

佐久間サイリスタ変換装置試験所用装置の概要

Outline of Equipment for Sakuma Thyristor Converter Testing Station

杉本 光 昭*
Mitsuaki Sugimoto

加 藤 寧**
Yasushi Katô

栗 田 健太郎***
Kentarô Kurita

曾根田 瑞 夫****
Mitsuo Soneda

奥 山 賢 一*****
Ken'ichi Okuyama

横 山 謙二郎*****
Kenjiro Yokoyama

要 旨

直流送電用変換装置は従来水銀整流器であるが、これに代わるものとして、各国が競ってサイリスタ変換装置の開発を進めている。このような情勢下において 125 kV, 300 A, 37.5 MW の高電圧大容量サイリスタ交直流変換装置が開発され、目下電源開発株式会社の佐久間サイリスタ変換装置試験所において試用試験中である。この成果により国産技術による直流送電用サイリスタ変換装置の実用化の道が開けるものと期待される。ここでは日立製作所が分担製作した装置の概要を述べる。

1. 緒 言

かねてより開発を進めてきた高電圧大容量サイリスタ交直流変換装置 (37.5 MW, 125 kV, 300 A) を完成、昭和 45 年 8 月末に無事据付を完了した。その後官庁検査および検収試験を経て同年 11 月より好調に試用試験中である。

現在世界で運転中の直流送電設備には変換装置としてもっぱら水銀整流器が使われているが、安定運転上の欠点である逆弧現象が避けられず、これに代わるべきものとして最近進歩の著しい半導体技術を応用した高電圧サイリスタ変換装置を各国がきそって開発中である。幸にもわが国のサイリスタ素子製造技術の水準は海外に比べ遜色 (そんしょく) なく、これを使用する変換装置の実用化は大いに有望視され製作者および諸研究機関で個々に基礎的研究が進められてきた。しかしながら変換装置の実用化には多額の資金を要することはもとより、製作者の設備による研究試験のみでは不じゅうぶんで、さらに実際の電力系統に接続しての試験を必要とする。このような状況において、通産省の指導により財団法人機械振興協会 (機振協) の新機械普及促進事業の一環として高電圧大容量サイリスタ交直流変換装置 (HVC) が採り上げられた。計画の推進にあたり機振協に組織された HVC プロジェクト分科会 (委員長 山田直平氏) ならびに試用者である超高压電力研究所に設置されたサイリスタ試験研究委員会 (委員長 福田節雄氏) のご指導を得て、日立製作所はこのたび変換装置および付属機器の開発に成功した。この変換装置は同時に製作された東京芝浦電気株式会社製装置と接続し、275 kV, 60 Hz および 50 Hz 系における (1) 零力率試験 (以下 ZPF と略す)、(2) 返還負荷試験 (以下 BTB と略す)、(3) 50-60 Hz 連系試験の各試験により信頼度を実証し、国産技術による直流送電設備の実用化の道を開くものと期待されている。

以下に日立製作所の分担製作した変換装置の基本的事項の概要を述べる。

2. 基 本 事 項

2.1 仕 様

(1) 変換装置の仕様

(i) 変換装置の定格

* 日立製作所大みか工場
** 日立製作所機電事業本部
*** 日立製作所国分工場
**** 日立製作所日立工場
***** 日立製作所日立研究所

- | | |
|--|---|
| (a) 変換容量 | 37.5 MW |
| (b) 直流電圧 | 125 kV |
| (c) 直流電流 | 300 A |
| (d) 周波数 | 60 Hz (東芝 50 Hz) |
| (ii) 結線方式 | 三相ブリッジ
バイパスバルブは設置されない。 |
| (iii) サイリスタバルブの構成 | 順逆方向耐圧 2,500 V, 順方向定格電流 400 A の素子 192 個の直列接続よりなる。 |
| (iv) 運転方式 | 三相ブリッジ 1 組で、ZPF, 2 組を用いて BTB および 50-60 Hz 連系が可能である。 |
| (v) 最小負荷限界 | 定格変換電力の 15% 以下 |
| (2) 交流系統の条件 | |
| (i) 短絡容量 | 60 Hz 系 50 Hz 系 |
| 常時 | 4,000 MVA 2,300 MVA |
| 最大 | 4,500 MVA 3,000 MVA |
| 最小 | 2,000 MVA 1,000 MVA |
| (ii) 交流電圧 | 275 kV |
| (iii) 交流電圧変動 | ±6% |
| (iv) 周波数変動範囲 | +0.2~-0.5 Hz |
| (3) 運転制御ならびに保護 | |
| (i) 運転制御 | 順逆変換器は次の制御または動作を行なうことができる。 |
| (a) フローティング | |
| (b) 定電力制御 (順変換器は定電流制御, 逆変換器は定余裕角制御) | |
| (c) 潮流反転 | |
| (d) 起動・停止・再起動 | なお系統制御装置 (緊急潮流制御, 周波数比率制御など) からの信号を受けて所要の制御を行なう。 |
| (ii) 保護 | |
| (a) 変換装置および直流回路の故障は、バイパスバルブを使用せずに保護する。 | |
| (b) ブリッジのアーム短絡および直流出力端子の短絡時には、変換装置をブロックするか、交流しゃ断器を 4 サイクルでしゃ断する。 | |
| (c) 直流リアクトルを通した短絡時には、変換装置をブロッ | |

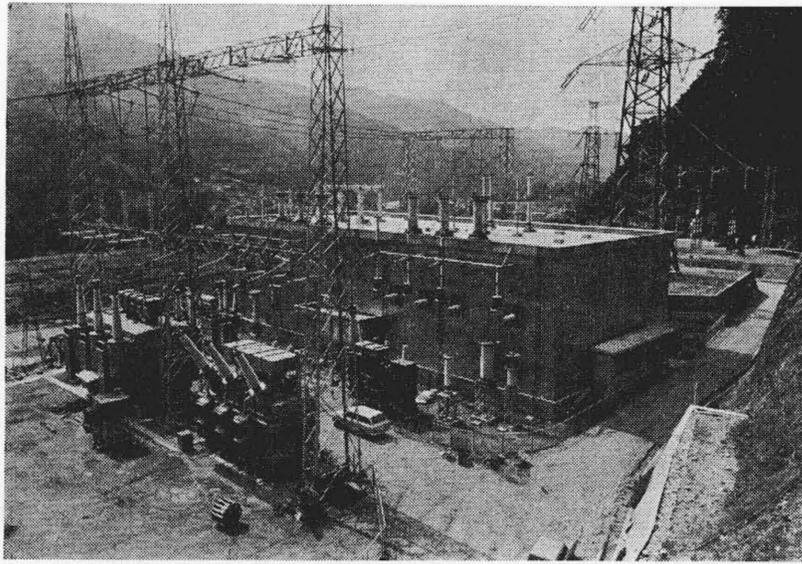


図1 サイリスタ変換装置試験所

表1 試験項目一覧表

	項目	条件	備考
1 工場試験 1970年 6月～8月	① 低圧通電試験	2～3 kV 300 A 通電	
	② 高圧零力率試験	110 kV 10～25 A 通電 60 Hz	150 MVA 短絡発電機使用
	③ ゲートブロック試験	4.6 kV 50 Hz 300 A 通電	アーム短絡を人工的に発生させ、ゲートブロック能力を検証した。
	④ BTB 試験	4.6 kV 50 Hz 100 A 通電	10 kV 100 A サイリスタ変換器と組んでBTBを行ない、潮流反転、定電力制御を行なった。
	⑤ 耐電圧試験	① AC 耐圧試験 ② AC コロナ試験 ③ DC 耐圧試験	
2 予備調整試験 1970年 9月～11月	① シーケンス試験		
	② 耐圧試験	① 275 kV 側 ② 110 kV 側および 直流側 ③ 3.3 kV 側	
	③ 充電開閉試験	佐久間発電所の発電機によるてい昇加圧	
	④ 零力率試験	275 kV/110 kV 300 A 通電	開ループ試験によりバルブの動作を確認し、定電流制御試験により制御装置の調整を行なう。
3 試用試験 1970年11月～ 1971年9月	① 零力率試験	275/110 kV 300 A 通電 60 Hz	
	② BTB 試験	275/110 kV 300 A 通電 60 Hz	
	③ 50-60 Hz 連系試験	275/110 kV 50-60 Hz 300 A 通電	

クする。

- (d) 転流失敗時には1サイクル以上の自然回復を待ち、回復しない場合は変換装置をブロックする。

(4) 絶縁仕様

- (i) 変換用主変圧器二次側機器
 - (a) 一次側 1,050 kV (1×40 μs) および 870 kV の開閉サージ (200×1,000 μs) の二次移行電圧に耐える。
 - (b) 直流側内部異常電圧に耐える。
- (ii) 避雷器との関連において、主変圧器、サイリスタバルブ、直流リアクトル、直流側機器間のじゅうぶんな絶縁協調を図る。

図1はサイリスタ変換装置試験所の鳥瞰図を示したものである。

2.2 試験計画

工場試験、現地での予備調整試験、試用試験があるが、表1はその具体的内容を示したものである。

実規模級変換装置の工場試験は、ほとんど等価試験にならざるをえないと思われるので、今回は極力現地と同じ構成で試験を行ない、将来の等価試験計画に備えることにした。

電源として150 MVA、60 Hzの交流発電機を使用した。このインピーダンスは、現地よりはるかに大きい値なので、きわめて過酷な条件で試験を実施したことになり、制御回路フィルタの効果を確認することができた。

ゲートブロック試験は、6モジュールのブリッジとし、これをABBで、アーム短絡して直流出口短絡を起こさせ、保護動作とゲートブロック能力を確かめた。また工場試験のBTBは、主として変換装置の逆変換動作を確認するもので、定電流、定余裕角制御、潮流反転制御を確認した。

予備調整試験における大きな課題は、超高圧系統のもとで、複雑な電子回路と誘導ノイズとの関連を究明することであるが、アレスタ放電時、しゃ断器投入しゃ断時のノイズを測定し、じゅうぶん支障のない値以下に抑制されていることが明らかとなった。

直流送電用変換所の重要な問題点の一つにラジオノイズ対策がある。変換装置が導通状態になる瞬間に、急激な電位変化が起こるので、このときバルブから直接放射するノイズと、変圧器の漂遊キャパシタンスを通して流れる高周波電流に起因するノイズが発生する。これに対し、前者はバルブそのものまたはバルブ室をシールドすることにより後者はブロック装置によりそれぞれ抑制される。

ラジオノイズに関しては、工場試験、現地試験により支障のない値に制御されていることが確認された。

3. 構成機器の概要

3.1 構成機器

表2は構成機器の仕様一覧表である。

表中No.1～3までは機械振興協会の買上げ分、No.4～15まではメーカーの分担分である。

3.2 主回路構成

図2は全体結線図を示したものである。図中60 Hz側は日立の分担、50 Hz側は東芝分担、275 kV側交流しゃ断器、開閉器、電位変成器(PD)は電源開発株式会社が分担した。

275 kV側は佐久間発電所と佐久間周波数変換所(以下FCと略す)の連絡線の途中から分岐している。主変圧器の一次側には交流しゃ断器、PD、避雷器などが接続されており、サイリスタのゲート用同期信号はPDからとられている。

主変圧器の二次から、ラジオ周波ブロック用線輪(BC)壁貫きブッシングを経てバルブ室にはいり、再びBCを経てバルブの交流端子に接続される。バルブ交流端子と大地間にラジオ周波ブロック用結合コンデンサおよび結合フィルタ(BF)が接続される。バルブ室内の6台のサイリスタバルブはブリッジに結線され、その直流出力端子からBC、壁貫きブッシングを経て屋外に出る。そこで再びBCを経て、直流リアクトルに至る。これは電流平滑と転流失敗時の過電流を抑制する。直流リアクトルの反対側のブッシングから直流変流器(DCCT)を経て、東芝側の回路に接続される。

主変圧器の二次回路には、端子大地間に避雷器3台と計測用分圧器(VD)3台が接続されている。また端子と直流出力端子間に避雷器3台が接続されている。さらに直流出力端子と大地間に直流ギャップおよび直流電圧変成器(DCPT)が接続されている。直流ギャップは直流側の異常電圧吸収用で特に続流しゃ断能力は持たず、これ

表2 構成機器一覧表

No.	機器名	仕様	単位	数量
1	サイリスタバルブ	DC125 kV 300A, 37.5 MW	台	6
2	絶縁変圧器	20 kVA 三相, 200/200V 100号	台	1
		20 kVA 三相, 200/200V 10号	台	1
3	制御装置		式	1
4	主変圧器	46.6 MVA 275/110/3.3 kV インピーダンス 19% タップ調整 275 kV ±11% タップ数 23		
5	直流リアクトル	DC 125 kV 300 A インダクタンス 0.8 H (300A) 2.0 H (30A)	式	1
6	直流巻線側避雷器	140 kV 用	式	6
7	直流ギャップ	DC 125 kV 用	式	1
8	直流変流器	300 A/0.1 A 100号 1台 300 A/0.1 A 10号 2台	式	3
9	直流変圧器	±DC 125 kV/±4 kV	式	1
10	分圧器	AC 110 kV/110 kV	式	3
11	ラジオ周波ブロック装置	AC110 kV用 DC125 kV用 (1組は BC 2台 CC 1台 BF 2台からなる)	組	4
12	電動発電機	40 kVA	台	1
13	壁貫きブッシング	AC110 kV用, DC 125 kV用	本	4
14	配電盤		式	1
15	パイロットワイヤリレー盤		式	1

が動作すると直ちに検出器により検出してサイリスタ変換装置のゲートをシフトしたのちブロックする。直流電圧は直ちにゼロとなり続流はカットされる。一定時間後に自動再起動する。

サイリスタバルブのゲート電源には、クレーマ形交流発電機を使用し、系統動揺時あるいは所内電源の瞬時停電時にも安定なゲート電力を確保するようにしてある。

配電盤は主変圧器一次、二次の監視保護、制御盤はサイリスタ変換器の制御保護を行なう。このほか3端子方式のパイロットワイヤリレー盤があり 275 kV の保護を強化している。制御装置の信頼度向上のために IC を使用し部品の点数を減らしている。

4. 絶縁協調

4.1 被保護機器の耐圧と避雷器

機器の耐圧についてサイリスタ試験研究委員会で検討の結果、直流側開閉インパルス耐圧 400 kV が与えられた。これを保護する避

雷器は変圧器最高タップ比、電圧変動率、一線地絡時の電圧上昇率などを考慮し、定格電圧 140 kV が選ばれた。放電電圧と保護レベルの間に 15% の裕度を見ると放電電圧の上限は 340 kV で、この関係は緩波頭領域まで保たなければならない。放電電圧の下限は転流振動電圧を考慮して決定しなければならないが、一般の交流避雷器の交流放電開始電圧は定格電圧の 1.5 倍以上であり、これらを勘案して放電電圧の下限は 250 kV とした。

制限電圧は変圧器二次側設置の避雷器であることから放電電流 5 kA にて 340 kV とした。

4.2 避雷器設置場所の検討

4.2.1 避雷器端子電圧と絶縁回復特性

通常の交流系統に使用される場合との大きな相違点は転流振動電圧と呼ばれる過渡電圧が交流の各サイクルごとに発生することである。このために転流振動電圧波高値を定格電圧波高値とみる方法もあるが、ここでは続流しゃ断後の絶縁回復特性と端子電圧との比較で避雷器の動作特性を判定することにした。これで見ると今回使用した避雷器は続流しゃ断後 4 ms 内で交流放電電圧の 90% 以上の絶縁回復特性を有することがわかっているの、交流放電電圧波高値は 300 kV 以上であれば良い。今回製作した避雷器は図3に示す放電特性を有しているの、じゅうぶん所期の目的を達することができる。なお転流振動電圧領域では 400 × 1,200

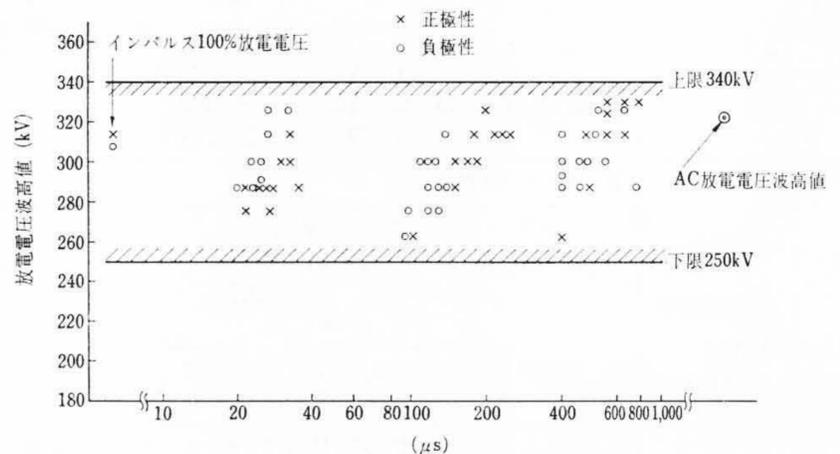


図3 直流巻線側避雷器の衝撃波から緩波頭領域までの V-t 特性

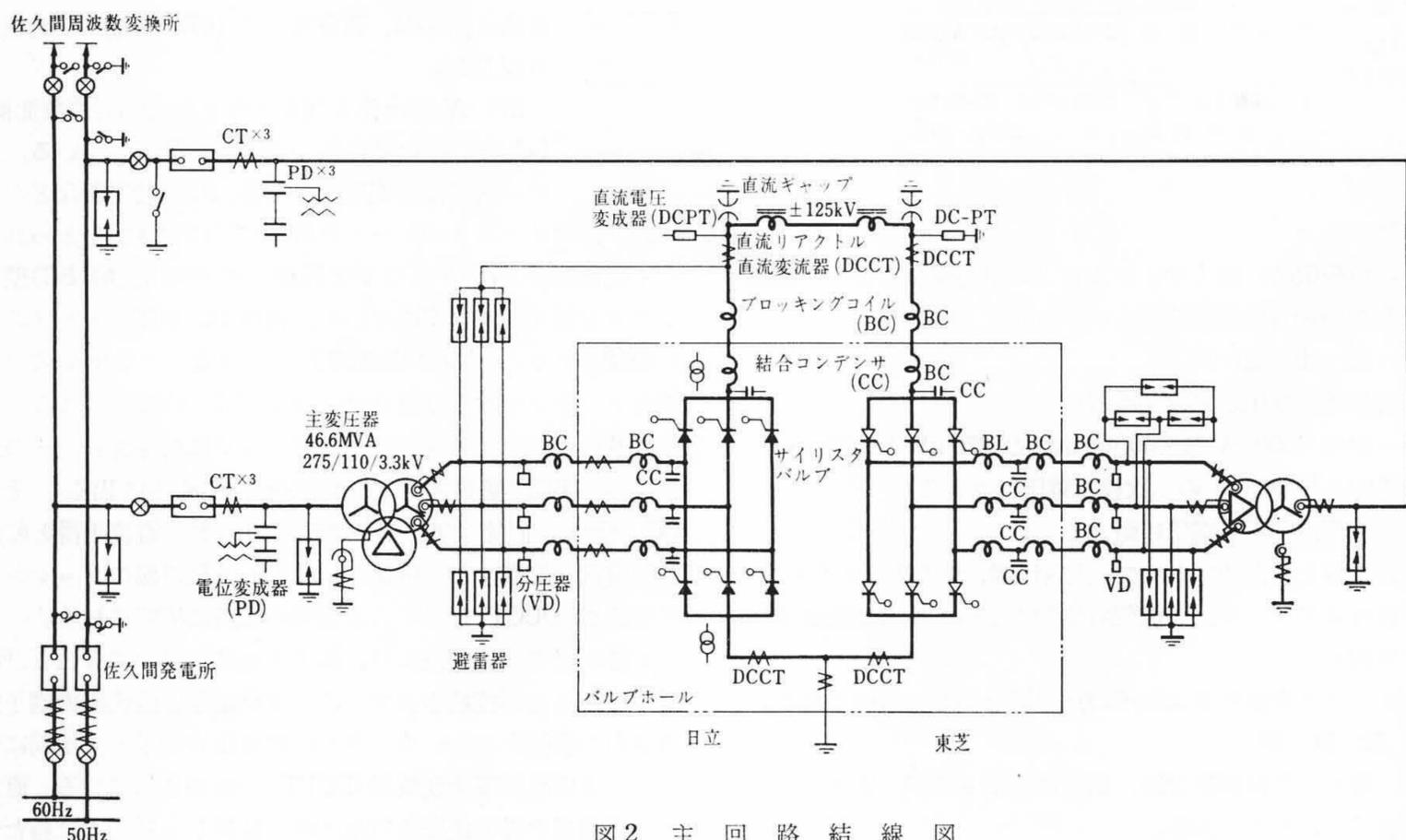


図2 主回路結線図

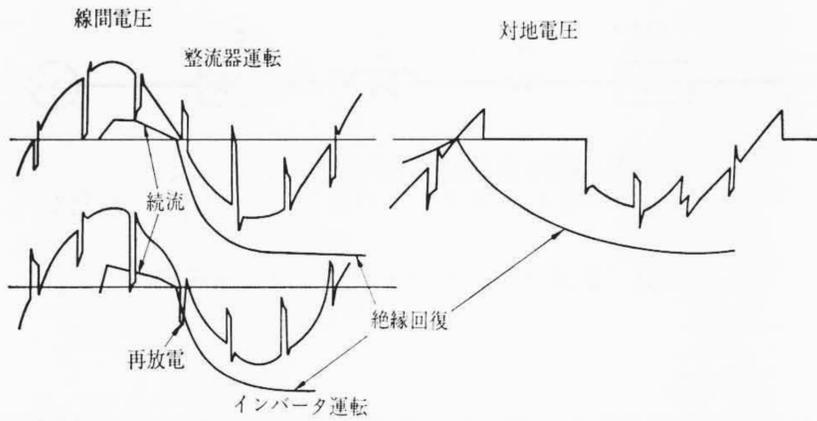


図4 端子電圧波形と絶縁回復

μs の緩波頭を220~290 kVの範囲で1,900回印加し、260 kV以下での放電確率がゼロであることを確認した。

4.2.2 避雷器設置場所

当初二次側避雷器は対地および線間に設置する予定であったが、対地避雷器端子電圧はほぼ 120° の電圧零期間があるため動作責務上はむしろ望ましいのに対し、線間避雷器についてはインバータ運転時に避雷器が動作した場合、図4に示すように避雷器の絶縁回復を上回る電圧が続流しゃ断直後に現われるような運転条件もある。この場合避雷器は再放電して続流しゃ断不能となる。このことから、その動作電流を検知してバルブをブロックすることも考えられたが、むしろサイリスタバルブの積極的保護を目的としてバルブ端子間に避雷器を接続したほうが電圧零期間があるため避雷器責務上も信頼性が向上することを考慮し、対地およびバルブ端子間に避雷器を設置することとした。

この場合、続流しゃ断後にバルブ通電中の電圧降下分の電圧が印加される影響については動作責務試験で問題無いことが確認された。また変圧器相間保護については従来の交流系統と全く同じに考えられるのであるが、初めての装置でもあり、一応種々の異常電圧について以下述べるような検討を加えた。

4.3 変圧器二次側の異常電圧

本装置は構成上直流側が外雷を直接受けることがないので、直流機器への直接の雷撃を考慮する必要はない。したがって線路雷撃波の主変圧器を通した移行電圧、あるいは開閉サージ、事故時の発生サージが絶縁検討上対象となる異常電圧である。また転流振動電圧も重要な要素である。

4.3.1 雷サージ

(1) 模擬回路による解析

主変圧器を通して二次回路に移行したサージ電圧に対する保護をここでは変圧器二次端子からサージを印加して模擬回路で検討し、別に移行電圧を解析して両者から総合判断することにした。

まず二次回路のみでの解析から避雷器放電電圧以下の侵入電圧の場合は波頭長が $1 \mu\text{s}$ ではバルブ端子で侵入電圧より約18%の電圧上昇、 $5 \mu\text{s}$ 以上の波頭長に対しては侵入電圧と同じである。次に避雷器動作を伴う高い侵入電圧の場合についてブロッキング回路定数の影響も含めて解析したのが図5であり、波頭長 $3 \mu\text{s}$ 以上ならば400 kV以下に押えられ、ブロッキング回路の影響も L_0C_0 の小さいほうがバルブ端子のはね上がりが小さめであるがその差はわずかである。

(2) 移行電圧

変圧器単体での移行電圧は事前に計算で求めることが可能であり⁽¹⁾、これによれば印加電圧の41%が移行することになるのに対し、測定値は43%である。二次回路が接続された場合については図6の単相等価回路に基づいて計算され、図7がその結果と測定波形を比較して示したものである。

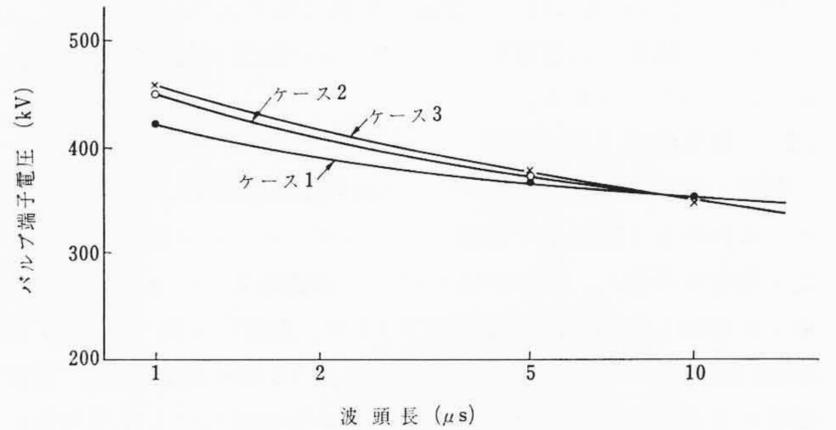


図5 ブロッキング・コイル回路定数を変えたときの侵入波頭長とバルブ端子電圧

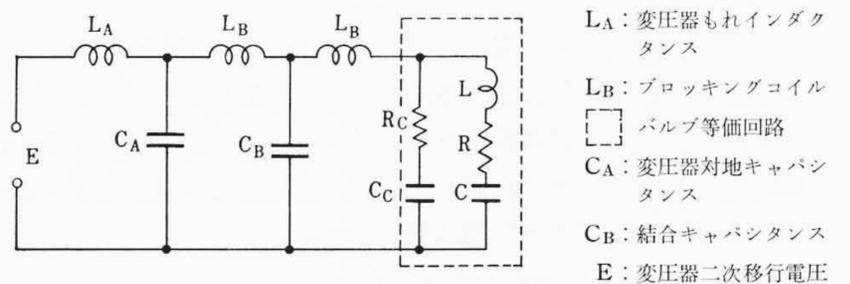


図6 二次回路を考慮した等価回路

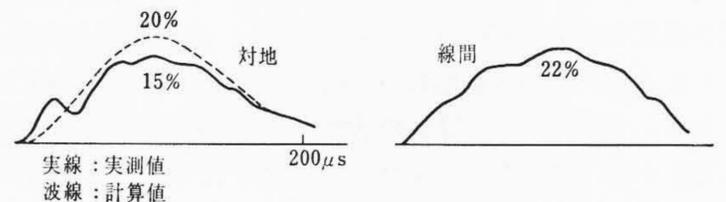


図7 移行電圧波形

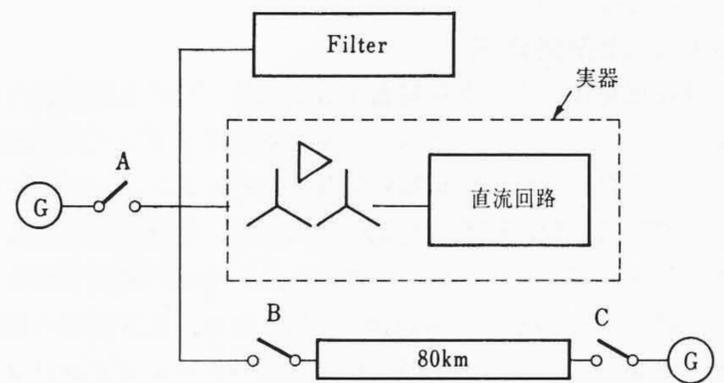


図8 線路投入サージ実験回路

そのほか緩波頭波印加についても解析し、雷サージに関して二次側の絶縁協調のとれていることを確認した。

4.3.2 開閉サージ

(1) 線路しゃ断器によるサージ

線路しゃ断器によって発生するサージを確認する手段として主変圧器以後は実器構成のままとし、275 kV側に図8に示す模擬回路を接続し、模擬しゃ断器の開閉による発生電圧を測定した。ここではサージ発生倍率の高い投入サージを検討対象とし、開放後30 ms前後内で、かつ各相のばらつきを5 ms以内として最大サージが発生するように投入した。

この実験結果では佐久間発電所が開放された状態で、名古屋変電所で高速度再投入したときの異常電圧が最も高く、275 kV側対地で3倍、相間で2.2倍、110 kV側対地で2.2倍、相間も2.2倍となった。これは予想していた対地 2.8 倍、相間 $1.6 \times 28 / \sqrt{3}$

=2.6 倍に比べ対地はほぼ予想値，相間は低めとなった。

これらの結果から変電器，バルブともに耐圧に対して裕度のあることが明らかである。

(2) 無負荷変圧器の開閉

既設の佐久間周波数変換所には高周波吸収用のフィルタがあり，これらと主変圧器の励磁インピーダンスとの共振などの異常電圧発生を予想し，模擬回路を用いて励磁投入，しゃ断時の異常電圧を検討した結果，不揃投入で 1.7 倍，正常しゃ断で 1.5 倍，電流截(さい)断による異常しゃ断でも最大 1.6 倍が得られた。電流截断による異常電圧の計算と上記結果から判断しても常規対電圧波高値の 2 倍を越えるサージ発生は無いと判断された。これは完成後現地で実測した結果でも 1.6 倍でほぼ予想どおりであり，この種サージに対しても懸念する点はない。

(3) 断路器開閉サージ

断路器開閉時の異常電圧については 70~220 kV 回路で実測した例があり，これによると断路器負荷側と電源側の対地キャパシタンスの比率および電源インピーダンスにより影響を受けるが，断路器負荷側で交流波高値の約 2 倍，電源側では 2 倍以下であることが確認されており問題は無い。

4.3.3 短絡または一線地絡時のサージ

バルブは高い電圧上昇率 (dv/dt) に敏感なので，三相模擬回路を用い，二次側各点で短絡または地絡を発生させてバルブ端子での電圧上昇率を検討した。これらの実験から最も過酷な条件は U 相が通電中に 340 kV のサージが侵入し，直流側がその値に充電されたときに V 相の接地側で地絡を生じた場合で，約 300 kV/ μ s となる。またサージ計算盤の結果から避雷器が放電して制限電圧に電圧が降下する際，バルブ端子にはやはり約 300 kV/ μ s の電圧上昇率がみられた。

以上の点を考慮し，400 kV，1×40 μ s 波のインパルス試験を行なってバルブ耐圧を確認し，今後の直流送電用としてのインパルス耐圧にも確信が得られた。

4.3.4 転流振動電圧

転流振動電圧の大きさを左右する要因の一つに主変圧器の漂遊キャパシタンスがあり，これがバルブ内のダンピング回路定数を決める。したがって主変圧器の漂遊キャパシタンス，バルブのダンピング回路定数，転流振動電圧の大きさ，絶縁協調の考え方は機器重量をも左右する重要なものである。今回の装置では転流振動電圧は当初の設計どおりほぼ 1.3 倍となり，主変圧器の漂遊キャパシタンスのとり方およびこれに基づいたバルブダンピング回路の設定，さらに絶縁協調設計の適切なことが確かめられた。

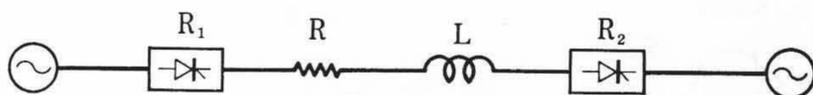
4.3.5 そのほかのサージ

インバータ側でシーケンスブロックした場合の最大上昇電圧も 10 kV シミュレータを用いて実験し，高調波フィルタのあるときのほうが高いが，約 1.8 倍程度で問題ないことを明らかにした。また整流器運転としての工場での実器組合せ試験で直流側の起動停止時の異常電圧も測定したが異常は認められなかった。

転流期間にバルブにサージがはいった場合を考えても，分圧さえ確保されておれば転流開始前からサージが印加されている場合に最も高い電圧が素子に加わることになり，この条件で問題ないようにしてあるので支障はない。

4.4 直流回路の保護

直流リアクトルの保護としては ODBR-110P 形避雷器を使用し，動作報知器で動作を検知し，保護継電器と連動してバルブをブロックさせ，端子電圧を零とし再使用可能な状態に復帰させる構成にしてある。なおこのために復帰に至るまでの間の耐量を試験により検証しじゅうぶん信頼性のあることを確認した。



R_1, R_2 順逆変換器の転流リアクタンス
 L, R 直流リアクトルのインダクタンス, 抵抗値

図9 直流送電線を含まない交直連系系統

以上のように変圧器二次回路の機器保護に対してはバルブ端子間に所定性能の交流避雷器の設置，直流回路に対しては保護ギャップによる方式で絶縁協調を図っている。

5. 順逆変換器系の安定限界

5.1 状態方程式

順逆変換器系の機器の仕様は，変換容量，故障電流，系統インピーダンス，系統電圧，周波数，直流電流の断続限界などから決定されるが，これらの機器を含む全システムが安定に運転できるかどうか検討しておく必要がある。

本プロジェクトのシステムの安定度については次のようにして検討した。

- (1) 順逆変換器系の制御特性を線形近似し，状態方程式を立て，ルースフルピッツの判定条件から安定限界を求める。
- (2) DDS (Digital Dynamic Simulation) により過渡特性を検討する。
- (3) 変換器シミュレータにより，静特性，過渡特性を検討する。ここでは特に(1)の安定限界について考察する。

図9は直流送電線を含まない交直連系系統を示している。

簡単のために制御系は一次おくれで近似し，かつ変換器の動作点付近では線形であるとする。

$$E_{d1} = E_{d01} \cos \alpha - R_1 I_d \dots\dots\dots (1)$$

$$E_{d2} = E_{d02} \cos \delta - R_2 I_d \dots\dots\dots (2)$$

$$L \frac{dI_d}{dt} + R I_d = E_{d1} - E_{d2} \dots\dots\dots (3)$$

$$\cos \delta = \cos \gamma + \frac{2R_2}{E_{d02}} I_d \dots\dots\dots (4)$$

$$T_2 \frac{dE_{c1}}{dt} + E_{c1} = K_1 (I_{d\beta} - I_d) \dots\dots\dots (5)$$

$$T_3 \frac{dE_{c2}}{dt} + E_{c2} = K_4 (\cos \delta_\beta - \cos \delta) \dots\dots\dots (6)$$

$$\alpha = -K_2 E_{c1} \dots\dots\dots (7)$$

$$\gamma = -K_5 E_{c2} \dots\dots\dots (8)$$

(1)~(8)式を線形化し，これを整理すると状態方程式(9)が得られる。

$$\begin{pmatrix} \dot{I}_d \\ \dot{\alpha} \\ \dot{\gamma} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_d \\ \alpha \\ \gamma \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ k_1 & 0 \\ 0 & k_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta I_{d\beta} \\ \Delta \cos \delta_\beta \end{pmatrix} \dots\dots (9)$$

図10は状態変数線図を示したものである。

- ここに， α, γ : 順逆変換器の制御角 (度)
- E_{d1}, E_{d2} : 順逆変換器直流出力電圧 (kV)
- E_{d01}, E_{d02} : 順逆変換器無負荷直流出力電圧 (kV)
- I_d : 直流電流 (A)
- $I_{d\beta}$: 定電流制御系の基準値 (A)
- $\Delta I_{d\beta}$: 定電流制御系の基準値の微小変化
- $\cos \delta_\beta$: 定余裕角制御系の基準値
- $\Delta \cos \delta_\beta$: 定余裕角制御系の微小変化
- $\dot{I}_d, \dot{\alpha}, \dot{\gamma}$: I_d, α, γ の微係数

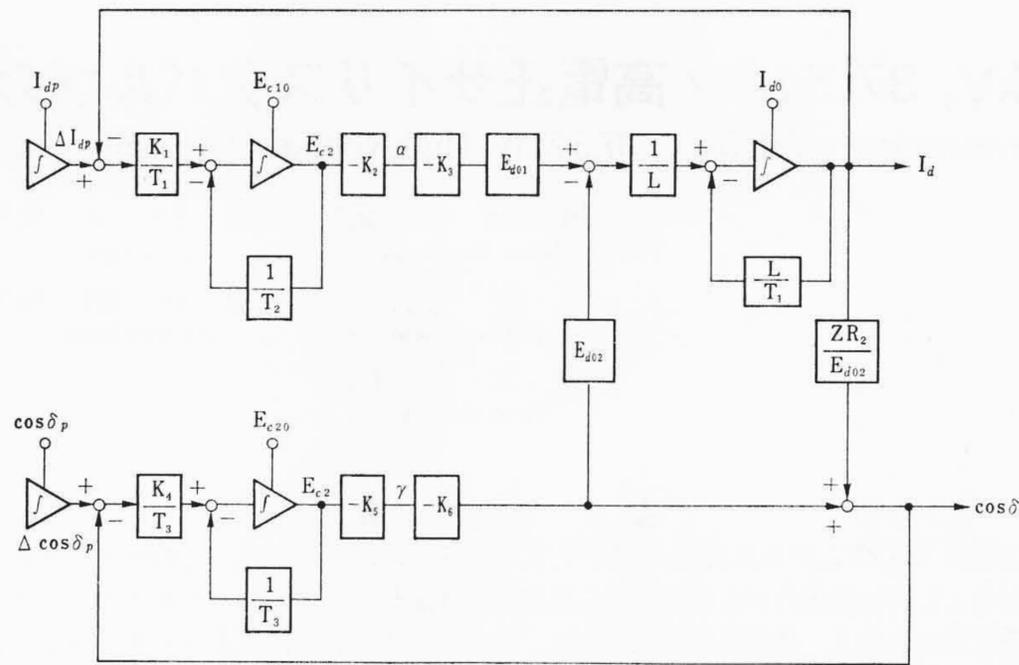


図10 状態変数線図

T_1 : 主回路時定数 (s)

$$T_1 = \frac{L}{R_1 + R_2 + R} \quad (s)$$

T_2 : 定電流制御系の時定数 (s)

T_3 : 定余裕角制御系の時定数 (s)

E_{c1}, E_{c2} : 順逆変換器の位相制御電圧 (V)

$K_1, K_2, K_3, K_4, K_5, K_6$: 各制御ゲイン

$$a_{11} = -\frac{1}{T_1}, \quad a_{12} = -\frac{K_3 E_{d02}}{L}, \quad a_{13} = \frac{K_6 E_{d02}}{L}$$

$$a_{21} = \frac{K_1 K_2}{T_2}, \quad a_{22} = -\frac{1}{T_2}, \quad a_{23} = 0$$

$$a_{31} = \frac{2R_2 K_4 K_5}{T_3 E_{d02}}, \quad a_{32} = 0, \quad a_{33} = -\frac{K_4 K_5 K_6 + 1}{T_3}$$

$$k_1 = -\frac{K_1 K_2}{T_2}, \quad k_2 = \frac{K_4 K_5}{T_2}$$

5.2 安定条件

(9)から推移行列を、 $\Phi(s) = (SI - A)^{-1}$ とする。

ここに、 $A \equiv [a_{ij}]$, S は演算子、 I は単位行列である。

$(SI - A)$ の S の根の実数部がすべて負であると、系は安定である。

$$(SI - A) = \begin{pmatrix} s - a_{11} & -a_{12} & -a_{13} \\ -a_{12} & s - a_{22} & 0 \\ -a_{31} & 0 & s - a_{33} \end{pmatrix} = 0 \quad \dots\dots (10)$$

これから安定条件を求めると、

$$\frac{1}{T_1} + \frac{1}{T_2} - \frac{2R_2}{L} > 0 \quad \dots\dots (11)$$

が得られる。

(11)から $(R_1 + R)$ に比べて逆変換器の等価内部抵抗が大きいと(11)が満足しなくなり安定範囲が狭くなる。

本プロジェクトの場合は、

$R_1 = 56\Omega$, $R = 8\Omega$, $T_2 = 0.1s$, $L = 2H$ とすると、(11)から限界 R_2 は、

$$R_2 = R_1 + R_2 + \frac{L}{T_2} = 84\Omega \quad \dots\dots (12)$$

$$\frac{R_2}{R_1} = 1.5 \quad \dots\dots (13)$$

となる。東芝側とのインピーダンスの差は、この値以内にはいっており特に問題はない。

6. 結 言

高電圧大容量サイリスタ変換装置の開発について、基本事項、仕様、試験計画、構成機器、絶縁協調、順逆変換器系の安定度について述べた。

計画の過程では、10 kVサイリスタ変換装置、600 V変換器シミュレータなどを駆使して、サイリスタ変換器の基本動作、異常現象の解明を行ない、保護動作を確認して装置設計に反映させた。また絶縁協調についても、サージアナライザによる異常電圧の予測とか10 kVサイリスタ変換器による人工地絡実験により、各部異常電圧を予測するなど慎重な実験を重ねた。これは各分野の力を結集してはじめてなすうるものである。さらに、本プロジェクトを今日あるまでもってこられたのは、パルプの開発については電子技術総合研究所の電力技術グループ、制御保護については電力中央研究所の電力技術グループの長年にわたるご指導と、佐久間周波数変換所の計画と運転に深い経験を有する電源開発株式会社の技術グループの惜しみないご協力のたまものである。

本変換装置は目下、電源開発株式会社を中心に協定8社が協力し合って試用試験中であるが、計画にあたって予想し解決した諸問題を含めて、変換装置の信頼度の検証がなされ、実用化への道が開けるものと期待している。

参 考 文 献

(1) 池田, 奥山: 変圧器移行電圧算出法 昭43 電学東京大 No. 160