

電源開発佐久間周波数変換所の概要

桑 原 進*・竹之内達也*

General Aspect of Sakuma Frequency Converter Station of The Electric Power Development Co.

The Electric Power Development Co., Susumu KUWAHARA・Tatsuya TAKENOUCHI

High voltage DC transmission technology was first developed in Sweden. In the year 1961 tie-lines of 160MW were laid over the Anglo French Channel for commercial operation. The Electric Power Development Company, realizing that the DC transmission technique is applicable to frequency conversion equipment, set out to construct a Sakuma Frequency Converter Station for the purpose of tying via direct current the eastern power system at 50 cycles and the western at 60 cycles, the difference of which is a fatal drawback in this country. The station is slated to enter into commercial operation in this fall. The apparatus installed are unprecedented in this country and also the largest as AC to DC conversion equipment in the world. Description is made herein on DC machines as the major topics.

1. ま え が き

わが国の電力系統は本州中央部を境として、東は 50 c/s, 西は 60 c/s に統一されている。これら二つの地域内は北海道を除いて、すべて超高压で系統連系されており、昭和 40 年末の系統容量は、50 c/s 系が約 11,000 MW, 60 c/s 系が約 16,000 MW になることが予想されている。

佐久間周波数変換所は、これら両サイクル系統を直流によって直接連系することを目的として、電源開発株式会社が建設している設備で、その概要は下記のとおりである。

場 所 静岡県磐田郡佐久間町

出 力 300 MW

電 圧 AC 275 kV

DC ± 125 kV

着 工 昭和 37 年 4 月

運転開始予定 昭和 40 年 11 月

周波数変換所は佐久間ダムとして知られている電源開発会社の佐久間発電所の近くであって、ここで変換されて 50 c/s あるいは 60 c/s の電気は AC 275 kV の送電線によってそれぞれ東京および名古屋地区の大系統と連系されている。図 1.1 はこれらの系統との関連を示すものである。

周波数変換所建設の利点を概略列記すれば下記のとおりである。

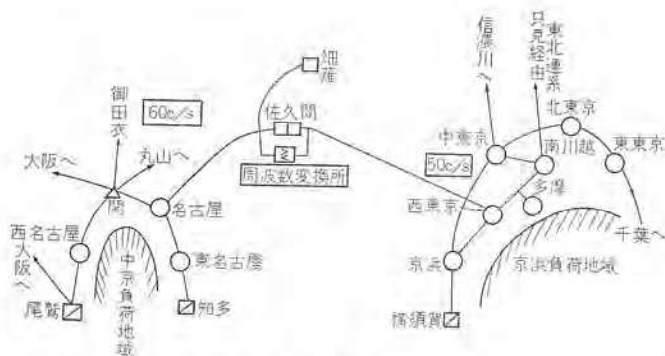


図 1.1 関連系統図

Fig. 1.1 GHV power system showing the position of Sakuma Frequency Converter Station.

(1) 現在の両サイクル切替用の発電所容量は約 300~400 MW といわれるが、火力開発が急速に進み、また系統容量も急激に膨張してきているので、両サイクル間の電力融通をこれら切替発電所のみでまかなうには量的に十分でなくなってきた。

(2) 両系統の直接連系により膨大な運転予備力の節減が図れる。一例として昭和 43 年の節減量は約 380 MW といわれ、この量は系統拡大とともに大きくなる。

(3) 一方のサイクル系統の発電能力に脱落があった時、緊急に他サイクル系統より応援すれば、事故系統の周波数低下をかなり防止できることとなり、事故波及を避けられる。たとえば横須賀火力 340 MW が脱落した場合、50 c/s 単独系統の場合は 0.33 c/s の低下が、両サイクル連系をすれば 0.14 c/s の低下にとどまるであろうことが試算されている。

以下には変換所の設備概略を直流機器などの特殊な問題に重点をおいて紹介したい。主要変圧器、バルブ冷却水設備、交流回路保護方式などは他の論文を参照されたい。

2. 周波数変換装置

周波数変換装置は 50 c/s, 60 c/s 側にそれぞれ 2 群の 125 kV 150 MW の交直変換装置を有するもので、図 2.1 に単線接続図を示す。この図において $V_1 \sim V_4$ に示しているバルブ群は 6 相 グレーツ接続されており、いわば装置の中心である。通常の運転においては DC リアクトルの中点は電圧は 0 であり、 V_1 と V_3 の間および V_2 と V_4 の間の母線に DC 125 kV が発生する。直流送電の場合には整流器側、インバータ側は離れた 2 点にあるのでこの装置の場合のごとく整流器、インバータを交互に直列接続するわけにいかず幾分複雑になる。

一方海外の直流送電の概況を示したものが表 2.1 であるが、佐久間は出力においても最大級に属し、大いに世界の注目のまとなっておりところである。図 2.2, 2.3 に機器配置図と全景写真を示した。

3. バルブ (水銀整流器)

バルブは並列の 4 陽極を有し、6 相 グレーツ結線で 1,200 A の定格電流が得られる。定格電圧は 125 kV である。バルブの大略の大き

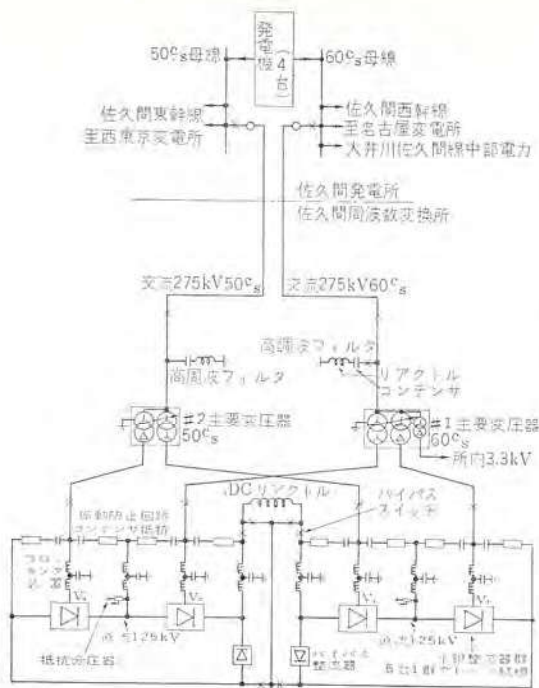


図 2.1 単線接続図
Fig. 2.1 Single line connection diagram.

表 2.1 世界の高压直流設備

	ゴットランド	ドンパ スオール ガグラ ード	英仏海峡	ニュージ ーランド	イタリー サルデー ニア	コンテ イスカ ン	佐久間 50-60 c/s	カナダ バンクー バー	米国太平洋沿岸 連系	
									ダレス ロスア ンゼルス	ダレス ミード
送電電力 (MW)	20	700	160	600	200	250	300	312 (78)	1,440	1,440
交流系統電圧 (kV)	130 30	220 220	275 225	16 110	220 380	130 150	275			
直流電圧 (kV)	100	±400	±100	±250	200	250	±125	260 (130)	800	800
直流電流 (A)	200	900	800	1,200	1,000	1,000	1,200	1,200		
直流電圧 / パルス幅 (kV)	50	100	100	125	100	125	125	130		
無効電力	同期調相 機電力用 コンデン サ	同左	電力用コ ンデンサ	同期調相 機電力用 コンデン サ	同左	同左	電力用コ ンデンサ	—		
直流送電線 (架空) (km) (ケーブル)	— 97	470 —	— 65	580 40	350 98	43 80	母線のみ —	41 28	1410	1410
送電方式	1 線大地 帰絡	—	2 線	2 線	1 線大地 帰絡	同左	—	—		
運転開始年	1954	—	1961	1965	1965	1965	1965	1968 (1967)	1968	1971

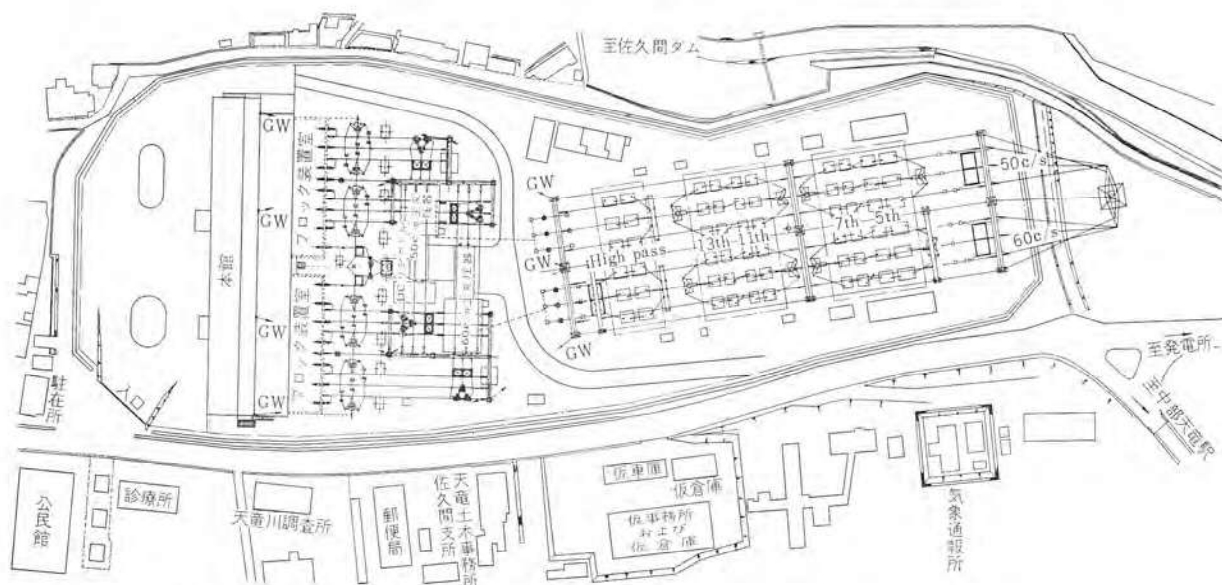


図 2.2 機器配置図
Fig. 2.2 General arrangement of machines.

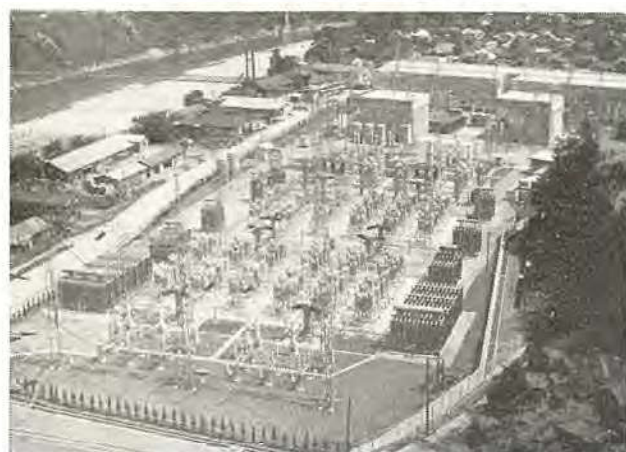


図 2.3 全 景
Fig. 2.3 Complete view of Converter Station.

さは長さ 340、高さ 320、幅 120(cm) で、重量は約 4 トンである。バルブは背圧として補助真空タンクを有する水銀ポンプによって常時排気され、通常内部ガス圧を 0.001 mm Hg 以下に保つ。補助真空タンクの真空度は使用中に次第に悪くなってくるので、定期点検時などに可搬式の真空ポンプで真空度をあげてやる必要がある。

佐久間に使用されたバルブは英仏直流連系に使用されたバルブとほとんど同じ形であるが、冷却装置が著しく異なっている。すなわち、英仏連系用は陽極および陰極タンクとも空気で冷却しているが、佐久間においては陽極部分の冷却は空気を使用しているが、陰極タンクの部分は純水を使用している。バルブ全体は高圧部分にあって大地より絶縁されており、純水は絶縁チューブによってバルブ本体に供給されている。陽極冷却用の空気はバルブ室よりファンによって陽極柱に送り込まれ、またバルブ室に排気される。バルブ

室は全体が温度、湿度調整されている。

陽極柱には陽極の他に多数の中間電極が納められ、これらは陽極柱の外部に設けられている CR 分圧器に接続されている。CR 分圧器は無通電期間中の陽極と陰極間の電圧分布を均等にするためのものである。CR 分圧器には、また保護用のギャップがあり、アーク切れなどの異常電圧に対しては放電して分圧器を保護する。

バルブの付属品として陽極電流分流器、陽極リアクトルおよび陰極リアクトルが分離しておかれる。分流器は 2 個以上の陽極が並列して使用される場合に万一陽極の一つだけに通電されれば、他の陽極の電圧はアーク電圧降下だけとなり、他の陽極を点弧するには不十分となるので、これを防ぐために設けられたものである。

陽極リアクトルは転流時新たに点弧したバルブの電流立上りをなめらかにするためのもので、この値が適切を欠くと、電流立上に振動電流が重畳し、合成電流が点弧初期において再び 0 点を切り、アークの消滅をまねく。振動の様相は変圧器および導体などの C の値によっても影響を受ける。この意味で回路のこれらの C はなるべく小さい方が好ましい。陰極リアクトルはまったくラジオ障害防止対策を目的とするものである。

図 3.1 はバルブ室に据え付けられているバルブを示す写真である。



図 3.1 バルブ Fig. 3.1 Valves.

4. 直流リアクトル

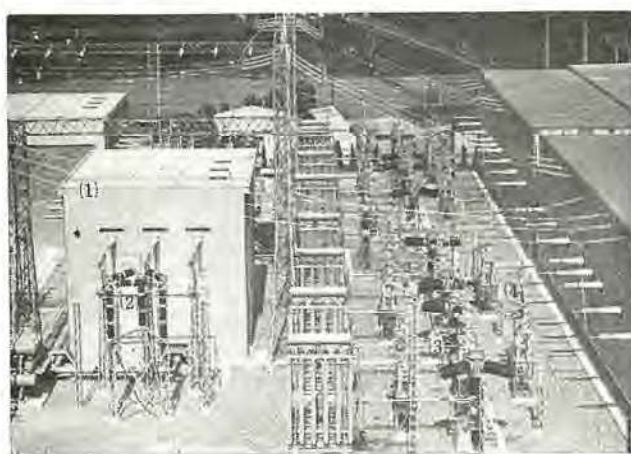
直流リアクトルは直流主回路のちょうど真ん中、150MW の 2 極の間にあり、定格電圧 DC 125 kV、定格電流 DC 1,200A である。直流回路のインダクタンスが十分大きくない場合、制御角が大きく直流電流が小さい時、直流電流が不連続となることがあり、安定な制御を行なううえで好ましくないため、十分大きいインピーダンスが必要である。またこれによって直流電流の振動、異常時の電流変化率、波高値を抑制し、転流失敗などのバルブ事故の発生を防止する。構造は外部ヨークに積層銅板を使用した空心で、DC 100A で 1H、DC 500A 以上で 0.4H のインダクタンスを有する。

直流リアクトルについての騒音は従来の実測例が乏しいので推定が難しいが、佐久間においては人家も近くにあるので二重防音カー方式を採用し、冷却装置も送油風冷式とした。

5. その他の直流用機器

5.1 振動防止回路

振動防止回路は前掲の図 2.1 に示すとおり、バルブの陽極と陰極間に接続されている抵抗とコンデンサの直列回路より成り立っている。この目的は転流時アーク消滅したバルブの陽陰極間に発生する振動電圧を抑制してバルブ動作の安定を計るためである。しかしながら、このような過渡振動電圧はなお相当に高い値となるので、とくに変換装置を起動するとき、あるいは潮流を逆転するときなどには制御角はほぼ 90 度近くの電気角になることもあり、飛躍逆電圧も定常運転時よりも著しく大きくなるので、変圧器その他機器の絶縁設計、機器などの内部、外部のコナ、あるいは有機絶縁材料の誘電体損の増加などの考慮がなされなければならない。振動防止回路のコンデンサは 45,000 pF、抵抗は 2.4 k Ω である。図 5.1 は直流回路部分を示す写真であるが、振動防止用抵抗、直流避雷器、および主要変圧器用建屋を見ることができる。



(1) 主要変圧器建屋 (2) 直流巻線用アレスタ
(3) ダンピング用抵抗 (4) キャパシタ
(5) ブロック装置室

図 5.1 屋外直流回路部分

Fig. 5.1 Part of outdoor DC circuit.

5.2 直流用避雷器

主要変圧器バルブ巻線端子の対地間および相間にそれぞれ 1 組直流 125 kV 母線に 1 組、および直流リアクトル保護用としてその端子間と対地間にそれぞれ 1 組設置されている。直流避雷器の端子の電圧波形は常に一方向性であって、電圧は 0 点に達しない。英仏連系の変換所などにおいては避雷器の放電をリレーで検出し、整流器群をブロックして続流シャ断を行なわせる方針が採用されているが、佐久間においては避雷器自体の続流消弧能力を特別に強くして、強制的に続流をシャ断するいわゆる直流避雷器となっている。

6. 無効電力および高調波フィルタ

変換装置の制御遅れ角は 15°, 余裕角は 50 c/s 側は 17°, 60 c/s 側は 19° となっている。このため下記の無効電力が必要であることが計算される。

	順変換器	逆変換器
50 c/s	147 MVA	153 MVA
60 c/s	166 MVA	181 MVA

無効電力の供給方法としてはもちろん同期調相機および電力用コンデンサのいずれも利用できる同期調相機を利用すれば無効電力

の連続的な調整ができるが、コンデンサに比べて高価であり、損失も多く、また高調波電流に対して耐える設計が必要である。これに対してコンデンサを使用すれば高調波フィルタの一部として利用でき、転流作用を改善するなどの利点が大いだが、無効電力の調整ができず不便である。いずれにしても一長一短があり、結局同期調相機とコンデンサを両方設置すればきわめてよいが経済的でない。佐久間においてはフィルタ用コンデンサとして所要無効電力の約2/3に当る90MVAをおき、不足分は近くの発電機よりの供給または系統側よりの供給に期待することとしている。

変換装置より発生する高調波電流の次数は $kp \pm 1$ である。 p は整流相数で、佐久間の場合1極運転(150MW)の場合は $p=6$ であり、2極運転(300MW)の場合は $p=12$ である。したがって高調波電流としては5, 7, 11, 13, 17, 19, ...が発生することとなる。実際にはこのほかに制御角の不均衡、変換器群間の不均衡などによってその他の次数の高調波も発生するが平衡状態がよければ問題とするには当たらない。フィルタとしては図6.1に示すとおり、第5, 7, 11, 13調波用の帯域フィルタと第17調波以上に対する高域フィルタを設けた。それぞれ、L, C, Rの三要素によって構成されている。図6.1には各要素の定数と各分路の進相容量を示している。

フィルタ特性は常時の周波数変動範囲ではできるだけ抵抗性であることがのぞましく、 $Q \approx 50$ として定数を選定している。LおよびCともに製作誤差があるので正確に同調点を調整できるようにコンデンサにタックが設けられている。フィルタ電流は周波数変動および系統の高調波インピーダンスによって大きく変化する。系統の高調波インピーダンスはきわめて複雑で、また系統の構成によっても変化する。したがってフィルタ電流の周波数変動に対する変動状況も非常に複雑である。フィルタの高調波電流の設計値は周波数変動、系統の変化などを考慮して決定されている。

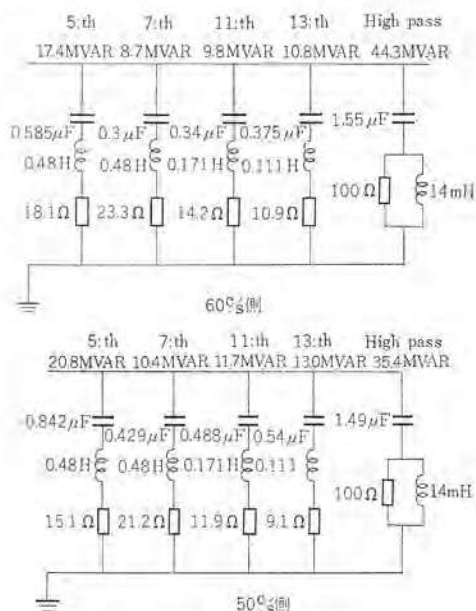


図 6.1 フィルタ定数

Fig. 6.1 Constants of filter elements.

7. 運転および保護

7.1 定電流制御

変換装置の制御は基本的には定電流制御によって行なわれる。すなわち順変換装置側は電流設定値と測定値の比較によって点弧

角 α を制御し電流制御を行なっている。逆変換装置側はさらに電流余裕値を入力として加え、平常運転においては余裕角一定制御を行なう。直流電圧は逆変換装置の逆起電圧としてきまる。

一方、順変換装置の交流側に電圧降下が生じた場合は電流制御は逆変換装置に移り、その点弧角 β の制御にまかされ直流電圧は順変換装置によってきまってくる。逆変換装置の制御電流は設定電流値より常に電流余裕値だけ小さくされている。

図7.1には電圧-電流特性を示すが、点Aは平常運転の場合で、電圧は逆変換装置特性によって決定され、電流は順変換装置の特性によって決定されるが、順変換装置の電圧が降下すれば点Aは点Bに移り、今度は電圧は順変換装置で決定され、電流は逆変換装置により決定されることを示している。

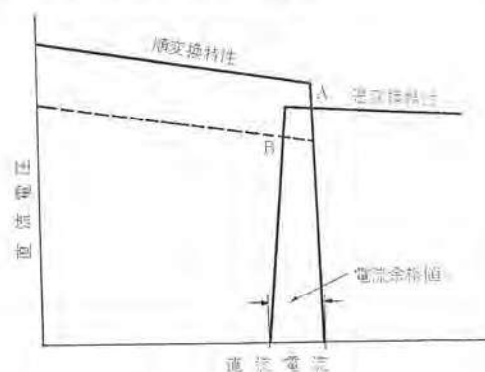


図 7.1 電圧-電流特性

Fig. 7.1 Voltage-current characteristic of converter.

実際の運転は定電力制御で行なわれるが、この場合は電力の設定値と電圧測定値より所要の電流を求め、これと電流測定値を比較して α および β を制御して電力が常に設定電力になるように制御する。英仏連系のような直流送電では制御用の通信回線が必要であるが、周波数変換では順逆変換装置が1個所にあるので通信回線は必要でなく簡単になる。

通常の運転状態においては制御角 α の運転範囲は $10 \sim 20^\circ$ であり、 α がこの範囲を越える場合には変圧器タップ位置を自動的に変えて α をこの範囲内に保つようにしている。また逆変換装置の余裕角は60c/s側で約 19° 、50c/s側で約 17° である。したがって直流電圧は交流側電圧の変動に応じて変動するので、直流電圧に $125kV \pm 3\%$ といった制限を設け、これをはずれた場合は変圧器タップによって調整してこの範囲内に入るようにしている。

7.2 運転

変換装置は2極よりなり1極はパルプ12台とバイパスパルプ1台より成る。1極の定格は150MWで1極だけによる運転も可能である。1極運転の場合は停止される方の極はバイパススイッチによって短絡される。変換装置は普通2極運転とする。2極運転は12相運転となり、1極運転の場合の6相運転よりも高調波電流が少なく有利である。

電力設定スイッチは電力方向別に一つずつあり、0MWから300MWまで20MWステップに設定できる。整定速度は50MW/secであってかなり早い。最低電力は変換装置定格の約1割でこれ以下の電力設定値に対しては電流は0となり、通電しない。常時の潮流方向の変更はその時の潮流設定を0とし、逆方向電力設定を任意に選べば行なわれる。

この他緊急応援電力設定スイッチが設けられており、0, 100, 200, 300MWのタップを任意に選べる。これにより緊急時の送電また

は受電電力を事前に設定しておけば、緊急応援電力指令によって常時運転はただちに切り換えられ、緊急応援電力が送電される。緊急応援はその電力方向は正であっても逆であっても任意に変えられる。応援の時間約 0.5 秒である。

7.3 保護

逆弧は整流器においては偶発するものといわれ、陰極タングの過熱、陽極の過冷などによって発生し易くなるが、その発生原因は明確でなく完全に防ぐことはできない。

逆弧発生の場合にはこれを交直電流を比較して検出した場合に故障極の通電をブロックし、バイパスパルプに一時的に電流を移して 1 極運転とする。そしてブロック成功後ある時限を経て自動的に再開路を行ない定常運転に戻す。したがって一時的には変換電力が半減するが交流系統への影響は少ない。ただし逆弧電流が一時ブロックによってシャ断されない場合には、交流側シャ断器を開く。また逆弧が再開路時に再発生するような場合はブロック、再開路を何回か繰り返す。3—4 回目には故障極を永久ブロックし、1 極運転に自動的に移行させる。

交流系統故障時は電圧変動のため一定余裕角制御が間に合わず転流失敗になる場合がある。転流失敗は電流も異常に大きいことはなくまた次の転流の機会に回復する性質があるので普通は放置され回復を待つ。そして転流失敗が継続する場合には初めて故障極を一時ブロックする。

直流回路の保護としては過電流検出によって故障極をブロックし、接地検出によって交流側シャ断器を開放する。

直流機器の保護は従来の交流機器と同様に温度、油流、ガスリーなどが付けられ、故障機器側の運転極を永久ブロックする。

パルプの補機電源は励磁電流、格子 バイパス 装置、陽極空気 ファン、水銀 ポンプなどに使用されているので、電源故障の場合はただちに運転を停止しなければならない。補機電源の電圧降下の許容限度は定格の 60% までで正常運転が可能である。

8. ラジオ障害

変換装置より発生するラジオ障害としては、

- (1) アーク点弧時にパルプより直接ツク(輻)射される障害波と、
- (2) 屋外開閉所導体に流れる高周波振動電流波によるツク射障害波の二つが考えられる。

(1) のツク射波は建物をシールドすることによって障害を防止できるが、佐久間の場合は民家がごく近傍にあるのでとくに厳重なシールドを行なう必要があった。シールドは建物の内側に鉄板を張る

とか、コンクリート内部に金網を入れる方法で行なった結果、50—60 dB の減衰を得ることができた。(2) の屋外開閉所からのツク射に対しては屋内外の境界で導体に高周波防止装置をおいて屋外開閉所に高周波電流が流れないようにしなければならない。このためコイルとコンデンサの組み合わせによるブロック装置をおき、これをアルミメッシュで構成したシールド室においた。以上の方策を取って結果としては非常により障害防止効果を得ている。現在の所、ラジオ、テレビおよび無線通信などにあたえる障害はない。

9. むすび

佐久間周波数変換所は今年 4 月に機器の据付を終わり、5 月より試運転に入った。試運転は初期の段階においては返還負荷法で実施できるが、大部分は両サイクル系統を連系して、実際に潮流を変換装置に通して行なわなければならない。潮流の確保については各電力会社の積極的な協力を得ることができ、予定どおりのスケジュールを達成できたことは感謝に耐えない。またわが国はもとより、世界でも新しい方式であり、不明の点も多く、途中で設計変更をしたものもあり、試運転の途中において重大な困難に会うことも覚悟していたが、それもなく、ほぼ順調に試運転を 9 月上旬に終わった。変換所は予定より幾分早く 10 月中旬には営業運転に入れるものと思われる。

直流送電は新しい技術であり、今後その応用分野も開けてくるものと思われるが、佐久間周波数変換所の建設と運転によってわが国のこの方面における技術の進歩にいささかなりとも貢献できれば幸いである。とくに三菱電機は主要変圧器をはじめ国内製作機器の主要部分を多数受けもったもので関係者の努力に謝意を表する次第である。

参 考 文 献

- (1) 電力中研：両サイクル連系問題委員会報告書 37 年 5 月
- (2) C. Adamson & H. G. Hirgorani: High Voltage Direct Current Power Transmission (1960)
- (3) 雑誌 Direct Current (1952)
- (4) Hans Witt Insulation Levels and Corona Phenomena on HVDC Transmission Lines (1961)
- (5) 電気協同研究会 直流送電専門委員会
高電圧直流送電 協同研究, 9, 5 号
" " 12, 1 号
" " 19, 6 号