

## 発電機無効電力調整装置故障について【2020年1月16・17日】（報告）

環境技術課

電気主任技術者 岡本 保雄

### ○当施設の発電機無効電力制御方法

当施設においては、蒸気タービン発電機（TG）が関西電力系統に併入されている場合、受電点の無効電力がほぼ零になるように、発電機の励磁を調整制御している。（AQR制御）

またこの制御は、発電機の状態にかかわらず受電点での無効電力制御を行うため、発電機の許容値を越さないようにkVA制限が設定されている。

### ○故障時の発電機の状況（時系列）

1月16日（木）10時30分頃 日常巡視点検において中央制御室電力監視盤を点検中、非常用高圧母線電圧7,000V、非常用動力低圧側480Vと通常より高い指示値であった為、状況の確認を行った。（1号炉1炉運転中、発電機関西電力系統併入運転中）

- ・主変2次電圧7,000V（通常6,600～6,800V）
- ・主変2次電流550A（通常50～0A）
- ・主変2次有効電力0MW（通常±1,000～0kW）
- ・主変2次無効電力7,000kvar（通常±300～0kvar）
- ・警報表示及び保護リレーの作動なし

以上の状況から、発電機の無効電力制御の異常と考えられたため点検した。

発電機のAQR制御が働いてない可能性があるため、AQR使用ランプ確認した。（同期操作卓、DCS共）→AQR使用中点灯

DCS無効電力トレンドから異常発生開始時刻調査した。→9:50頃からで、特段の操作は行っておらず通常運転中に発生したと思われる。操作誤りの可能性は低く、故障と考えられ、発電機運転継続可能か検討するため、発電機側各計器指示値を確認した。



写真1 故障時の状況

発電機出力2,600kw（定格12,000kw）電流750A（定格1,160A）無効電力9,000kvar→kVA換算9,368kVA（定格13,333kVA）界磁電圧38V（定格DC110V）、界磁電流6.3A（定格6.3A）ただし励磁（界磁）電圧電流値はブラシレス発電機のため、交流励磁装置（ACEX）ではなく永久磁石発電機（PMG）を介して自動電圧調整装置（AVR）からの出力値である。

以上の項目は定格以内であり、電圧の増加も1割以内であり、このまま長時間運転継続することは問題あるとしても、直ちに停止する必要はないと判断した。

川崎重工工業㈱に点検修理を依頼するとともに、本日中の来場が不可能な場合も考慮して、引き続き故障個所の調査及びkVA制限が有効に働いているかの確認を行う事とした。

○故障箇所調査

電図 5/16 G42 の発電機無効電力調整装置 (MPCユニット 形式 MPC-R1C1C) で写真 2 の LOWER 出力ランプ連続点灯を確認したため、制御リレーの状況確認を行う事とした。

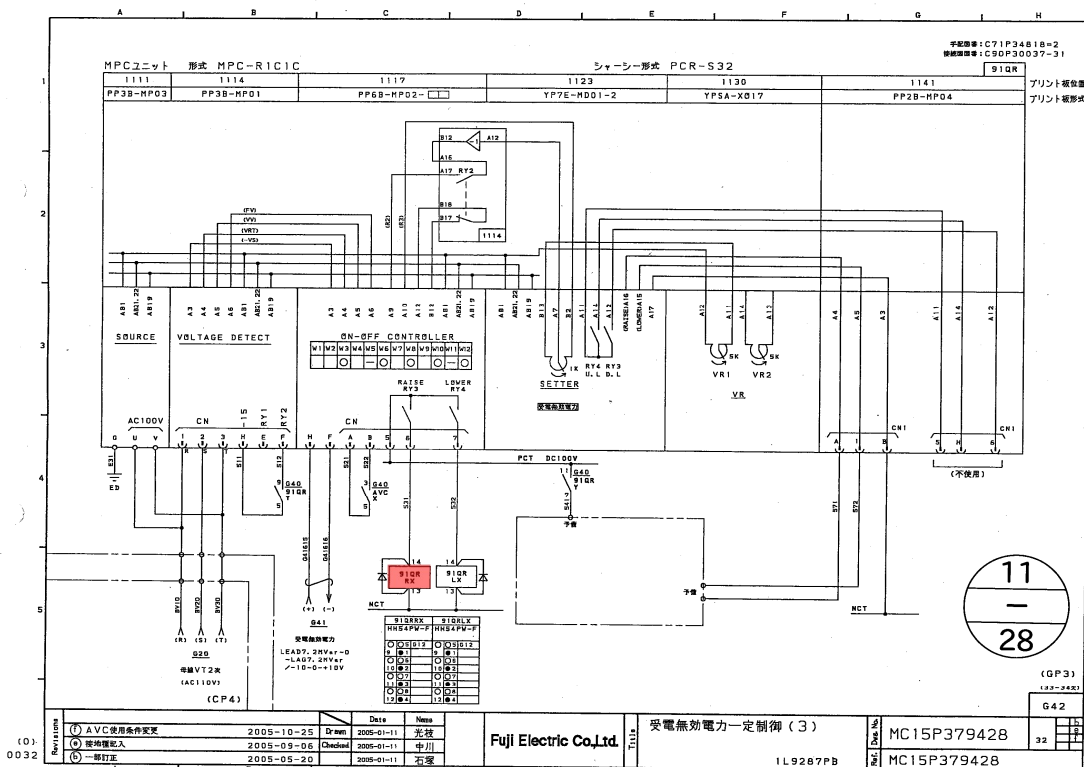
電図 5/16 G12 でリレー91QRLX、90RX のコイルに荷電されていた。このことからAQR制御器 (MPCユニット) が励磁下げ出力を出しているのにAVRユニットは励磁上げの信号を受けている事がわかった。

電図 5/16 G10 ~ G13 のシーケンスを調査した所、90RX リレーコイルが荷電されているのに、その為のリレー、スイッチ等の 90RX リレーON 条件が成立していないため、接点の焼き付きの可能性を考慮し、関連するリレー接点の目視チェックを行ったところ、91QRRX リレーの異常を発見し、交換したところ正常に復帰した。

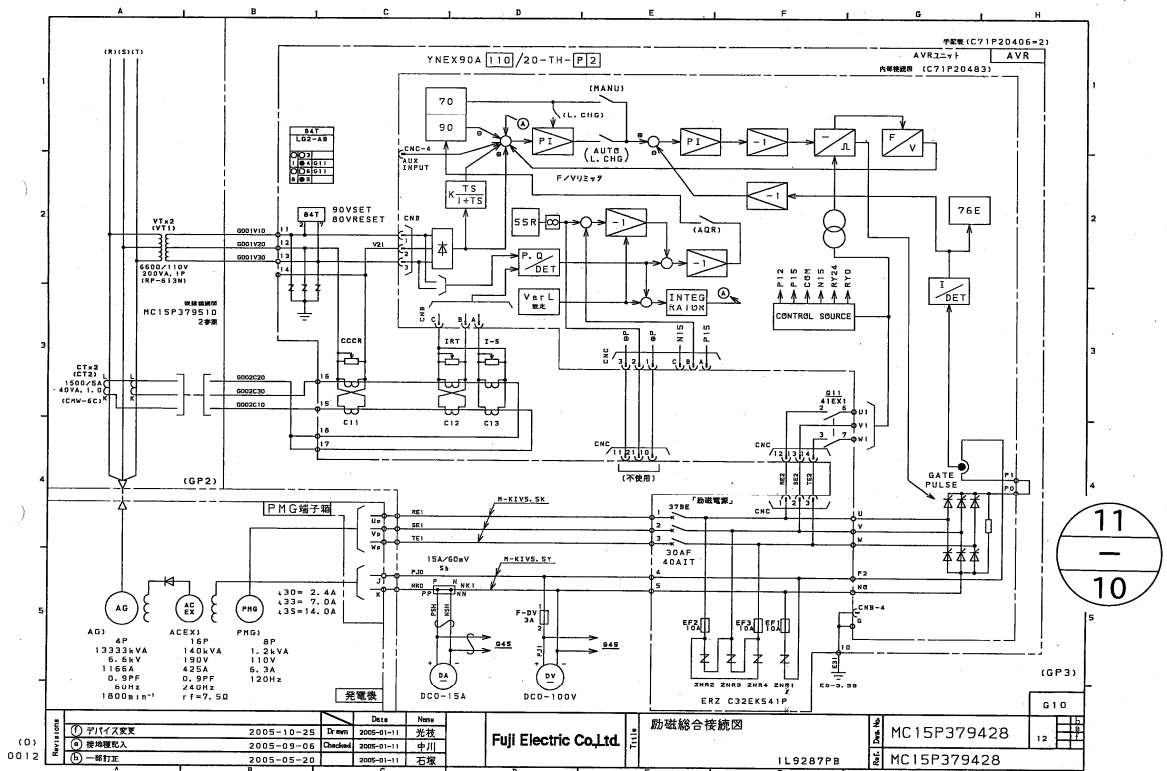
91QRRX リレーは型式 HH54PW-F であるが在庫がないため HH54PW と交換し HH54PW-F (サージキラーダイオード付き) を購入後に 91QRLX と合わせて交換することとした。



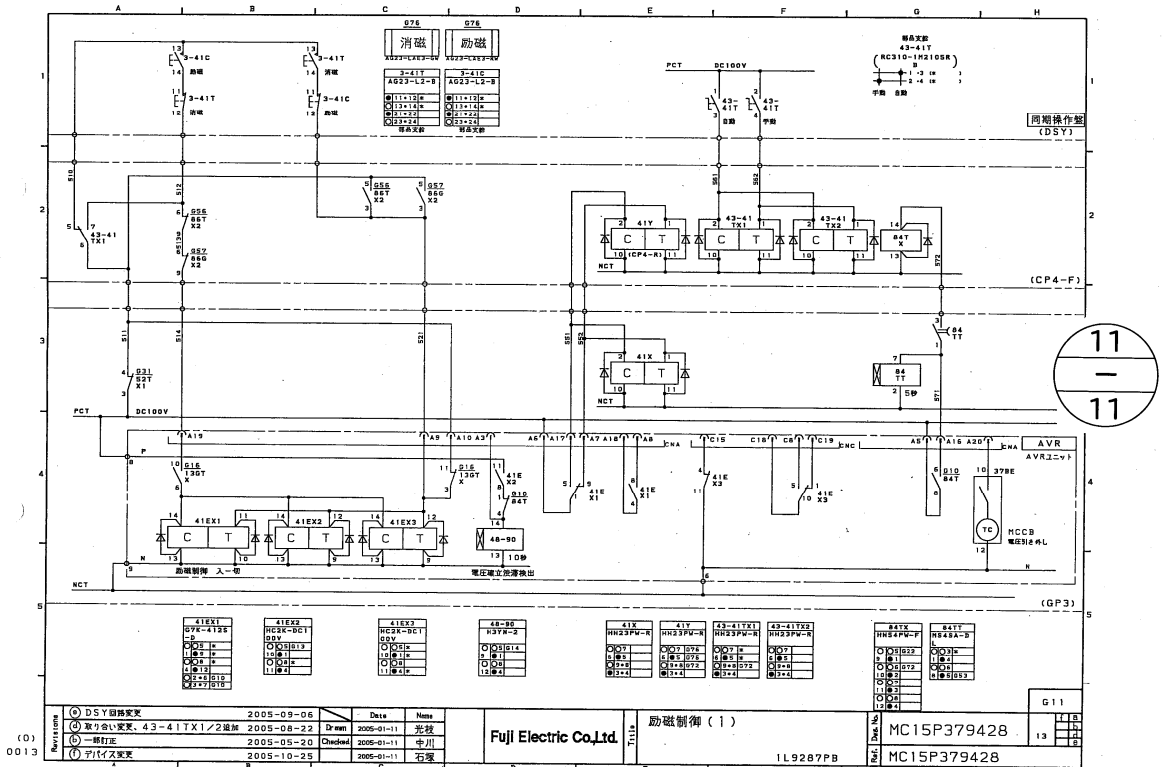
写真 2 MPCユニット



電図 5/16 G42



電図 5/16 G10



電図 5/16 G11



### ○1月17日の故障状況について

1月17日（金）始業時 TAN（運転委託業者）より昨夜逆方向が故障した様子で、電圧が6,300～6,400Vに下がり、無効電力が負方向に増加しているとの報告を受けたため、状況確認を行った。

1月16日（木）21時25分頃より異常発生。17日9時頃状況確認したところ、主変2次電圧6,300V 主変2次電流324A 主変2次電力0.9MW（送電）主変2次無効電力0.285Mvarから-3.55Mvarへ急減少（1炉運転中）していた。

状況から昨日と逆の励磁電流減少による発電機誘起電圧減少によるものと考えられ、91QLRXリレー（励磁下げ側）不良と判断し、交換したところ正常になった。ただし、リレー予備品がHH54PW型しかなかったため、HH54PW-Fを購入後に取換えた。また、同様の動きをする下記リレーの取り換えを行った。

- ・2月3日（月）91QRRX、91QLRXリレー取り換え
- ・2月5日（水）90RX、90LXリレー取り換え

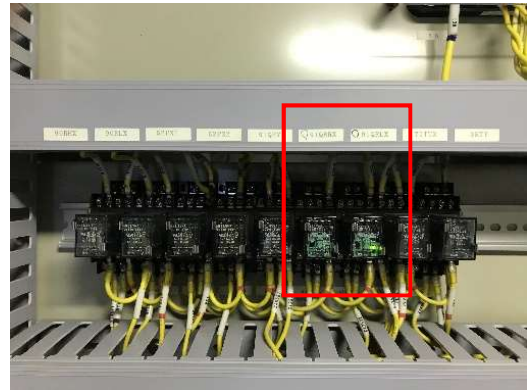


写真3 リレー取り換え後

### ○kVA制限の確認について

1月16日（木）AQR故障時、発電機kVA制御が働いて保護していたことの確認を行っていなかったため、後日に発電機無効電力を図1のトレンドで確認を行った。

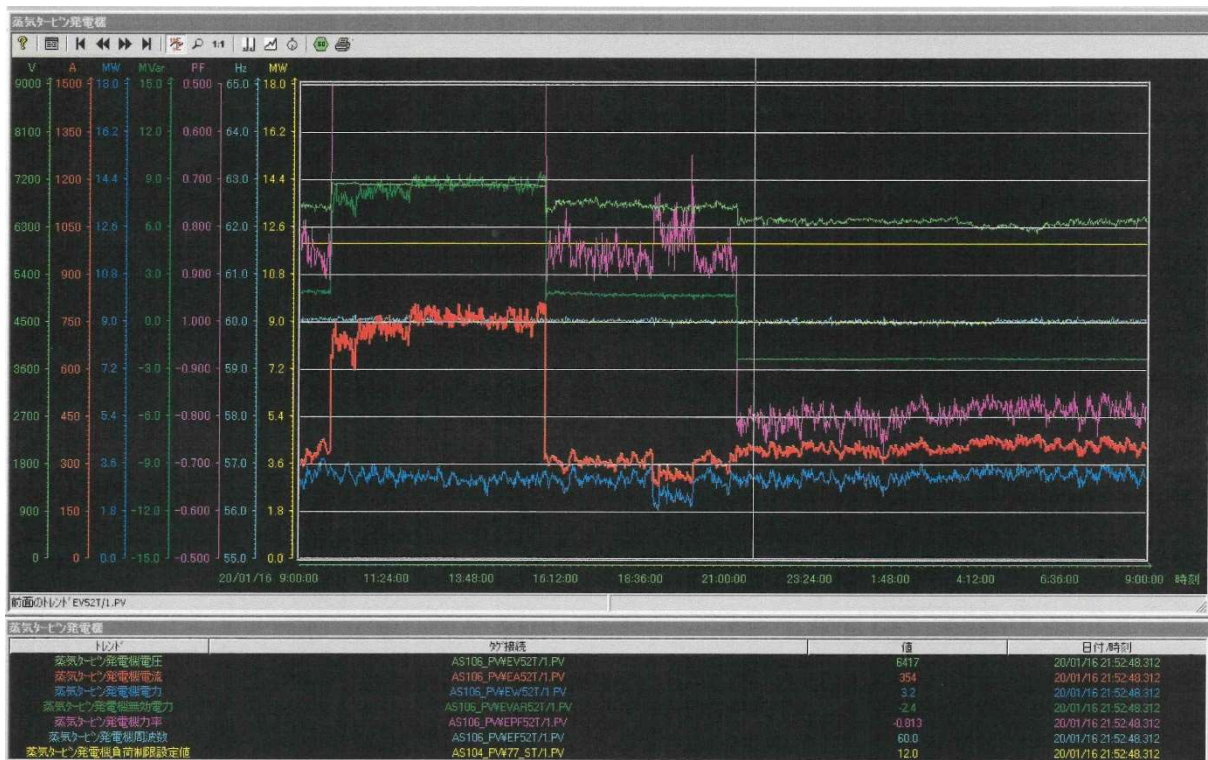


図1 トレンド

発電機無効電力遅れ側異常時ほぼ+9.0Mvar、最大+9.4Mvar、進み側異常時-2.4Mvarで有効電



力 2.5~3.5MW とすれば図 2 の発電機 kVA 制限整定曲線及び表 1 の kVA 制限整定値・発電機出力限界値から、kVA 制御内に入っていたことが分かり、kVA 制限は有効に働いていたと考えられる。

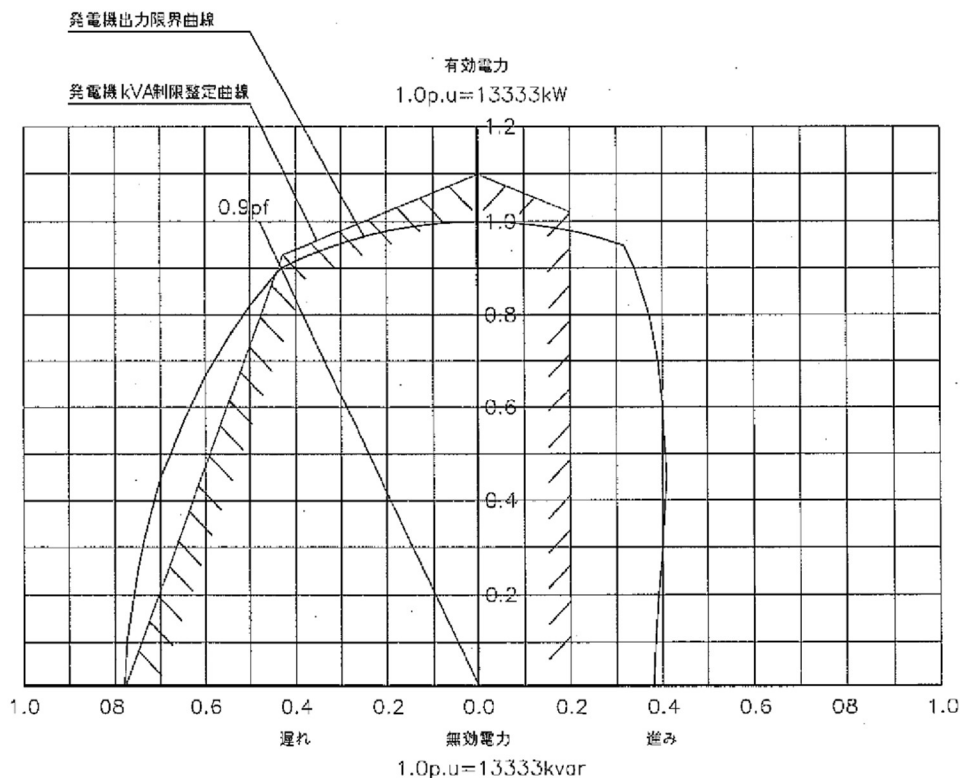


図 2 発電機 kVA 制限整定曲線

表 1 kVA 制限整定値・発電機出力限界値

炉	有効電力 kW	kVA 制限整定値		発電機出力限界値	
		遅れ+kvar	進み-kvar	遅れ+kvar	進み-kvar
1 炉運転	0	10,390	2,660	10,390	5,060
	2,000	9,640	2,660	10,260	5,130
	2,500	9,460	2,660	10,130	5,190
	3,000	9,270	2,660	9,990	5,260
	3,500	9,080	2,660	9,860	5,330
2 炉運転	5,500	8,330	2,660	9,460	5,390
	6,000	8,140	2,660	9,330	5,460
	6,500	7,950	2,660	9,060	5,390
	7,000	7,760	2,660	8,790	5,330
	7,500	7,580	2,660	8,660	5,330
3 炉運転	9,000	7,010	2,660	7,990	5,190
	1,0000	6,640	2,660	7,330	4,990
	12,000	5,880	2,660	5,860	4,530

## 発電機の無効電力制御について参考説明など

### ○無効電力の符号について

- ・ 無効電力は遅相を基準として考える。
- ・ 有効電力と遅相無効電力が同じ向きの場合、無効電力は+とする。
- ・ 有効電力と遅相無効電力が逆向きの場合、無効電力は-とする。
- ・ 遅相無効電力を基準とするため、-符号の遅相電力を進相電力とする。
- \* 当施設の力率計、無効電力計について上記通りの符号で指示していることを確認した。
- \* トレンドにおいて、正常な状態でも図3の様に主変2次無効電力が異常な値を示すことがあるので注意のこと。

主変2次有効電力が正送（受電）となった時、主変2次無効電力逆送（送電）が+側最大値となり、主変2次有効電力が逆送（送電）になった時、主変2次無効電力正送（受電）が-側最大値を示している。（帳票は正常、DCS更新時に調査する様に川崎重工業株へ依頼中）

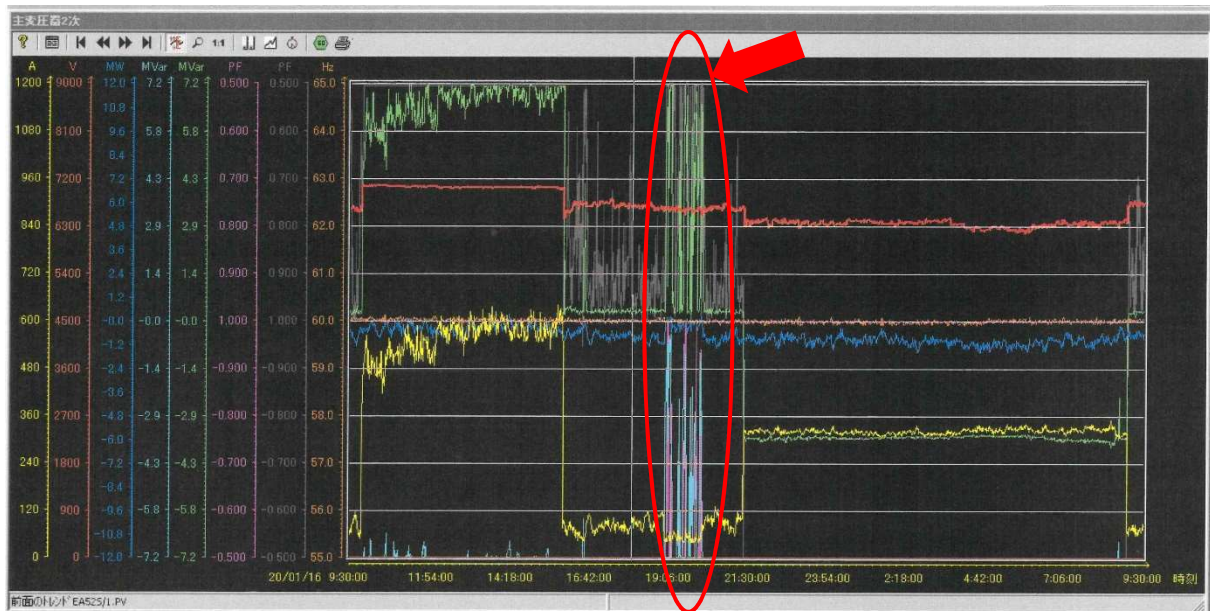


図3 トレンド

### ○発電機（中央制御室 蒸気タービン発電機電力監視盤）の無効電力計、力率計

負荷は通常遅相で遅れ無効電力を要求するから、受電点で無効電力零の制御を行うなら、発電機は遅相電力を送り出す（遅相運転）必要があり、また発電機の進相運転は、同期外れや、固定子鉄心端の過熱など問題が生じるため通常行わない。そのため発電機は通常遅相無効電力を送電しており、有効電力は必ず送電側なので、発電機の無効電力は+で、力率計はLAG遅れ側を指している。

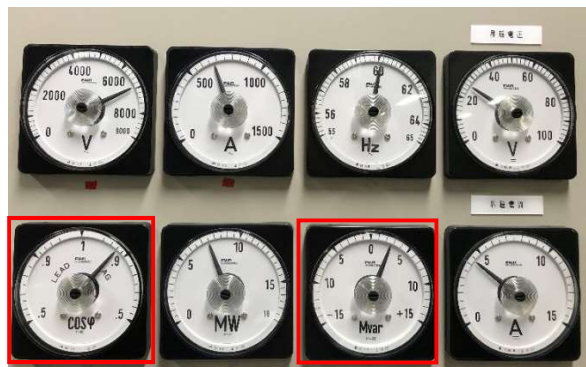


写真4 蒸気タービン発電機電力監視盤

○受電点（中央制御室 特高受電電力監視盤）の無効電力計、力率計

当施設では、受電点において力率割引の関係から遅相無効電力を受電しないように、遅相電力を僅かに送電（0～300kvar）する様に設定し制御している。

通常運転時において、無効電力計は有効電力の向きで指針が左右に変化するが、有効電力送電中の無効電力計は+側（0 から+300kvar）指示し、有効電力が受電になれば指針は右に振れ、-側（0 から-300kvar）を指示している。

力率計も有効電力の向きで指針が左右に変化するが、有効電力が逆送であれば**写真5**の力率計は1からLAG側を指示し（1炉運転時はLAG側0.95～0.6 2炉運転時は1）、有効電力が正送になれば**写真6**の指針は右に振れ、力率計は1からLEAD側を指示している。



写真5 逆送の状況



写真6 正送の状況

○発電機の無効電力と励磁電流の関係について

同期発電機の抵抗分を無視した等価回路は**図4**の様に表せる。ここで  $V_0$ =無負荷誘導起電力（内部誘導起電力）、 $V_r$ =発電機端子電圧、 $X$ =同期インピーダンス、 $I$ =発電機電流とすれば同期インピーダンスによる電圧降下は  $XI = V_0 - V_r$ （全てベクトル）と表せる。

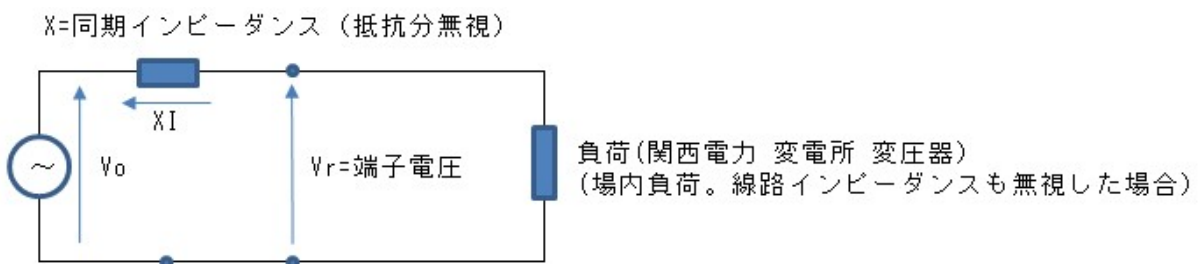


図4 同期発電機の抵抗分を無視した簡易な等価回路

$V_r$  を基準としたベクトル表記にして、 $V_r$  を両辺にかけ、 $X$  を右辺に移項し実数項と虚数項に分けて整理し、遅れ無効電力を正とするため虚数項の符号を入れかえれば**式1**となる。

$$V_r I = V_0 V_r \sin \delta / X + j(V_0 V_r \cos \delta / X - V_r V_r / X) \cdots \text{式1}$$

これを書き換えれば皮相電力= $P+jQ$  ということで、その実数項  $P = V_0 V_r \sin \delta / X$  は発電機の有



効電力を表しており、虚数項  $jQ = j(V_0V_r \cos \delta / X - V_rV_r / X)$  は無効電力を表している。

これを利用し発電機端子電圧  $V_r$  を基準として  $V_0$ 、 $I$  のベクトル図を描き励磁電流を増減した時のこれらの関係を考えてみる。ただし簡単にするため、場内消費を零とし、配電線路の電圧降下を無視し関西電力系統の変電所電圧と同じとし、 $V_r$  一定として考えてみる。また、同期発電機の励磁電流と発電機電流の特性は、**図5**のV曲線である。

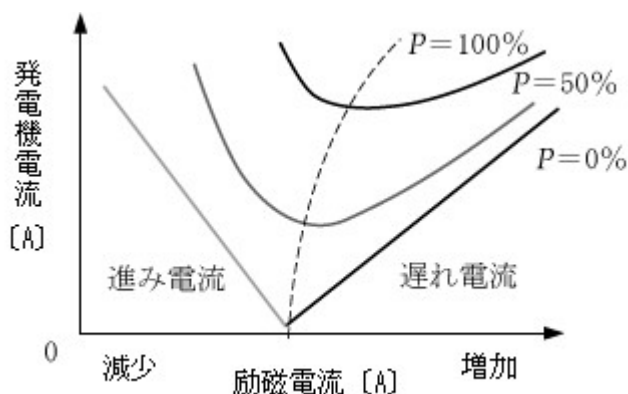
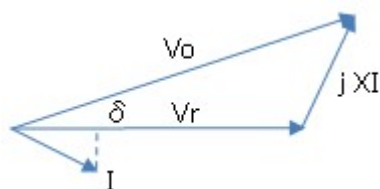


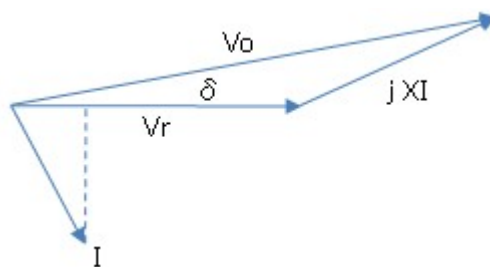
図5 同期発電機のV曲線

通常運転では発電機は有効電力を送電し、遅相運転しているので  $V_0$  は  $V_r$  より進相で、発電機電流は遅れとなるためベクトル図1のようになる。



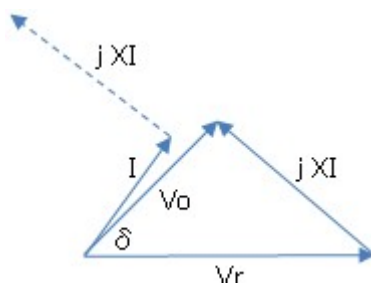
ベクトル図1 通常運転

次に励磁電流を増加させるとそれに比例し  $V_0$  も増加するが発電機の有効電力は、蒸気タービン入口蒸気が一定なら変化しないため、 $P = V_0V_r \sin \delta / X$  から  $\sin \delta$  は正で  $V_0$  の増加分だけ減少する必要があり、相差角  $\delta$  は減少する。また無効電力は相差角  $\delta$  の減少で  $\cos \delta$  は増加し  $V_0$  の増加と合わせて増加することになる。そして  $I$  の  $V_r$  と同相分は変化しないため遅相分のみ増加し、各々の値はベクトル図2のようになる。



ベクトル図2 励磁電流増加

その次に励磁電流を減少させ、 $V_o$  を  $V_r$  以下にすれば、前記と逆に  $V_o$  減少分だけ  $\sin \delta$  は正で増加し、無効電力  $jQ$  は相差角  $\delta$  の増加で  $\cos \delta$  は減少し  $V_o$  の減少と合わせて減少し、 $V_r V_r / X$  以下になると  $-jQ$  になり発電機は進相運転となる。 $I$  は  $V_r$  と同相分は変化しないため進相分のみ増加し、ベクトル図3のようになる。



ベクトル図3 励磁電流減少

つまり発電機併入中に励磁電流を増加すれば、内部誘起電圧  $V_o$  の増加分だけ電圧降下  $XI$  が増加するまで遅相無効電力が増加する。また励磁電流を減少し、内部誘起電圧  $V_o$  が発電機端電圧  $V_r$  以下になれば、遅相無効電力が発電機に流入し電圧降下  $XI$  の向きが逆になり、 $V_o$  の減少分と平衡するまで遅相無効電力の流入が増加するという事である。

### OkVA制限

発電機の無効電力制御は関西電力系統に併入された状態で、励磁電流を増減させることにより、無効電力量の制御が行える。

その機器の構成は図6のようになっており、発電機が系統併入状態において同期操作卓又はDCSでAQR使用を選択すれば、受電点の無効電力を一定にするように、MPCユニットからAVRユニットへUP又はDOWN信号を送ってAVRユニットで励磁電流を調整し無効電力を制御する。

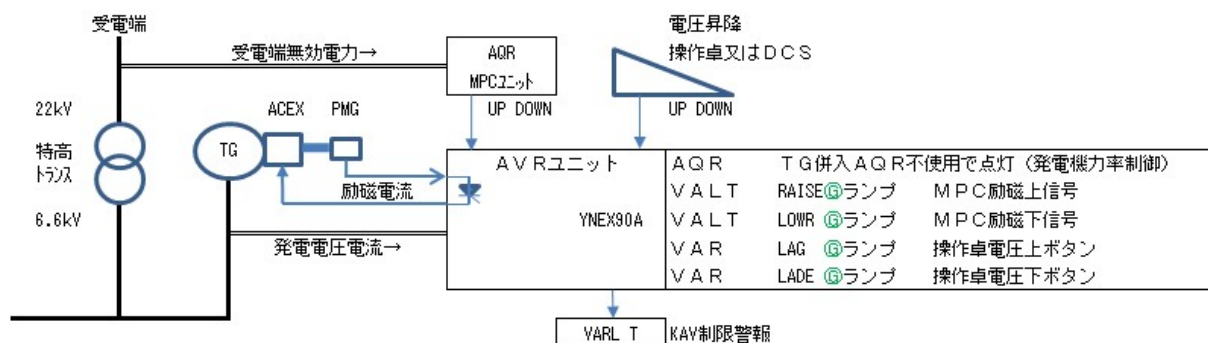


図6 構成図

ただ受電点の無効電力のみを見て励磁制御すると、発電機の状態が危険領域に入る可能性がある。そこで図2の制限範囲を超えるとvarL制限がかかり30秒以上継続するとkVA制限の警報が発報する。

またこの制限は図6からもAVRユニット内に設定されており、その具体的な値を図2から読み表1に表す。

次に図2のグラフの読みから、これを計算式で表せば式2の通りである。

$$\begin{aligned} \text{遅れ無効電力制限値[kvar]} &= -3.7 \times \text{有効電力} + 7.75 \times 13,333 \quad \dots \text{式2} \\ \text{進み無効電力制限値[kvar]} &= 2,660 \end{aligned}$$

今回の故障時にkVA制限が働いていたか図1のトレンドで確認すると16日9:50～は有効電力3.0Mw前後、無効電力は増加して、ほぼ+9.0Mvar、最大+9.4Mvarであり、21:25～は有効電力3.0Mw前後で無効電力は減少して-2.4Mvar一定である。これらは表1よりほぼkVA制限内であることから、kVA制限が正常に働いていたことが分かる。

### ○AVRユニットのAQR制御について

今回のAQR制御故障により、発電機励磁制御関係を調査したところ、機器構成、取扱説明書、シーケンス図、器具番号等からAVR制御装置にも独自に発電機端の力率を制御する機能があると思われるので以下に説明する。

発電機の無効電力制御の機器構成の概略は図6の様になっている。MPCユニットからの制御信号がAVRユニットの90R側に接続されており、同期操作卓又はDCSのタービン発電機電圧調整上下信号は55R側に接続されている。またAVRユニットにはAQRランプがあり、これはAQR使用時消灯であるがシーケンスより発電機併入AQR不使用の条件で点灯することから、AVRユニットには独自のAQR制御があると考えられる。

そしてAVRユニットには発電機端の電圧電流が入力されていること、AVRユニットの取扱説明書に力率設定値(95% 2020/3/26 現在) 55Rの表示方法の記載のある事から、AVRユニットのAQRランプ点灯時は発電機端の力率制御になると思われる。電図5/16 G10~G13 G40~G42 (電気設備 単体取扱説明書 2/3-2-P.15~17 参照)



写真7 AVR

### ○今後AQR制御の故障が起こった場合の処置について

今後今回のように異常発生し警報もトリップもしない場合、また警報発報のみの場合などの処置としては今回と同様に、各値が定格を超過していないかを確認し運転継続可能かをまず判断し、運転可能であれば運転中に点検できる箇所の点検を行い修復可能か判断し処置を決めるのが良いと思われる。

もし今後同様の故障(AQR制御故障でAVRユニット正常の場合)が起こった場合、発電機の無効電力が表1を参考にkVA制限内であることを確認する。



写真8 同期操作卓

次に図6を参考にMPCユニット、AVRユニットのランプの状況からAVRユニットが良好なことを確認できれば、同期操作卓又はDCSでAQRを除外する。これにより発電機の力率は一定に制御され受電端の力率はコンデンサの自動解並列で制御される（確認済み）。

もし受電端の力率がコンデンサの制御範囲を超える場合は、発電機の力率設定を同期操作卓又はDCSのタービン発電機電圧調整上下ボタンで力率の設定値を変更することにより、コンデンサの制御範囲内にできると考えられる（未確認）。

\* 今回は発電機が関西電力系統併入中に発電機の力率 94%でAQR除外操作をしたところ、AVRの力率設定が一旦 100%になり、それから 95%になると思われ無効電力、励磁電流が大きく変化した。（ただし取扱説明書にAVRの電源を切った際は、設定値はリセットされるとあるので、毎回同じとは限らない。）AQR除外にする際は留意のこと。

\* 今回1炉運転で問題にならなかったが、復旧のめどが立たず発電機停止の判断となった場合、契約電力が 2,500kW なので、発電機を直ちに停止する状況になれば、炉を1炉停止した後に発電機を停止する。

もし発電機を直ちに停止する必要がある場合やトリップの場合でも選択遮断や、不要不急負荷の停止により、契約最大電力を超過しないように努力する。冬季2炉運転で発電機停止し、契約電力を超過しなかった実績はあるが、場内負荷は季節により異なり2炉運転でリサイクルプラザを除き 2,500~2,800kw 程度であるので、不要不急負荷を停止しても、超過する場合も考えられる。その際も可能な範囲で超過量を抑制することで、以後の契約電力変更量を抑制でき、買電経費の増加抑制につなげることができる。