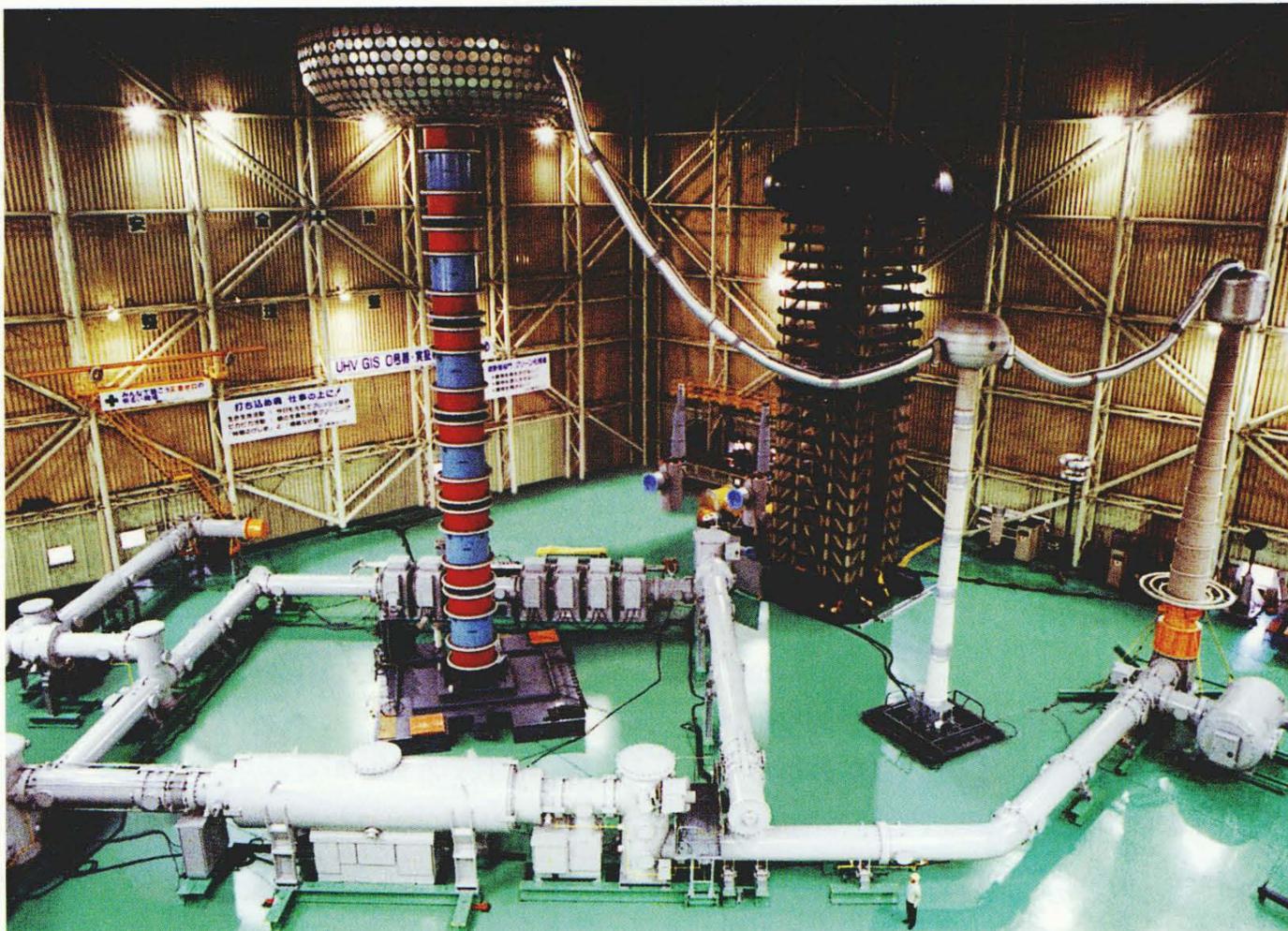


1,000 kVガス絶縁開閉装置の開発

—低サージ, 絶縁設計合理化GIS—

Development of UHV Gas-Insulated Switchgear

山形芳文* *Yoshibumi Yamagata* 大野政智** *Masatomo Ôno* 椿 徹** *Tôru Tsubaki*
田中晃司* *Kôji Tanaka* 山極時生*** *Tokio Yamagiwa* 大下陽一**** *Yôichi Ôshita*



1,000 kV GIS (Gas-Insulated Switchgear : ガス絶縁開閉装置)

1,000 kV GISの工場内絶縁試験状況を示す。工場で全コンポーネントを組み合わせて各種試験を実施している。

1,000 kV (UHV) 送電は21世紀初頭の運転開始を目指して開発が進められている。変電所での主要機器については遮断器, 断路器など送電線引込み口のブッシングから変圧器端子部まで, すべての機器をSF₆ガスで絶縁したGIS (Gas-Insulated Switchgear : ガス絶縁開閉装置) を採用し, 変電所の敷地面積の縮小化を図った。

1,000 kV化にあたっての技術課題は, 高い信頼性を維持しながら機器をコンパクトに設計することにある。GISの基本的絶縁諸元を決定するLIWV (雷インパルス耐電圧値) は, 保護特性を改善した高性能避雷器の実現によって低減され, 機器の小型化を達成した。変電所や送電線に発生する過電圧には雷サー

ジのほかに, 断路器開閉サージや遮断器開閉サージがあり, これらの発生を抑制することが課題となる。このため, 従来の500 kVの機器にはない, 抵抗遮断方式のGCB (Gas Circuit Breaker : ガス遮断器) や抵抗付き断路器を開発した。また, 一線地絡遮断後の二次アークを短時間で消弧し, 高速再開路を可能にするためにHSGS (High Speed Grounding Switch : 高速接地開閉器) を導入するなど, UHV特有の技術を開発している。

1,000 kV GISは, 平成7年度後半からフィールドでの長期課電・通電試験など, 実用器に向けた信頼性検証試験が東京電力株式会社新榛名変電所内UHV機器試験場で実施される予定である。

* 東京電力株式会社 送変電建設本部 ** 日立製作所 国分工場 *** 日立製作所 国分工場 工学博士 **** 日立製作所 日立研究所

1 はじめに

1,000 kV(UHV)送電は500 kVの次の時代を担う基幹送電系統として、21世紀初頭の運転開始を目指して、東京電力株式会社を中心として開発が進められている。近年、変電所では、変圧器を除く遮断器、断路器などの開閉器類や母線などの主要機器をSF₆ガスで完全密封したGISが、広く用いられている。1,000 kV変電所でも、山岳地に建設されることで、変電所用地の縮小、輸送コストの節減などの必要性から、送電線端から変圧器端子部まですべてガス絶縁としたGISが採用されることになる。

1,000 kV機器は、現状の500 kV機器の技術の延長線上で設計すると、非常に大型化してしまうので、高信頼性を維持しながらコンパクトな設計とすることが必要とされる。機器の縮小化に伴って、運転時の電氣的ストレスが増大するが、従来以上の信頼性を確保することが重要である。

また、1,000 kV系統では送電線を含めた総合的な絶縁設計合理化が求められている。特に、送電鉄塔の小型化の必要性により、絶縁設計の面で支配的な遮断器開閉時、送電線に発生する過電圧を抑制するために、抵抗投入・遮断方式のGCBが導入された。一方、送電線の充電容量が増大するため、事故相遮断後も健全相からの誘導により、二次アークが消滅しにくくなって高速度多相再開路が困難になる問題がある。これを解決するためにHSGSが導入された。このように、1,000 kV GISでは従来にない新しい技術が適用されている。ここでは、1,000 kV GIS特有の技術課題と特徴について述べる。

2 1,000 kV GISの技術課題

1,000 kV GISの主要構成機器と基本仕様を表1に示す。

GISの絶縁設計を決定する試験電圧の種類には、雷インパルス、開閉インパルス、および商用周波電圧がある。また、考慮すべき過電圧として、断路器開閉サージがある。通常、GISの絶縁設計は、電圧値の最も高いLIWVで決定される。変電所に侵入する雷サージの大きさは、酸化亜鉛型避雷器の出現により、大幅に低減されるようになってきている。

1,000 kV GISでは、保護特性を改善した高性能酸化亜鉛型避雷器を適用することにより、LIWVが2,250 kVと運転電圧波高値の2.5倍(2.5 p.u.)まで低減され、タンク

表1 1,000 kV GISの基本仕様

絶縁設計の基本仕様であるLIWVは、2,250 kVで運転電圧の2.5倍に低減されている。

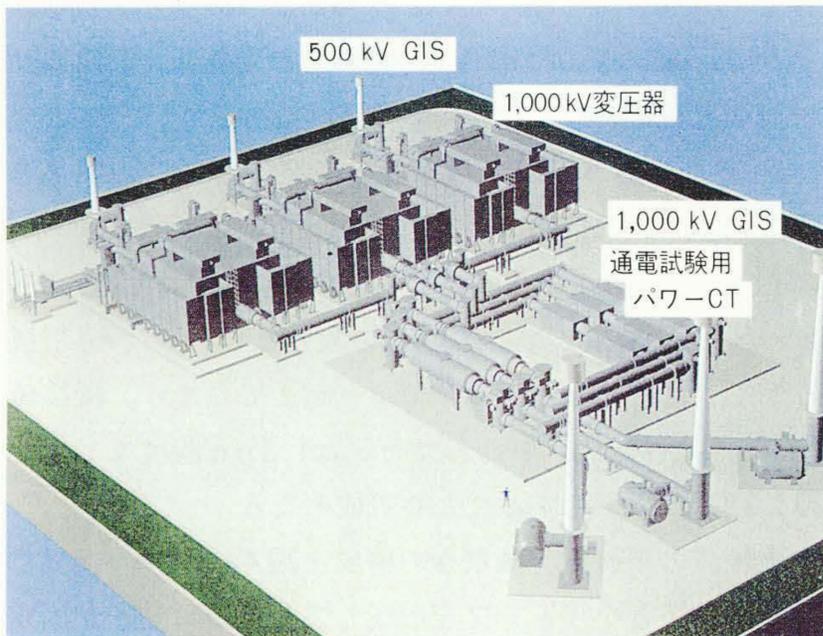
仕様項目		基本仕様
共通事項	定格電圧	1,100 kV
	定格電流	8,000 A
	定格短時間電流	50 kA
	試験電圧	LIWV 2,250 kV AC 1,100 kV/1min
G C B	遮断電流 投入遮断抵抗	50 kA 700 Ω(投入・遮断共用) 投入時抵抗挿入時間: 10 ms 遮断時抵抗接点遅延時間: 30 ms
	標準動作責務	O-(θ)-CO-1 min-CO
D S	サージ抑制方式	抵抗挿入方式(500 Ω)
H S G S	電磁誘導遮断	5,780 A, 640 kV 7,000 A, 410 kV
	静電誘導責務	1,200 Ap, 900 kV 520 Ap, 700 kV
	標準動作責務	C-(θ)-O
L A	定格電圧	826 kV
	制限電圧	1,620 kV(at 20 kA)

注: 略語説明 DS(断路器), LA(避雷器)

径を縮小することが可能となった。しかし、従来の絶縁設計では支配的でなかった断路器開閉サージは、理論的には3.0 p.u.程度発生する可能性があり、絶縁協調上無視できなくなってきた。そのため、サージ抑制手段として、断路器の接点間での再点弧を抵抗を介して行う、抵抗付き断路器を採用することになった。500 Ωの抵抗を挿入することによって発生サージは1.3 p.u.程度に抑制される。

一方、送電線の絶縁設計は大気中での絶縁特性に依存するため、雷インパルスよりも波長の長い開閉インパルス領域の過電圧、すなわち開閉サージが支配的になる。開閉サージの発生要因としては、送電線地絡時に発生する地絡サージや無負荷送電線を遮断器で投入するときに発生する投入サージ、および送電線事故を遮断器で遮断するときに発生する遮断サージなどがある。

このうち地絡サージは有効な抑制手段を持たないが、遮断器開閉に起因する投入・遮断サージは遮断器極間に抵抗を並列に挿入する抵抗投入遮断方式を採用することによって低減することができる。地絡サージは1,000 kV系統では1.6 p.u.程度の大きさとなるので、遮断器投入・遮断サージをこのレベル以下に抑制することができれば、送電線の合理的な絶縁設計が可能になる。遮断器の投入遮断抵抗を700 Ωとすることにより、1.6~1.7 p.u.以下に抑えることが可能である。



注：略語説明 CT (変流器)

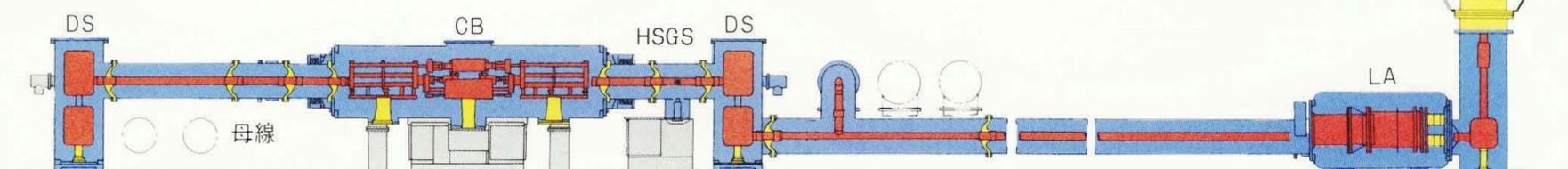
図1 1,000 kV GIS現地実証試験のレイアウト

1,000 kV変圧器の二次側から昇圧して1,000 kVの電圧を課電するとともに、電源CTを用いてループ回路に定格電流を通電する課通電試験を平成7年度後半から実施する予定である。

送電鉄塔が低くなることや、送電線の相間距離が小さくなることにより、線路の充電容量が大きくなったり、線間の誘導が大きくなるため別の問題が生じてくる。例えば、送電線の地絡事故時、超高压以上の系統では、線路を遮断器で切り離した後1秒程度で再閉路する、高速度多相再閉路が適用されている。1,000 kV系統では他回線の誘導の影響が大きく、地絡アークが消えるまでに4秒程度の時間がかかり、遮断器の高速度再閉路を妨げることになる。このため、遮断器が事故を遮断して再閉路するまでの間に線路を接地して、二次アークを確実に消弧し再び開放するHSGSをGISの構成要素として適用した。

3 1,000 kV GISの構成と機器の特長

1,000 kV GIS現地実証試験のレイアウトを図1に示す。この試験は、東京電力株式会社新榛名変電所構内



注：略語説明 DS (断路器), CB (遮断器), LA (避雷器)

図2 1,000 kV GIS内部の構造

送電線ユニットの内部構造を示す。GCBの線路側にHSGSを配置している。母線用DS、線路用DSは、ともに縦形の相似構造を採用している。ブッシング端の避雷器は横置き構造である。

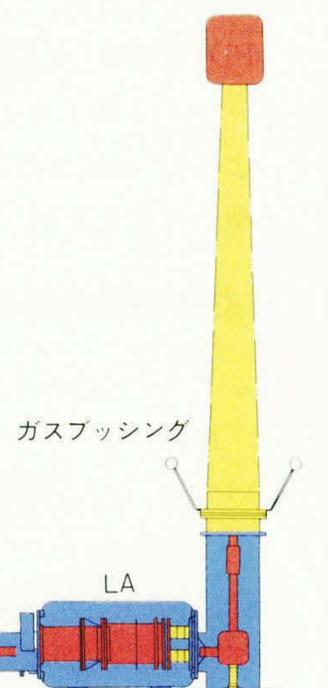
UHV機器試験場で平成7年度後半から実施される予定である。1,000 kV変圧器の二次側を500 kV母線に接続し、1,000 kVに昇圧して課電試験を実施するとともに、ガス母線によるループを形成し、通電用パワーCTの逆励磁によって定格電流を通電する課通電試験を行い、長期信頼性を検証する予定である。実証試験器は、主母線、送電線ユニットを模擬して構成している。その内部構造を図2に示す。主要構成機器とその特徴について次に述べる。

(1) GCB(ガス遮断器)

- (a) 2遮断点/相構成を実現した。これにより、500 kV 63 kA GCBの1点切りも達成した。
- (b) 従来500 kV遮断器で採用されてきた抵抗投入方式に加え、遮断サージ抑制のために抵抗遮断方式を採用した。抵抗体は投入、遮断共用で700 Ωとしている。
- (c) 主遮断接点に対する抵抗遮断接点の開極時間の遅延は、主遮断接点での最大のアーク時間を考慮して、30 msを確保しなければならない。このため、主遮断部と抵抗遮断部はおのおの独立した油圧操作機構で動作する方式とした。また、遅延機構は温度・操作圧力による影響の少ない機械式を採用している。
- (d) 抵抗投入接点は、抵抗遮断接点と独立に設ける構成として、500 kV GCBで実績があり信頼性の高い、主接点と一体に動作する方式を採用した。

(2) DS(断路器)

- (a) DS開閉過程での再点弧に伴って発生する急しゅん



波サージを抵抗を介して抑制する抵抗付きDSを採用した。抵抗値は500 Ωとしている。

(b) ループ電流開閉責務がある母線用DSには、500 kVで実績のある熱パuffa方式を採用した。

(3) HSGS(高速接地開閉器)

(a) GCBとほぼ同等の高速動作が要求されることや、誘導電流遮断の要求から、GCBと同様油圧操作方式によるパuffa形遮断部を採用している。

(b) 他相での後追い故障時に発生する可能性のある零点推移現象に対応し、約80 ms(4 サイクル)の長アーク時間幅を確保する手段として、圧縮したガスを貯留室に蓄え、可動部がフルストロークした後も長時間吹き付ける構造としたパuffa形遮断部を開発した。

(4) LA(避雷器)

(a) 500 kV用高性能LAの構成を基本としている。500 kV用では酸化亜鉛素子は1 並列 4 柱構成であったが、1,000 kV用ではこれを4 並列16柱構成としている。

(b) さらに高性能化を図るために、酸化亜鉛素子課電寿命、電圧-電流の非直線性、放電耐量の改善を行っている。また、高い放電耐量性能を得るために、耐電流試験時に熱画像測定による素子スクリーニングを導入するなど製造技術の改善も行っている。

(5) 母線・スペーサ

高性能避雷器の適用によってLIWVが低減され、運転電圧に対する比が小さくなるので、絶縁物内部の電気的ストレスや金属異物に対する信頼性を確保しながらタンク径の縮小化を図った。

(6) PD(変成器)

ポッケルス素子を応用した光方式のPDを採用することにより、1,000kVの高電圧サージの影響を排除し、機器の小型・軽量化を図った。

4 主要機器の開発

ここでは、GISの主要構成機器である、DS、HSGSおよび、母線・スペーサの設計の概要と開発検証試験結果について述べる。

(1) DS(断路器)の開発

DSは開閉速度が比較的遅いので、開閉極過程で何度も再点弧しながら動作する。再点弧時、サージはGISの内部で反射を繰り返しながら進行するので、数メガヘルツの急しゅんなサージが発生する。GISの断路器サージに対する耐電圧特性は雷インパルスとほぼ同等の特性を示すが、500 kV以下の電圧階級では断路器サージはLIWVよ

りも十分低い値となっているためあまり問題とされなかった。1,000 kVではLIWVが低減された結果、断路器サージが無視できなくなっている。

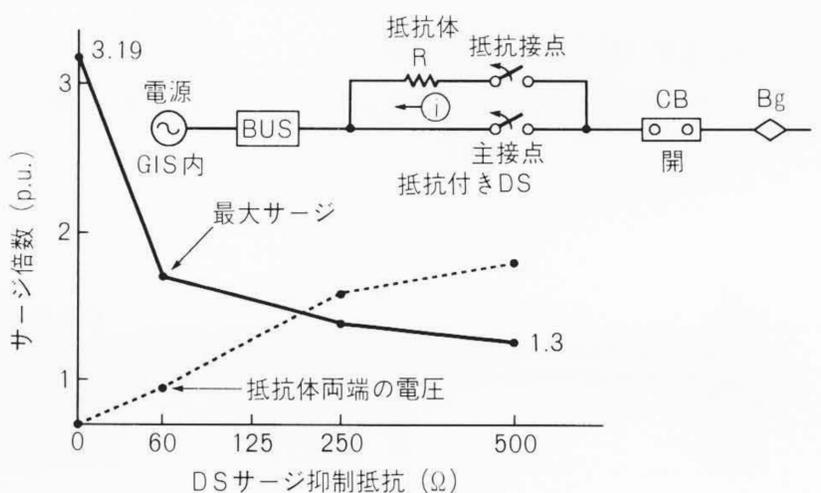
DS極間に挿入された抵抗値と断路器サージの関係を図3に示す。抵抗が入っていない状態では断路器サージは最大約3.2 p.u.発生する。1,000 kVのLIWVは2,250 kVで、運転電圧波高値の2.5倍の大きさであるため、抵抗なしでは断路器サージはLIWVを超えてしまう。抵抗値を500 Ωとすると、断路器サージは1.3 p.u.程度まで下がり、LIWV以下にすることが可能となる。

主接点と抵抗体発弧電極の構成を図4に示す。発弧電極は可動子と小ギャップを形成しており、可動子が固定子を離れると、発弧電極との間で点弧を繰り返しながら最終開極位置まで移動する。抵抗体はGCBで使用しているものと同様のカーボンソリッドタイプである。

抵抗体によるサージ抑制効果を直接試験によって検証するために、進み小電流遮断試験を行った。試験は、実器GISの母線連絡ユニットの静電容量を模擬して約2,000 pFの負荷をGIBおよびGISに内蔵したセラミックコンデンサで構成し、電源側から変圧器で直接交流電圧635 kVを印加して遮断および投入する直接試験法を採用した。試験の様子を図5に示す。試験の結果、サージ倍数は約1.1 p.u.に収まっており、目標が達せられた。

(2) HSGS(高速接地開閉器)の開発

HSGSは、GCBが線路事故を遮断して高速度再開路を行うまでの約1秒間に投入・遮断を行うため、ほぼGCB並みの高速動作が要求される。さらに、HSGSの遮断すべき責務としては、電磁誘導および静電誘導電流遮断があ



注：略語説明 BUS(母線)

図3 DS極間抵抗値断路器サージの関係

断路器サージは抵抗なしでは3.2 p.u.程度発生するが、500 Ωの抵抗を挿入することによって1.3 p.u.程度に抑制される。

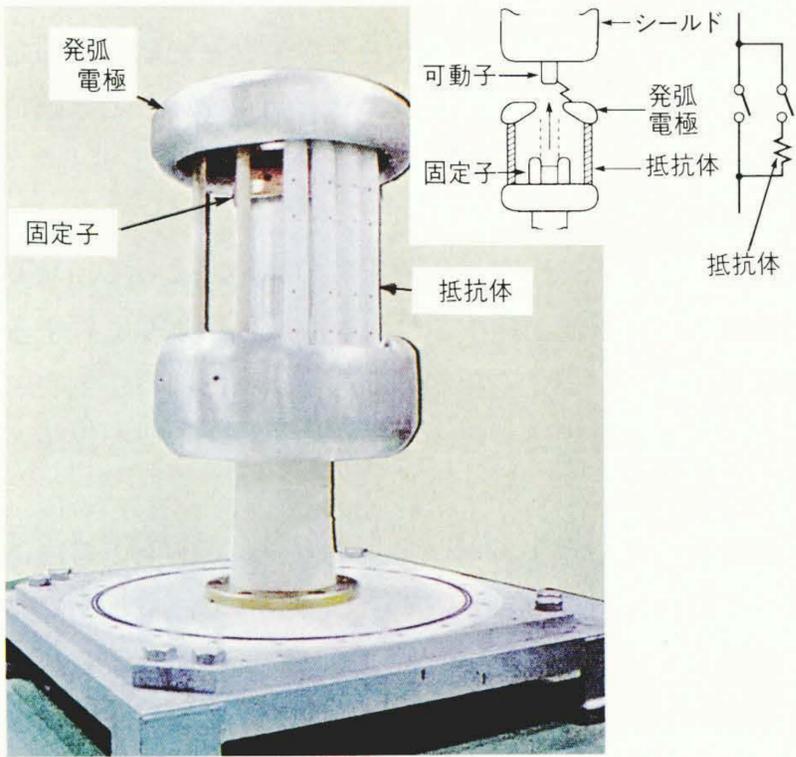


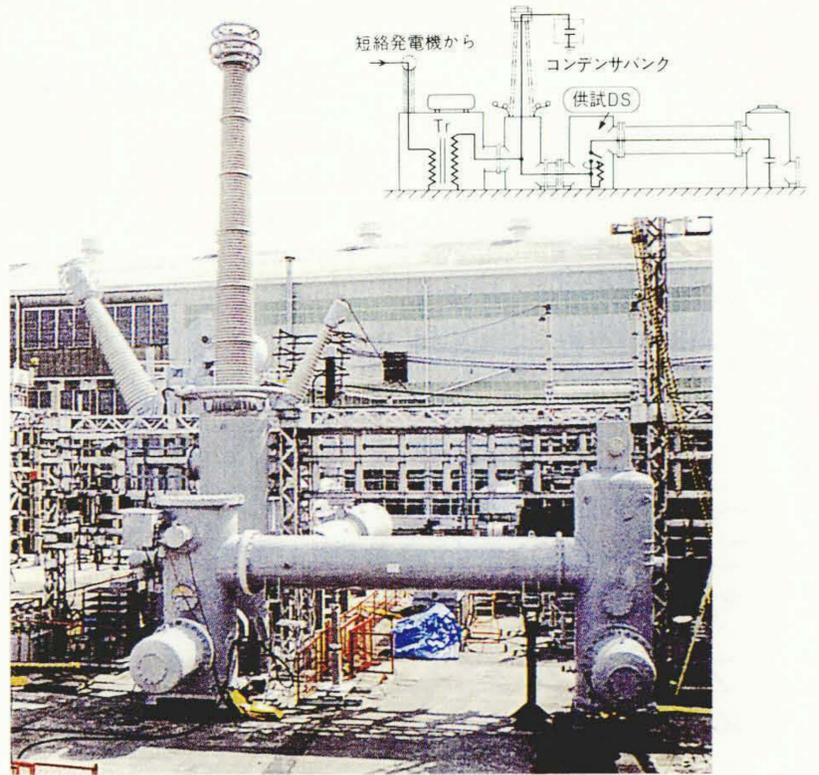
図4 DSの主接点と抵抗接点の構成

抵抗体発弧電極は可動子と小ギャップを形成しており、可動子が固定子を離れると、抵抗体発弧電極との間で点弧を繰り返す。

るが、その過渡回復電圧波高値は、ほぼ超高压クラス並みの責務となっており、GCBと同様、パuffa型遮断部を採用している。HSGSは、事故相遮断後に当該相に投入され、健全相からの誘導電流を遮断するわけであるが、HSGSが開放する直前に健全相に地絡事故が発生する、いわゆる後追い故障が発生し、誘導電流・電圧が過渡的に変動する可能性がある。後追い故障の発生条件によっては、誘導電流がシフトして零点を迎えなくなる零点推移現象が発生する。この現象は、後追い故障が除去されると元に戻るため、約4サイクル(80ms)継続する可能性がある。

通常のパuffa形遮断部は、遮断部の動作とともに、パuffaシリンダ内のガスが高まるが、フルストロークではほぼ100%の容積を圧縮してしまうので、フルストローク後急速に吹付け圧力が低下する。通常GCBでは、フルストロークまでの時間は、開極から2~30ms程度であるため、80msの間吹付け圧力を維持することはできない。そこで、今回のHSGSでは、パuffaシリンダ内にガスの貯留室を設け、フルストローク時でも全容積の60%程度しか圧縮しないようにした。これにより、パuffa圧力の最大値は低くなるが、長時間吹き付けることが可能となる。パuffa圧力特性を図6に示す。これによると、80msの有効アーク時間幅を確保していることがわかる。

遮断試験回路および遮断試験のオシログラムの代表例



注：略語説明 Tr(変圧器)

図5 DS進み小電流試験の様子

負荷側に実器GISの条件を模擬した静電容量を接続し、電源側から変圧器で交流電圧635kVを直接印加して直接試験を実施する。

を図7に示す。2台の短絡発電機を使用し、位相を制御して重ね合わせることで、交流分をキャンセルし、零点推移現象を発生させている。工場の遮断試験設備で実系統のような大きい直流分減衰時定数を得ることは困難であるため、さらに、コンデンサバンクから直流電流

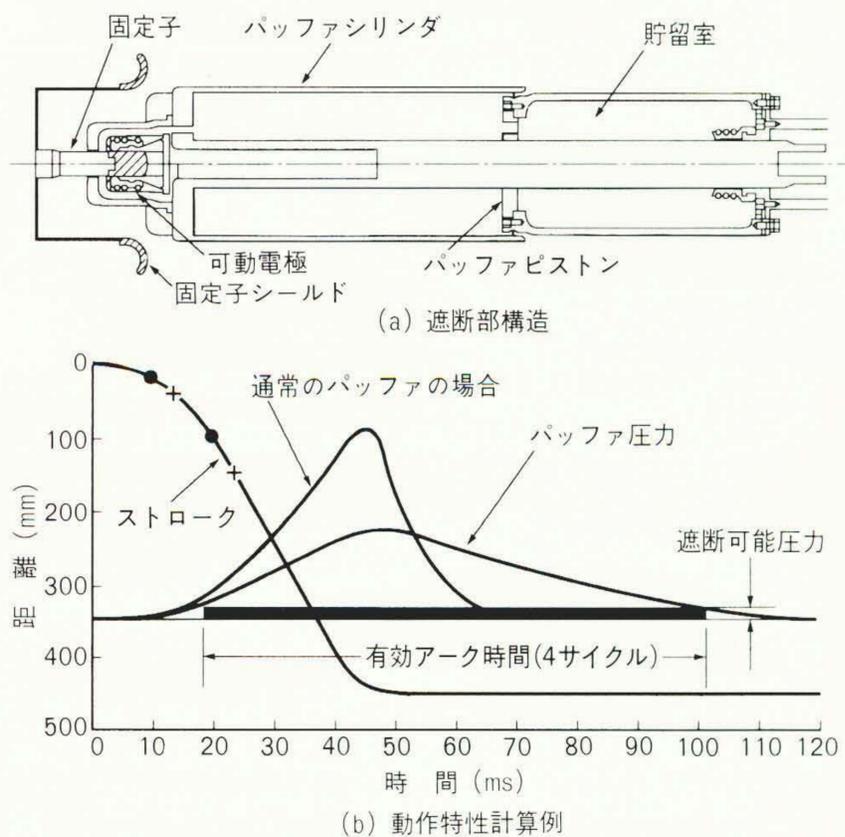


図6 HSGS遮断部のパuffa圧力特性

パuffaシリンダ内にガスの貯留室を設け、フルストローク時でも全容積の40%程度を圧縮せずに残すことにより、長時間の有効アーク時間幅を確保した。

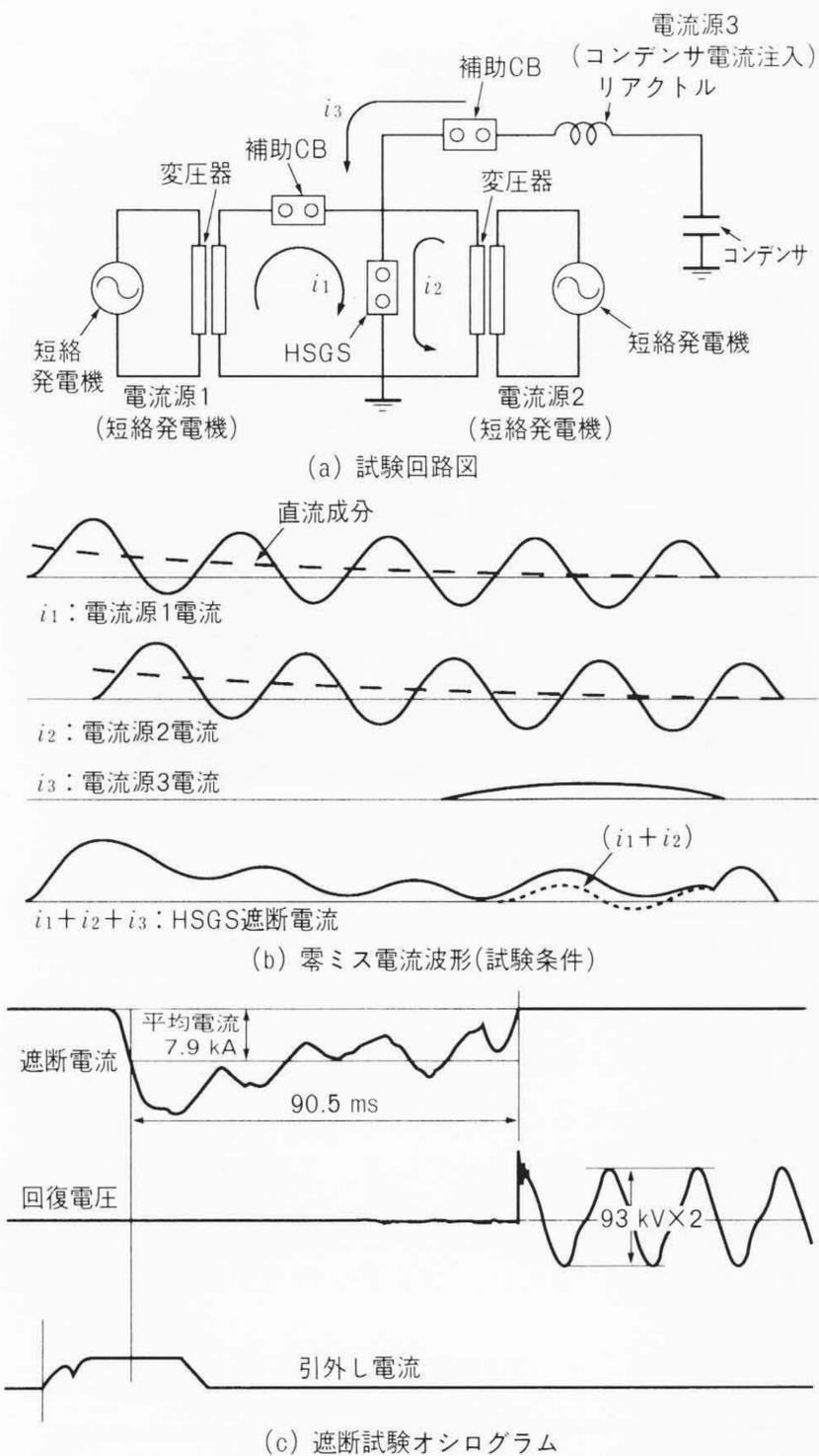


図7 HSGS長アーク時間遮断試験回路および試験結果
 2台の短絡発電機の位相を制御して重ね合わせ、さらにコンデンサバンクから直流電流を注入することにより、90 ms以上の零ミス電流を発生させている。

を注入し、90 ms以上の零ミス電流を発生させている。
 試験の結果、アーク時間90.5 msで遮断成功している。

また、フルストローク後も長いアークが継続するが、遮断時のアークの挙動を高速カメラで撮影した結果、固定接触子のシールドの内側に収まり、問題ないことを確認している。

(3) 母線・スペーサの開発

1,000 kV GISは、高性能避雷器の適用によってLIWVが低減され母線径が縮小されたが、逆にLIWVに対する運転電圧の比が小さくなるので、絶縁物内部の電氣的ストレスや金属異物混入時の絶縁性能が特に重要な課題となる。

絶縁物内部の電氣的ストレスは従来の500 kV GISに比べて約40%高くなっている。したがって、絶縁物として使用しているエポキシ樹脂注型品については、長時間V-t特性の研究成果をもとに、50年にわたる長期絶縁性能を確保している。さらに、部分放電開始電圧を捕えた予測保全システムでの部分放電監視精度を向上させることにより、信頼性確保に努めている。

また金属異物については、従来の設計基準である5 mmの長さの異物が絶縁物表面に付着しても運転電圧に耐えられることを確保しながら、さらに設計面、工場・現地での品質管理の改善により、管理面での許容異物3 mmとし信頼性向上に努めている。

5 おわりに

ここでは、1,000kV GISの技術課題、設計的な特徴および検証試験の一例について述べた。1,000kV GISの開発は、平成6年8月で一応の完了をみて、現地でのフィールド試験に向けて機器を据付け中である。今後、現地での信頼性検証を十分に行い、実変電所の計画に反映していく予定である。

参考文献

- 1) 特集 UHV交流送電：電気学会誌 Vol. 102, No. 11
- 2) 田邊：100万V昇圧に向けた技術開発・建設について、平成5年電気学会電力・エネルギー部門大会
- 3) 田中、外：1,000 kV GIS用抵抗付断路器の性能検証、平成6年電気学会電力・エネルギー部門大会
- 4) 田中、外：1,000 kV GIS用高速接地開閉器の性能検証、平成6年電気学会電力・エネルギー部門大会