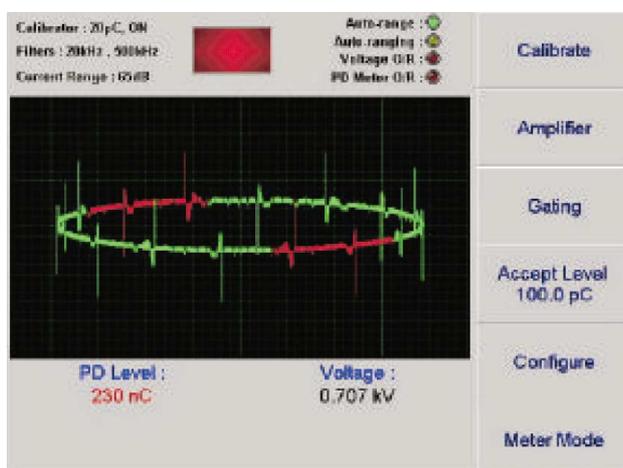


図10 部分放電測定器モニター画面

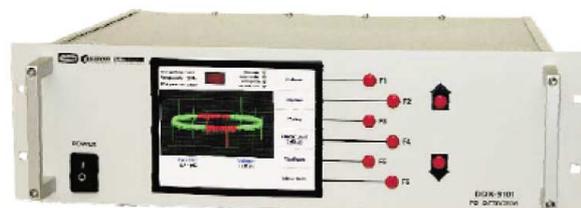


写真6 部分放電測定器（タイプ DDX9101）



写真7 部分放電測定器タイプ（DDX9121）

#### 5・4 その他の計測装置

上記製品以外にも、単相、3相変圧器の巻数比を測定する変圧器巻数比測定器、静電容量及び誘電正接測定器（C&Tan 測定ブリッジ）、周波数応答測定器（FRAメータ）等、工場試験および現場でのフィールドメンテナンス用の各種測定器がある。当社ではこれらの各種測定器も含め高電圧の各種製品試験や開発試験に必要なヘフリー・テスト社及びハイポトロニクス社の製品を幅広く取り扱っている。

#### 6．あとがき

以上、最近の高電圧試験装置に関連する技術動向の概要を紹介したが、今後もお客様の様々なご要求にお応えし、社会の基盤を支えている各種電力用機器の信頼性確保や製品開発に貢献する各種の高電圧試験装置と計測装置等の製品、並びにサービスを提供していきたい。

---

#### 執筆者紹介

---



田中 和彦 Kazuhiko Tanaka  
(株)NHVコーポレーション  
業務・企画部長



土屋 昇 Noboru Tsuchiya  
(株)NHVコーポレーション  
エネルギー環境機器事業部長



安達 繁 Shigeru Adachi  
(株)NHVコーポレーション  
エネルギー環境機器事業部  
営業グループ 主任



相根 豊 Yutaka Sagane  
(株)NHVコーポレーション  
エネルギー環境機器事業部  
エネルギー環境機器グループ