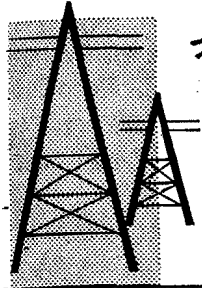


UDC 621.314.261: 621.311.49



技術総説

佐久間周波数変換所

桑 原 進

1. 緒 言

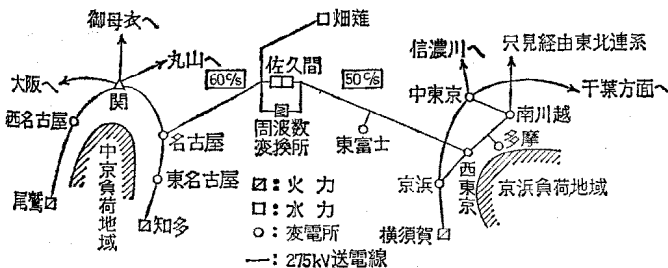
わが国の電力系統は本州中央部を境として、東は 50 c/s、西は 60 c/s に統一されている。これら二つの地域内は、北海道を除いてすべて超高压で系統連系されており、昭和 40 年末の系統容量は、50 c/s 系が約 11,000 MW、60 c/s 系が約 16,000 MW になることが予想されている。

佐久間周波数変換所設備は、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た設備で、その概要を示せば下記のとおりである。

場所 静岡県磐田郡佐久間町（佐久間発電所付近）

出力 300 MW

電圧 交流 275 kV



第 1 図 関連系統図

桑原 進：電源開発株式会社工務部長兼佐久間周波数変換所建設担当

直流 ± 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、佐久間発電所から約 1 km 離れた地点にあり、交流 275 kV 送電線（50 c/s、60 c/s 各 1 回線共架）1.7 km によって佐久間発電所に接続し、これよりもさらに既設佐久間東幹線および西幹線によって、東京および名古屋の大系統と連系されている。これら系統との関連を示せば第 1 図のとおりである。

佐久間周波数変換所による両サイクル連系の利点について概略を述べれば、下記のとおりである。

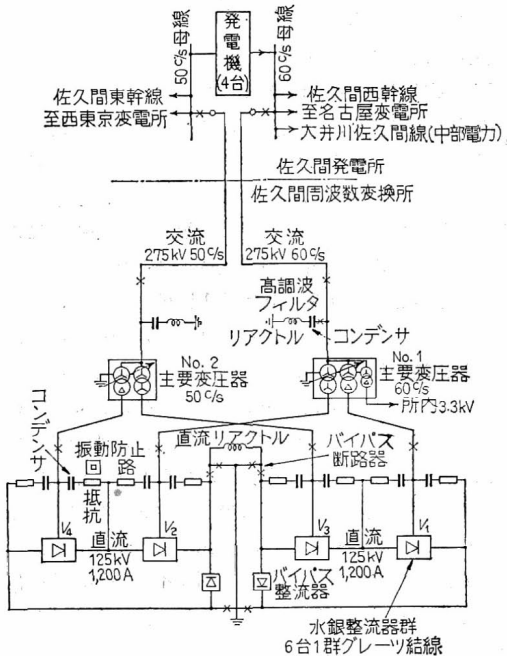
(1) 両サイクル設計発電所の切り換えは 300 MW ないし 400 MW といわれているが、発電所切り換えには数分から 15 分程度を要し、また系統運用上の制約を伴うが、直流連系にはこのような欠点がない。しかも火力開発が急速に進み、全発電力に新鋭大火力の占める比率が逐次大きくなり、両サイクル発電所の出力だけをもって融通をはかることは、量的にも不じゅうぶんになりつつある。

(2) 運転予備力の節減について試算した結果は、一例として、全国的にみて昭和 39 年約 290 MW、昭和 43 年約 380 MW の予備力の節減がはかれることを示している。

(3) 一方のサイクル系統の発電力の脱落があった場合、緊急に他サイクル系統から周波数変換設備によって応援すれば、事故系統の周波数低下をかなり防止できることになり、事故波及を避けられる。試算の結果は、一例として昭和 39 年度の系統で 50 c/s 単独系統の場合、横須賀火力 340 MW の脱落に対し、系統サイクルはピーク時 0.33 c/s、軽負荷時（40% 負荷）0.83 c/s の低下が、直流連系すればそれぞれ 0.14、0.35 c/s の低下に押えられることを示している。

2. 周波数変換装置

周波数変換設備は 50 c/s、60 c/s 側にそれぞれ 2 群の ± 120 kV、150 MW の交直変換装置を有するもので、主要変圧器、交流フィルタ、ブリッジ接続された水銀整流器群、直流リアクトルその他の交流および直流の付帯設備からなりたっている。第 2 図に単線接続図を示す。この図から 50 c/s、60 c/s の水銀整流器群 1 組ずつ（たとえば V_1 および V_3 ）が直列接続されて、共通のバイパス



第2図 単線接続図

整流器1個、バイパス断路器1個とともに150 MWの変換器1極を構成し、直流リアクトルを介して、対称にほかの1極(V_2 および V_4 からなる)と直列接続されていることがわかる。また通常の運転においては、接地点と対応する直流リアクトルの中点は電圧0であり、 V_1 と V_3 の間および V_2 と V_4 の間の母線に直流125 kVが発生する。50 c/s→60 c/s送電の場合はこの点の電圧は正になるが、60 c/s→50 c/s送電の場合は負になることに注意されたい。このように50 c/s, 60 c/sの整流器群を交互に直列接続するのが離れた2地点間を直流送電する場合と異なる大きな点で、これによってバイパス整流器およびバイパス断路器を半数にすることができ、制御装置も(V_1, V_3)および(V_2, V_4)の組合せとして考えられるので単純になる。

佐久間においては、発電所の母線と変換所の間が送電線で約1.6 kmであるので、交流しゃ断器は発電所側だけに置き、変換所側には置かなかった。変換所の所内電力はすべて60 c/sで供給することにし、60 c/s主要変圧器に4,500 kVAの所内変圧器を内蔵している。さらに停電時に備えて、発電所所内とは3.3 kV動線で連絡されており、予備的に発電所所内発電機から受電できるように考慮されている。

第3図に全景写真を示し、第4図にその変換所全体の機器配置図を示す。

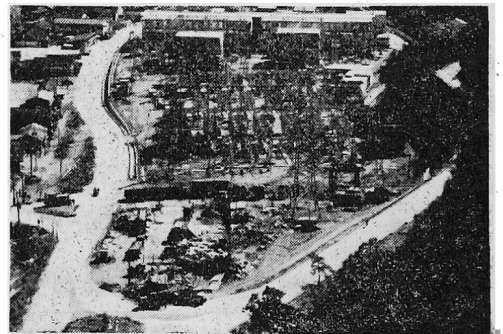
3. 水銀整流器

整流器は並列の4陽極を有し、六相グレート結線で1,200 Aの定格電流が得られる。定格電圧は125 kVである。整流器のおよその大きさは、長さ340 cm、高さ320 cm、幅120 cmで重量は約4 tである。

整流器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 mmHg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、定期点検などに可搬式の真空ポンプで真空度を上げてやる必要がある。

佐久間に使用された整流器は英仏直流連系に使用された整流器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、陰極タンク部分の冷却には純水を使用している。整流器全体は高圧部分にあって、大地から絶縁されているので絶縁スパイラルチューブによって10 kΩ・cm以上の純水を供給している。水の温度は整流器入口において $32 \pm 1^\circ\text{C}$ に制御されている。ただしバイパス整流器は $40 \pm 2^\circ\text{C}$ である。陽極冷却空気は整流器ホールから扇風機によって陽極柱に送り込まれ、また整流器ホールに排気される。陽極空気温度は $75 \sim 110^\circ\text{C}$ に保持される。整流器ホールの温度は、 $0 \sim 30^\circ\text{C}$ に制御されなければならない。そのため整流器ホール全体の温度調整設備を有している。

陽極柱には、陽極のほかに多数の中間電極が収められ、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分圧器の目的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ものであるが、逆電圧波形には直流分から高い周波数までの成分を含み、また回路の漂遊キャパシタンス、変圧器の漏れリアクタンスなどの影響を受けるので、その値の



第3図 変換所全景

低く多くの点ですぐれている。これに変圧器の $\Delta-\Delta$ 、 $\Delta-Y$ 接続による相差を利用し 12 相整流を行ない、高調波電流の減少をはかっている。各変圧器の諸元は第 1 表に示した。 $\Delta-\Delta$ 変圧器と $\Delta-Y$ 変圧器を同一タンクに収納してすえ付面積縮小、重量減少による経済効果をねらった。変換用変圧器としては初めての大容量器であり、次のような点に問題があった。50, 60 c/s 連系用であるため、両サイクルの干渉、各整流器制御角の不均衡、系統側の不均衡などにより変圧器直流側に直流分が残る、直流励磁を受けることが予想され、総計 20 A の直流励磁を受けるものとして設計を行なった。次にインピーダンスは直流側電圧変動率、力率の点からは小さいほうが望ましいが、逆弧電流あるいは短絡電流などの故障電流を抑制する点からは大きいほうが望ましい。

一方、整流器にかかるストレスは飛躍逆電圧、転流終期の電流減少率によって決まり、電流減少率は変圧器インピーダンスによって決まる。これらの点を勘案し、各変圧器のインピーダンスを決定した。交流側の電圧変動に対し、制御角一定範囲で変換装置の制御を行なうため高圧側に負荷時タップ切替器を使用した。4 抵抗式タップ切替器を使用し、切替動作と逆弧との一致を考慮し、限流抵抗値、切替時間を調整した。

一般の電力用変圧器と異なり、変換装置から発生する高調波電流が流れるので、設計上局部加熱、振動などに特に注意した。また各サイクルの転流時二相短絡、逆弧電流およびそのひん度を考慮し、じゅうぶんな機械的強度を持つように注意した。次に騒音については、変換所用地は暗騒音 45 ホン以下の非常に静かな住宅地と接近しており、一方、当変圧器は電力用変圧器としても大容量であり、本体だけの騒音も 93 ホン程度と推定される。そのうえ変換用変圧器であるため、かなり騒音レベルが高くなると考えられる。実測例はほとんどないが、直流励磁による磁束密度増加から 10~15 ホンの増加を見込んだ。このため二重防音タンク構造とし、コンクリート防音建屋に収納し冷却装置は別置形送油水冷式とした。

これにより変換所境界における騒音レベルは 45 ホン以下になるであろう。また直流側巻線の対地静電容

量は整流器点弧時の突入電流と関係するので、種々のモデル試験の結果、整流器の運転に悪影響を及ぼすことがわかったので、対地静電容量が小さくなるよう巻線配置を考慮するとともに、防音建屋からの直流側端子引出しは、ケーブルでなく架線引出しとした。

〈4・2〉 交流側避雷器 交流側機器の耐雷設計については、従来と特に変わるところはない。交流系統の直流による連系という特殊な構成に関連する交流側の異常電圧については、じゅうぶんに検討を行ない種々のモデルセットを組んで研究を行なった結果、

(1) 主要変圧器と並列にフィルタ回路が接続されているので、しゃ断器で一括投入する場合に約 1.8 倍の異常電圧が発生することがある。

(2) 逆変換装置側系統において、負荷しゃ断を行なうと、特に 50 c/s 系向け送電時には、負荷電流しゃ断位相によって約 2 倍前後の異常電圧が、整流器両極間、変圧器高低圧側線間に発生する可能性があることがわかった。変圧器などの機器はこの程度の電圧ではまず問題はないが、これらの電圧に対して避雷器を放電させることは好ましくないので、266 kV 避雷器の商用周波放電開始電圧は実使用時の低下などを考慮して、650 kV 以上とすることにし、衝撃放電開始電圧、制限電圧は JEC どおりとした。

これらの電圧上昇問題については、試運転期間中に現地試験を行なう予定である。

5. 直流リアクトル

直流リアクトルは直流主回路に直列に接続され、脈流を含む直流電流の平滑作用を行なうものである。直流回路のインダクタンスがじゅうぶん大きくない場合制御角が大きく直流電流が小さいとき、直流電流が不連続になることがあり、安定な制御を行なうために好ましくないで、じゅうぶん大きいインダクタンスをもつ直流リアクトルが用いられる。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、これらに基づく転流失敗などの整流器事故の発生を防止する。直流回路の大電流に対しても、じゅうぶん大きいインダクタンスを保つためエアギャップ入鉄心形リアクトルとなっており、直流 100 A で 1 H、直流 500 A 以上では 0.4 H である。

直流リアクトルを含む直流回路の対地絶縁は BIL 550 kV であるが、リアクトル端子間は電流急変時の過電圧を考慮し BIL 750 kV に相当する絶縁を施している。

直流リアクトルの騒音については、従来この種の実

第 1 表 主要変圧器

	1 号	2 号
周波数	60 c/s	50 c/s
電圧	275 kV $\pm 11\%$ / 108.3 kV / 3.3 kV	275 kV $\pm 11\%$ / 104 kV
容量	372.5 / 184 $\times$ 2 / 4.5 MVA	353 / 176.5 $\times$ 2 MVA
結線法	$\Delta-Y$, $\Delta-\Delta$, $\Delta-Y$	$\Delta-\Delta$, $\Delta-Y$
インピーダンス	17.9%, 17.9%, 7.5%	13.3%, 13.3%

測例が乏しく推定がむずかしいが、一応 75 ホン程度を想定し二重防音カバー方式を採用し、20 dB の減衰を目標として冷却装置は送油自冷式とした。

6. 無効電力

変換装置は、その制御機能をじゅうぶん確保するため、制御遅れ角は 15° 、余裕角は $17^\circ \sim 19^\circ$ としている。このため一定量の無効電力が必要である。さらに変圧器励磁分などがこれに加わるが、ほとんど変換装置自体が消費するものである。当変換装置について所要無効電力を計算すれば、次表のようになる。

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

なお、これには変圧器消費分は含まれていない。逆変換側のほうが大きいのは、余裕角が制御遅れ角よりも大きいためである。

この無効電力を少なくするには、強制転流などの方法があるが、実務的でなく、同期調相機あるいはコンデンサにより無効電力を供給するのが現在最も実務的な方法である。同期調相機を使用すれば、変換装置消費分に応じて無効電力の連続的な調整ができるが、損失が大きく、また高調波電流による温度上昇が問題となる。これに対し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、損失が少なく、転流作用を改善するなどの利点大きい。このため 275 kV 母線に直接コンデンサを接続し、無効電力を供給するとともにフィルタの一部として利用している。このコンデンサにより高調波は短絡された状態となり、転流時の変換器群間の相互干渉作用が低減され、補償リアクトルなどを設ける必要はなくなっている。変換装置の所要無効電力の計算値は前述のとおりであるが、系統側からの供給も可能であり、これだけの容量のコンデンサを設置する必要はない。フィルタと組合せた実際の進相容量は 60 c/s 側 91 MVA、50 c/s 側 91.3 MVA である。

7. 高調波フィルタ

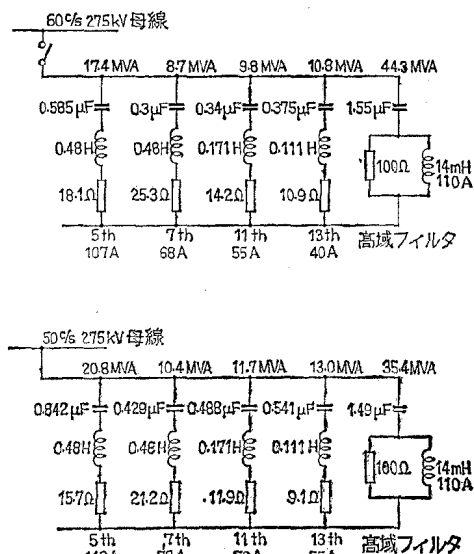
変換器は一種の開閉器であり、直流回路にある大きいインダクタンスのため、交流側の電流波形は階段形となり、多くの高調波電流を発生する。制御角の不均衡、系統の不均衡によっても発生するが、いまこれらは平衡しており、重なり角も無視して計算すれば、発生

高調波電流の次数 n は $k p \pm 1$ となる。(ただし p : 整流相数 $k=1, 2, 3, \dots$) その大きさは基本波分の $1/n$ となり、制御角、重なり角が増すと小さくなる。

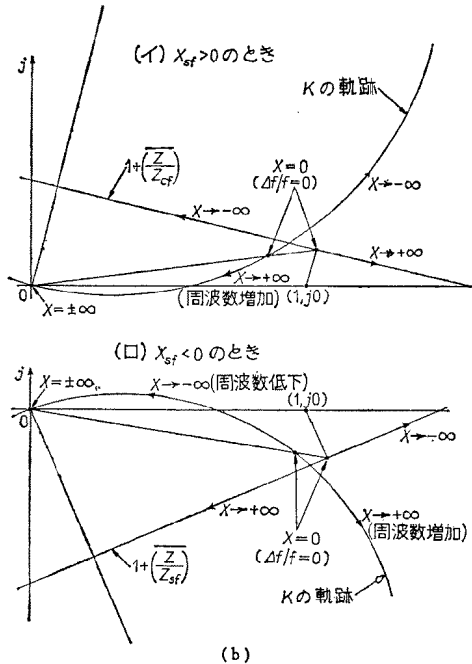
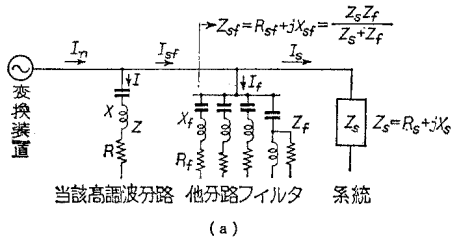
制御角の不均衡、変換器群間の不均衡などによって低次の高調波が生ずる。これらの高調波電流が系統に流出すると、系統につながる機器の過負荷による過熱、通信線障害などの悪影響を及ぼす。高調波電流の系統流出を防止するため、第 7 図のように超高压側母線に第 5, 7, 11, 13 調波用帯域フィルタおよび第 17 調波以上に対し高域フィルタを設けた。(各調波用フィルタの L の最大許容電流を第 7 図中に示す) それぞれ L, C, R の 3 要素により構成される。

フィルタ特性は常時の周波数変動範囲において、できるだけ抵抗性であることが望ましく、この点から $Q=50$ とした。また、 C には 0.625% ステップで $\pm 4\%$ の調整タップを設けた。フィルタ効果、すなわち高調波電流の系統流出電流、フィルタ電流は、周波数変動、系統の高調波インピーダンスによって大きく変化する。 L, C の温度変化、経年変化も見掛け上の周波数変動として作用するので、これらは極力押える設計としてある。

フィルタ機器は、交流系統の周波数変動範囲 $+0.2$ c/s, -0.5 c/s で連続運転でき、1 c/s 低下時 5 分間に耐えうよう設計されているが、系統周波数 1.5 c/s 低下時にもフィルタ機器は 5 分間程度耐えうことは計算で確かめられている。しかし、このときは高調波電流の系統流出が増加することがある。これらの関係は種々のケースについて電子計算機を使用して検討を重



第 7 図 フィルタ定数



第 8 図 フィルタ効果計算

ねてきたが、その概略を簡単にはあくするために次に述べるような円線図法による検討も行なった。

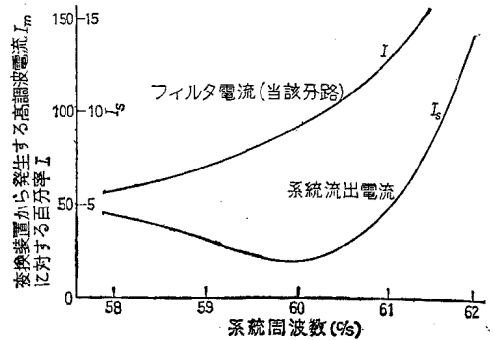
いま、ある高調波分路に注目すると第 8 図 (a) のような回路となる。この図において当該高調波電流はインピーダンス比に応じて次のように分流する。

$$I = \frac{Z_{sf}}{Z + Z_{sf}} I_n = \frac{1}{1 + \frac{Z}{Z_{sf}}} I_n = K I_n$$

$$I_s = \frac{Z_{sf}}{Z_s} \left(1 - \frac{1}{1 + \frac{Z}{Z_{sf}}} \right) I_n = K_s I_n$$

となり $|K|$ 、 $|K_s|$ はそれぞれ当該分路電流、系統流出電流の発生高調波電流 I_n に対する比率を表わす。

周波数変動 Δf の少ない範囲について計算した結果の一例を示せば、 K のベクトル軌跡は第 8 図 (b) のようになる。(イ) は X_{sf} が正の場合を示し、(ロ) は X_{sf} が負の場合を示す。この図からわかるように、 X_{sf} が正ならば周波数低下時、 X_{sf} が負ならば周波数



$Z_s = 137 - j645$, $Z_{sf} = 12.8 - j67$ (60 c/s で I_s が最少となるよう調整した場合を示す)

第 9 図 60 c/s 第 11 調波フィルタ

上昇時に K が増加し、当該フィルタ電流が増加する。他分路フィルタと系統のインピーダンス Z_f 、 Z_s の相差が大きく、並列共振状態に近くなると $|K_s|$ は大きくなり、系統への流出電流は大きくなる。一例として 60 c/s 第 11 調波フィルタについての検討結果を第 9 図に示した。これは X_{sf} が負の例であり、周波数変動 1 c/s に対しフィルタ電流増加は約 40% であることを示している。

8. 直流特殊機器

〈8・1〉 転流時の過渡電圧振動と振動防止回路 水銀整流器は毎サイクル負荷電流の開閉を行なうため、交流しゃ断器の再起電圧とほぼ同じ様相の異常過渡振動電圧が転流のたびに発生する。したがって、(i) 変圧器、その他の機器の絶縁強度を脅かす。(ii) 機器の内部コロナ開始電圧を考慮する場合、この事実を忘れてはならない。(iii) 外部可視コロナについても同様である。(iv) 高周波振動電圧により、 $\tan \delta$ 損は増大する。回路のコンデンサ、ケーブルなどの熱的設計を行なう場合、これを忘れてはならない。といった事項のほか、変換器自身の動作特性にも密接な影響を有する。すなわち、逆電圧の波高値 ($e_{i\max}$) が大きいほど、また、その初期の変化率 (de_i/dt) が大きいほど、逆弧が発生しやすくなる。また逆変換器にあっては、転流のための余裕角を低下させ転流失敗の原因となる。したがって、第 2 図に示すように、コンデンサ (45,000 pF) と抵抗 (2.4 kΩ) からなる振動抑制回路が、各水銀整流器の陽陰極と並列に設置されている。

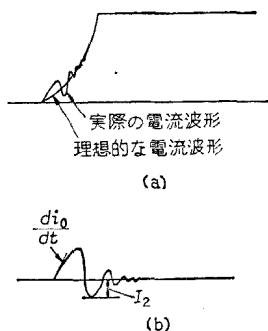
〈8・2〉 転流時の電流振動と陽極リアクトル 転流時の電流波形は第 10 図 (a) の理想的な曲線に同図 (b) の電流振動分が重なっている。この電流振動は回路の L 、 C によって発生するが、これがあまり大き

いと、すなわち I_2 の大きさが励弧電流よりも大きいとき、あるいは整流器電流がこのとき I_2 の大きさに立上っていないとき、陰極スポットは消滅し失弧を起こす。また、点弧時の電流の立上り (di_0/dt) があまりにも大きくて、陰極スポットの成長が追従できないと、これがまた失弧の原因となる。

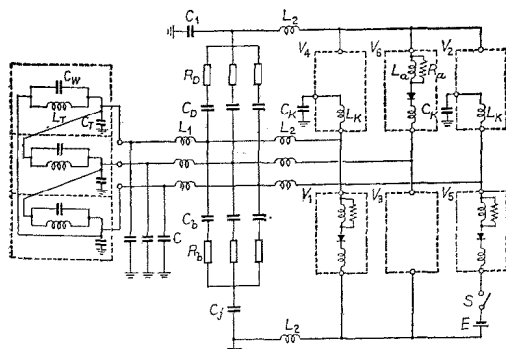
この電流振動を抑制し転流をスムーズにするために 1.5 mH の陽極リアクトルが設備される。

〈8.3〉 模擬回路による解析 佐久間周波数変換所の場合の転流時の過渡現象を解明するため、第 11 図の模擬回路による解析が行なわれた。同図でスイッチ S を閉じることにより、整流器 5 から整流器 1 への転流が模擬でき、第 10 図のオシロ波形を容易に、多くの回路条件を変更したケースにつきうることができる。第 12 図はその結果の一部であり、交流側回路の対地静電容量が増大すれば I_2 が大きくなることを示している。

さらにスイッチ S を開くとアーク消滅 (Arc quenching) 時の異常電圧の解析を行なうことができる。

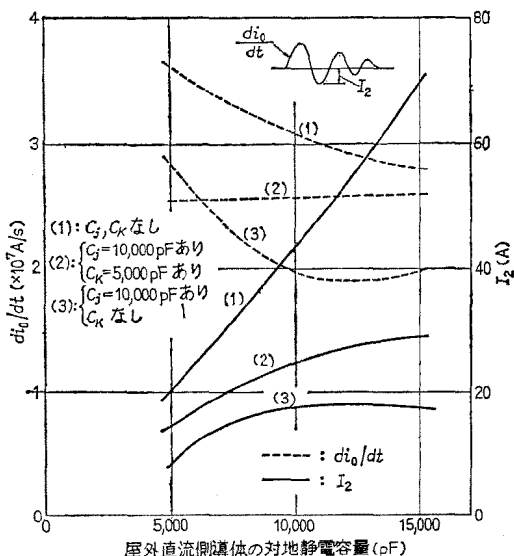


第 10 図 転流時の電流振動



L_T, C_T, C_W : 変圧器のインダクタンスおよび静電容量
 R_D, C_D : 振動抑制回路
 C, L_1, L_2 : 屋外直流側導体のインダクタンスおよび静電容量
 L_A, R_A : 陽極リアクトル
 L_K : 陰極リアクトル
 C_j, C_k : 整流器陰極タンク付近の漂遊静電容量

第 11 図 模擬回路 (転流時の現象解析用)



第 12 図 転流時の電流振動
(模擬回路による解析結果)

この種の異常電圧は、変換装置の内部異常電圧(内雷)の原因の一つであり、そのほか 275 kV 側から侵入する外雷などから、主変、直流回路を保護するために、避雷器が設置されている。

〈8.4〉 直流避雷器 佐久間周波数変換所の直流側には次の避雷器がある。

主要変圧器バルブ巻線端子の対地間および相間それぞれ 1 組、整流器ブリッジと逆変換器ブリッジの接続点に 1 組 (群間避雷器と呼ぶ) および直流リアクトル保護用としてその端子の対地間および極間である。

直流避雷器の端子電圧波形は常に方向性であり、電圧は零点に達しない。こうした場合、避雷器の放電を継電器で検出し、整流器群をブロックして続流しゃ断を行なわしめるのが英仏連系の場合は採用されているが、佐久間周波数変換所の場合、避雷器自体が強力な強制消弧能力を有していて、電圧零点がなくとも続流しゃ断が可能となっている。

9. 制御装置

〈9.1〉 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電圧として決まる。

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 の制御に任せ直流電圧は順変換装置によって決まってくる。逆変換装置の制御電流は設定電流値よりも常に電流余裕値だけ小さくされている。

第 13 図は制御特性を示すが、点 A は平常運転を示し、点 B は順変換装置の電圧降下時を示す。電流余裕値は約 100 A である。

実際の運転は定電力制御が行なわれるが、この場合は電力の設定値を実際の電圧で除した値を電流設定値とし、測定電流値との比較制御を行なっている。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、周波数変換装置では順・逆変換装置が 1 箇所にあるので通信回線は必要でなく簡単になる。

〈9・2〉 遅れ角計算方式 順・逆変換装置を構成する水銀整流器の点弧角は、それぞれの遅れ角計算器によって計算される。特に逆変換装置については常時の電圧変動、負荷変動によっても常に一定余裕角を残して転流を終了しなければならない。逆変換装置の遅れ角計算方法は下記のとおりである。

一般に 6 相グレート結線においては、次式が成立する。

$$\cos \gamma - \cos(\gamma + u) = \frac{6}{\pi} \frac{I_d X}{D_{i0}} \dots \dots \dots (1)$$

$$D_{i0} = 1.35 E_0$$

E_0 : 無負荷交流電圧 (線間 rms 値), γ : 余裕角, u : 重なり角, I_d : 直流電流, X : 転流リアクタンス

(1) 式を第 14 図の関係を用いて $\gamma + u = \pi - \alpha$ とおくと次のようになる。

$$D_{i0} \cos(\pi - \alpha) = D_{i0} \cos \gamma - \frac{6}{\pi} I_d X \dots (2)$$

遅れ角計算器においては、(2) 式の左辺をうるために転流電圧 $E_c = E_R - E_T$ の位相を 90° 遅らせ、波高値を D_{i0} に比例させて、電圧波形 $D_{i0} \cos(\pi - \alpha)$ をつくっている。一方、(2) 式の右辺の第 1 項は、 γ が一定であり第 2 項の I_d は測定されるので、右辺に比例

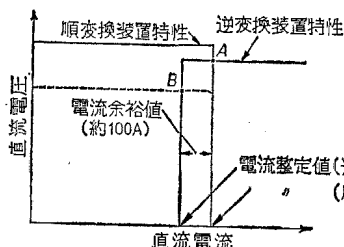
した直流電圧が得られる。したがってこの左辺と右辺が等しくなった点 P において制御パルスは出される。

逆変換装置の一定余裕角計算は前記のとおりであるが、順変換装置の点弧角 α の計算には、制御増幅器の出力電圧を第 14 図の P 点のレベルよりも大きく差し引いて Q 点に移し、この点を動作点として点弧角を決めている。制御増幅器出力電圧は電流設定値と測定値の偏差に応動し、定電流制御を行なう。逆変換装置に電流制御が移った場合の制御角 β も、上記と同様に決められるが、この場合は $\beta \leq 90^\circ$ の制限がつけられる。

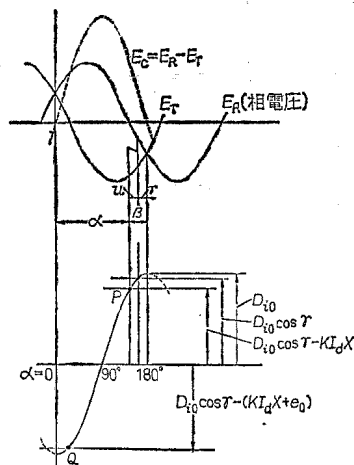
制御角 α の運転範囲は $10^\circ \sim 20^\circ$ であるが、この範囲をこえた場合は順変換装置側の変圧器タップ位置を自動的に変えて、常にこの範囲に保つようにしている。また、逆変換装置の余裕角は 60 c/s で約 19° (50 c/s, $\gamma = 17^\circ$) 一定であるから、逆起電力、すなわち、直流電圧は整流器巻線側の交流電圧に比例して変化する。そこで直流電圧が $125 \text{ kV} \pm 3\%$ をそれた場合には、逆変換装置の変圧器タップは制御される。

〈9・3〉 運 転 変換装置は 2 極からなり、1 極は主整流器 12 台とバイパス整流器 1 台からなる。1 極運転の定格は 150 MW で、この場合は停止極はバイパス断路器によって短絡される。1 極、2 極の運転中の切換えは自由に可能であるが、2 極運転が 12 相運転となり高調波成分が少ないこと、大電流におけるバイパス断路器の入・切は好ましくないので、2 極運転を原則としている。

電力設定スイッチは電力方向別に一つずつあり、0 ~ 300 MW まで 20 MW ステップに設定できる。整定速度は 50 MW/s である。最低負荷は 2 極運転の場合 40 MW であり、1 極運転の場合 15 MW である。



第 13 図 運転電圧-電流特性



第 14 図 遅れ角計算方法

最低負荷以下の電力設定に対しては、自動的にブロックされ潮流は零になり、いわゆるフローティングの状態となる。常時の潮流逆転は電力設定スイッチによって設定電力を零に減らし、逆方向スイッチにより任意の電力に設定する。

その他、緊急応援電力設定スイッチが 50 c/s, 60 c/s 別に設けられ、0, 100, 200, 300 MW のタップがある。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達成される。以後、電力設定スイッチを操作して上記の設定タップに一致させると緊急指令は解除され、常時運転にもどすことができる。緊急応援の電力方向は正・逆いずれも可能である。また、緊急応援の制御速度は指令を受けてから約 0.3 秒である。

10. 計 測

〈10・1〉 交流電圧 制御用の交流電圧をうるために変圧器一次側には 1,000 VA のコンデンサ形計器用変圧器が設備されている。ここには並列に高調波フィルタ群があって電圧波形のひずみは少ない。

〈10・2〉 遅れ角測定回路 整流器群を構成するどれか一つの整流器の制御パルスと、その整流器の転流電圧の位相を比較することにより測定し、順変換装置側では変圧器タップの制御に使用する。

〈10・3〉 直流電圧測定回路 直流回路の順・逆変換装置の群間にそう入された抵抗分圧器によって直流電圧を測定する。

〈10・4〉 直流電流測定回路 直流回路にそう入されたトランスダクタによって測定している。

11. 保 護

逆弧は整流器においては偶発するものといわれ、陰極タンクの過熱、陽極の過冷などによって発生しやすくなるが、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、これを交直電流比較による差動方式で検出して、ただちに故障群の通電をブロックしバイパス整流器に一時的に電流を移して 1 極運転にする。そして故障回復後ある時限を経て自動的に再閉路を行ない平常運転にもどす。したがって、一時的には変換電力は半減するが、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。また整定時

間内に自動再閉路が数回繰り返す場合には、バイパス断路器にバイパス整流器の電流を移行させて、故障群を永久ブロックする。

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よる場合がある。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自復する性質があるので、普通は故障表示されるだけで放置され自復を待つ。そして整定時間継続すれば初めて故障群を一時的にブロックする。転流失敗の検出は逆弧とは別個の交直電流比較による差動方式で行なわれている。

直流回路保護としては、過電流検出用および接地検出用トランスダクタ（直流変流器）があり、前者は故障群を選択ブロックし、後者の場合は交流側シャ断器を開く。

直流機器の保護は従来の交流機器と同様に、温度、油流、ガスリレーなどが付けられていて、故障機器側の運転群を永久ブロックする。

整流器の補機電源は、励弧電流、グリッドバイパス装置、陽極空気扇風機、水銀ポンプなどに使用されているので、電源故障の場合にはただちに運転をブロックしなければならず、補機電源の確保はきわめて重要である。

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ことが確認されている。

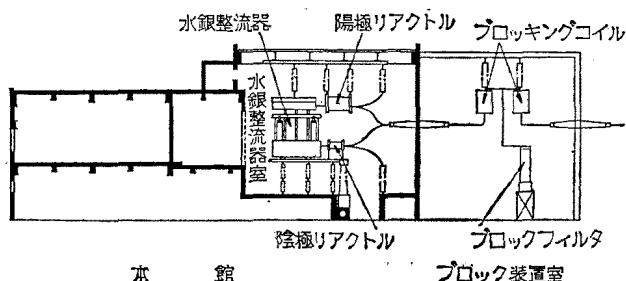
12. ラジオ障害

水銀アーク変換装置のラジオ障害は、次の二つに問題を方向づけられる。

(1) 水銀整流器は点弧時、陽陰極間に急しゅんな電圧変化を伴う。この現象は双極子からの放射として問題をとらえることができる。

(2) 上記の電圧変化は、整流器室壁ブッシングから屋外開閉所の導体に伝搬される。これは電流ループを形成し、磁気双極子として問題をとらえることができる。

(1) の双極子からの放射については、建物をシールドするのが唯一無二の対策である。整流器付近の漂遊静電容量その他を勘案して、陽陰極間の電圧波形を推測し、数式をたてて変換所付近の雑音電界強度の分布について理論的解析を行ない、さらに数分の 1 程度の変換所縮小モデルを作り測定を試みた。佐久間周波数変換所の場合、シールドなしで約 75 dB (100 m 地点換算) と推定された。建物のシールド効果についても、従来から解析、実験、測定が多く行なわれ、ある



第 15 図 ブロック装置室

程度は推定できるが、メッシュであるか鉄板か、網目の大きさ、材質、施工方法に関係するので、正確な推定はかなり困難である。われわれの場合、当初 50～55 dB のシールド効果を期待し、建物完成後実測を試みたが予想以上の好成績であり、60～70 dB 程度であった。通常バックノイズは 25 dB 程度であり、第 1 原因の直接放射電磁界は 5～15 dB まで低減できることになり、したがって、第 2 原因の屋外開閉所の電流ループからの放射が問題となる。

電流ループの強さは、主要変圧器をはじめ各種機器の高周波特性に関係し、その理論的解析はきわめて困難である。したがってこの推定は縮小モデルでの実験によったが、約 70～60 dB (100 m 地点換算) と推定された。陰極リアクトルを追加したので 10～20 dB は低減するが、なお不足である。よって第 15 図のブロック装置室を本館と屋外開閉所の間におき、ここで屋外開閉所へのラジオ雑音の伝搬を阻止した。図中ブロッキングコイルは放送周波帯で高抵抗分を有し、ブロックフィルタは結合コンデンサにフィルタを組み合わせ、同じ放送周波帯では低抵抗の特性を有する。ブロック装置室全体はアルミメッシュでおおわれている。これにより第 2 原因のラジオ雑音は数デシベル (100 m 換算) 程度となると推定されている。

高電圧直流変換は世界にも類がなく、ラジオ障害問題は特に理論的解析が困難である。さらに英仏連系に比べ、わが国のこの問題に対する要求の程度はかなり高度であると思われる。もしわれわれの対策が成功すれば、直流送電の見通しは明かるいものとなり、特に第 15 図のブロック装置室方式によるラジオ障害防止対策は、直流送電技術に寄与するところの大きい技術的成果の一つになるのではないかと考えている。

13. 結 言

佐久間周波数変換所は最近予定よりいくぶん早目にすえ付工事を終了し、5 月から調整のための試運転にはいっている。この調整試験は建設担当の当社だけでは実行できないものであり、大きく電力系統へ影響を与えるものであって、したがって広域運営の中心である電力協議会の下部機関に佐久間周波数変換所特別小委員会を設けて審議をお願いしている状態である。幸いに各電力会社の委員各位の絶大な協力のもとに、試験計画の審議も着々と進行していることは感謝に耐えないところである。なにぶんにもわが国では初めての試みであり、世界的にも珍しい方式であるので、今後の試験を通じてある程度の困難があるものと考えられるが、関係各位のご援助のもと 1 日も早く完成して電気事業の広域運営の一部に貢献できるように望んでいるものである。なお、当所の方式は直流送電線のない直流変換所とも考えられ、将来のわが国の直流送電問題、あるいは電力系統の連系問題にかなりの詳しい技術を提供しうと思われるが、本文がなんらかの参考となれば幸いと考えるものである。また、文献をいちいち参照していないが、おもなものを別記して各位の参照に供する。

文 献

- (1) 両サイクル連系問題委員会報告書、電力中研 (昭 37-5)
- (2) C. Adamson & N.G. Hingorani: High Voltage Direct Current Power Transmission (1960)
- (3) 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, 9, 5号; 12, 1号; 19, 6号