

## 直 流 送 電

大阪大学工学部 山 村 豊

表1 主要直流送電設備

場 所	設備 完成 年	電圧 (KV)	定格容 量 (MW)	送電方式	長 さ (KM)
Gotland (スエーデン)	1954	100	20	海底ケーブル	96
English- Channel (イギリス-フ ランス)	1961	±100	160	海底ケーブル	94
Volgoad- Donbase (ソ連)	1962	±400	750	架 空	500
Italy-Sardinia	1964	200	200	架空および 海底ケーブル	架 空 380 ケーブル99
North Island- South Island (ニュージ ーランド)	1965	±250	600	" "	架 空 540 ケーブル42
佐久間(日本)	1965	±125	300	—	—
Oregon- California (アメリカ)	建設 中	±400	1440 ×3	架 空	1400 3回線

## 1. ま え が き

わが国における電力需用は非常な勢いで増加し、最近では毎年一割以上の伸びを示している。電力をなるべく安く発生するには大きな発電設備とする必要があり、この電力を需用地に送るために、大きな送電設備が必要となる。大電力を遠方へ送る場合には電圧を高くする必要があり、従来交流送電で次第に高い電圧の送電線が建設され、日本でも500KVの超々高圧送電線が造られている。ところが巨大電力の長距離送電になると、交流の場合には線路のインピーダンスのため安定度が悪くなり、送電容量が制限される。直流ではこのようなことがないので、同じ程度の規模の送電線で遥かに大きな電力が送れる。しかし直流では電圧を任意に上下できないので、送電端では交流で変圧器を使用して高電圧とし、これを整流して直流の高電圧を得る順変換器が必要であり、受電端では使用に適当な低電圧とするため、交流に変える逆変換器（インバータ）が必要である。現在のところ変換器としては格子付水銀バルブを使用しているが、他の送電用機器とくらべて高価につくので、送電部分が架空線の場合は非常に長距離（500km程度以上）にならないと直流が有利とはならない。しかし送電部分がケーブルの場合は直流送電が非常に有利となる。ケーブルの絶縁耐力は直流の場合、交流にくらべて非常に高く、同じ程度のケーブルで交流実効値の2倍以上の直流電圧にも耐える。直流の場合には、導体の抵抗損失だけで、交流の場合のような誘電体損失による温度上昇がないので、電流容量も大きくできる。またケーブルの単位長さ当りの建設費が、架空線の場合の10倍にもなるので、両端に設置せねばならない変換装置が高くても、その影響が少なくなり、現在でもケーブルが30km程度以上なら直流送電が有利となる。

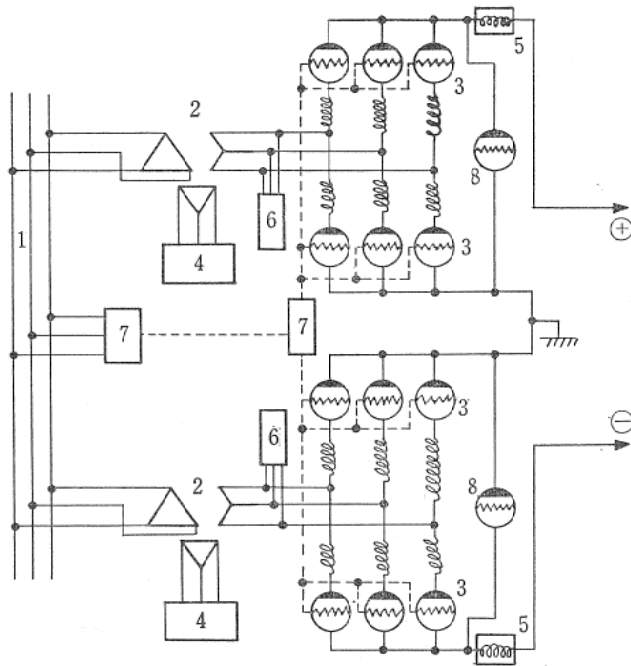
現在本格的に行なわれている直流送電設備は表1のようである。

スエーデンの ASEA 社が高電圧の変換装置を開発し、ゴットランド島への直流送電に成功してから、本格的な直流送電が行なわれるようになり、ソ連を除き現在のところ、ほとんど ASEA 社の変換装置が使われている。

日本においては交流系統の周波数が統一されていない。東日本が50c/s、西日本が60c/sである。周波数が異なるため、東西を直接に連系して電力の融通を行なうことができない。これを接続して電力の融通を計るには、周波数変換装置が必要である。これを実現したのが佐久間発電所（静岡県）に設置された直流を介しての変換装置である。直流の送電線の部分はないが、変換装置は直流送電の場合と同じであり、50c/s、60c/s両系統の電力状況によりどちらの方向でも、周波数が標準より下つた方向に電力の融通を行なえるようになっている。送電容量は300MWであるが、常時は少し余裕を残して電力の融通を行なっており、どちらかの系統に事故があり、一方の系統の周波数が標準より急に低下した場合には、健全な系統から、急に電力を送り得るように制御されている。

## 2. 直流送電設備の構成

直流変換設備は通常図1のように構成される。変換装置の主体は制御格子付水銀アークバルブである。変換装置は交流を直流にする順変換器も、直流を交流にする逆変換器も全く同様な構造となっており、電力を送ろうとす



1: 交流回路 2: 主変圧器 3: 水銀アークバルブ  
4: 調相機 5: リアクタおよびフィルタ 6: フィルタ  
7: 格子制御装置 8: バイパスバルブ

図1 直流変換設備の構成

る方向により、格子制御によつて、順変換器にも逆変換器にも変えることができるようになっている。

変換装置は無効電力を必要とする。とくに逆変換器として運転する場合に大きい。このため通常主変圧器の3次巻線に調相機またはコンデンサーが接続されている。

電流波形を平滑にし、バルブ電流が途切れないようにするため、平滑リアクタが直列に挿入されている。

変換器は交流側にも、直流側にも高調波電流を流し通信線に誘導障害を与え、接続されている機器にも悪影響を与える。したがつて高調波フィルタも必要である。

### 3. 変換器の格子制御

順変換器の格子の負電圧を制御することにより、交流側が定電圧である場合にも、直流電圧および電流を制御することができる。その時の電圧、電流は図2のようになる。

$\alpha$  が制御角であり、 $u$  が転流角（重なり角）である。交流回路のリアクタンスのため、電流には図のような重なり期間がある。この期間中は同時に電流が流れている両陽極の電位は等しく、リアクタンス  $x$  のため直流電圧は斜線を引いた部分だけ低くなる。低くなる電圧  $e_d$  は次式のようなのである。

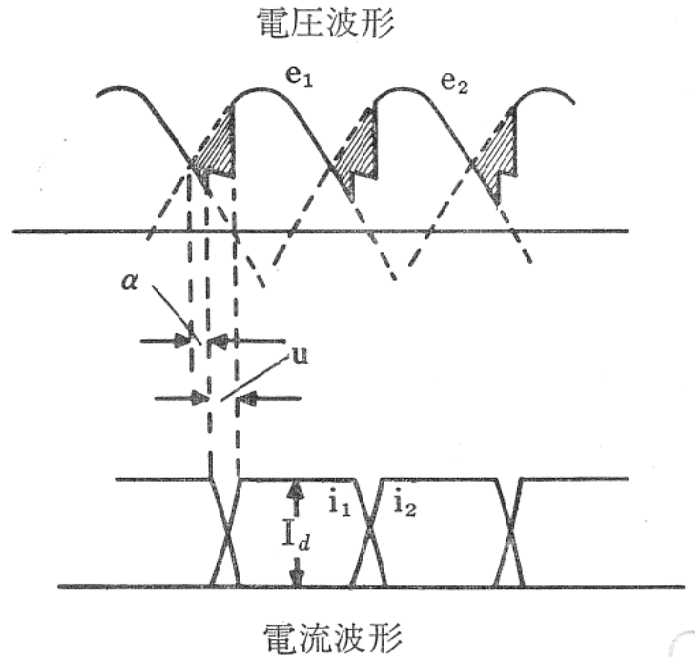


図2 順変換器の電圧電流波形

$$e_d = \frac{Px}{2\pi} I_d$$

$I_d$  は直流電流の大きさであり、 $P$  は相数である。

制御角  $\alpha$  を制御することにより直流電圧を調整することができる。交流側の電圧が  $E$ 、制御角が  $\alpha$  の時の直流電圧  $E_{d\alpha}$  は次式のようなになる。

$$E_{d\alpha} = \frac{P}{2\pi} \int_{-\frac{\pi}{P} + \alpha}^{\frac{\pi}{P} + \alpha} \sqrt{2} E \cos \theta d\theta - e_d$$

$$= \frac{P2\sqrt{2} E \sin \frac{\pi}{P}}{2\pi} \cos \alpha - e_d$$

$$= E_{d0} \cos \alpha - \frac{Px}{2\pi} I_d \quad (1)$$

変換器を逆変換器として運転する場合には、制御角  $\alpha$  を順変換器の場合にくらべてずつと大きくする。その時変換器の電流の方向は変わらず、直流側の電圧の極性変わり、送られる電力の方向が逆になり逆変換器となる。逆変換器となつた時の電圧および電流は図3のようである。この場合の角  $\gamma$  は重なり角と余裕角  $\delta$  との和より大きくなければ転流に失敗する。余裕角はいままで通電していた極が耐圧を回復しうる時間をとるための角である。

逆変換器の場合も順変換器の場合と同様に、直流電圧は次式で表わされる。

$$E_d = E_{d0} \cos \alpha - RI_d \quad (2)$$

逆変換器の場合、 $\alpha = \pi - \gamma$  とすれば

$$E_d = -(E_{d0} \cos \gamma + RI_d) \quad (3)$$

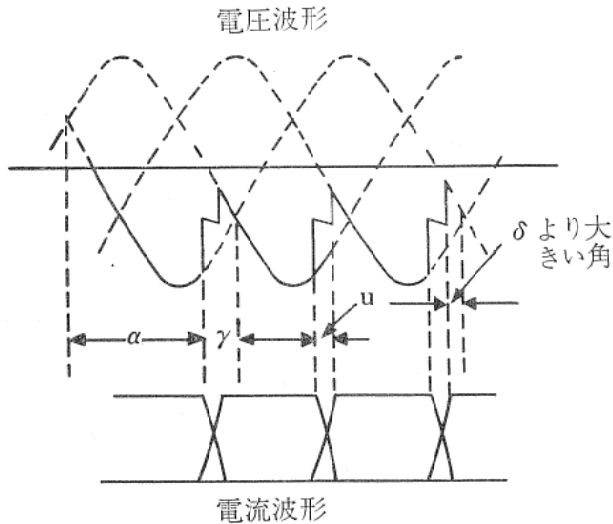


図3 逆変換器の電圧電流波形

#### 4. 直流送電システムの制御

直流送電システムにおいては、許されるだけ高い直流電圧で、安定した電力を送る必要がある。そのため通常順変換装置は定電流制御を行ない、逆変換装置では定余裕角制御が行なわれる。

直流送電回路の等価回路は図4のように表わされる。

直流部分の回路については(1), (2)式により次の関係式が成立する。

$$\begin{cases} E_{d1} = K_1 E_1 \cos \alpha - R_1 I_d & (4) \\ E_{d2} = K_2 E_2 \cos \gamma + R_2 I_d & (5) \\ I_d = \frac{E_{d1} - E_{d2}}{R} & (6) \end{cases}$$

故に

$$I_d = \frac{K_1 E_1 \cos \alpha - K_2 E_2 \cos \gamma}{R_1 + R_2 + R} \quad (7)$$

$K_1, K_2$ : 定数。  $R_1, R_2$ : 順, 逆変換器の等価抵抗。

$\alpha, \gamma$ : 順, 逆変換器の格子制御角。

これらの式から、直流電圧と直流電流、すなわち直流電力は格子制御角の制御によって変化し得ることがわかる。また変圧器のタップを変え  $E_1, E_2$  を変えることによっても送電電力を調整できる。

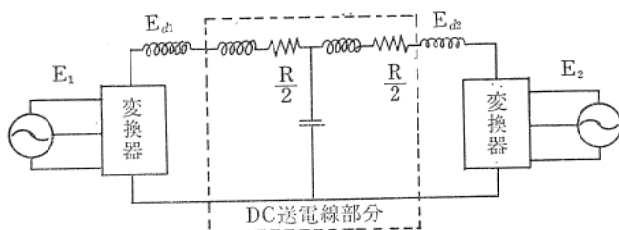


図4 直流送電の等価回路

直流送電を実際に行なう場合には、 $\alpha, \gamma, E_1, E_2$  を調整して無効電力がなるべく小さくて効率のよい安定した送電ができるように制御を行なうのである。

(4), (5)式により図5のように順, 逆変換器の特性が画ける。逆変換器では、余裕角  $\delta$  制御を行なえば無効電力が最も少なくてよいのであるが、負荷特性が垂下特性となり、電流が増加したとき直流電圧が下る。したがって順, 逆変換器を組合せて直流送電を行なう場合に、順変換器の方を単に  $\alpha$  角一定の制御をしたのでは、系統として不安定となる。これを防ぐため、順変換器では通常定電流制御が行なわれ、図6のようにして安定点が求められる。定電流制御を行なうには、直流側の電流を測定しその値が予定値よりも大きければ  $\alpha$  角を大きくし、小さければ  $\alpha$  角を小さくするように制御すればよい。

送変換器で  $\alpha$  角一定制御を行なえば安定ではあるが、 $\gamma$  は転流角  $u$  と余裕角  $\delta$  との和であり、電流の多い時は  $\gamma$  を大きくする必要があり、電流の小さい時に  $\gamma$  が大きいままだと、無効電力が大きくなり効率が悪くなる。

実際の直流送電システムにおける ASEA 社の制御方式は、逆変換器側で余裕角一定制御を行ない、順変換器側で送電電力に応じた電流制御を行なうようにしている。

直流送電システムでは、このほか色々の特性をもたせた制御を行なうことができる。その中でも周波数比率制御を

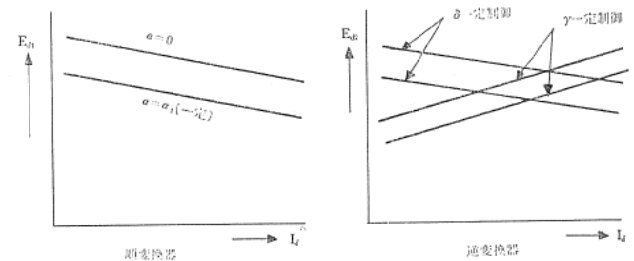


図5 順逆変換器の特性

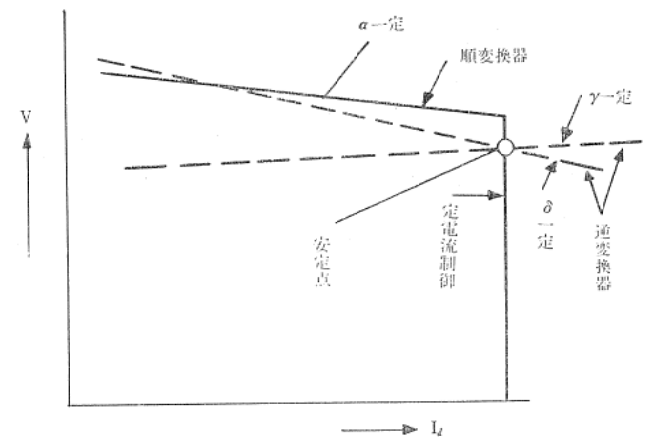


図6 直流送電システムの運転特性

行なえば、交流系統の事故時の融通電力を調整して系統の安定度の増大に大いに役立つ。直流送電系統では、変換器の格子制御角を変えることにより、容易に速やかに送電電力を換えることができるので、周波数の低下を検出して、それに応じて格子制御を行なえばよい。

格子付水銀アークバルブを用いた直流送電系統でも比較的容易に電力の流れの方向を逆転することができる。それには直流電流の方向を一定にしておいて、直流電圧の極性を変える方法が変換器の制御にとつて容易である。順、逆変換器のいずれか一方で定電流制御を行ない、他の変換器の制御角を変える。たとえば逆変換器を定電流制御にしておき、順変換器の制御角を遅らせると電圧が低下する。逆変換器は一定電流を維持しようとして、制御角  $\gamma$  を自動的に進める。制御角  $\alpha$  が  $90^\circ$  を越えてさらに大きくなると、直流電圧は自然に極性が変わり、順変換器に、逆変換器は順変換器に変わり、送電電力が反転する。

このように直流送電では、変換器の格子電圧を制御することにより、任意の送電特性をもたせることができるのであるが、それには電圧、電流、電力、周波数などの正確、迅速な測定と、格子制御電圧の発生が必要であり、順、送変換装置が安定に動作し、さらに交流電力系統をも含めた安定性を検討する必要がある。このような点を十分に検討して完全な制御を行なえば、交流系統の安定度をも、直流送電系統の功妙な電力制御によつて増大できるのである。

## 5. サイリスタ (SCR) による直流送電

現在のところ直流送電の変換器としては水銀バルブが用いられており、設備費が高く、保守が面倒である。最近 SCR の開発が進み、これを用いた直流送電が各所で研究されている。SCR を用いた安価な変換器ができれば直流送電も大いに進歩する。現在の SCR は耐圧2000~3000V 電流400A程度であるため、超高圧の直流送電を行なうには、このような SCR を多数直並列に接続する必要がある。多数直並列に接続した SCR のゲートにパルス電圧を加えて同時に通電させ、部分的に過電圧がかからないようにするには、まだ種々検討すべき問題

があるようである。パルスの立上り時間も数  $\mu\text{s}$  以下である必要があり、このパルスを高電圧の部分に伝達するパルス変成器にも問題がある。巻線形の変成器の代りに、光を用いる方法も研究されている。

筆者の研究室においても SCR の順、逆変換器を試作して、直流送電模擬回路を組立て、点弧の問題および直流送電の制御方式などについて研究中である。

## 6. むすび

現在のところ実施され、あるいは建設されつつある直流送電系統は、非常に大きな電力を速く送る場合である。これは両端に必要な変換器が水銀アークバルブで非常に高価であるためである。日本においては50c/s, 60c/sの連系がそのままではできないので、直流変換器を通して連系し、両系統の電力の融通を計っている。電力の需用は今後も急速に増加し、巨大電力の送電が必要となるので、直流送電が実施され、変換装置が安価になり、手軽で信頼性が高まったならば、将来電力系統にはさらに多くの目的のために直流送電が使われるものと思われる。

大電力の長距離送電の直流化は勿論であるが、さらに次のような場合に直流送電が考えられる。

- (1) 都心の変電所にケーブルにて送電する場合。最近の都市の負荷の増加は非常に大きく、これに電力を送るため現在でも超高圧のケーブルで都心の変電所に送電せねばならない状態である。安価な直流変換装置が開発されれば、このケーブルを直流化することが考えられる。
- (2) 大容量の火力、原子力発電所からのケーブル送電の直流化。
- (3) 交流系統の短絡電流軽減のための直流連系。交流系統の容量が大きくなると、事故の時の短絡電流が大きくなり、保護しゃ断器のしゃ断容量が問題となる。交流系統を分離して直流を介して連系しておけば、平常時には電力の融通ができ、事故の時には短絡電流を制限することができる。このような方法はすでにイギリスにおいても計画されている。

以上のように直流送電には数々の特長があるので、是非動作の安定した価格の安い変換装置を開発して、巨大化する電力の輸送に役立たせたいものである。