
直 流 送 電 特 集

| | |
|---|----|
| 直流送電用機器開発の諸問題とすう勢 | 67 |
| 佐久間サイリスタ変換装置試験所用装置の概要 | 72 |
| 125 kV, 37.5 MW 高電圧サイリスタバルブの開発 | 78 |
| 125 kV, 300 A, 37.5 MW サイリスタ変換装置用制御保護装置 | 83 |
| 125 kV, 37.5 MW サイリスタ変換装置用主変圧器, 直流リアクトル, 直流変成器 | 88 |
| 超高圧直流 OF ケーブルの絶縁特性 | 95 |

直流送電用機器開発の諸問題とすう勢

Developments of High-voltage Direct-current Transmission Equipment

高 林 乍 人* 浅 野 弘**
Hayato Takabayashi Hiroshi Asano

栗 田 健 太 郎*** 広 吉 秀 高****
Kentarō Kurita Hidetaka Hiroyoshi

要 旨

電力需要の増大は系統の巨大化を招き、直流送電採用の機運は内外を問わず高まってきている。しかし、従来の水銀整流器による交直流変換装置は、信頼性その他において必ずしもじゅうぶんでなく、サイリスタによる変換装置の開発が望まれていた。日立製作所では多年の研究の成果を盛り、昭和45年 DC 125 kV, 37.5 MW のサイリスタ高電圧大容量交直流変換装置を完成納入した。ここに至るまでの研究、開発のいきさつ、技術的問題点を述べるとともに、今後のすう勢をサイリスタバルブ、サイリスタ、制御保護装置、変圧器類、などの直流送電用主要機器について述べる。

1. 緒 言

近年電力需要の増大は著しく、系統は急速に巨大かつ複雑化してきており、電力供給確保のためすぐれた特長を有する直流送電導入が世界的な要望となっている。

直流送電は昭和29年スウェーデンゴットランド系統に始まり、昭和45年には北アメリカ太平洋岸南北連系系統が完成し、1,440 MW, 1,330 km の本格的な大電力長距離主幹送電を開始するに至った。わが国においても電力の伸びはめざましく、系統連系、大電力輸送、流通に近い将来の直流送電採用の必要性が高まってきている。

しかし、直流送電の実績は経済性ととも、供給信頼度において必ずしも満足すべきものではない。特に後者に関しては交直流変換器として従来使われてきた水銀整流器には固有の逆弧現象が付随するので、その解決が緊要なものとなっていた。

ところで、半導体技術の最近の進歩は、水銀整流器に代わる高性能の高電圧サイリスタ交直流変換装置開発の可能性を高め、その実用化が電力界で強く要望されてきた。これに対応して数年来世界の主要製作者は使用者とともにこぞって研究開発に努め、欧米ではすでに二、三の計画でサイリスタ変換装置の採用が決定している⁽¹⁾。

わが国でも、世界のすう勢に鑑(かんが)み、サイリスタ高電圧交直流変換装置が、財団法人機械振興協会の助成のもとに開発された。本装置は DC 125 kV, 37.5 MW というサイリスタ変換装置として世界最大のもので周波数変換装置として運転される。その一端の装置一式を日立製作所が他端を東京芝浦電気が製作し、ともに昭和45年11月より実用試験にはいつている。

日立製作所は、早くから工業用高電圧大電流サイリスタの開発とともに高電圧サイリスタ変換装置の開発を続け、この研究成果を基礎として今回の変換装置一式を完成したものである。

本文では、主要直流送電機器の開発のいきさつと技術的諸問題について述べるとともに、今後のすう勢について総括的説明を加える。

2. 直流送電用サイリスタバルブ

2.1 サイリスタバルブ開発の経過

サイリスタ変換装置は水銀変換装置と比べ、逆弧、失弧などの異常現象がなく、また温度制御を必要としない。したがって運転保守が容易で信頼性が高く、屋外形も可能である。このためサイリスタ

変換装置の開発がスウェーデン、アメリカ、イギリス、ドイツなどで開始された。

わが国でも昭和40年ごろから電子技術総合研究所、電力中央研究所、製作者などにおいて研究が開始された。日立製作所においては次のような段階を追ってサイリスタバルブの製作経験を重ね、設備の充実を図ってきた。

2.1.1 10 kV サイリスタ変換装置 (昭和42年納入)

電子技術総合研究所に1,200 V, 150 A サイリスタ24個直列接続から成るサイリスタバルブ6本を三相ブリッジ結線として納入した。これはサイリスタバルブの研究設備として使用されている。

2.1.2 50 kV サイリスタバルブ等価試験設備 (昭和42年製作)

大容量サイリスタバルブを実負荷で試験することは設備容量上困難である。このため等価試験設備を製作し、特に重要であるサイリスタバルブのターンオン時あるいはターンオフ時の電圧分担など過渡時の現象を研究するようにした。

2.1.3 50 kV サイリスタ変換装置 (昭和43年納入)

10 kV サイリスタバルブの製作に引き続いて電子技術総合研究所に2,500 V, 400 A サイリスタ64個直列接続から成るサイリスタバルブ3本を納入した。これは単独あるいは10 kV サイリスタ変換装置と組み合わせて運転される。

2.1.4 10 kV, 100 A 直流送電実証研究用12相変換装置 (昭和44年製作)

日立研究所に設置したもので整流器およびインバータ側がそれぞれ12相接続されている。

2.1.5 ±600 V, 22 kW 基礎研究用サイリスタ変換装置 (昭和44年納入)

電力中央研究所に納入した。

2.1.4 および 2.1.5 は交流—直流—交流変換回路における主回路および制御保護回路の試験研究を行なうための設備である。

以上の実績と設備により実規模サイリスタ変換装置製作の態勢はじゅうぶんに整ったといえる。

2.2 サイリスタバルブ開発上の問題点

サイリスタバルブは多数のサイリスタが直並列に接続された構成となっている。サイリスタバルブが通常の整流器と著しく趣を異にする点として次の事項があげられる。

- (1) 回路電圧が $10^4 \sim 10^5$ V のオーダーであり、通常のサイリスタ適用に比べ約2けた大きい。このため100個あるいはそれ以上の素子を直列に接続しなければならない。
- (2) 電力系統に直接接続される通常10万kW以上の大容量機器である。したがって高信頼度が要求される。

* 日立製作所日立研究所 工学博士

** 日立製作所日立工場

*** 日立製作所国分工場

**** 日立製作所大みか工場

(3) 水銀整流器に比較して技術的、経済的メリットを持たねばならない。

具体的技術開発項目のおもなものは次のとおりである。

2.2.1 直列接続素子間の電圧分担方式

ストレイキャパシタンスを考慮したサージ電圧の分担、あるいはターンオン時、ターンオフ時の電圧分担についてはアノードリアクトルと並列コンデンサ、抵抗器の常数を適当に選ぶことにより規定値内のばらつきに収めることが可能である。サイリスタが順電圧を負担時、一部の素子のみが点弧漏れをすると残りの素子に全電圧が加わる。このような現象に対しては回路の信頼度を上げることが第一であるが、ターンオフタイムのばらつきにより運転中にこのような現象が生ずることがまれにある。これに対しては分圧器およびゲート回路により対策ができることを確認している。

2.2.2 直並列数の決定

直列数はアレスタとの協調から決定され、アレスタの設計条件は回路のサージ電圧から与えられる。このため各種のサージ発生時および事故時を想定してシミュレータにより異常電圧の検討が行なわれ条件が決定されている。並列数については事故電流のゲートブロック能力に見合せて定格電流を決定している。

2.2.3 絶縁構造と冷却方式

従来製作してきたバルブはいずれも試験用であるので、試験、点検の便を考慮して乾式絶縁風冷式としている。

2.2.4 素子特性と回路との協調

次節で述べる。

2.3 直流送電用サイリスタ

わが国で、サイリスタが本格的に実用化され始めてから10年余り経過した。現在では重工業用から家庭電化製品に至るまで広範囲に用いられ、サイリスタの機種も多くなっている。これらの分野での使用実績は、その実用性、信頼性を立証している。このことがまた新しい応用分野の開拓の動機につながり、その新分野の一つとして直流送電用変換装置のサイリスタ化をあげることができる。ここではこの高圧変換装置に使用される高耐圧サイリスタについて述べる。

2.3.1 2,500 V-400 A CH03 形サイリスタ

現在、標準品として量産されている高圧サイリスタは2,500 V級の素子である。機械振興協会納めの高圧サイリスタバルブは2,500 V-400 AのCH03形サイリスタで構成されている。これは本バルブの計画時点で経済性と使用実績を持つことからCH03形サイリスタに決定されたものである。CH03形サイリスタのおもな仕様は表1に示すとおりである。

(1) 耐電圧特性

素子の耐電圧の点で特に留意したのは素子の温度特性である。事故電流による接合温度の異常上昇状態において逆阻止能力を保持することが必要である。

(2) 電流容量

電流容量についても定常運転の場合は問題はないが、異常時の協調上の考慮を必要とする。異常時の過電流に対して単に過電流に耐えるのみならず、この状態でゲートブロック能力を保持することが必要であり、接合温度上昇を低くするように計画しなければならない。

(3) サイリスタの動的特性

サイリスタバルブにおいては、直列数が多いためサイリスタのターンオン時間をそろえる必要がある。この場合、特にディレイタイムの特性をそろえることがたいせつであるが、ディレイタイムはゲート信号のレベルによって変わる。図1はディレイタイム

表1 CH03形のおもな仕様 (サイリスタバルブ用)

| 項目 | 条件 | 件 |
|-----------------|--|---|
| ピーク線返し逆電圧 | 2,500 VP | |
| ピーク非線返し逆電圧 | 2,750 VP | |
| ピーク線返しオフ電圧 | 2,500 VP | |
| 定格平均オン電流 | 400 A 180° 通電 | |
| サージオン電流 (1サイクル) | 8,000 A 50 Hz | |
| オン電圧 | 1.9 VP | |
| ゲートトリガー電流および電圧 | 単相半波せん頭値 1,250 AP 通流角 180° RT 電圧 4 VDC 電流 300 mA DC V _{A-K} =6 VDC | |
| 臨界オフ電圧上昇率 | 200 V/μs V _{A-K} =1,250 VP | |
| 臨界オン電流上昇率 | 100 A/μs V _{A-K} =1,250 VP | |
| ターンオン時間試験 | 4.0~9.0 μs V _{A-K} =1,250 VP | |
| 逆回復電荷 | 200~500 μc | |
| 熱抵抗 | 0.045°C/W (J-F間) | |

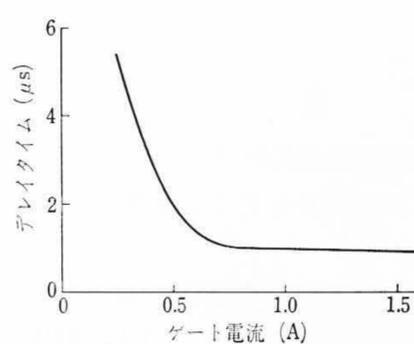


図1 デレイタイムとゲート電流

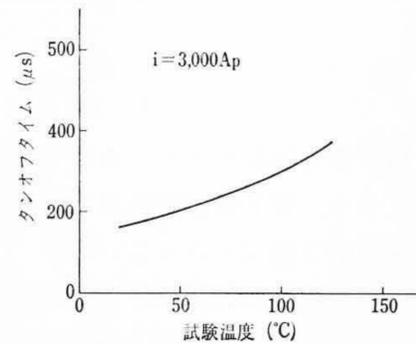


図2 ターンオフタイム温度特性

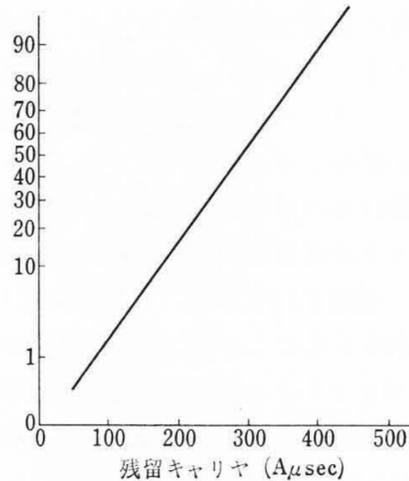


図3 残留キャリア分布

とゲート電流との関係例である。

ターンオフ時間は制御角の設定のうえで重要な要素であり、また異常時にゲートブロックする方式をとるような場合にはサージ電流におけるターンオフが問題である。図2はターンオフ特性を調べた例である。直列数の多い逆方向電圧分担の要素として残留キャリアの問題がある。図3は残留キャリアの分布を調べた例である。残留キャリアは接合温度に強く依存するので、異常時の高温における逆電圧分担を検討する際見のがしてはならない特性である。

以上CH03形サイリスタの高圧バルブへの適用について考えてみたが、素子の特性面から温度の要素が最も大きい。この点、システム全体から保護方式のあり方と素子特性との間の相互協調をじっくり考えなければならない。また、これらより高圧サイリスタの開発上の指針が生ずるものと考えられる。

2.3.2 サイリスタの高耐圧化

前記サイリスタバルブでは2,500 V素子が200個に近い直列数で構成されているので、サイリスタの高耐圧化が強く望まれてく

表2 10 kV サイリスタのおもな仕様

| 項 目 | 条 件 |
|---------------|---|
| ピーク線返し逆電圧 | 10,000 VP |
| ピーク非線返し逆電圧 | 10,000 VP |
| ピーク線返しオフ電圧 | 10,000 VP |
| 定格平均オン電流 | 250 A 180° 通電 |
| サージオン電流 | 3,500 A 50 Hz |
| ゲートトリガ電流および電圧 | 電圧 4 VDC 電流 300 mADC V _{A-K} =6 VPC |

る。サイリスタの高耐圧化は厚さ1mm以下のシリコン板に高い電圧を印加するので、この点から技術的にむずかしい問題が出てくる。シリコンの内部で高い電界強度を持たせることはさほど困難ではないが、問題は表面の安定化と電界強度の低減にある。このため表面の処理方法と形状につき種々の検討がなされている。日立製作所ではこの方面の技術の壁を突破する意味で10,000Vサイリスタの開発を行ない、CH99形サイリスタを試作した。この素子のおもな仕様は表2に示すとおりである。これらにより高耐圧化の技術は確立した。

一方、高耐圧に伴いPNPN接合の接合層の幅が厚くなっていく。また表面端部電界強度低減のため幾何学的形状に制約を生ずる。これらのため順電流特性およびスイッチング特性は次のような傾向を持つ。

- (i) 順方向電圧降下が大きくなる。
- (ii) サージ電流耐量が減少する。
- (iii) ターンオフタイムが増加する。
- (iv) ターンオンタイムが増加する。
- (v) di/dt耐量が減少する。
- (vi) 残留蓄積キャリアが増加する。

このような傾向はサイリスタバルブの構成上好ましくないもので、前記CH99形ではライフタイムの向上、ゲート構造の改良、接合構造の改良など種々の対策が施された。しかし耐圧の向上と上記の(i)~(vi)の傾向とは本質的に相伴うものである。サイリスタバルブ用のサイリスタとしてはこれらを総合的に検討し、バランスの取れた設計とすることが必要である。現状では4,000~5,000Vに最適な点があるのではないかと考えられている。しかしこれは単結晶の大口径化、素子製作技術の進歩、バルブ保護方式の改良などにより変わってくるものであり、今後さらに高耐圧化の方向に進むであろう。

2.4 今後の動向

現在、125 kV 37.5 MW サイリスタバルブの試験が佐久間試験所において進められており、サイリスタバルブの基本的な性能についてはこれによって逐次確認されていくであろう。今後のサイリスタバルブを考えた場合、大きな課題として次の2項が考えられる。

- (1) 大容量化
- (2) 高信頼度化

またコストの低減も大きな課題である。具体的な項目として次の諸項があげられる。

2.4.1 素子の大容量化

素子が大容量化すれば素子の直並列数が減少し、同時に分圧回路などの付属回路部品数も減少する。数十万キロワット級のサイリスタバルブにおいては並列数も数個程度になるので大容量化にあたっては耐圧のみならず、電流量の増大も効果がある。

2.4.2 簡潔な素子並列接続方式

バルブを大容量化する際、バルブを並列接続するのが最も容易

で確実な方式であるが、これでは大容量化に伴うスケールメリットは生じない。また逆に素子を直接並列に接続し、これを1個の素子として扱うことができれば、素子を大容量化したのと同じ効果があるが、素子特性のばらつきのため技術上問題がある。この二つの方式の中間的な方式も種々考えられるが、素子の歩どまりを考慮して最も経済的な方式を選ばなければならない。

2.4.3 油冷却方式

バルブが大容量化した場合、発生損失もそれに従って増大するので、効果的な冷却方式を採用してバルブの小形化を図る必要がある。また絶縁媒体として考えた場合油は空気に比べて、はるかにすぐれており、この点からも油冷却方式が採用されることになろう。油冷却方式とすれば屋外形とすることも容易である。誘電率の関係で対地ストレイキャパシタンスが増大するが、これは分圧回路で補償することができる。

2.4.4 素子直列数の低減と保護方式の開発

バルブの経済性を確保するためには素子直列数を減少することが有効である。このためにはバルブの絶縁レベルを低減しなければならない。したがってアレスタの放電開始電圧を下げなければならない。回路の絶縁協調とアレスタの特性をさらに検討しなければならない。

2.4.5 素子並列数の低減と保護方式の開発

交流側高速度短絡器を用いれば過電流除去後の素子の順電圧阻止能力の問題は解消する。したがってサージ電流耐量が増大したことと等しく、素子並列数を減少することができる。しかし系統の安定度と関連してくるので今後の検討が必要である。

2.4.6 バルブの信頼度と冗長度

バルブの運転信頼度を向上させるためには冗長度をある程度とることが必要である。これをいくらに選ぶのが最適かについては部品の信頼度、運転方法、定期点検の周期と停電時間などについて総合的な検討が必要である。

これらの問題については製作者単独で解決できるものもあるが、システムの面からの検討がぜひ必要なものもあり、関係各位のご指導、ご援助をお願いしたい。

3. 制御保護装置

3.1 制御保護装置の問題点

制御保護装置はサイリスタ変換装置全体と常に密接有機的に結合され、必要な制御保護動作を行なうものである。おもな動作がゲートの迅速な位相操作であり、制御性の良さと信頼度の確保が特に要求されるものである。代表的な制御保護装置の外観を図4に、主回路結線を図5に示す。以下おもな問題点について述べる。

3.1.1 ゲート制御方式

ゲート信号伝送方式としては光方式か電磁方式かが問題となる。光方式は絶縁が容易なこと、ノイズを受けにくいこと、立上りの速いパルスが容易に得られることなどの利点があるが、発光体の信頼度が問題となる。電磁式は絶縁が高くなるとパルス立上りが悪くなる欠点があるが、信頼性のうえからは現状では優位であろう。ゲート波形としては広幅パルス方式と狭幅パルス方式がある。広幅パルス方式では大きなゲート電力が必要となるが、特殊なサイリスタ保護回路は不要である。狭幅パルス方式ではゲート電力は小さくてよいが、直流電流断続時の特殊な制御保護方式の併用が必要となる。ゲート電力供給方式としては低圧から電動発電機などの出力を供給する方式とバルブ高圧主回路から供給する方式がある。前者は絶縁が問題となるが安定な電力が供給できる。後者は主回路ひずみ波形あるいは低電圧時にもじゅうぶんなゲート電力を確保することが問題となる。

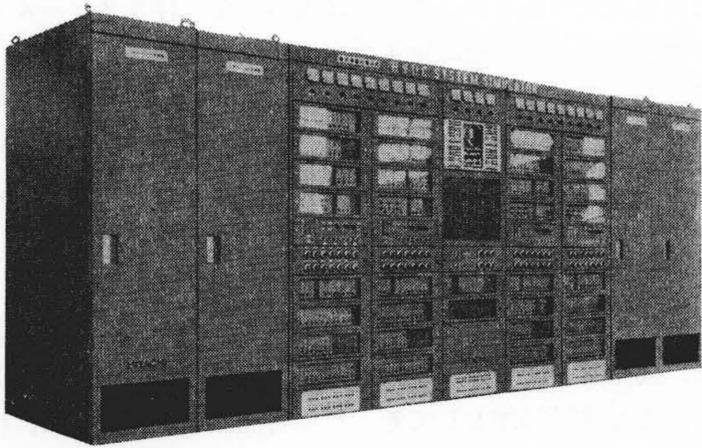


図4 基礎研究用変換装置シミュレータ

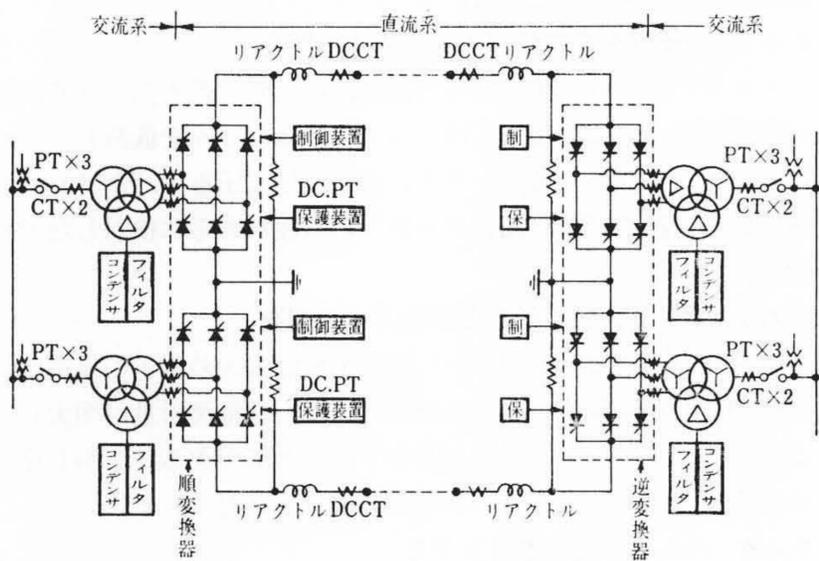


図5 サイリスタ変換装置制御保護装置と主回路結線図

3.1.2 位相制御方式

サイリスタバルブ点弧位相のばらつきは主変圧器の直流偏磁あるいは異常高調波発生の原因となるので、特に点弧角のそろったパルスを提供する必要がある。パルス位相制御は自動パルス移相器 (APPS) により行なわれる。この方式としては起動停止、潮流反転時などの複雑な点弧位相角制御を行なう場合制御性の良いものとして考えられるのが直線性 APPS で、これは制御電圧と点弧位相との関係が直線的のものである。さらに進んだものとして考えられるのがフェーズロック (phase lock) 方式、パルス間隔一定方式であり、これらは各バルブアームに対して1個の共通のパルス回路より供給するものである。前者は同期電源に同期して多相パルス発振を行ない各バルブアームに振り分ける方式である。後者は多相分のパルスの間隔が常に一定となるようデジタル的に処理制御するもので、両者とも同期電源ひずみの影響の小さいのが特長である。

3.1.3 サイリスタバルブアーム短絡保護

サイリスタバルブには逆弧がないのでアーム短絡はない。また多数個素子が直列となっていることならびに母線絶縁方式の進歩とから、事故によるアーム短絡もまず考えなくてよい。しかしこれを考慮に入れるとすればその保護方式はサイリスタバルブの経済性とも関連して重要である。

(1) 交流側短絡器による保護方式

短絡器はサイリスタバルブの交流側で強制的に三相短絡するもので、アーム短絡発生後 5 ms 程度以内には短絡を完了する必要がある。本方式は短絡器の開発、故障の検出方式と短絡器の信頼度保持が大きな研究課題である。

(2) 1 サイクルゲートブロックしゃ断器開放方式

アーム短絡時に1サイクルゲートブロックし、交流側からの電流を阻止ししゃ断器を開放する方式である。この場合1サイクルブロックの信頼性を確保し、常にゲートブロックにたよる方式とすれば過大電流は1サイクルのみ考慮すればよく、経済的なバルブ設計が可能である。ブロック失敗を考慮すると、しゃ断器開放までの過電流を考慮する必要があり、バルブは高価なものとなる。

3.1.4 高信頼度化

変換装置を構成するサイリスタバルブ、制御装置などは多くの電子部品より構成されるため高信頼度化が特に重要である。MTBF (平均故障間隔) 向上対策としては IC などの採用による部品点数の大幅な縮減、部品選別、多重化の採用など、MDT (平均故障時間) 短縮のため故障箇所早期発見の高度な自動点検システムの導入が必要である。

3.2 今後の動向

3.2.1 パルス間隔一定方式の開発

小容量交流系統に直流送電を適用するためにはバルブ点弧パルス位相をそろえて高調波を低減するとともに、同期電源ひずみに対しても安定な位相の制御パルスを供給する必要がある、このためのパルス間隔一定方式の開発が必要である。

3.2.2 系統制御装置の開発

サイリスタ変換装置の長所はゲート位相操作により迅速に系統制御(周波数制御, 安定度向上, 無効電力制御)ができる点にあり、計算機を用いた高度な系統制御装置の開発が望まれる。

3.2.3 伝送制御保護方式の開発

直流送電の場合、順変換器と逆変換器は互いに遠隔地点にあり、相互間の信号伝送が必要である。このための安定な伝送技術および新たな制御保護方式の開発が必要である。

3.2.4 自動監視装置の開発

サイリスタ変換装置の信頼性をあげるため変換装置の異常箇所を早期発見あるいは故障を予測し必要な処置をすることがきわめて重要となるが、このためのバルブ内部監視までを含めた高度な自動監視装置の開発が必要となる。

4. 変換装置用主変圧器・直流リアクトルその他

主変圧器・直流リアクトル・直流変流器・直流変圧器などの直流機器には共通した技術的問題があるが、基礎となる技術は交流電力用機器と共通している。日立製作所では、機器の大容量化・超高压化に対応し、これら基礎技術の研究・開発を積極的に進めてきている。本章では上記直流機器の技術的問題を概説し、その基礎技術の研究・開発状況について述べる。

4.1 絶縁

直流回路では、直流電圧および整流作用に起因するひずみ波に対する絶縁が問題となるが、直流については後章の各機器について詳論し、ここではコロナ特性について述べる。

たとえば三相ブリッジ結線の場合、対地電圧が線間電圧に等しく、制御角が90度付近の運転状態では、電圧のピークに転流振動電圧が重畳し、同一定格の電力用機器の常時対地電圧波高値の2~2.5倍 ($=\sqrt{3} \times 1.2 \sim 1.4$) の電圧となる。

90度付近の運転は起動・停止・潮流反転時に生じ、機会は少ないこと、また転流振動電圧は周波数が数キロヘルツでかつ数サイクルで減衰することを考えると、波高値は高いが絶縁に与える影響は少ない。しかし一方、毎サイクル発生する電圧に対し有害なコロナを発生しないことが望ましい。

このような意味から直流機器に対しては交流の超高压機器と同様、従来の交流1分間耐圧のほかに、コロナ試験が問題となってく

るので、次に示す対策を講じて、信頼性のある機器を製作している⁽²⁾。

- (a) 電界液槽法・半導体紙法による電界解析を行ない、高電圧課電部分の電界強度を適正值にする。
- (b) 絶縁バリヤを極力等電位面に沿って配置し、沿面方向電界を貫通方向電界に置き替える。
- (c) 油隙(ゆげき)寸法を冷却上許容できる範囲で極力細分化する。
- (d) 空調室内作業により、防じん、防湿を行なう。
- (e) 高真空排気装置により、除湿、ボイド除去効果を高める。
- (f) 注油後の熱油循環により、完全な油含浸と、防じんを行なう。
- (g) RIV法・ERA法などを併用し有害コロナのないことを確認する。

4.2 漂遊負荷損と温度上昇

一般に整流回路においては電流高調波が発生するが、これが機器に及ぼす影響およびその対策について述べる。

うず電流損などの漂遊負荷損は、損失の発生個所の材質・形状により異なるが、周波数の0.5~2乗に比例して増加し、そのため温度が上昇する。たとえば主変圧器の場合、運転条件・回路条件・材質形状により異なるが、高調波電流により漂遊負荷損は一般の交流変圧器の1.5~4.5倍程度に増加する。これを抑制するため、漂遊負荷損の発生個所およびその量を正確に把握(はあく)し、適切な対策を講ずることが重要であり下記のようにこれらを行なっている⁽³⁾⁽⁴⁾。

(a) 磁界計算

漏れ磁界は電流の作るベクトル・ポテンシャルを求め、HITAC 5020による計算を行なっている。これには円形線電流および無限長平行電流として扱う2方法があり、後者は曲率無視の近似で計算時間が短い。2方法は適用対象により使い分けられる。たとえばタンクへの漏れ磁束の影響を扱う場合は、前者を三次元で使用する。

(b) 非磁性体内の損失

たとえば無限長板のうず電流損は、無限長板についてうず電流を電界槽法などで求め、これをもとに理論式によりうず電流損を求める。

有限長板に適用する場合には一様な磁束分布はもちろんのこと一様でない分布に対しても磁束分布の変化に対する換算係数を使用して算出する。

(c) 磁性体内の損失

磁性体の場合は導磁率の問題から磁性体内の磁界解析がむずかしいので、磁性体にはいる磁界分布と損失の相関関係から損失を求める。

以上(a)~(c)およびリード線の漏れ磁界による損失などの基礎データを使用し、機器の漂遊負荷損を計算し、実測とかなりよい一致をみている。これをもとに内部構造物の適切な構造・材質を選択し、必要に応じ磁気シールドを活用して、漂遊負荷損の発生を抑制

している。

4.3 機械的強度

水銀バルブの場合には逆弧が多発し、主変圧器には多ひん度の相間短絡電流が流れ、過酷な使用条件に置かれるが、サイリスタバルブの場合には逆弧現象はない。しかし転流失敗などに対し発生機械力・巻線の機械的強度を把握し、機械的強度の大きい巻線構造の確立が重要である。

特に巻線の半径方向座屈強度については、従来一般に認められていた座屈計算式は、一部の巻線構造に対しては妥当性があるが、一般には過小評価する傾向のあることが数百種類にも及ぶモデル実験の結果判明した⁽⁵⁾。すなわち

- (1) 巻線座屈の際に弾性変形のみならず塑性変形が生ずる。
- (2) 軸方向振動の影響は、従来無視されていたが相当大きい。
- (3) 座屈応力は巻線平均ひずみにより大きく変わる。

などの事実を明らかにし、実験と理論的考察から妥当性の高い座屈基本計算式を開発した。また、同時に従来不可能とされていた大容量器の短絡試験も縮小モデル理論を確立して実施可能とした。

一方、軸方向強度についても、従来の静的な考え方と異なり、巻線と支持物を振動系として処理し、動的な変位、発生力の計算式を確立し、実測とよい一致をみた⁽⁶⁾。

このような技術開発の結果、機械的強度を正確に把握できるようになり、信頼性のある機器を製作している。

以上述べてきたほか、冷却、騒音などについても研究・開発を進めこれら基礎技術のうえに立って信頼度の高い直流機器の製作を可能にした。

5. 結 言

サイリスタ式交直流変換装置開発のため、長年にわたりかずかずの段階を経て、多方面にわたり研究、解決した技術的諸問題をサイリスタ、サイリスタバルブ・制御保護装置・変圧器などについて述べた。

日立製作所においては、上記の機器類のみでなく、総合したシステム技術とともに広く公的機関とも共同研究に努め、ご協力ご指導を得て今回のDC125 kV, 37.5 MWサイリスタ変換装置を完成したものであり、性能・信頼性・運転性において、従来の水銀整流器をしのぐ所期の実績をあげることを確認している。

また本文で述べたように今後の研究・開発の方向を定めて、信頼性ととも経済性においてもじゅうぶんに電力業界のご要望にこたえるよう、よりいっそうの努力を続けてゆく所存である。

参 考 文 献

- (1) 堀米孝：電気学会誌 90, 22 (10, 1970)
- (2) 栗田：電学連大シンポジウム (昭44)
- (3) 奥山ほか：日立評論 50, 154 (昭43-2)
- (4) 平石ほか：電学東支大 No.154 (昭45)
- (5) 平石ほか：日立評論 50, 153 (昭43-2)
- (6) 堀ほか：日立評論 50, 153 (昭43-2)