

# 発電所用無効電力自動制御装置

## Automatic Reactive Power Controller for Power Station

横川 純 男\* 吉田 昌 弘\* 新美 忠 正\*\*  
Sumio Yokokawa Masahiro Yoshida Tadamasa Niimi

### I. ま え が き

最近の電力系統ではその信頼性向上、および質の向上のために、あらゆる角度から検討が行なわれ、数々の対策が施されている。前者の一環としては、電力系統の連系、保護継電システムの信頼性の向上、系統安定装置の設置による停電地域の局限対策などがあげられる。後者には従来から実施されている自動周波数制御、大容量電源脱落に備えて電源に予備力を考慮しておくこと、電圧制御のためのLRT制御、SR、SCの制御、さらに最近では中央給電所において系統全体の電圧、無効電力潮流の監視制御、その一環として発電所の無効電力制御が急速に発展してきている。

一般に電圧、無効電力制御方式は次のように分類される。

#### 1) 個別制御

限定された地域の電圧、無効電力を所定値に制御するよう電気所ごとに行なうもの。

#### 2) 協調制御

部分系統において他のVQ制御と協調しながら行なうもの。

#### 3) 総括制御

系統全体のVQを監視し、そのデータにより制御目標を指示するもの。

これらの方式は、それぞれの地域条件にしたがって採用されなければならない。

たとえば、電源中心の大容量発電機はAVR運転、または必要に応じて一定無効電力運転、電圧プログラム運転が行なわれる。最近では夜間における系統電圧抑制のために、大容量火力発電所が進相運転を行なうようになってきた。

また長距離送電線を介する発電所においては送電損失を最小にするような無効電力制御が行なわれる。すなわち、送電損失を最小にするための発電機の無効電力設定値は送電有効電力の関数として与えられる。

いずれの場合も、これらの無効電力制御装置(AQR)の制御信号は発電機の電圧設定器90R(場合によっては力率設定器55R)に与えられる。

一方AQRの制御許容範囲は下記の制限から決められるので、それぞれの監視も必要である。

- 1) 遅相限界
- 2) 進相限界
- 3) 発電機電機子容量限界
- 4) 直列機器の許容最大電圧

なお、変電所における電圧、無効電力制御用AVQR<sup>(1)</sup>についてはすでに述べられているので本稿では割愛する。

### II. AVR と AQR との関係

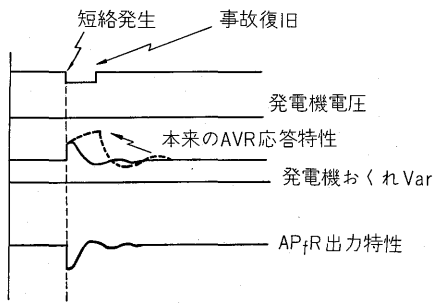
発電所における自動電圧調整装置(AVR)の特性は、一般に電圧調定率特性か、発電機端子ではAVR特性で発電機端子と系統母線との間に介在するユニット変圧器のインピーダンスによって得られる電圧調定率特性が適用される。また場合によっては折線特性付電圧調定率特性が採用されることもある。

また発電機が系統と並列する前か、単独運転時には自動電圧調整器は定電圧制御機能とし、系統と並列した際には一定力率制御器としての機能を要求される場合がある。しかし、この二つの状態変化を常に確実に時間おくれなく検出して、自動電圧調整器の機能を切換えることは不可能であり、検出失敗時は非常に危険なのでこのような方式は採用すべきでない。すなわち、並列状態にある発電機と系統母線の間には一般に複数個のしゃ断器が介在しており、そのいずれが開放しても単独状態となり、それらのしゃ断器が遠方の時はその補助接点すべてを発電所に導くことは不可能に近いことから、AVRへの切換えが不能であり、発電機の励磁系は無制御になってしまうからである。

また励磁系が自動力率調整器によって制御されている場合、本来の励磁系速応度の意味がなくなる。すなわち系統内の短絡故障によって系統電圧低下が発生しても、直接APfR特性による励磁系を有する発電機は瞬時のみ無効電力を供給し、即時に設定力率にしたがった無効電力のみを供給するように制御されてしまう。このことは過渡安定度の点からみれば逆動作である(第1図)。

発電機のkVA制限に関しても、以前にはAVRに直

\* 制技・系統技術部 \*\* 制技・第一製造部

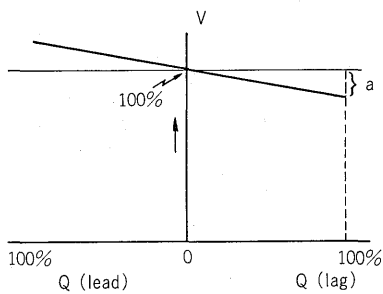


第1図 APfR 過渡応答特性  
Fig. 1. Transient character with APfR

接検出信号を与えていたが、このケースもまったく同じである。系統電圧低下に伴って発電機無効電力出力は瞬時に増大するが、kVA 制限装置もその電流値が所定値を超過すると瞬時に抑制動作をする。

このような場合、瞬時に発電機が過熱状態になることはないので、本来の速応励磁動作を行なわせ、何秒か後で kVA 制限を行なえば充分である。

すなわち、発電機の励磁系は原則的には一定電圧特性か、電圧調定率特性にしておいて、発電機の力率、無効電力、kVA 制限は、90R (または 55R) の設定器の調整で行なうことが理想である。



第2図 電圧調定率特性(1)  
Fig. 2. Voltage droop (1)

AVRの制御特性として一般に使用される電圧調定率特性は第2図のとおりである。第3、4図に電圧調定率特性設定および検出回路を示す。第3図はある相電流のインダクタンス降下電圧(電流位相に対し90°進み)をその相電圧に付加し、合成電圧をAVR検出電圧とする。この場合、検出電圧を三相全波整流すると300Hzのリップルのほかに電圧不平衡に基づくリップルが加わる。したがってトランジスタ式AVRで増幅率を大きく取る場合はあまり好ましくない。第4図の場合は発電機が平衡出力状態であれば完全な正三角形のベクトル電圧が入力となるので300Hzの電流リップルのみを対象とした検出フィルタを考えればよい。いずれの場合も出力が力率1.0の状態を増減しても検出電圧はほとんど変わらないが、無効電流が流れると、遅相の場合は電圧増、進相の場合は電圧減の方向に作用する。たとえば定格kVA相当のおくれ電流で11Vの補正ができるように選定したとすれば電圧調定率は10%となる。

第2図においても横軸の100% ΔQは100% 定格相当の無効電力偏差を意味し、この状態で設定電圧補正值がa%の時、電圧調定率はa%と定義するのが一般である。たとえば系統電圧V<sub>L</sub>と発電機設定電圧V<sub>S</sub>を一致させた状態からV<sub>L</sub>が-ΔV<sub>L</sub>%だけ変動したとすれば、AVRはそれを元の電圧V<sub>S</sub>に回復させるように動作して、発電機に式(1)で示される無効電力量Qを発生させる。

$$Q = \frac{\Delta V_L}{a} \times 100 \quad (\% \text{ Var}) \quad \dots\dots\dots(1)$$

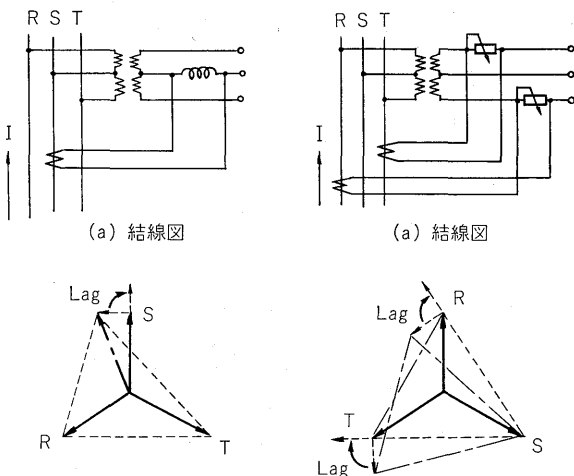
逆にAQRまたはAPfRの制御信号がパルスの時、そのパルス幅t<sub>p</sub>と90Rの走行時間T<sub>90R</sub>/100%voltとの関係から、90R設定変更幅に対する無効電力量ΔQを知ることができる。一般に90Rの調整範囲は-80%volt~110%voltで設定幅は30%であるから実際の走行時間t<sub>90R</sub>は100%volt相当の走行時間T<sub>90R</sub>に換算する必要がある。

$$\Delta Q = \frac{t_p}{T_{90R}} \times \frac{1}{a} \times 100 \quad (\% \text{ Var}) \quad \dots\dots\dots(2)$$

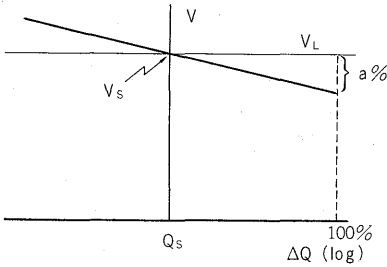
たとえばT<sub>90R</sub>=100s a=10%の時t<sub>p</sub>が0.25sであれば2.5%Var/1パルスとなる。したがってAQRによりAVRループの90Rを制御する場合、その設定用電動機の最小感動特性、走行時間、AQR制御信号パルス幅は前もって知っておく必要がある。

一方、AQRのパルス間隔は、Varのリップル、90Rの動作回数などを制限条件に決めるべきである。

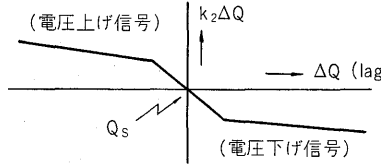
第2図の特性は差電圧検出信号と無効電流に比例した信号を同時にAVR入力としても得ることができる。すなわち、差電圧ΔVと無効電流Qに関連した信号をそれぞれk<sub>1</sub>ΔV(正符号の時電圧上げ信号とする)、k<sub>2</sub>Q



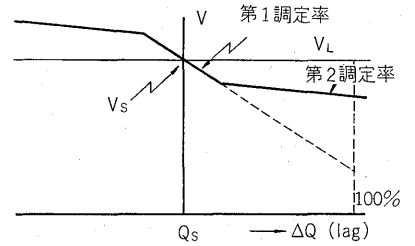
第3図 電圧調定率(1) 第4図 電圧調定率(2)  
Fig. 3. Circuit for droop (1) Fig. 4. Circuit for droop (2)



第 5 図 電圧調定率特性(2)  
Fig. 5. Voltage droop (2)



第 6 図 ΔQ 折線特性  
Fig. 6. Non linear character of ΔQ



第 7 図 折線特性付電圧調定率  
Fig. 7. Voltage droop with non linear character

(おくれ無効電流発生時電圧下げ信号とする)とし、AVRの増幅率を大きくとれば、常に式(3)が成立する。

$$k_1\Delta V + k_2Q = 0 \quad \dots\dots\dots(3)$$

ここで電圧調定率は  $k_2$  の  $k_1$  に対する比率で決まる。すなわち第 2 図の電圧調定率直線は AVR からみた時、常に式(3)から得られる。

電圧調定率特性を得る別の手法として、第 5 図のように、設定電圧  $V_s$  と発電機端子電圧との偏差が零の条件で設定力率と有効出力によって決まる設定無効電力  $Q_s$  を基準に偏差無効電力  $\Delta Q$  に比例した制御信号  $k_2\Delta Q$  と、電圧偏差信号  $k_1\Delta V$  とを同時に AVR 入力とする方式があげられる。本方式の場合も  $Q_s$  を基準とした電圧調定率は  $k_2$  の  $k_1$  に対する比で決まる。 $k_2\Delta Q$  の検出特性として第 6 図のような折線特性を得るならば、電圧調定率特性は式(3)の関係から第 7 図のようになる。この場合は AQR 信号を力率設定器に与えることが可能となる。

なお実際には発電機端子にて AVR を介して得られる電圧調定率のほか、系統母線と発電機間のインピーダンスによる調定率分を加算して総合調定率を使用しなければならない。

III. 送電損失最小制御用 AQR

送電損失最小制御の目的は長距離送電線を介して大電力を送電する場合に検討の必要性が生ずるもので、送電の経済運用がその目的である。

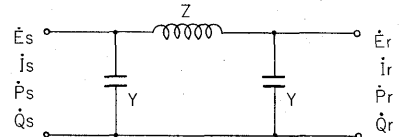
1. AQR 定数の算定

送電線の四端子定数を第 8 図のような集中定数から求めると次のとおりになる。

$$\left. \begin{aligned} A &= 1 + YZ \\ B &= Z \\ C &= 2Y + Y^2Z \\ D &= 1 + YZ \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(4)$$

送受両端の  $E, I, P, Q$  が第 8 図の時、AQR 定数は次のようにして求めることができる。

$$\left. \begin{aligned} \dot{E}_s &= A\dot{E}_r + B\dot{I}_r \\ \dot{I}_s &= C\dot{E}_r + D\dot{I}_r \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(5)$$



第 8 図 送電線インピーダンス  
Fig. 8. Impedance of transmission line

$$\left. \begin{aligned} P_s + jQ_s &= \overline{\dot{E}_s} \cdot \dot{I}_s \\ P_r + jQ_r &= \overline{\dot{E}_r} \cdot \dot{I}_r \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(6)$$

ただし進相を正とする。

ここで  $A, B, C, D$  を式(7)のとおりとすると、

$$\left. \begin{aligned} A &= a + ja' \\ B &= b + jb' \\ C &= c + jc' \\ D &= d + jd' \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(7)$$

$$\begin{aligned} P_s &= (ac + a'd')E_r^2 + (ad + a'd' + bc + b'c')P_r \\ &\quad - (ad' - a'd - bc' + b'c)Q_r + (bd + b'd') \\ &\quad \frac{P_r^2 + Q_r^2}{E_r^2} \end{aligned} \dots\dots\dots(8)$$

$$\begin{aligned} Q_s &= (ac' - a'c)E_r^2 + (ad' - a'd + bc' - b'c)P_r \\ &\quad + (ad + a'd' - bc - b'c')Q_r + (bd' - b'd) \\ &\quad \frac{P_r^2 + Q_r^2}{E_r^2} \end{aligned} \dots\dots\dots(9)$$

ここで送電損失  $P_l$  を求めると、

$$\begin{aligned} P_l &= P_s - P_r \\ &= KE_r^2 + lP_r + m\left(\frac{P_r^2 + Q_r^2}{E_r^2}\right) - nQ_r \end{aligned} \dots\dots\dots(10)$$

ただし

$$\begin{aligned} k &= ac + a'c' \\ l &= ad + a'd' + bc + b'c' - 1 \\ m &= bd + b'd' \\ n &= ad' - a'd - bc' + b'c \end{aligned}$$

式(10)で無効電力  $Q_r$  に関する送電損失最小条件は、 $E_r = 1.0(\text{pu})$  一定とし、 $\partial P_r / \partial Q_r$  もほとんど零であるから

$$\frac{\partial P_l}{\partial Q_r} = 2mQ_r - n = 0 \quad \dots\dots\dots(11)$$

$$\begin{aligned} \therefore Q_r &= \frac{n}{2m} \\ &= \frac{ad' - a'd - bc' + b'c}{2(bd + b'd')} \end{aligned} \quad \dots\dots(12)$$

式(9)に式(12)を代入して、

$$\begin{aligned} Q_s &= \left\{ (ac' - a'c) \right. \\ &+ \frac{(ad + a'd' - bc - b'c'xad' - a'd - bc' + b'c)}{2(bd + b'd')} \\ &+ \frac{(bd' - b'd)(ad' - a'd - bc' + b'c)^2}{4(bd + b'd')^2} \\ &+ (ad' - a'd + bc' - b'c)Pr + (bd' - b'd)Pr^2 \\ &= a_0 + b_0Pr + c_0Pr^2 \end{aligned} \quad \dots\dots(13)$$

また  $Pr \doteq Ps$  とすれば

$$Q_s = a_0 + b_0Ps + c_0Ps^2 \quad \dots\dots(14)$$

式(14)の AQR 定数  $a_0, b_0, c_0$  それぞれの送電線定数にしたがって決められ、発電機の有効電力出力  $Ps$  に応じた無効電力基準値  $Q_s$  が与えられ、常に送電損失を最小とする自動無効電力制御が行なえる。

また式(14)は二次関数で与えられているが、近似的に一次関数でもその目的を充分構成し得る場合もある。

## 2. 送電損失最小制御用 AQR の実施例

第 9 図に東京電力・水殿発電所に納入された例を示す。ただし説明のために 1 台分のみを示す。

この場合の AQR 基準値  $Q_s$  は一次関数で近似されている。本装置の特徴は次のとおりである。

- 1) 有効電力および無効電力検出装置はトランジスタ形時分割掛算回路による電力直流変換装置で、95% 応答時間が 0.3 秒、精度は 0.5 級である。

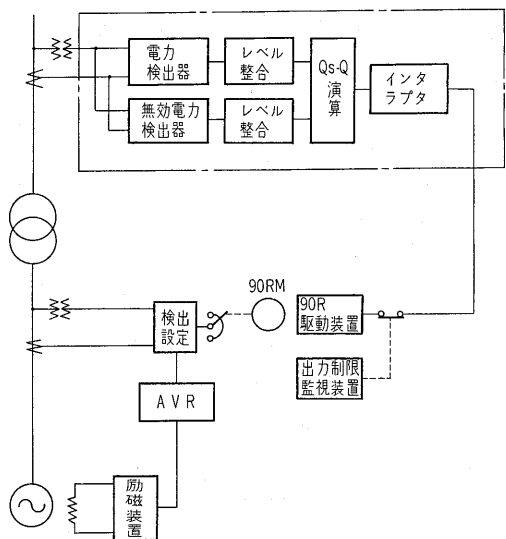
電力変換器 (FVW II-5)

0~5 V/0~X MW

無効電力変換器 (FVBW II-5)

0~±5 V/0~X MVAR

- 2) レベル調整、増幅演算部は標準系列のトランジスタ



第 9 図 AQR 概念図

Fig. 9. Block diagram for AQR

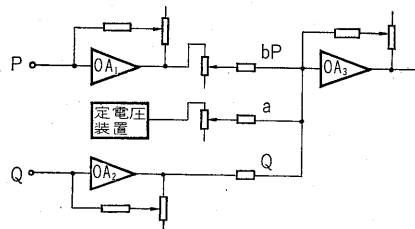
形増幅器が使用されている。

- 3)  $4Q$  信号発生用インタラプタ回路はトランジスタ形ロジック素子 (F-Matic 標準素子) で構成されている。

第 10 図に  $Q_s - Q$  演算回路を示す。  $Q_s$  は(III.1.)項で得られた AQR 定数による一次式 (近似式) により与えられている。 OA1, OA2 はそれぞれ PQ のレベル整合用演算器で OA3 は式(15)の演算用増幅器である。

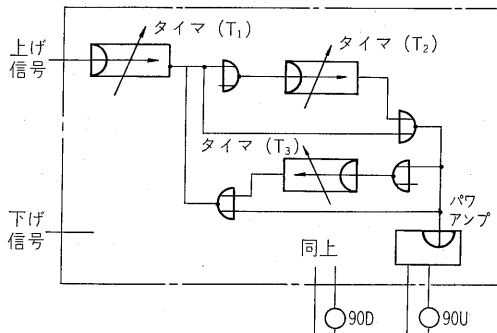
$$\begin{aligned} 4Q &= Q_s - Q \\ &= a + bP - Q \end{aligned} \quad \dots\dots(15)$$

第 11 図  $4Q$  は出力を入力とし、励磁系速度応度などの協調を得るためのパルス発生回路である。これはシリコントランジスタを用いた NOR, NAND 素子を基本とした標準ロジック素子により構成されている。



第 10 図  $Q_s - Q$  演算

Fig. 10. Calculation circuit for  $Q_s - Q$



第 11 図 パルス発生回路

Fig. 11. Pulse generating circuit

タイマ  $T_1$  は  $4Q$  信号のフリッジ成分に対するフィルタで、90R の不要動作を避けるために設けられたものである。  $T_2$  は 90R 駆動パルス幅を規定し、  $T_3$  が AQR の速度を規定するパルス間隔調整用タイマである。  $T_1, T_2, T_3$  は下記のような調整幅を有する。

- $T_1$  : 4~12 s
- $T_2$  : 0.25~2.5 s
- $T_3$  : 4~12 s

## IV. 発電機無効電力制御用 AQR

系統電圧の調整を目的として発電機が  $APfR$  または AQR によって制御されることが多くなってきた。この場合も AVR ループとは別に III. 項と同じように別の制御ループを構成して、AVR の 90R を制御する方式が一般的である。なお、式(16)~(18)に示される演算結果は、

系統の過渡状態には 90R に制御信号を与えず、励磁系が本来の使命を果たした後で、初めて動作が開始され、かつその速度度もインタラプタにより極端に抑制されるように考慮されている。

$$Q_s = a \dots\dots\dots(16)$$

$$Q_s = bP \dots\dots\dots(17)$$

$$Q_s = a + bP \dots\dots\dots(18)$$

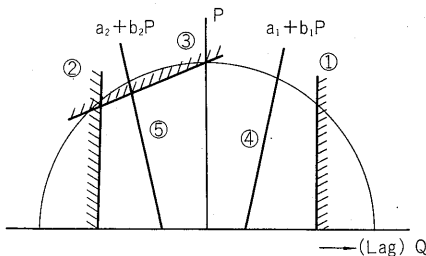
式(16)は一定無効電力制御、式(17)は一定力率、式(18)は前者の中間特性を示すものである。式(18)において、 $a, b$  ともに±設定可能な2種類の  $Q_s$  が選べるようにすれば、切換えによって昼夜それぞれ別個の無効電力制御を行なうことができる。

以下に東京電力・所野第三発電所に納入されたAQRの概要を述べる。

1. 原理および構成概要

検出部は III 項と同様、電力および無効電力変換装置からなり、 $Q_s$  演算部は IC 増幅部を主体とした  $\pm a_1, \pm a_2, \pm b_1, \pm b_2$  の設定機構、コンパレータよりなる。コンパレータ出力はトランジスタロジック素子で構成されるインタラプタ回路に与えられる。

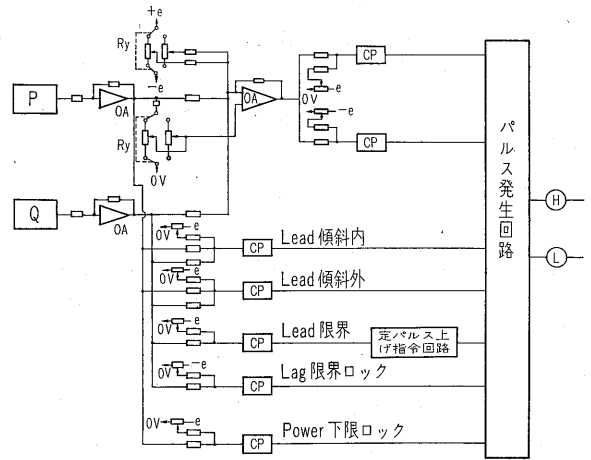
第 12 図に  $Q_s$  特性の設定例を示す。すなわち2種類の  $Q_s$  が与えられており、プログラムタイマにより、その設定切換えを行なえば、たとえば昼間は有効出力に応じた遅相無効電力制御(直線④)が行なえ、夜間にはやはり有効出力に応じた進相無効電力制御(直線⑤)が行なえる。



第 12 図  $Q_s$  特性および制限特性

Fig. 12.  $Q_s$  characteristic curve and limiting curves

なお第 12 図において、遅相無効電力出力側には界磁容量限界を加味した制限特性(直線①)を設け、この制限を越した場合はAQR信号をロックし、進相無効電力出力側には安定限界を加味した制限特性(直線②)を設け、発電機出力ベクトルがこの限界を越した場合は瞬時に一定パルス幅だけ 90R を“上げ”側に強制制御するように考慮されている。また直線③は直線①と同様AQR信号の 90R “下げ”側をロックするために使用される。さらに発電機有効出力が所定値以下になった場合はAQR信号は完全にロックされ、制御除外と同等な働きを持たせてある。



第 13 図 AQR ブロック図

Fig. 13 Block diagram for AQR

第 13 図は AQR のブロック図である。

V. 制限条件

AQR とその信号を受ける AVR にはそれぞれ次のような制限条件を設け、動作をロックするか、除外しなければならない。

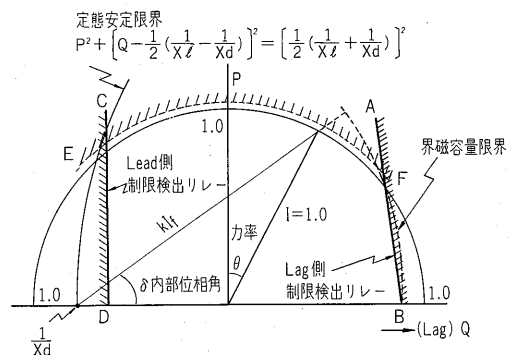
1. 発電機からみた制限

1) 発電機の遅相無効電力の制限監視

第 14 図に示すように、発電機界磁容量限界値が遅相無効電力許容値に関連しているので、無効電力検出装置により、その制限値を検出する。無効電力検出装置は  $15^\circ$  傾斜の位相特性を持たせた直線  $\overline{AB}$  のように設定され、その右側に  $W = P + jQ$  ベクトルが入った場合に 90R への AQR 信号をロックする。場合によっては同時に 90R に適当な幅の下げ方向パルスを与える。

2) 発電機の進相無効電力制限監視

第 14 図のように動態安定度または定態安定度曲線に関連して進相無効電力検出装置によりその制限値を検出する。特にターボ発電機の場合前記条件のほかに固定子



$x_d$ : 直軸リアクタンス

$x_l$ : 変圧器および系統インピーダンスの和

第 14 図 非突極機の制限および検出  $R_y$  ( $V=1.0$  p.u 一定)

Fig. 14. Capacity limit and detecting relay for cylindrical synchro machine ( $V=1.0$  canst)

巻線端部過熱も加味しなければならない。なお、水車発電機で短絡比が大きい場合は進相無効電力制限監視は不要の場合もある。

無効電力検出装置の動作領域は第 14 図の直線  $\overline{CD}$  の左側で、検出装置動作時、場合によっては 90R に適当な幅の上げ方向パルスを与える。また当社では、進相無効電力検出装置は瞬時形を用い、遅相無効電力検出装置としては誘導継電器の使用を標準としている。

### 3) 発電機の kVA 制限監視

第 14 図のように直線  $\overline{AB}$ 、直線  $\overline{CD}$  に対し、曲線  $\overline{EF}$  を kVA 制限曲線とし、その上側領域で動作させる kVA 制限検出装置を設ける。近似的には発電機端子電圧一定の条件で誘導形過電流継電器が採用し得る。ただし、主回路過電流継電器よりも電流設定値は低目とし、反限時特性も励磁系の突き上げ動作時、不要動作を避けるよう長時限形の採用か、レバー整定を大き目に選定すべきである。

## 2. AQRのロック

1) 無効電力検出点または送電端電圧の上下限の監視を行ない、その制限値を逸脱した場合 AQR 出力信号はロックする。これらは過電圧継電器および低電圧継電器により検出する。

2) AQR 装置故障、たとえば AQR 信号パルス幅異常時など AQR を停止とする。

## VI. む す び

本稿では AVR の電圧調定率特性の概念を述べ、AQR または  $APfR$  制御ループの考え方、およびその組合せ方法について述べたが、なんらかの参考になれば幸いと思う。なお、当社 AQR の標準化に有益なご指導を賜った東京電力関係各位に厚くお礼申し上げる次第である。

### 参考文献

- (1) 立松・永江・吉田：電圧、無効電力自動制御装置  
41 No.11 (昭 43)

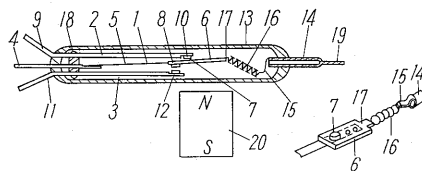
## 発明の紹介

## 封 入 ス イ ッ チ

(特許第 551334 号)

本発明は、ガラス容器中に封入した開閉要素を外部から制御磁束によって開閉する封入スイッチに関するもので、図に示すように、可動接点 1 と固定接点 2 (常閉接点) および 3 (常開接点) とが容器 13 内に封入されている。可動接点 1 は、外部引出導体 4 に接続され適当なスティフネスを有する板ばね 5 と、板ばね 5 の先端に取り付けられ制御磁束によって運動する磁性体のアマチャ 6 と、アマチャ 6 に固定された接触部 7、8 とから構成され、固定接点 2、3 は、外部引出導体 9、11 の延長部に設けられ可動接点の接触部 7、8 と対向する接触部 10、12 を備えている。またアマチャ 6 の先端部のフック 17 と、容器 13 の一部に構成されたフック 15 との間には圧縮ばね 16 がそう入されている。アマチャ 6 に対向する位置には制御磁束発生装置 20 が設けられている。

本発明によれば、制御磁束がアマチャ 6 に作用すると、アマチャ 6 は反転動作するが、ばね 16 の存在により可動接点のスナップ動作はきわめて確実にこなわれ、接点動作時の跳躍現象もきわめて小さいという特長がある。またすべての接点を容器の一方側で構成することができ、しかも封入に先立って接点間の寸法を調整することができるから、製造上もきわめて有利である。





\*本誌に記載されている会社名および製品名は、それぞれの会社が所有する  
商標または登録商標である場合があります。