

シリコン移動変電所

Silicon Rectifiers for Mobile Substation

地 福 順 人*
Yorito Jifuku

内 容 梗 概

シリコン整流器が小形、軽量、保守容易であるという利点は、直流移動変電所に新分野を開拓した。移動変電所は仕様の異なる種々の変電所で、不特定の整流器用変圧器と組合され、各種の整流器と並列運転を行わねばならないので、そこに数々の問題点が存在する。このほど日立製作所で完成した日本国有鉄道納3,000 kW, 1,500 V シリコン移動変電所はこれらの問題点を解決したものである。

1. 緒 言

直流移動変電所には次の2種類がある。

(i) 特定の地点における季節的または特殊な事情による負荷のラッシュに備え、その緩和のために移動して使用されるもの。

この場合、移動変電所は整流器のほか、整流器用変圧器、主回路器具、配電盤、その他直流変電所としての必要器具を一切具備している。

(ii) 地上変電所の整流器の事故時、その補修または新製の期間だけ故障整流器にかわって運転するため移動用として製作されたもの。

この場合は整流器のみの移動でよいが、いかなる変電所でも使用可能のように必要器具を備えねばならない。

(i) は従来水銀整流器でも使用されており、シリコン整流器においても現在製作中である。この種のもの、構造上の特異点を除けば、整流器用変圧器、保護制御器具などとも組合されている関係上、地上変電所と問題点に大差は生じない。

(ii) はシリコン整流器において初めて実現されえたものといえる。この種ものは次の条件を具備しなければならない。

- (イ) いかなる場所へも早急に移動しうる機動性に富むこと。
- (ロ) 屋内、屋外を問わずいかなる場所にも設置しうること。
- (ハ) 電鉄用整流器に用いられる二重星形6相結線、3相ブリッジ結線のいずれにも使用可能なこと。
- (ニ) 周波数は50 c/s, 60 c/s 共用であること。
- (ホ) いかなる変電所においても容易に保護制御回路を構成しうること。

シリコン整流器は、

(イ) に対しては、小形、軽量で耐震性も比較的高いところから(i)の移動変電所が軌道台車またはトレーラートラックを必要とすることに對し、3,000 kWでも普通のトラックで移動できる。

(ロ) に対しては、上記と同様小形軽量であるほか、特殊な温度制御を必要としないため、屋外形も比較的容易である。

(ハ) に対しては、シリコン整流器は相当数のシリコン整流素子を直列および並列に組合せたものであるから、その条件も比較的容易に具備しうる。

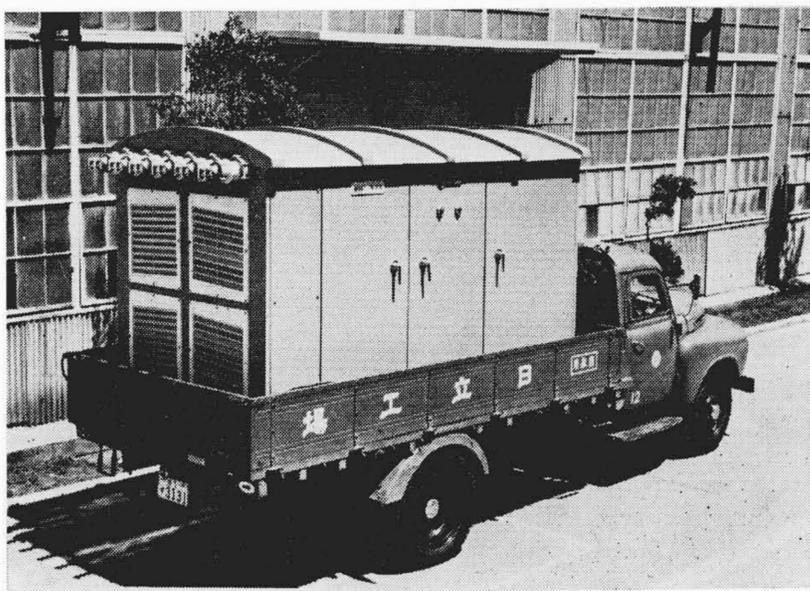
(ニ) については、温度制御が容易で単に冷却だけが条件であるところから、さしたる困難は伴わない。

(ホ) に対しては、付属装置が少なく保守容易という利点がこれを可能にしている。

以上の理由で、かかる用途に最適のものといえる。

今回完成した3,000 kW, 1,500 V シリコン移動変電所は上記(ii)の用途に該当するものであり、日本国有鉄道におけるシリコン整流

* 日立製作所日立工場



第1図 移動変電所外観

器の予備器として移動することを主目的とし、さらに必要に応じて水銀整流器変電所の応援用として設計、製作されたものである。

この論文では本シリコン移動変電所を紹介するとともに、上記(ii)の用途について次の一般の問題点を検討する。

- (イ) シリコン整流器と他の整流器用変圧器を組合せた場合、いかなる出力および特性を示すか。
- (ロ) 異常電圧に対しては、いかなる考慮が必要か。
- (ハ) 過電流または短絡電流に対しては、いかなる考慮が必要か。
- (ニ) 構造上いかなる考慮が必要か。
- (ホ) 他の変流機器との並列運転には、いかなる考慮が必要か。

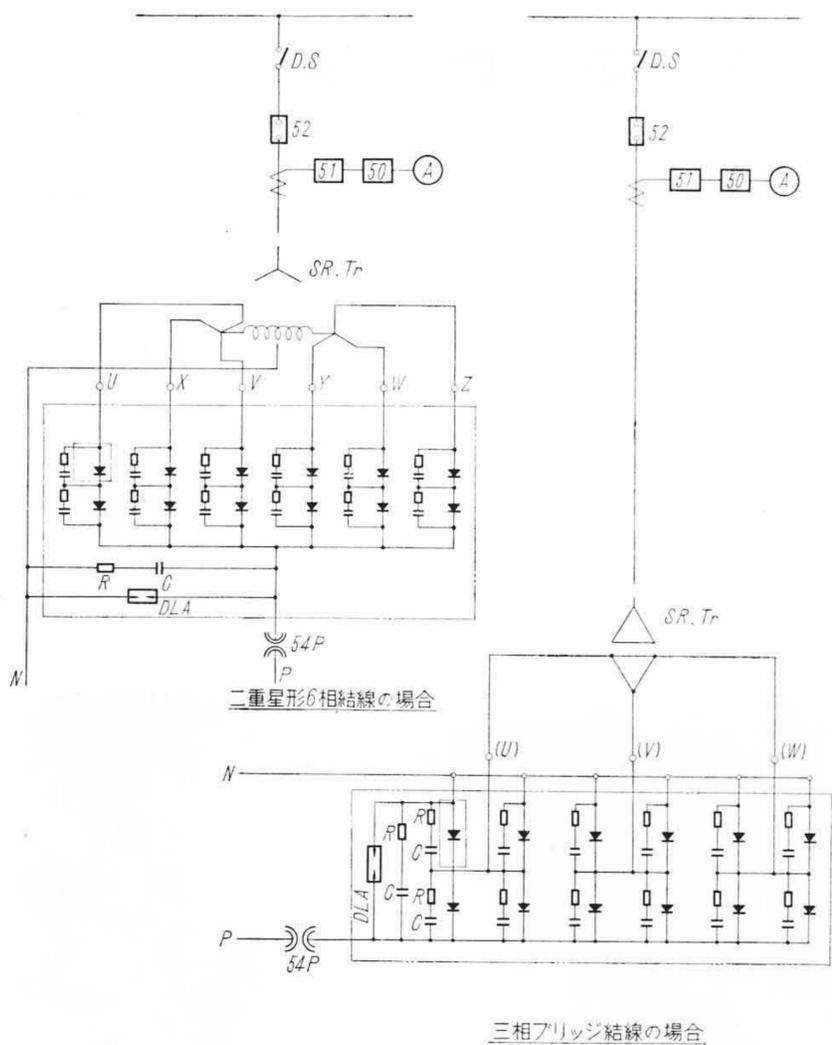
2. 3,000 kW, 1,500 V シリコン移動変電所

まず、今回完成したシリコン移動変電所について紹介する。第1図に本移動変電所の外観を示す。

2.1 仕 様

シリコン移動変電所の仕様は下記のとおりである。

形 式	F-6 BX (6相風冷式移動用)
定 格 出 力	3,000 kW
定 格 直 流 電 圧	1,500 V
定 格 直 流 電 流	2,000 A
定 格	100% 連続, 120% 2時間, 300% 1分間
定 格 周 波 数	50 および 60 c/s
結 線 方 式	三相ブリッジ, 二重星形6相共用
冷 却 方 式	風冷式



第2図 シリコン移動変電所の単結結線図

整流素子 DJ14L

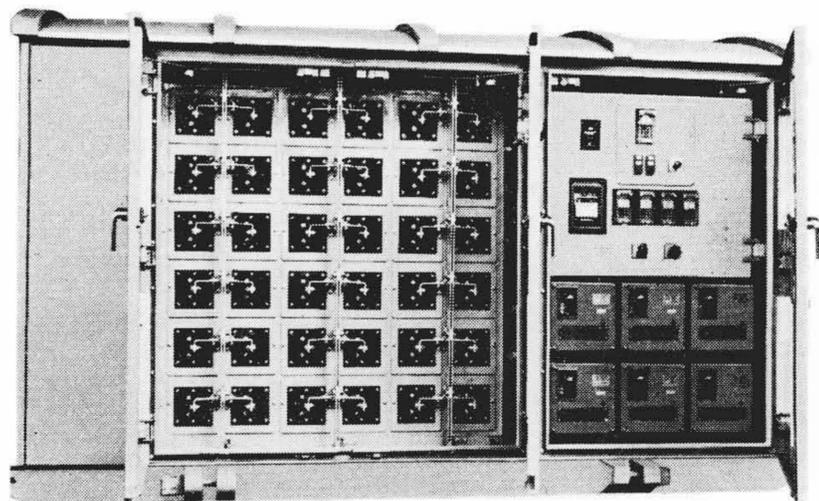
最大許容せん頭逆電圧	1,000 V
最大許容瞬時逆電圧	1,300 V
定格平均順電流	200 A
構成	6/12s×12/6P×6A

2.2 接続方式

本シリコン移動変電所はシリコン整流器の予備器として使用されるほか、水銀整流器の変電所においても使用されるため、三相ブリッジ、二重星形6相の共結線方式が可能である。切換は第2図の1点鎖線内の整流素子6s×6Pを1グループとし、このグループの直並列接続によっている。また異常電圧吸収装置、整流素子故障検出装置も本グループ単位に取付け、結線方式の相違による接続換えを簡便にしている。

2.3 冷却方式

シリコン整流器の冷却方式は風冷式が最も多く採用され、本器も風冷式を採用している。周波数が50/60c/s 共用の場合には送風機の風量、風圧の調整が考えられる。しかしシリコン整流器は運転上過冷の影響はないため本器の場合は60c/sにおいては必要以上の冷却



第3図 シリコン移動変電所の内部

を行い、送風機制御の複雑さを避けている。

2.4 保護制御装置

電鉄直流変電所用シリコン整流器の保護装置については種々の文献が発表されている⁽¹⁾。シリコン移動変電所がシリコン整流器の予備器として使用される場合には地上変電所用シリコン整流器と同等の保護制御装置を具備すれば十分であるが、水銀整流器の変電所で使用される場合はシリコン整流器特有の保護制御器具を具備しなければならない。本器は下記の保護制御器具を備えている。

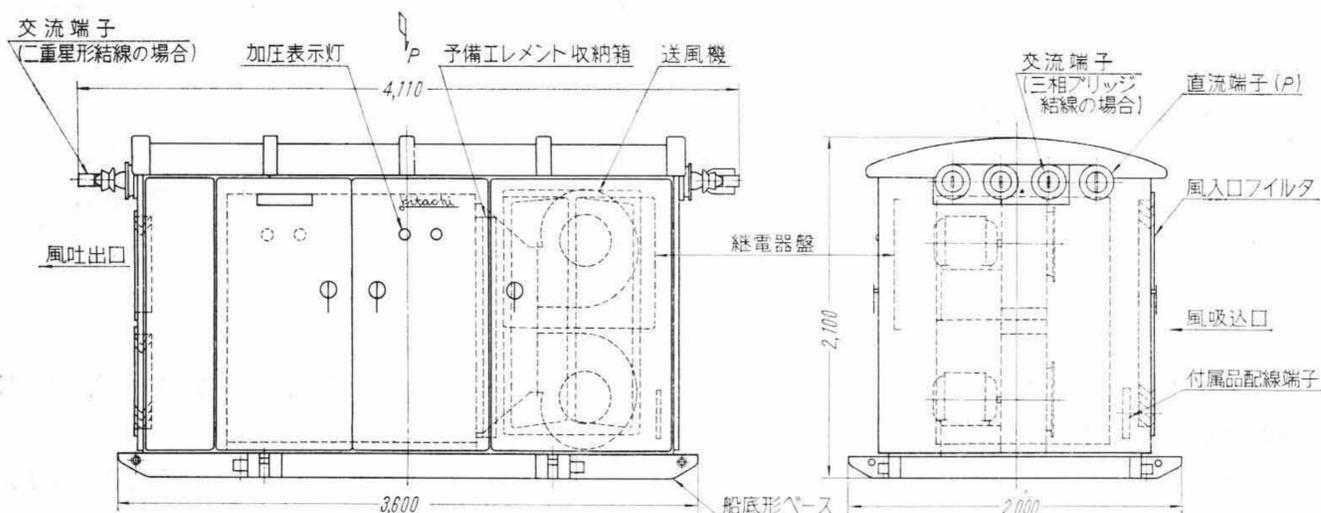
- (i) 交流側開閉サージ、交流側雷サージおよび転流時の振動の抑制用 C-R サージアブソーバ
- (ii) 直流側雷サージおよび異常電圧に対する直流アレスタおよび C-R サージアブソーバ
- (iii) 冷却装置
- (iv) 整流素子故障検出装置 (71 E)
- (v) 気流開閉器 (63 A)
- (vi) 操作場所選択用切換開閉器
- (vii) 送風機単独操作用開閉器
- (viii) (iii) (iv) に対する故障表示器
- (ix) 冷却装置連動用限時継電器
- (x) その他補助継電器

なお、(vi)、(vii)、(viii)は変電所内へも持込み可能なように取付け、取はずしが容易な構造となっている。第3図はその外観を示す。

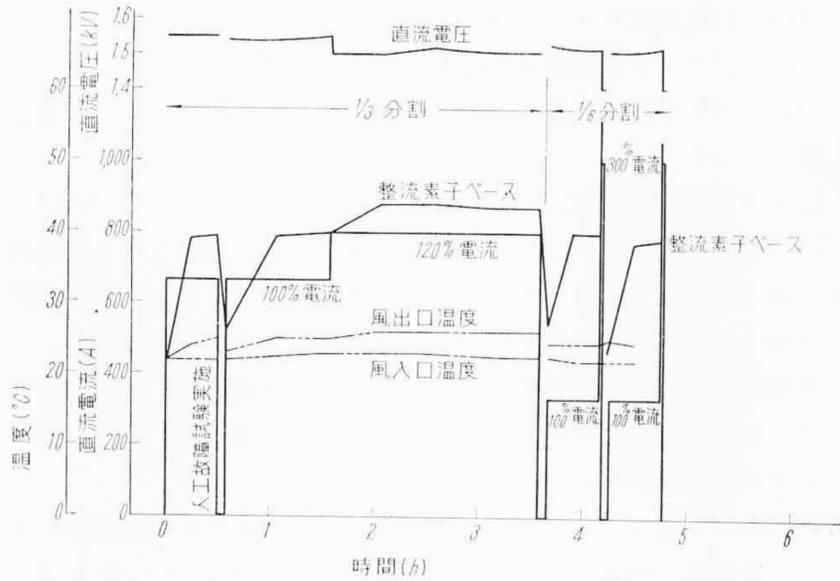
2.5 構造

シリコン移動変電所は多くの場合屋外形が要求されるが、この場合は防じん、防水のために十分な空気フィルタが必要である。本器においては十分な砂まき試験、散水試験を行ったが、いずれも完全な性能が実証された。

また、シリコン移動変電所は構造がコンパクトでなければならない。第4図に本器の寸法図を示す。本器にはトレイ方式を採用し外



第4図 シリコン移動変電所の寸法図



第5図 負荷試験時温度曲線

形を整えるとともに保守の簡便化を図っている。

キュービクルには上記保護制御器具のほか、予備整流素子、結線方式接続換え用の短絡導体なども内蔵している。

2.6 試験

本器について実施された試験は下記のようにいずれも問題なく良好な結果が得られた。

- (i) 送風機試験
 - (イ) 送風機用電動機入力測定
 - (ロ) 風量測定
 - 50 c/s において 202 m³/min
 - 60 c/s において 234 m³/min
- (ii) 温度試験
 - (イ) 低電圧通電試験
 - 整流素子ベース温度上昇 41°C
 - (ロ) 無負荷電圧印加試験
- (iii) 順電圧降下測定
 - 順電圧降下 10.75 V
- (iv) 負荷試験

第5図に負荷試験時の温度曲線を示す。

(v) 人工故障試験

第6図に直流短絡等価試験のオシログラムを示す。この試験は整流器を3分割して行ったものである。

- (vi) 効率の測定
 - 規約効率 98.87%
- (vii) 絶縁耐力試験
- (viii) 保護連動試験
- (ix) 外装検査および付属品検査

3. シリコン整流器と他の変流機器用変圧器との組合せ

現在電鉄用として使用されている直流変流機器としては、水銀整流器、回転変流機そしてシリコン整流器がある。

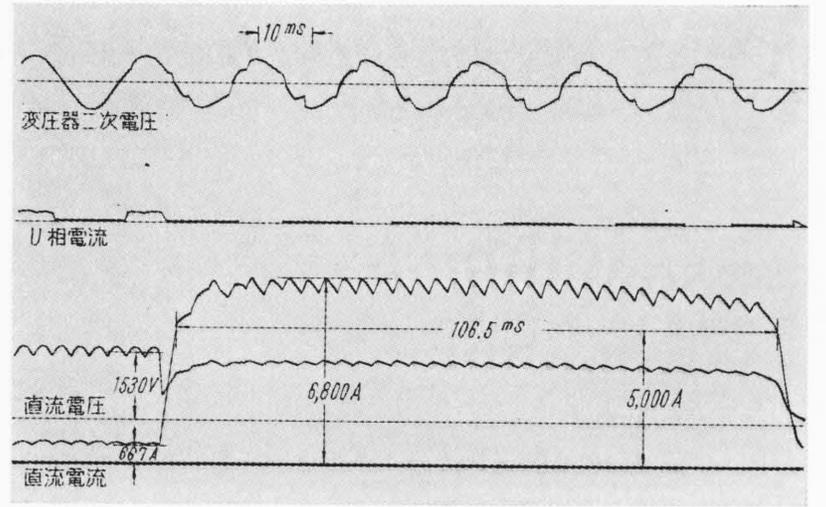
水銀整流器用変圧器はほとんどが二重星形6相結線であり、6相ダイアメトリカル結線、6相フォーク結線が多少存在する。

回転変流器用変圧器は電鉄用としては6相結線が採用されており、シリコン整流器と組み合わせる場合には、変圧器の接続を端子部で変更して三角三相ブリッジ結線として使用される。

シリコン整流器用変圧器は二重星形6相結線、三相ブリッジ結線の2種がおもに採用されている。

3.1 水銀整流器用変圧器との組合せ

シリコン整流器と水銀整流器は主回路現象の考え方は全く同一である。ゆえに整流器を交換するのみで主回路出力には大差は生じな



第6図 直流短絡試験オシログラム

い。ただ次の点で出力電圧に多少の差が生ずる。

- (i) 水銀整流器の電弧降下は 20~25 V 程度であるが、シリコン整流器の順電圧降下は定格直流電圧 1,500 V で 10 V 前後、600 V で 5 V 前後である。ゆえにシリコン整流器を使用した場合、直流電圧が 1,500 V で 15 V 前後、600 V で 20 V 前後高くなる。
- (ii) 水銀整流器、変圧器にシリコン整流器を組み合わせると順電圧降下の差だけ直流電圧が上昇する。
- (iii) 電圧変動率は整流器用変圧器によるものは同じである。水銀整流器の電弧降下の電圧変動分とシリコン整流器の順電圧降下の変動分はほとんど同様と考えてよく、シリコン整流器の場合は整流素子の直列枚数および並列枚数で異なるが、その差は整流器用変圧器の電圧変動率に比べ実用上無視される。

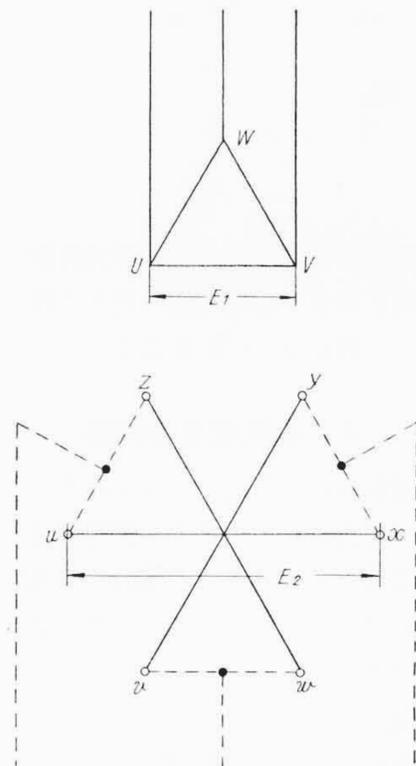
また二重星形結線に対し6相ダイアメトリカルおよび6相フォーク結線では同一のシリコン整流器の場合、その直流(出力)電流を 15% 程度減少させる必要がある。

3.2 回転変流機用変圧器との組合せ

回転変流機は直流変流機器ではあるが整流器ではないためシリコン整流器と置換える場合、次の点の考慮が必要となる。

(i) 主回路接続

第7図に示す回転変流機用変圧器の二次側端子 x-v, y-w, z-u をそれぞれ接続し実質的な三角結線とし、シリコン整流器は三角三相ブリッジ結線として接続する。



第7図 回転変流器用変圧器接続図

(ii) 直 流 電 圧

6相の回転変流機における交流二次電圧 E_2 と無負荷直流電圧 E_{d0} との比は次の(1)式で示される。

$$\frac{E_2}{E_{d0}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \dots\dots\dots(1)$$

次に三相ブリッジ結線における二次線間電圧 E_2 と無負荷直流電圧の比は次の(2)式で表わされるため、シリコン整流器を接続した場合には $3/\pi$ だけ直流電圧が不足することになる。

$$\frac{E_2}{E_{d0}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \times \frac{\pi}{3} \dots\dots\dots(2)$$

しかし実際の場合回転変流機は磁極弧と極間隔との比の関係で磁束分布状態が正弦波でなく(1)式の比が変化して多少大きくなるため交流電圧はやや高めにとってある。それでも直流電圧の3~5%の不足はまぬかれない。ゆえに場合によっては昇圧変圧器が必要となる。

(ii) 直 流 電 流

6相回転変流機の交流巻線電流 I_2 と直流電流 I_d との比は次の(3)式で表わされ、三角三相ブリッジ結線の変圧器二次三角巻線電流は(4)式で示される。

$$\frac{I_2}{I_d} = \frac{\sqrt{2}}{3} \cdot \frac{1}{\cos \varphi} \quad \cos \varphi: \text{力率} \dots\dots\dots(3)$$

$$\frac{I_2}{I_d} = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{1 - 3 \frac{\sin u(2 + \cos u) - u(1 + 2 \cos u)}{2\pi(1 - \cos u)^2}} \quad u: \text{重なり角} \dots\dots\dots(4)$$

ここで $\cos \varphi = 1$, $u = 0$ と仮定すれば直流電流は同一となる。一般には、回転変流機用変圧器の容量は回転変流機の定格出力と同一となっているため、電圧変動率分だけ直流電流は少なくなっている。

(iii) 電 圧 変 動 率

回転変流機用変圧器を三角三相ブリッジ結線とした場合、電圧変動率は回転変流機の電圧変動率と異なってくる。

今、回転変流機用変圧器の定格交流電圧を E_1 , 定格交流電流を I_1 , インピーダンス電圧を E_z , 銅損を W_c とすると、転流リアクタンス X は(5)式で算出され、直流電流 I_d におけるリアクタンス分電圧降下 e_x は(6)式で示される。また抵抗分降下 e_r は(7)式となる。

$$X = \frac{\sqrt{3E_z - \left(\frac{W_c}{I_1}\right)^2}}{3I_1} \times \left(\frac{E_2}{E_1}\right)^2 \dots\dots\dots(5)$$

$$e_x = \frac{3}{\pi} X I_d \dots\dots\dots(6)$$

$$e_r = \frac{W_c}{I_d} \dots\dots\dots(7)$$

以上より電圧変動率を算出すると回転変流機が垂下特性を示すのに対し、直線的となり、定格電流付近までは回転変流機の電圧変動率より大きく一般に3~4%となる。

4. 異常電圧の保護

シリコン整流器運転時の異常電圧、およびその保護については今までに多くの文献が発表されているので詳述はさけるが、シリコン移動変電所の場合は考えられる種々の場合の異常電圧に対しその保護装置を備えなければならない。すなわち異常電圧に対しては次の保護装置が必要になる。

- (i) 交流側開閉サージに対する C-R
- (ii) 交流側雷サージに対する C-R
- (iii) 直流側開閉サージに対する C-R

- (iv) 直流側雷サージに対する直流避雷器および C-R
- (v) シリコン整流器内部振動に対する C-R
- (vi) 並列水銀整流器の逆弧, 消弧による異常電圧に対する避雷器および C-R

以上の C-R は普通の地上変電所と同一の考え方で選定されるが、(ii)の交流側雷サージは変電所の受電側避雷器で制限される電圧の変圧器二次側への移行であるため古い変電所における避雷器の制限電圧および変圧器の移行率については十分な注意が必要である。

水銀整流器よりの異常電圧に対しては水銀整流器の陽陰極間避雷器および直流避雷器で保護するがシリコン整流器はその制限電圧に対応する保護装置を設ける。

そう入すべきコンデンサは結線方式の相異によりその値を異にするが、整流素子の適当なグループに対するコンデンサの値を選定し、その直列, 並列の接続換えを行えば種々の結線方式に対し適用できる。

5. 過電流に対する保護

整流器の過負荷に対しては、⑤⑥, ⑤⑦, ⑤⑧で保護する。水銀整流器の変電所では⑤⑥, ⑤⑦, ⑤⑧とも具備しており、シリコン整流器に置換えた場合には容量に応じた継電器の調整で利用できるが、回転変流機の変電所では既設保護機器とシリコン整流器との協調に注意を要する。

直流短絡電流に対しては高速度遮断器で保護する。短絡電流は整流器用変圧器の電圧変動率およびリアクタンス分電圧降下, 抵抗分電圧降下に関係する。

シリコン整流器用変圧器の電圧変動率は4~8%であるが、5%程度以下のものには短絡電流抑制用直流リアクトルをそう入している。一方水銀整流器用変圧器の電圧変動率は4~6%であり、回転変流機用変圧器を流用した場合には3~5%となる。この場合これらの電圧変動率における短絡電流に耐えるようなシリコン整流器を選ぶか、短絡電流抑制用直流リアクトルまたは並列運転の条件が許せば交流リアクトルをそう入する必要がある。実際の場合には、電圧変動率が5%程度以下ではリアクトルをそう入することが望ましい。ただしリアクトルのそう入限界は電源容量によっても異なる。また短絡電流抑制用リアクトルは空心であるか、少なくとも短絡電流が流れたときその L の値を保持しなければならない。

上記の電圧変動率は組合わされる変圧器の容量がシリコン整流器の定格出力に対する皮相容量と同一の場合であるが、変圧器の容量がそれ以上である場合には短絡電流は大きくなるので注意を要する。

6. そのほかの保護装置

シリコン整流器の運転に必要な保護装置としては、上記の異常電圧, 過電流に対する保護装置のほか、冷却風回路の故障検出, 冷却風の温度監視, 整流素子の故障検出がある。

整流素子の故障検出の場合、結線方式が異なるとその度ごとに検出装置の調整を行わねばならないが、シリコン移動変電所では調整の手間を避けるため結線方式が異なっても接続上不変な最大のグループに一つの検出装置をつけることが得策である。

また万一、シリコン整流器のアーム(二重星形結線の場合1アーム, 三相ブリッジ結線の場合は正極側および負極側のアームが同時に)が短絡した場合、水銀整流器の逆弧, 回転変流機のせん絡と同様直流電線からの逆流が起る。これを検出するためには逆流継電器が必要である。普通の水銀整流器の変電所では逆弧に備え、逆方向遮断の高速度遮断器がついているが、シリコン整流器の変電所では正方向遮断の高速度遮断器のみの場合が多い。この場合には直流

き電線のバックパワーによっては、さらに逆方向遮断の高速度遮断器を追加するか、両方向性の高速度遮断器が必要となる。また直流側逆流抑制用の直流リアクトルが必要になることもありうる。

シリコン移動変電所はそのほか、以上のシリコン整流器個々の保護装置の動作、故障の表示を行わねばならず、そのため、補助継電器、故障表示器も具備しなければならない。

7. シリコン移動変電所—シリコン整流器 キュービクルの構造

シリコン移動変電所としてのシリコン整流器キュービクルは下記の点が要求される。

- (i) トラックで運搬可能なように幅、奥行、高さの寸法に調和がとれ、可能な限り小なること。
- (ii) トラックの積載重量以下で、少なくとも 3,000 kW で 5 頓以下なること。
- (iii) 屋外形で防水、防じんが完全なこと。
- (iv) 輸送時の振動に十分耐えること。
- (v) 主回路端子はブッシングとし、主回路接続が容易に行うること。
- (vi) 結線方式の変更が容易に行えること。またそのための短絡導体なども具備していること。
- (vii) 送風機そのほか付属器具も 50 c/s, 60 c/s に共用しうること。
- (viii) 整流素子の点検が容易であること。
- (ix) シリコン整流器固有の操作用配電盤を具備していること。
- (x) 加圧表示灯をつけていること。
- (xi) 必要ならば点検用の特殊工具および整流素子の故障予備を内蔵していること。
- (xii) そのほか上記の保護装置を備えていること。

8. シリコン整流器と水銀整流器または 回轉變流器との並列運転

シリコン移動変電所はいかなる変電所で、いかなる変流機器用変圧器と組み合わせられ、いかなる機器と並列運転を行うかわからない。

まず同一変電所内における他の変流機器との並列運転の原則は

- (i) 無負荷直流電圧（二重星形結線の場合は等価無負荷直流電圧）が同一なること。
- (ii) 電圧変動率が同一なること。

である。しかし一方、並列機器の容量、定格、老朽度、その他変電所の都合によって、

- (iii) ある機器に比較的多く負荷を取らせる。
- (iv) ある機器には基礎負荷を取らせ、他の機器にはせん頭負荷を取らせる。
- (v) 最大せん頭負荷において各機器の負荷分担の割合が同一となるようにする。

というやり方も場合によっては有効である。

無負荷直流電圧が異なった場合、それを一致させるためには次の方法が用いられる。

- (イ) 整流器用変圧器のタップを調整する。
- (ロ) 格子付水銀整流器との並列運転の場合には水銀整流器の格子を調整する。

(イ)の方法は一般に変圧器のタップは 5% 程度となっているためあまり期待できず、また変圧器の過励磁に留意しなければならない

い。(ロ)の水銀整流器の格子調整は(イ)と組み合わせるとさらに有効であるが、あまり格子を絞り過ぎて整流器の動作責務を過酷にするようなことがあってはかえって逆効果である。

電圧変動率の調整は電圧変動率の小なる方へ交流リアクトルをそう入するのが最良の方法である。また回轉變流器ではさらに励磁電流を変化させることによって多少電圧変動率の調整を行いうるが無効電流の増加に注意を要する。

整流器にそう入される交流リアクトルの容量 P は、定格直流電流 I_d において ΔV の降下が必要となるときは (8) 式で算出される。

$$P = \frac{2\pi}{3} \Delta V I_d \dots\dots\dots (8)$$

8.1 水銀整流器との並列運転

上述のように格子付水銀整流器との並列運転は比較的容易であるが、格子のない水銀整流器または格子があっても絞ることが危険であるものとの並列運転時には次のような並列運転をすることが望ましい。

- (i) 運転効率の高いシリコン整流器にできるだけ基礎負荷を取らせる。
 - (ii) 少なくとも最大せん頭負荷においてシリコン整流器が定格以上の過負荷にならぬようにする。
- また水銀整流器との並列運転には次のことに注意を要する。
- (i) 水銀整流器の逆弧時の過電流がシリコン整流器の過電流耐量を越えぬようにする。
 - (ii) 逆弧時に発生しうる異常電圧を十分考慮すること。
 - (iii) リップルの差による循環電流を適当な値に押える。

8.2 回轉變流機との並列運転

回轉變流機の電圧変動率は負荷の増加とともに増大する。ゆえに電圧変動率の小なるシリコン整流器では定格負荷付近までは電圧変動率が合っている、過負荷においてシリコン整流器がせん頭負荷を受持つことになる。特に複巻式回轉變流機においてはその傾向が著しい。

また回轉變流機との並列運転には次の注意が必要である。

- (i) 回轉變流機のせん絡時の過電流がシリコン整流器の過電流容量を越えぬようにすること。
- (ii) シリコン整流器の無負荷直流電圧が回轉變流機のそれより高い場合、軽負荷時に回轉變流機に逆流を生ずるが、これはできるだけ避けねばならない。また複巻回轉變流機では逆流は危険を生ずるので即時遮断が必要である。
- (iii) シリコン整流器のある程度以上のリップルは回轉變流機の整流に悪影響を及ぼすので注意を要する。

9. 結 言

以上、シリコン整流器の特長を十分に発揮する新分野の一つであるシリコン移動変電所について述べたが、かかる移動変電所の将来は大いに期待される。事実、今回わが国最初に完成した 3,000 kW シリコン移動変電所はその試験に十分な性能を発揮し、何らの不安もないことが立証された。現在同じ仕様のシリコン移動変電所 2 台も製作中である。

最後に、かかる新製品採用のご英断と数々のご指示、ご激励を賜った日本国有鉄道をはじめ、関係各位に厚くお礼申上げる。

参 考 文 献

- (1) 曾根田, 森田: 日立評論別冊 32, 31 (昭 34-11)
- (2) 高橋, 地福: 日立評論 43, 380 (昭 36-3)