

東京電力株式会社新信濃変電所納め

# 周波数変換装置用関連機器

## Associated Equipment for Shin-Shinano Frequency Converting Station of The Tokyo Electric Power Co., Inc.

周波数変換装置用関連機器のうち、変圧器については一般電力用変圧器と異なる技術上のポイントとして仕様決定の主要素、直流絶縁、漂遊損対策などを、直流リアクトルについては空心形とした根拠や特性などを、また、直流変成器と直流避雷器についてはその構造と特性について述べ、それぞれ要求仕様を満足していることを明らかにした。

奥山賢一\* Okuyama Kenichi  
 白川晋吾\*\* Shirakawa Shingo  
 丸山勝也\*\* Maruyama Katsuya

### 1 緒言

周波数変換装置用関連機器については、昭和45年に財団法人機械振興協会プロジェクトとして開発されたDC125kV、37.5MW実証試験用の機器について、数年にわたり連系運転試験を実施した貴重な経験が基礎となっている。今回はサイリスタ変換装置として我が国で初めて営業運転に用いられる125kV、300MWの本格的な電力用機器であるため、信頼度のより高い機器を製作することに心掛けた。

以下、周波数変換装置用関連機器の個々について、仕様、構成、特性など信頼度に関係する技術的ポイントについて主に述べる。

### 2 変換器用変圧器

#### 2.1 仕様

この変圧器の仕様を表1に示す。仕様中、インピーダンスはサイリスタバルブのアーム短絡時及び直流短絡時の過電流抑制のため下限は19%とし、制御上の安定度及び無効電力の点から上限は25%として、変圧器製作上の裕度、タップ切換えによる変動を考慮して20%と定めた。

直流巻線電圧は、直流電圧125kVにバルブ余裕角及び変圧器リアクタンス降下などの無効分並びに抵抗降下分を考慮して110kVと定めた。

また東京電力株式会社新信濃変電所の周波数変換装置は、 $\Delta/\Delta$ 結線の変圧器と $\Delta/\Delta$ 結線の変圧器とが交流系に常時並列に接続されて、12相運転が行なわれるので、 $\Delta/\Delta$ 結線変圧器には $\Delta$ 巻線を設けない構造とした。この二回路並列運転方式により $\Delta/\Delta$ 結線変圧器と $\Delta/\Delta$ 結線変圧器のインピーダンス及び二次電圧差を各タップではほぼ同一とすることができ、 $\Delta/\Delta$ 結線変圧器を内蔵 $\Delta$ 巻線付とした場合よりも第5、第7高調波を大幅に減らすことができる。

#### 2.2 直流巻線側の絶縁設計

変換器用変圧器の直流巻線は、

- (1) 常に一線接地状態で使用されており、常規対地電圧は一般の場合の $\sqrt{3}$ 倍となる。
  - (2) 平均 $1.35E_d/2$ の直流電圧が加わる( $E_d$ は直流電圧)。
  - (3) サイリスタバルブの転流時にサージ電圧が重畳する(直流巻線側交流電圧波高値の最大約1.35倍)。
- などの特殊条件で使用されることから、雷インパルスに対し

表1 変換器用変圧器の仕様  $\Delta/\Delta$ 及び $\Delta/\Delta$ 結線の2台の変圧器が交流系に常時並列に接続され、変換装置は12相運転される。

項	目	仕	様														
形	式	屋外用送油風冷式内鉄形 負荷時タップ切換変圧器															
周	波	数	60Hz														
電	圧	交	流	側	275kV±11% (23タップ)												
		直	流	側	110kV												
容	量	187MVA															
結	線	$\Delta/\Delta$ 及び $\Delta/\Delta$															
イ	ン	ピー	ダ	ン	ス	20%											
絶	縁	階	級	交	流	側	200号 (中性点80号)										
				直	流	側	100号										
直	流	側	巻	線	試	験	電	圧	雷	イン	パ	ルス	耐	圧	550kV (全波) 630kV (截断波)		
									交	流	耐	圧	230kV (1分間)				
									交	流	部	分	放	電	試	験	160kV (30分間)
									直	流	耐	圧	±225kV (30分間)				

550kV耐圧ではあるが、交流に対し325kV耐圧を目標として絶縁設計を行なった。これは、長期使用に対しある意味で裕度をとったものであるが、今後運転実績などを参照しながら見直していきたい点である。

交流の電位分布は、油及び油浸紙の誘電率により各々の分担電圧が決まるが、直流の電位分布は抵抗率により各々の分担電圧が決まる。油と油浸紙の誘電率比は2.2:3.5であるのに対し、抵抗率比は1:10~100であるため、交流と直流の電位分布は大きく異なる。図1に交流と直流に対する電界マッピングの例を示す。

一方、基礎実験、要素試作により材料の直流絶縁特性、直流-交流重畳時の破壊電圧特性及び極性反転による破壊電圧特性を求め<sup>1)</sup>、電界解析手法と併用することにより直流絶縁に対する設計技術を確立している。

#### 2.3 鉄心の直流偏磁

本来、直流巻線に流れる電流は交流であるが、バルブの点

\* 日立製作所国分工場 工学博士 \*\* 日立製作所国分工場

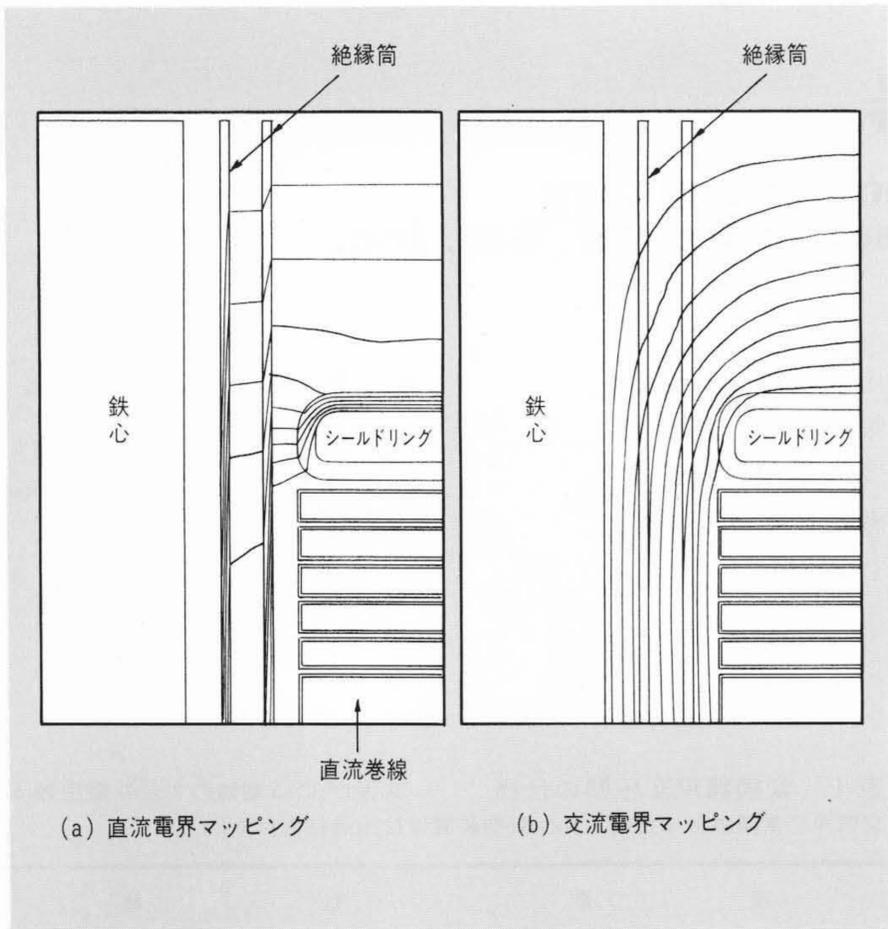


図1 直流電界マッピングと交流電界マッピングの比較 直流絶縁設計、交流絶縁設計とも電子計算機により電界マッピングを行なっている。交流と直流とは電圧分担の様子が異なり、後者では大部分絶縁紙で電圧を負担していることが分かる。

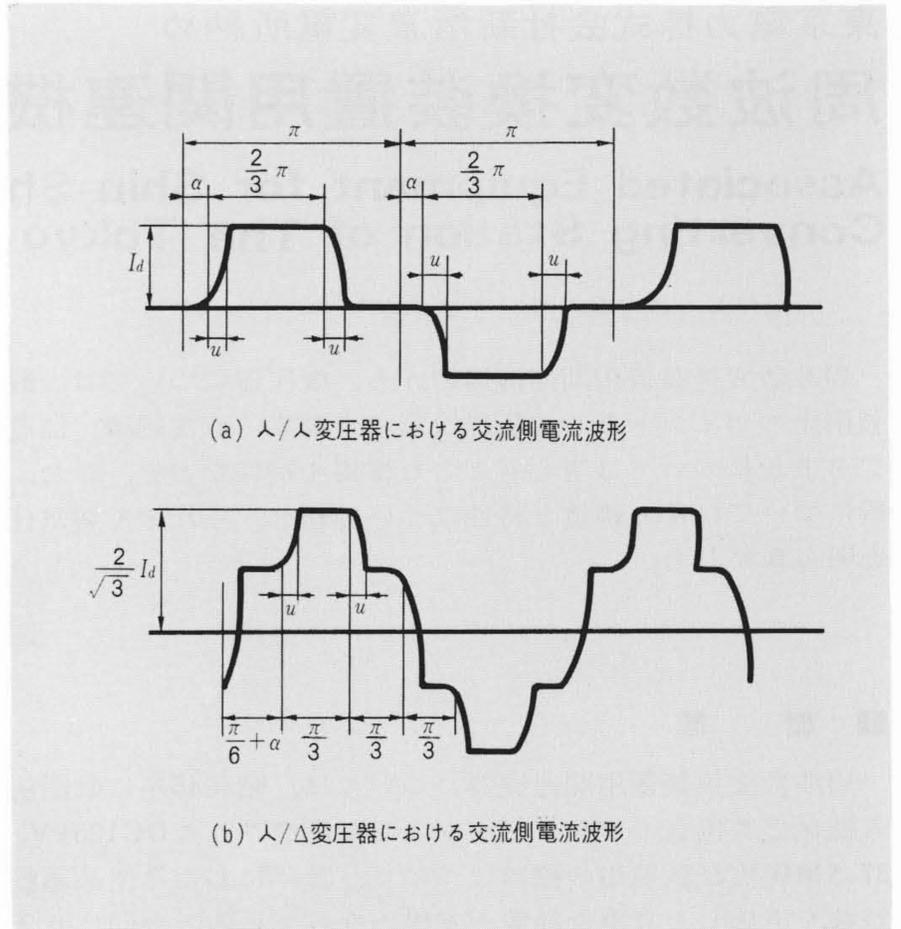


図2 交流側電流波形 一般の交流と異なり、高調波を含有している。この内容が表2に示す高調波含有率である。

弧角の不ぞろい、50~60Hz系連系時の直流電流のビートなどにより巻線に直流電流が流れる。点弧角の不ぞろいについては制御装置の誤差、電圧ひずみなどの影響により±0.5度のばらつきを考慮する必要があるが、この変圧器の設計に当たっては悪条件側にそれぞれ1度ずれた場合を想定して鉄心設計を行なった。また、鉄心単独の状態では鉄心に直流磁束を流して、鉄心内部の損失分布、温度分布、鉄心からの漏れ磁束、騒音の測定などを行ない、実際運転上の問題点の把握と信頼性の向上に努めた。

#### 2.4 高調波による漂遊損の増加

変圧器巻線を通る電流の波形を、重なり角を考慮して簡単に表わすと図2に示すようになる。この波形をフーリエ級数展開すると表2に示す一例のように $6m \pm 1$  ( $m=1, 2, 3, \dots$ ) 次の高調波を多く含み、このため一般の電力用変圧器に比較して漂遊損が大きくなる。更に、この変圧器はインピーダンスが20%と大きく、漏れ磁束量が大いので、漂遊損抑制対策として、転位電線の使用、タンクシールドの実施、内部構造金属の形状、材質の検討などを行なった。

#### 2.5 防塵対策

直流絶縁強度に対しては塵埃の影響が極めて大きいので、作業管理や油中塵埃の除去などを入念に行なった。また、現



図3 変換用変圧器の外観 低騒音構造である。

地作業時に塵埃が混入するのを防ぐため本体カバー輸送方式を採用し、現地作業の信頼性向上を図った。図3にこの変圧器の外観を示す。

### 3 直流リアクトル

#### 3.1 仕様と定格

本器は直流主回路に置かれるもので、定格電圧125kV、定格電流1,200Aであり、その他の仕様は表3に示すとおりである。

#### 3.2 構造

直流送電用リアクトルとして、鉄心形は低電流領域でインダクタンスを大にできるため、低電流領域での電流断続限界を効果的に確保できる利点があるが、一方、電流定格、インダクタンス定格が大となり大容量化するにつれて鉄心の所要

表2 定格電流に対する高調波電流 定格順変換器運転時 $\alpha=15^\circ$ 、 $u=27^\circ$ のときの高調波含有率を定格電流に対する比で表わしており、 $6m \pm 1$ 次調波の多いことが分かる。

調波	1	5	7	11	13	17	19	23
含有率	0.947	0.161	0.096	0.031	0.017	0.008	0.008	0.008

表3 直流リアクトル仕様 電流定格、インダクタンス定格が大きいことから空心形とした。空心形巻線の外側は磁気シールドを設け、磁束の外部への漏れを抑制し損失の低減を図った。

項目	仕様	
形式	屋外用送油風冷式空心形	
使用条件	連続	
定格	直流電圧	125kV
	直流電流	1,200A
インダクタンス	1H(実測値1.1H)	
試験	雷インパルス耐圧	大地間 400kV 端子間 650kV (一端印加, 他端接地各1回)
	交流耐圧	230kV(1分間)
電	交流部分放電試験	160kV(30分間)
	直流耐圧	±225kV(30分間)
圧	開閉インパルス耐圧	550kV, 80×240μs波形(一端印加, 他端接地各5回)

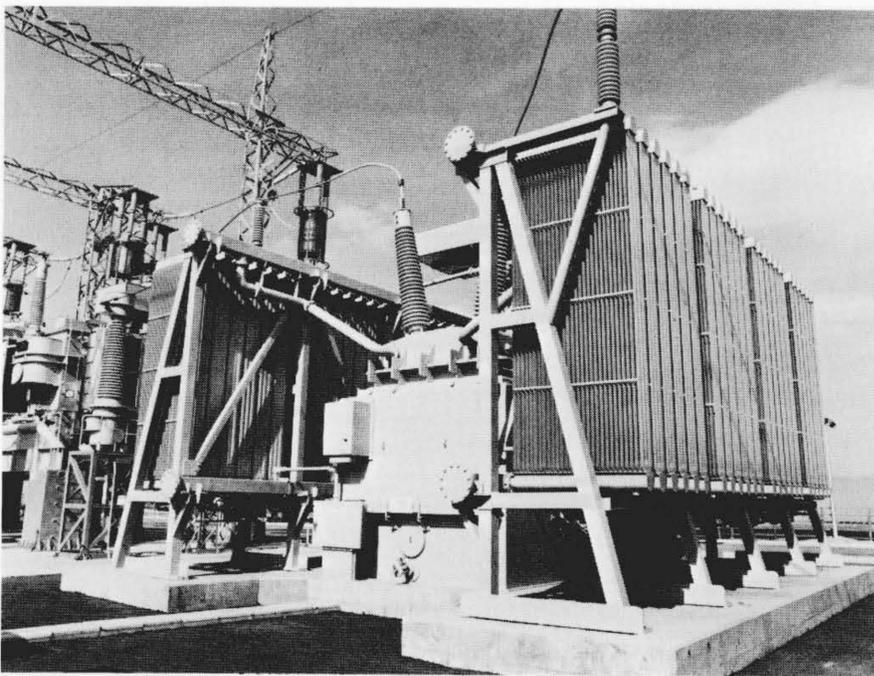


図4 直流リアクトルの外観 現地で運転中の直流リアクトルを示す。騒音対策として、放熱面積の大きいラジエータを用いている。

空隙長が大となるので空心形が有利となってくる。

そこで本器では空心形を採用した。空心形巻線の外側には継鉄部に磁気シールドを置いて漏れ磁束の外部への漏れを抑制し、タンクなどの構造物の損失の低減を図った。

冷却方式は送油風冷式とし、放熱面積の大きいラジエータを使用した。また、騒音低減のため、本体タンクの外側に防音タンクを設けている。本器の外観を図4に示す。

### 3.3 高調波電流と漂遊損失

インダクタンスが1Hと大きいため、定格運転時にはリップル電流の各高調波成分は1%以下と小さいうえ、前記の電磁シールドの効果もあり、全高調波電流により発生する漂遊損失は直流抵抗損の4%以下に抑制された。

### 3.4 過電流と耐力

直流線路地絡あるいは逆変換器転流失敗などにより、リアクトルに過電流が流れる。この過電流は定電流制御により瞬時に理論値以下の定格電流の約150%に抑制され、またこれのバックアップとしてゲートシフト、電源側交流しゃ断器開放などの保護が設けられているが、本器は過電流理論値に十分耐えるように設計して信頼性を確保した。

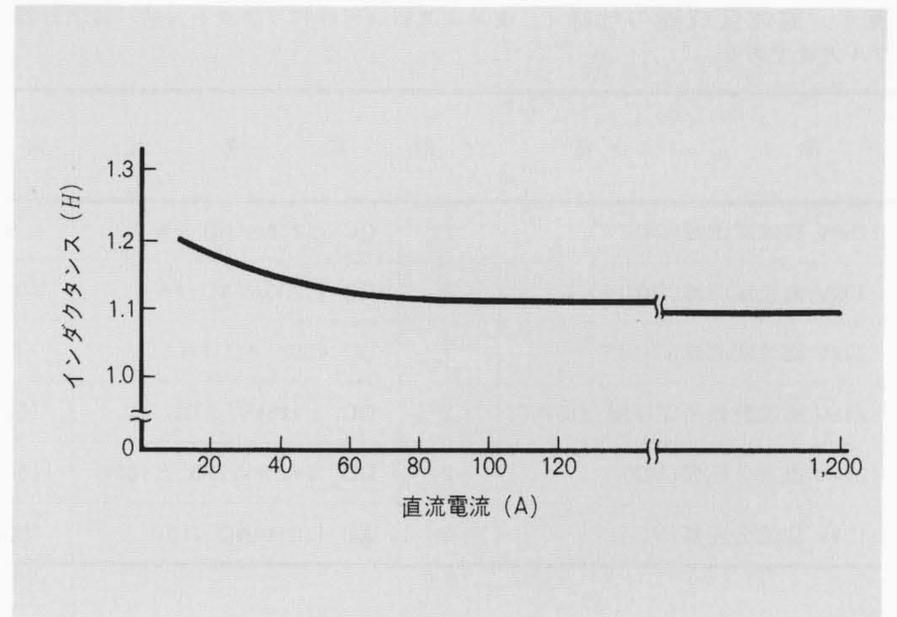


図5 インダクタンス-電流特性 電流によってインダクタンスはほとんど変化しない。

また過電流は、立上りから最大値に達するまでの時間が約400msと遅いため、電流変化による巻線振動はほとんど生じない。

### 3.5 絶縁

雷インパルスに対しては端子間絶縁を大地間絶縁より高い650kV耐圧とし、端子間避雷器を省略した。外部絶縁には140号がが管を使用し、内部絶縁は直流に対する電界を電子計算機により詳細に計算し、変圧器と同様絶縁強度の高い絶縁紙を効果的に使用して油中電界が過大とならないように配慮した。

### 3.6 試験結果

#### (1) 絶縁試験

表3に指定されている絶縁試験を実施し良好な結果を得たが、特に交流耐圧試験では160kV 30分間課電で無部分放電(5μV以下)であっただけでなく、230kV 1分間でも無部分放電(5μV以下)であった。

#### (2) インダクタンス

低電流領域から定格電流まで測定した結果、図5に示すようにほぼ一定のインダクタンス特性が得られた。

#### (3) その他

温度上昇、損失など、すべて仕様を満足する結果が得られた。

## 4 直流変成器

出力電圧・電流の計測、制御保護、波形観測などに使用する直流変成器類として、油入密封形の計器用直流変流器(DCCT)、計器用直流変圧器(DCPT)及び分圧器(VD)の仕様を表4に示す。

### 4.1 計器用直流変流器(DCCT)

DCCTは、高圧用、低圧用及び接地用の3種類を製作した。変成部分は図6(a)に示す可飽和リアクトル式で、鉄心は要求特性を満足させるため角形比の高いニッケルコアを使用して過電流でも誤差特性が直線性をもっているようにした。高圧用、低圧用は直流偏磁による誤差特性の低下やリップル分による局部過熱などを生じないようにシールド形状にも工夫をした。絶縁構造はすべて容量分割形として各層間の分担電圧を均等とし、部分放電開始電圧を十分高くすることによって機器の信頼性を向上させた。また耐震強度の向上にも十分注意を払った。試験の結果、比誤差特性は定格電流で1%、200%電流で2%以下、過渡応答特性は1ms以下で、電流制御及び過電流保護方式上必要な性能を十分に満足している。



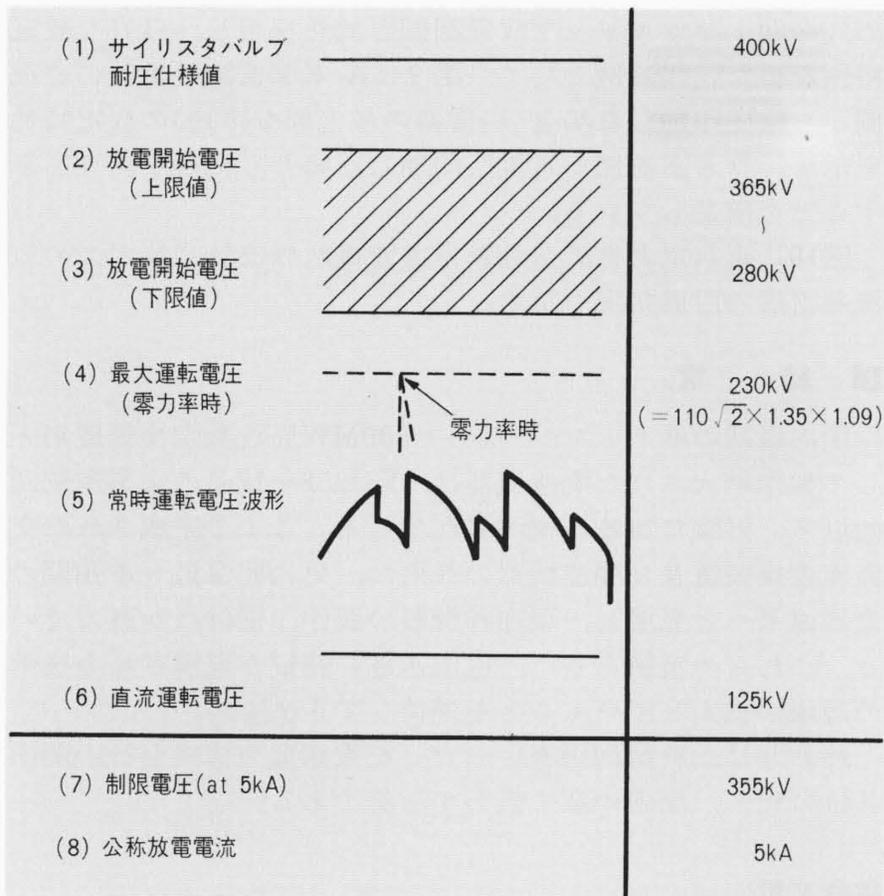


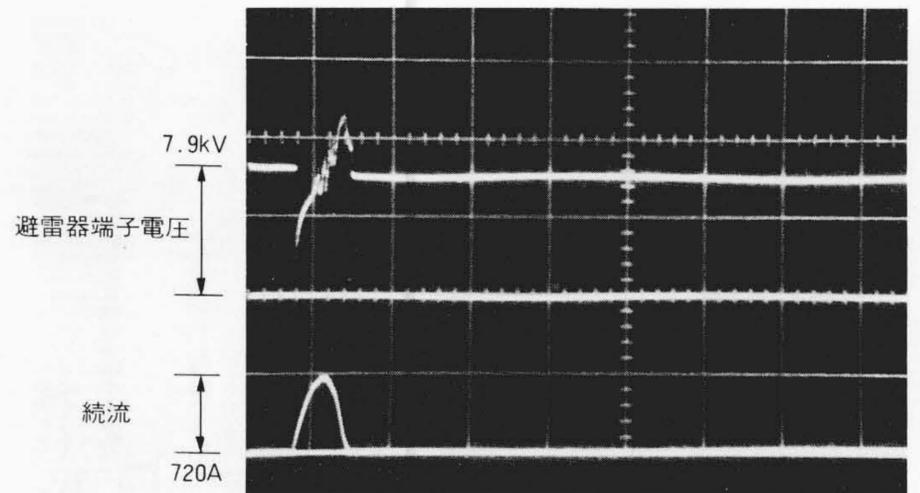
図7 東京電力株式会社新信濃変電所周波数変換設備用直流避雷器の特性 運転電圧及び避雷器の放電特性と被保護機器であるバルブの耐圧仕様値との関係を示す。

### 5.1 直流避雷器の配置

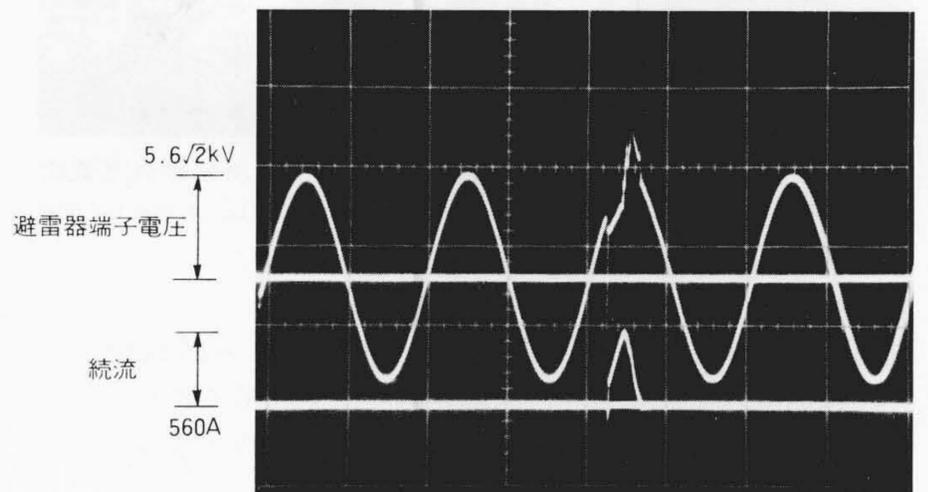
東京電力株式会社新信濃変電所周波数変換設備用直流避雷器の保護対象は、サイリスタバルブの高圧と低圧のA-K間保護及び直流リアクトルの対地絶縁保護である。特に、A-K間直流避雷器は対地絶縁されており、交流側及び直流側両方向の侵入サージに対してもサイリスタバルブを保護するように配慮されている。

### 5.2 直流避雷器の構成

東京電力株式会社新信濃周波数変換設備用直流避雷器は、がい管2段積構造とし、上段がい管内に続流しゃ断を行なう限流ギャップと放電制御を行なうトリガーギャップとを



(a) 直流の続流しゃ断試験結果オシログラム



(b) 交流の雷サージ動作責務試験オシログラム

図8 直流避雷器のしゃ断試験オシログラム しゃ断試験のオシログラムを示すもので、続流の様子と端子電圧の関係がはっきり分かる。

組み合わせた直列ギャップ部を、下段がい管内に特性要素(SiC)を封入してある。

### 5.3 直流避雷器の特性

#### (1) 続流しゃ断特性

直流避雷器の動作責務は、交流避雷器と同様に分割単位による等価性が検証されていることから<sup>2)</sup>、この避雷器は25ユニット構成につき分割単位DC 7.9kV/AC 5.6kVで試験を実

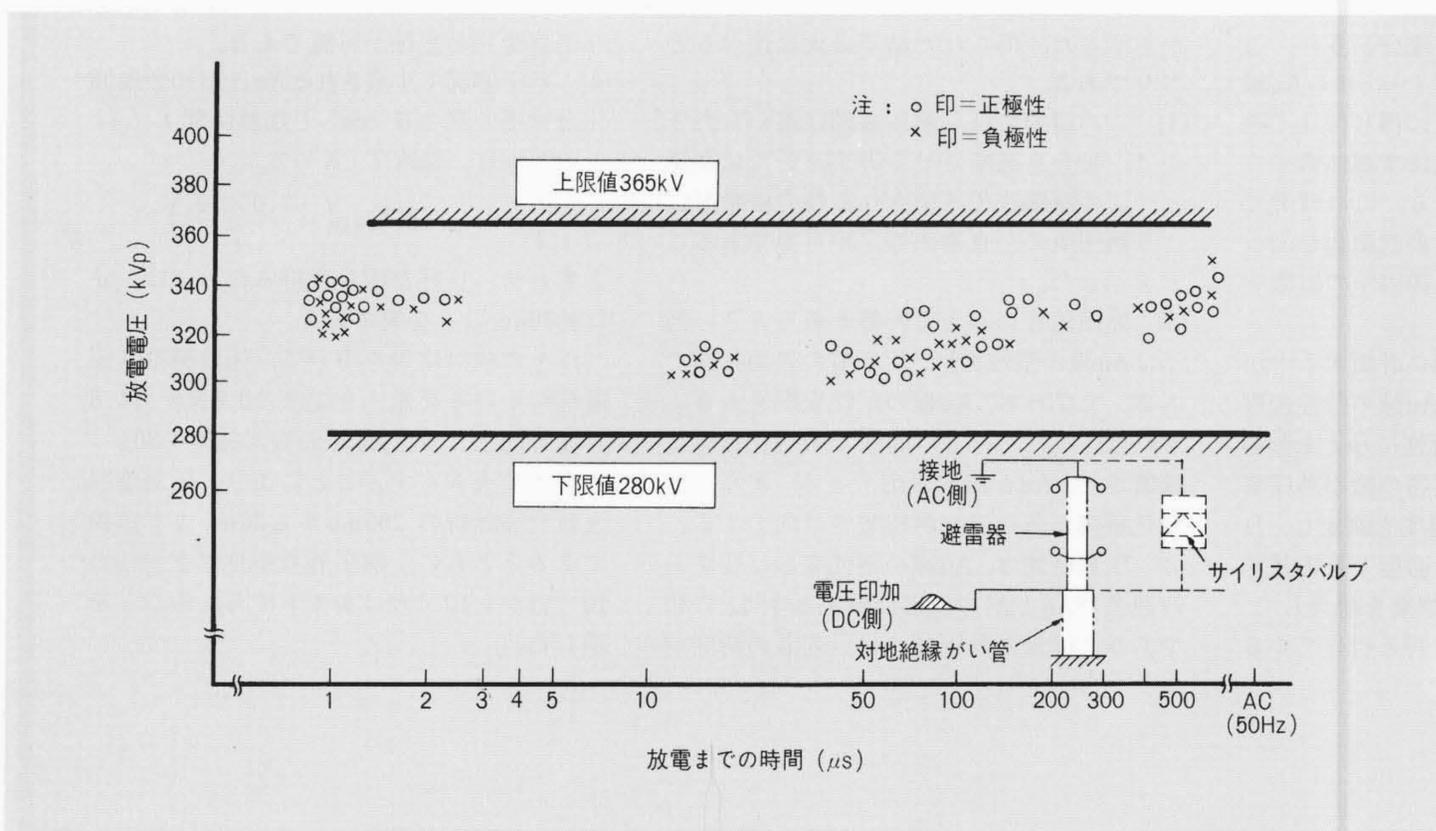


図9 DC125kV系統用直流避雷器の放電特性 放電電圧の上下限仕様値の間に実際の放電電圧値が入っていることが分かる。

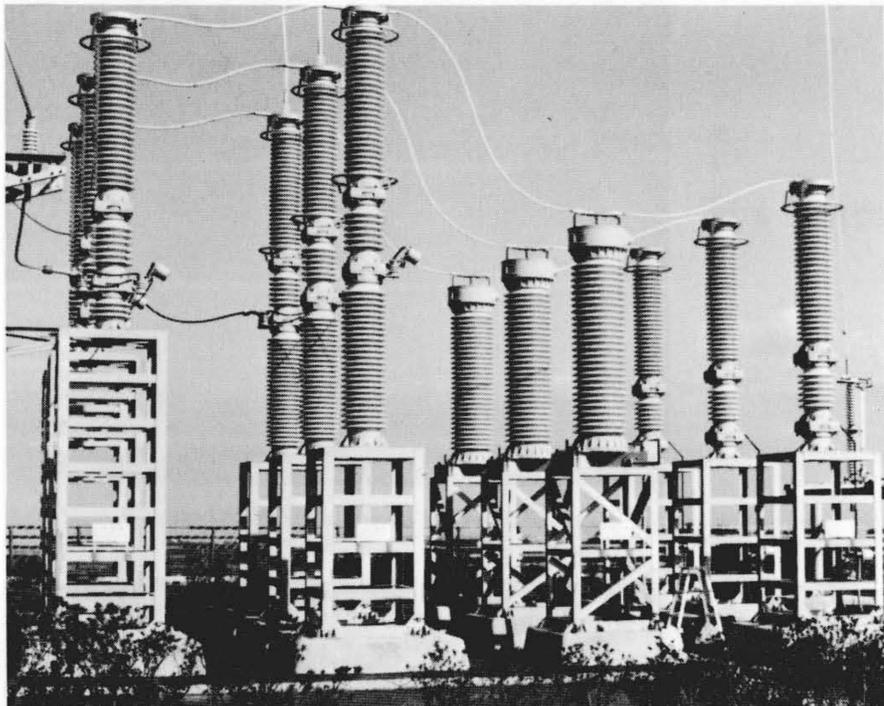


図10 東京電力株式会社新信濃変電所周波数変換所納め直流避雷器の外観 直流避雷器の現地での据付状態を示す(ただし、右端から2列目は分圧器)。

施した。図8(a)にDC 7.9kVでの直流の続流しゃ断試験結果の、同図(b)に交流の雷サージ動作責務試験結果のオシログラムを示す。直流及び交流いずれでも続流しゃ断を行なうことができる。

(2) 放電特性

仕様値は図7に示したように、サイリスタバルブの絶縁設計より雷インパルス領域から開閉インパルス領域まで、上限値、下限値とも同一に設定されている。これを満足するた

め、今回トリガギャップ放電制御方式を採用し、良好な放電特性を得た。代表例として、図9にA-K間直流避雷器の直流側から電圧印加した場合(避雷器の最上部を接地)の放電特性を示す。なお交流側から電圧印加した場合も同様な特性を示すことを確認している。

図10に東京電力株式会社新信濃変電所周波数変換所での直流避雷器の設置状況を示す。

6 結 言

国内最初のサイリスタを用いた300MW周波数変換装置用として製作納入された関連機器は、昭和52年12月の営業運転開始以来、好調に運転が続けられている。ここで完成された交直流変換装置及び関連機器の技術は、更に北海道一本州間の直流連系へと発展し、現在各機器の製作、据付けが進んでいる。これらの実績を基に、直流送電の特質が理解され今後その適用が拡大していくことを期待して止まない。

終わりに、終始御指導いただいた東京電力株式会社の関係各位に対し、深謝の意を表わす次第である。

参考文献

- 1) E. Takahashi, Y. Tsutsumi, K. Okuyama and F. Ogata : Partial discharge characteristics of oil-immersed insulation systems under DC, combined AC-DC and DC reversed polarity voltage, IEEE Vol. PAS-95 No. 1, p.411~p.420 (Jan/Feb. 1976)
- 2) M. Takanashi, T. Yokokura, S. Maruyama, J. Ozawa and S. Shirakura : Operating duty test of surge arresters for HVDC transmission systems, IEEE Vol. PAS-96 No. 4, p.1384~p.1390 (July/Aug. 1977)



半導体素子Al電極へのAu線熱圧着

日立製作所 岩田誠一・石坂彰利・他一名  
日本金属学会誌 41-11, 1161 (昭52-11)

IC(集積回路)やLSI(大規模集積回路)のAl電極と外部端子との接続にはAu線熱圧着という方法がとられる場合が多い。この方法は直径数十マイクロメートルのAu線を約300°CのAl蒸着膜電極に押し付けて接合させるもので、この工程は半導体素子の信頼性に大きな影響を与える。この研究では、上記熱圧着の高速化と高信頼化を図るために、熱圧着性に与える諸因子の影響を明らかにした。

まず、熱圧着性を定量的に評価する方法を開発し、それを用いて、Au線の塑性変形及びAlの表面状態が熱圧着性に与える影響を明らかにした。次に、実際の微小熱圧着部での、AuとAlとの反応速度を測定し、良好な接合が得られるために必要な反応量を求めた。最後に、これらの結果を総合して、圧着時間(Au線をAl電極に押し付けている

時間)をどこまで短縮できるか、及び熱圧着の不良率をどのようにしたら下げられるかを示した。得られた結果は次に述べるとおりである。

(1) この研究では、熱圧着部に横から力をかけ、接合を破断させる方法を新たに開発し、この試験法で求められる接合破断力により熱圧着の不良率の推定が可能であることを示した。

(2) 熱圧着性に与える影響が最も大きい因子はAu線の塑性変形、及びAlの表面状態である。すなわち、Au線の塑性変形を大きくすれば、それだけ広い面積でAl酸化被膜が破壊され、AuとAlが反応できる。また、Al酸化被膜が薄いほど熱圧着性は向上する。

(3) 圧着時間は、Au線の塑性変形に要する時間及びAuとAlの反応に要する時間との和であり、従来の熱圧着では、前者の時間が

圧着時間の大部分を占めていた。したがって、Au線の変形速度を大きくすることにより圧着時間の短縮が可能である。

(4) 熱圧着部で生成されるAuとAlの金属間化合物層の厚さd(cm)と加熱時間t(s)との関係は、温度T(K)では、

$$\frac{d^2}{t} = 8.1 \times 10^{-5} \exp\left(-\frac{7.0 \times 10^3}{T}\right)$$

と表わせ、良好な接合を得るためには、dは約10nm以上必要である。

以上の検討結果を用いて、圧着荷重(圧着部にかける荷重)を従来の0.8Nから1.8Nまで増加させ、Au線の変形速度を30s<sup>-1</sup>程度まで大きくすることにより、圧着時間を研究開始時の200msから20msまで短縮できるとともに、熱圧着の不良率を当初の10<sup>-3</sup>台から10<sup>-5</sup>台にまで下げられることを示した。