(19)日本国特許庁(JP)

(12)特許公報(B2)

(11)特許番号
特許第7341966号
(P7341966)

(45)発行日　令和5年9月11日(2023.9.11)

(24)登録日　令和5年9月1日(2023.9.1)

(51)国際特許分類

Ｈ０２Ｊ	*3/18 (2006.01)*	Ｈ０２Ｊ	3/18	１８５	
Ｈ０２Ｊ	*3/16 (2006.01)*	Ｈ０２Ｊ	3/16		
Ｈ０２Ｊ	*3/24 (2006.01)*	Ｈ０２Ｊ	3/24		
Ｈ０２Ｐ	*9/04 (2006.01)*	Ｈ０２Ｐ	9/04	Ｅ	
Ｈ０２Ｐ	*9/14 (2006.01)*	Ｈ０２Ｐ	9/14	Ａ	

ＦＩ

請求項の数　10　（全18頁）

(21)出願番号　特願2020-155334(P2020-155334)
(22)出願日　令和2年9月16日(2020.9.16)
(65)公開番号　特開2022-49229(P2022-49229A)
(43)公開日　令和4年3月29日(2022.3.29)
審査請求日　令和4年3月9日(2022.3.9)

(73)特許権者　000006208
三菱重工業株式会社
東京都千代田区丸の内三丁目２番３号
(74)代理人　110000350
ポレール弁理士法人
(72)発明者　高崎 達朗
神奈川県横浜市西区みなとみらい三丁目３番１号 三菱パワー株式会社内
審査官　下林 義明

最終頁に続く

(54)【発明の名称】　同期機の界磁制御装置及び界磁制御方法

(57)【特許請求の範囲】

【請求項１】

電力系統に接続された同期機の界磁を制御する同期機の界磁制御装置であって、

前記同期機の界磁コイルに流れる電流を操作する界磁制御系統の調節器の制御定数を界磁電流または界磁電流の等価物の大きさに応じて可変に調整する補償回路を備えることを特徴とする同期機の界磁制御装置。

【請求項２】

請求項１に記載の同期機の界磁制御装置であって、

前記同期機の界磁制御系統は、同期機の端子電圧偏差に応じて前記同期機の界磁コイルに流れる電流を操作する自動電圧調整器ＡＶＲであり、自動電圧調整器ＡＶＲの界磁制御系統の調節器の制御定数を界磁電流の大きさに応じて可変に調整する前記補償回路を備えることを特徴とする同期機の界磁制御装置。

【請求項３】

請求項２に記載の同期機の界磁制御装置であって、

前記同期機の界磁制御系統は、同期機の母線電圧偏差に応じて前記自動電圧調整器ＡＶＲの前記端子電圧偏差を調整する送電電圧制御界磁装置ＰＳＶＲであり、前記送電電圧制御界磁装置ＰＳＶＲから前記自動電圧調整器ＡＶＲに至る界磁制御系統の調節器の制御定数を界磁電流の大きさに応じて可変に調整する前記補償回路を備えることを特徴とする同期機の界磁制御装置。

【請求項４】

請求項２に記載の同期機の界磁制御装置であって、
前記同期機の界磁制御系統は、同期機の無効電力偏差に応じて前記自動電圧調整器ＡＶＲの前記端子電圧偏差を調整する自動無効電力調整装置ＡＱＲであり、前記自動無効電力調整装置ＡＱＲから前記自動電圧調整器ＡＶＲに至る界磁制御系統の調節器の制御定数を界磁電流の等価物である無効電力の大きさに応じて可変に調整する前記補償回路を備えることを特徴とする同期機の界磁制御装置。
【請求項５】
請求項２に記載の同期機の界磁制御装置であって、
前記同期機の界磁制御系統は、同期機の力率を一定とすべく前記自動電圧調整器ＡＶＲの前記端子電圧偏差を調整する自動力率調整装置ＡＰＦＲであり、前記自動力率調整装置ＡＰＦＲから前記自動電圧調整器ＡＶＲに至る界磁制御系統の調節器の制御定数を界磁電流の等価物である前記力率に応じて可変に調整する前記補償回路を備えることを特徴とする同期機の界磁制御装置。
【請求項６】
請求項２に記載の同期機の界磁制御装置であって、
前記同期機の界磁制御系統は、同期機の電力と系統周波数から求めた電力安定化信号に応じて前記自動電圧調整器ＡＶＲの前記端子電圧偏差を調整する系統安定化装置ＰＳＳであり、前記系統安定化装置ＰＳＳから前記自動電圧調整器ＡＶＲに至る界磁制御系統の調節器の制御定数を界磁電流に応じて可変に調整する前記補償回路を備えることを特徴とする同期機の界磁制御装置。
【請求項７】
請求項１から請求項６のいずれか１項に記載の同期機の界磁制御装置であって、
前記補償回路は、界磁電流または界磁電流の等価物の大きさが大きいときに、前記界磁制御系統の調節器の制御定数を低減することを特徴とする同期機の界磁制御装置。
【請求項８】
請求項１から請求項７のいずれか１項に記載の同期機の界磁制御装置であって、
前記補償回路は、制御定数の調整を、発電機系側の運転状態に応じて可変とすることを特徴とする同期機の界磁制御装置。
【請求項９】
請求項１から請求項８のいずれか１項に記載の同期機の界磁制御装置であって、
前記制御定数は、比例制御における比例ゲインであり、積分制御における積分ゲイン、制御時定数であることを特徴とする同期機の界磁制御装置。
【請求項１０】
電力系統に接続された同期機の界磁を制御する同期機の界磁制御方法であって、
前記同期機の界磁コイルに流れる電流を操作する界磁制御系統の制御定数を界磁電流または界磁電流の等価物の大きさに応じて可変に調整することを特徴とする同期機の界磁制御方法。
【発明の詳細な説明】
【技術分野】
【０００１】
本発明は同期機の界磁制御装置及び界磁制御方法に係り、特に電力系統の電圧調整機能を備えない再生可能エネルギが増大した状況において電力系統の電圧調整を行うに好適な同期機の界磁制御装置及び界磁制御方法に関する。
【背景技術】
【０００２】
電力系統の電圧調整は、主に発電所における発電機の界磁制御及び変電所に設置された調相設備の制御により維持されている。この点に関し、従来の発電所は電力系統の電圧調整機能を備えた火力発電所、原子力発電所、及び水力発電所（以下在来型発電という）が主流であったが、近年では電力系統の電圧調整機能を備えない再生可能エネルギの占める割合が増大している。この結果、電力系統全体としてみると電圧調整能力不足の傾向にあ

る。
【０００３】
このことから太陽光発電や風力発電などの再生可能エネルギを考慮した電力系統運用が提案されており、例えば特許文献１では、再生可能エネルギは天候に起因して時間経過とともに出力変動すること、電源構成や系統構成が変更されることなどが発生しても、電力系統の電圧と無効電力のバランスが維持され、さらには経済性を向上することが可能な電力系統電圧無効電力監視制御装置を提供することを目的として、「電力系統の電圧、無効電力を調整可能な個別装置に対して送信データを与える電力系統電圧無効電力監視制御装置であって、電力系統電圧無効電力監視制御装置は、電力系統の安定性を示す１つ以上の指標を用いて１つ以上の目標値制約を求め、目標値制約から目標値についての情報を得、目標値についての情報を含む送信データを個別装置に与え、個別装置により当該設置箇所における電圧、無効電力を調整することを特徴とする電力系統電圧無効電力監視制御装置。」とすることを提案している。
【０００４】
また特許文献２は、進相コンデンサのＯＮ／ＯＦＦ制御によるＡＱＲ制御（自動無効電力調整装置ＡＱＲ（Ａｕｔｏｍａｔｉｃ ｒｅａｃｔｉｖｅ ｐｏｗｅｒ Ｒｅｇｕｌａｔｏｒ）による制御）を用いて無効電力を制御する場合に、進み無効電力とならず、かつ、無効電力制御のＰＦを１．０とすることができる無効電力制御システムを提供することを目的として、「商用電源に系統連系するとともに分散電源を備え、進相コンデンサを用いたＡＱＲ制御により商用電源からの受電点の無効電力を制御するものであり、ＡＱＲ制御前における受電点の無効電力である第１の無効電力を検出する検出部と、第１の無効電力の値からＡＱＲ制御が必要か否かを判断するとともにＡＱＲ制御を行うＡＱＲと、ＡＱＲでのＡＱＲ制御の前に第１の無効電力の値をＡＱＲ制御で相殺可能な値の無効電力に修正するＡＶＲ制御を行うＡＶＲとを備える」ことを提案している。
【先行技術文献】
【特許文献】
【０００５】
【文献】特開２０１６－２０８６５４号公報
特開２００８－１８２７８９号公報
【発明の概要】
【発明が解決しようとする課題】
【０００６】
再生可能エネルギ増大の傾向は、将来において一層拡大するものとみられており、２０５０年には再生可能エネルギの占める割合が５０％を占めると予測するものもある。
【０００７】
且つこの割合は、単に高くなるというだけではなく、大きく変動する。例えば、１日のなかで、太陽光発電が行われる日中は風力発電を含めた再生可能エネルギの占める割合が高くなるが、太陽光発電が行われない夜間は風力発電が主となる再生可能エネルギの占める割合は相対的に低くなる。またこういった比率変動は、１日の中だけではなく、月や季節あるいは地域によっても変動する。
【０００８】
このような将来における電力系統の構成変化は、電力系統の電圧維持のうえでいくつかの障害をもたらすと予想される。例えば、在来型発電所の一部が電力系統から切り離されてしまうと、電力系統の電圧が低下し、それを回復させることが容易ではない。これは、電力系統の中で、電圧維持能力が総体として低下するからである。かつこの対策として電圧維持能力を増強（在来型発電所の発電容量（台数）や調相設備の容量（台数）を増強）することが想定されるが、１日の中でも変動する最過酷状況に応じて設備追加することは費用面において得策ではない。
【０００９】
これに対し特許文献１は、電力系統全体を監視して地域的な個別の問題箇所を制御する

ものであるが、電力系統全体としての電圧維持能力の不足及びその変動という課題に対して、根本的な解決にはならない。また特許文献２の調相設備を利用する方式も電圧維持能力の不足及びその変動という課題に対して有効ではなく、かつこの方式での対処は最過酷状況を想定した設備容量を備えることになり高価となることを避けられない。

【００１０】

以上のことから本発明においては、電圧維持能力の不足及びその変動という課題に対して、電力系統の発電側から根本的に対応可能とする同期機の界磁制御装置及び界磁制御方法を提供する。

【課題を解決するための手段】

【００１１】

以上のことから本発明においては「電力系統に接続された同期機の界磁を制御する同期機の界磁制御装置であって、同期機の界磁コイルに流れる電流を操作する界磁制御系統の制御定数を界磁電流または界磁電流の等価物の大きさに応じて可変に調整する補償回路を備えることを特徴とする同期機の界磁制御装置」としたものである。

【００１２】

また本発明は、「電力系統に接続された同期機の界磁を制御する同期機の界磁制御方法であって、同期機の界磁コイルに流れる電流を操作する界磁制御系統の制御定数を界磁電流または界磁電流の等価物の大きさに応じて可変に調整することを特徴とする同期機の界磁制御方法」としたものである。

【発明の効果】

【００１３】

電力系統の発電側から根本的に対応可能とする同期機の界磁制御装置及び界磁制御方法を提供することができる。

【図面の簡単な説明】

【００１４】

【図１】一般的な電力系統と系統安定化制御系統の構成例を示す図。
【図２】開放端子としたときの発電機Ｇの等価回路を示す図。
【図３】界磁電流Ｉｆと、起電力Ｅならびに同期リアクタンスＸｓの関係を示す図。
【図４】発電機から消費地である負荷までの等価回路を示す図。
【図５】時定数τと、起電力Ｅと端子電圧Ｖの応答特性を示す図。
【図６】電力系統の電圧維持に貢献する界磁制御装置５内の界磁制御系統の例を纏めた図。
【図７】本発明の実施例１に係る発電機の界磁制御装置の構成例を示す図。
【図８ａ】送電電圧制御界磁装置ＰＳＶＲの全体構成を示した図。
【図８ｂ】送電電圧制御界磁装置ＰＳＶＲ、自動電圧調整器ＡＶＲによる制御時に系統電圧低下した場合の送電電電圧と発電機端子電圧及び無効電力の関係を示した図。
【図９】一般的な送電電圧制御界磁装置ＰＳＶＲの構成例を示す図。
【図１０】自動無効電力調整装置ＡＱＲの具体的な構成例を示す図。
【図１１】界磁電流Ｉｆと力率ＰＦの関係を示した図。
【図１２】自動力率調整装置ＡＰＦＲの具体的な構成例を示す図。
【図１３】系統安定化装置ＰＳＳの具体的な構成例を示す図。
【図１４】比例積分制御における補償の例として、発電機の界磁制御装置の構成例を示す図。

【発明を実施するための形態】

【００１５】

以下本発明の実施例について説明する。

【００１６】

上記課題の解決のために本発明においては、回転式同期機における界磁制御に着目する。一般的に電力系統の電圧を調整するためには、変電所の調相設備（分路リアクトル、電力用コンデンサ、静止型無効電力補償装置、同期調相機）を制御する方法と、発電所の同期発電機を制御する方法があるが、本発明は両方を含む同期機（同期調相機、同期発電機

）における界磁制御に適用する。実施例の説明としては、同期発電機（以下単に発電機という）を例にとって説明する。以下、本発明者らが、在来型発電所の回転式発電機における界磁制御に着目するに至る知見について説明する。

【００１７】

まず図１は、一般的な電力系統と制御系統の構成例を示している。この図で電力系統１には、多くの発電所が連系されており、これらは風力発電所２Ａ，太陽光発電所２Ｂなどの電圧調整機能を備えない再生可能エネルギであり、また火力、水力、原子力といった電圧調整機能を有する在来型発電所２Ｃ（２Ｃ１，２Ｃ２・・・２Ｃｎ）である。電力系統全体を制御する中央給電指令所３は、電力系統全体の負荷１０に応じた発電を行うべく、減算器２１において検知した系統周波数ｆと一定周波数ｆ０の差分を入力して出力指令値Ｄ（Ｄ１，Ｄ２・・・Ｄｎ）を作成する制御機能５０を備え、在来型発電所２Ｃに指令する。

【００１８】

在来型発電所２Ｃ内の制御装置４は、機械的に接続されたタービンＴと発電機Ｇに対する蒸気発生器Ｂからの蒸気入力を蒸気加減弁ＣＶにより制御する。また出力指令値Ｄを目標値として、回転速度検出器５１で取得した回転速度や電力検出器５２で求めた発電出力を帰還値として制御する。電力検出器５２は電圧変成器ＰＴ１で取得した発電機Ｇの端子電圧Ｖｇと変流器ＣＴ１で取得した発電機Ｇの端子電流Ｉｇとから発電出力を求める。発電機Ｇによる電気出力は変圧器Ｔｒ、送電線１１，１２・・・１ｎを介して電力系統１に供給される。尚、制御装置４の制御対象として、ボイラと蒸気タービンで説明したが、ＧＴＣＣ等としても良い。

【００１９】

また在来型発電所２Ｃ内の界磁制御装置５は、同期発電機Ｇの二次巻線を界磁コイル６としており、交流電源７をサイリスタ８で直流化し、界磁コイル６に与える直流界磁電流Ｉｆを界磁制御装置５の主たる制御機能である自動電圧調整器ＡＶＲ（Ａｕｔｏｍａｔｉｃ Ｖｏｌｔａｇｅ Ｒｅｇｕｌａｔｏｒ）により制御することで、発電機端子電圧Ｖｇを設定電圧Ｖｇ０に調整している。

【００２０】

界磁制御装置５は、自動電圧調整器ＡＶＲを主たる制御機能としているが、上位制御系の指令により自動電圧調整器ＡＶＲの目標値を実質的に修正する直列制御系統を構成している。上位制御系とは、図１の例では送電電圧制御界磁装置ＰＳＶＲ（Ｐｏｗｅｒ Ｓｙｓｔｅｍ Ｖｏｌｔａｇｅ Ｒｅｇｕｌａｔｏｒ）、電力系統安定化装置ＰＳＳ（Ｐｏｗｅｒ Ｓｙｓｔｅｍ Ｓｔａｂｉｌｉｚｅｒ）、自動無効電力調整装置ＡＱＲ，自動力率調整装置ＡＰＦＲ（Ａｕｔｏｍａｔｉｃ Ｐｏｗｅｒ Ｆａｃｔｏｒ Ｒｅｇｕｌａｔｏｒ）などの制御系統であり、これらの指令が下位制御系である自動電圧調整器ＡＶＲの目標値を実質的に修正している。修正の仕方としては、直接自動電圧調整器ＡＶＲの電圧目標設定器９０Ｒを動かして目標値を修正する方式と、電圧偏差に加減算する方式とがある。図１では加算器２４において電圧偏差に加減算する方式で示しているが、目標値を変更する方式で実現するものであってもよい。自動電圧調整器ＡＶＲは、同期機である発電機Ｇの端子電圧Ｖｇを電圧変成器ＰＴ１により検知し、電圧設定器９０Ｒで設定した設定電圧Ｖｇ０との差分を減算器２１で求め、比例演算機能を有する調節器（ＡＶＲ演算部）２２を介してサイリスタ８を調整し、界磁コイル６に与える界磁電流Ｉｆを調整する。他の制御系については、図を参照して詳細に後述する。他の制御系への信号の入力として、電圧変成器ＰＴ１からの発電機Ｇの端子電圧Ｖｇ、電圧変成器ＰＴ２からの母線電圧Ｖｈ、変流器ＣＴ２からの発電機Ｇの端子電流Ｉｇがある。

【００２１】

図２は開放端子としたときの発電機Ｇの等価回路を表している。これによれば、発電機Ｇは発電機内部の内部誘起電力Ｅ（起電圧ということもある）と同期リアクタンスＸｓ＝ｊωＬｓと抵抗Ｒの直列回路で表すことができ、外部的に測定可能な値は発電機電流Ｉｇと発電機端子電圧Ｖｇである。このため内部誘起電力Ｅは、同期リアクタンスＸｓ＝ｊω

Ｌｓと抵抗Ｒと発電機電流Ｉｇと発電機端子電圧Ｖｇからの推定値として求められる。なおω＝２πｆであり、ｆは周波数である。

【００２２】

図３は、横軸の界磁電流Ｉｆと、縦軸の起電力Ｅならびに同期リアクタンスＸｓの関係を示した図であり、要するに界磁電流Ｉｆの増加に対して起電力Ｅは飽和特性を示し、同期リアクタンスＸｓは低下傾向を示す。

【００２３】

図４は、発電機から消費地である負荷までの等価回路を示しており、発電機内のインダクタンスがＬ１，抵抗がＲ１，負荷側のインダクタンスがＬ２，抵抗がＲ２である。図４の等価回路によれば、発電機の起電力Ｅに対する系統電圧Ｖの追従の速さを示す時定数（τ）は、（１）式に示すように求めることが出来る。

［数１］

τ［ｓｅｃ］＝（Ｌ１＋Ｌ２）÷（Ｒ１＋Ｒ２）　……（１）

図５は、時定数τが大きい場合と小さい場合について、起電力Ｅと端子電圧Ｖｇの応答特性を示したものである。ここでは、左上に示すように起電力Ｅを時刻０．１において７５％から１００％に増大させたときの瞬時値と実効値を示しており、この条件は右上の時定数τが大きい場合も同じである。なお瞬時値と実効値を区別するために、実効値を太線で瞬時値を細線で表示している。この変化に対し電子電圧Ｖｇは、時定数τが小さい場合は左下に示すように発電機の起電力Ｅに対する系統電圧Ｖの応答は速くなる（直ぐに最終値に到達する）。一方、時定数が大きいと、右下に示すように、応答は遅くなり、なかなか最終値に到達しない。即ち、発電機の起電力Ｅに対する系統電圧Ｖの応答速度は一定ではなく、界磁電流Ｉｆにより変化する。

【００２４】

ここでは、電圧維持機能の制御ゲイン（Ｋａなど）は固定値となっている。なお実際の制御装置の設計で、それらの比例ゲインは、代表的な制御状態（回路の時定数）を想定して決定している。

【００２５】

以上から、今後、再生可能エネルギの割合が増えた場合、電力系統の電圧を維持させるため、発電機の界磁電流、同期リアクタンス、発電機の応答時定数が大きく変化し、制御設計で前提としたものとは大きく異なり、適切に制御することが出来なくなる恐れがある。

【００２６】

以上の知見に基づいて、本発明においては電圧維持に関与する界磁制御系統の制御定数を、発電機の界磁電流の大きさに応じて変化させるものである。さらには、界磁制御系統の制御定数を、発電機の界磁電流の等価物に応じて変化させるものである。ここで界磁電流の等価物とは、例えば発電機力率であり、発電機無効電力である。

【００２７】

またここで制御定数とは、比例制御における比例ゲインＫａであり、積分制御における積分ゲインＫｉ、制御時定数Ｔｉである。なお以降の実施例の説明においては、主として比例ゲインＫａを変更する事例について説明し、積分時定数Ｔｉ（積分ゲインＫｉ＝１／積分時定数Ｔｉ）を含めて変更する事例については図１４の実施例７で説明するものとする。

【００２８】

図１に戻り、本発明ではこの図に示す在来型発電所の回転式発電機における界磁制御装置５に着目する。界磁制御装置５は、自動電圧調整器ＡＶＲを主たる制御系統とする複数の制御系統の集合体であり、図１では送電電圧制御界磁装置ＰＳＶＲ、電力系統安定化装置ＰＳＳ、自動無効電力調整装置ＡＱＲ，自動力率調整装置ＡＰＦＲなどの制御系統を含んで界磁制御装置５が構成された事例を示している。なお各制御系統の入力および処理内容について、個別に詳述するが、その出力は、最終的に自動電圧調整器ＡＶＲの制御系統を介して発電機の界磁電流を制御するように構成されている。

【００２９】

図６は、電力系統の電圧維持に貢献する界磁制御装置５内の界磁制御系統の例をまとめた図である。ここでは、界磁制御系統について制御量、操作量、制御目的などの観点から整理している。この図によれば、これらの制御量はその制御目的に応じて様々であるのに対し、操作量は発電機界磁電流を直接制御し、あるいは自動電圧調整器ＡＶＲを介することで間接的に発電機界磁電流を制御することになる。

【実施例１】

【００３０】

本発明は発電機の界磁電流またはその等価物の大きさにより、界磁制御系統の制御定数（比例制御における比例ゲインＫａ、積分制御における積分ゲインＫｉ、制御時定数Ｔｉ）を、変化させるものであるが、以降の実施例１から実施例６では比例制御における比例ゲインＫａを変化させることについて説明し、積分制御における積分ゲインＫｉ、制御時定数Ｔｉを変化させることについては実施例７において、まとめて説明する。

【００３１】

実施例１は、具体的な調整対象として自動電圧調整器ＡＶＲに関与する事例である。図７は、本発明の実施例１に係る発電機の界磁制御装置の構成例である。図７の自動電圧調整器ＡＶＲは、同期機である発電機Ｇの端子電圧Ｖｇを電圧変成器ＰＴ１により検知し、電圧目標設定器９０Ｒで設定した設定電圧Ｖｇ０との差分を減算器２１で求め、比例演算機能を有する調節器（ＡＶＲ演算部）２２を介してサイリスタ８を調整し、界磁コイル６に与える界磁電流Ｉｆを調整する。なお調節器（ＡＶＲ演算部）２２は、ＡＶＲ制御系統内の進み遅れ補償回路を備えるものであってもよい。

【００３２】

自動電圧調整器ＡＶＲは、同期機Ｇの界磁制御装置５内に設置されており、定常運転時に同期機Ｇの電圧を一定に保持する機能によって、負荷が変化するとき電圧を維持し無効電力を調整のうえ動態安定度を向上させることおよび電圧急変時速やかに電圧を回復する機能によって、負荷遮断時の電圧上昇を抑制し、過渡安定度を向上させる等の目的を有している。この目的のために、自動電圧調整器ＡＶＲは、総合電圧変動率（制御偏差）を小さくし、十分な即応度を持ち、制御系として十分安定である（十分な利得余裕と位相余裕を持つ）ことが必要である。

【００３３】

本発明では、自動電圧調整器ＡＶＲ内の比例演算機能を有する調節器２２の比例ゲインＫａを発電機の界磁電流Ｉｆの大きさに応じて変化させる。このための補償回路２０は、変流器ＣＴｆで検出した界磁電流Ｉｆを入力とする例えば関数発生器として構成され、調節器２２の比例ゲインＫａを可変に調整する。この時の関数が（２）式である。

［数２］

Ｋａ［Ａ／Ｖ］＝ｆ（Ｉｆ）……（２）

なお、その特性は、界磁電流Ｉｆが大きくなると、調節器２２の比例ゲインＫａが小さくなるようにされている。その関数の特性は、予めシミュレーションにより決定するか、或いは、試験にて決定する。さらには、学習制御により関数決定するのがよい。学習制御では、制御装置あるいは制御システムそのものが，制御方策とその実行結果の関係を記憶し，それに基づいて制御方策を改善していく。制御対象の特性や周囲の環境条件を完全に把握できず，適切な制御の方策をあらかじめ設計することができないとき用いられる。学習機能をもつ場合には過去に経験した状況あるいはそれに近い状況にただちに適応できるばかりでなく，経験しなかった新しい状況にも徐々に適応できる能力をもつ。このようにして定められるその関数は、折れ線型にすることが一般的である。

【００３４】

なお本発明における発電機とは、より一般的には同期機のことであり、この概念には同期調相機も含むものである。なお同期調相機は、同期電動機を無負荷のまま電力系統に接続したものであり、同期調相機の界磁を過励磁にして運転すると線路から進み電流をとるコンデンサとして作用し、不足励磁にして運転すると線路から遅れ電流をとるリアクトルとして作用する。電力系統が過負荷の時は、線路の負荷力率は遅れ方向に低下するので、

同期調相機を過励磁にすることにより負荷力率を改善して線路の電圧降下を改善させる。また電力系統が軽負荷で線路の充電電流が大きいときは、線路の負荷力率は進み方向に低下するので、同期調相機を不足励磁にすることにより負荷力率を改善して線路の電圧上昇を抑制するように使用される。同期調相機は、自動電圧調整器ＡＶＲを備えて電圧一定制御を行っているので、本発明の実施例１で述べたと同じ補償制御がそのまま適用可能である。

【００３５】

本発明の実施例１によれば、当該系統内にある再生可能エネルギの割合が増え、電力系統の電圧が大きく変動し、発電機の界磁電流が変化し、発電機－自動電圧調整器ＡＶＲ系の制御特性が変化した場合でも、自動電圧調整器ＡＶＲの調節器のゲインＫａが最適値に自動的に変更されることから、安定かつ迅速に電力系統の電圧を、本来の値に制御することが可能となる。即ち、ロバスト性を向上させることが可能となる。

【実施例２】

【００３６】

実施例２は、具体的な調整対象として送電電圧制御界磁装置ＰＳＶＲに関与する事例である。図１の界磁制御装置５内には、送電電圧制御界磁装置ＰＳＶＲの出力が自動電圧調整器ＡＶＲの電圧偏差に加算する形式で入力される構成例が示されている。

【００３７】

ここで送電電圧制御界磁装置ＰＳＶＲとは、図１の変圧器Ｔｒ二次側に設置された電圧変成器ＰＴ２で求めた送電線送り出し母線電圧Ｖｈとその基準電圧Ｖｈ０との偏差に応じて発電機の界磁電流Ｉｆを制御し、送電線送り出し母線電圧Ｖｈを基準値Ｖｈ０に維持する装置である。なお送電線送り出し母線電圧は、電力系統への母線電圧を意味している。ごく簡便に言うと、自動電圧調整器ＡＶＲは発電機端子電圧を一定に制御するに対し、送電電圧制御界磁装置ＰＳＶＲは母線電圧を一定に制御するものということができる。

【００３８】

送電電圧制御界磁装置ＰＳＶＲの原理について、図８ａと図８ｂを用いて説明する。図８ａは発電機と電力系統の関係を１機対無限大系統モデルとして表した図である。また図８ｂは実線で示す送電電圧制御界磁装置ＰＳＶＲによる制御と、一点鎖線で示す自動電圧調整器ＡＶＲによる制御のときの、系統電圧低下時の送電電圧（同図上段）と発電機端子電圧（同図中段）及び無効電力（同図下段）の関係を示した図である。

【００３９】

これによれば、常時の系統電圧運転範囲では両制御ともほぼ同じ運転状態となるが、系統電圧低下時には送電電圧制御界磁装置ＰＳＶＲで送電電圧を一定制御するので、昇圧変圧器のリアクタンス降下分だけ発電機電圧を自動的に上昇させ、無効電力を増大させる制御が行われる。

【００４０】

これに対して自動電圧調整器ＡＶＲの制御では、発電機端子電圧を一定に制御するので無効電力の発生が少なく、送電電圧は送電電圧低下に比例して低下することになる。結局、送電電圧制御界磁装置ＰＳＶＲの目的は、斜線部分の無効電力を多く発生させて送電電圧を高め、一定に保つことで系統電圧の低下を緩和させ、系統全体の電圧安定性を向上させることができる。

【００４１】

図９は一般的な送電電圧制御界磁装置ＰＳＶＲの構成例を示している。この回路構成例では、送電電圧制御界磁装置ＰＳＶＲは、減算器２１において母線電圧Ｖｈの検出値と電圧目標設定器９０Ｈによるその設定電圧Ｖｈ０の差に無効電流補正を行う電圧検出基準電圧設定部３１と、求めた差電圧にゲインＫＨを乗じて特に昇圧変圧器Ｔｒの部分における電圧降下分を補償する無効電力配分部３２と、進み遅れの位相補償回路部３３、減算器２１で求めた位相補償回路部３３の出力と発電機端子電圧Ｖｇの差分を制限する出力リミッタ３４などで構成されている。送電電圧制御界磁装置ＰＳＶＲの出力は、自動電圧調整器ＡＶＲ内の加算器２４において発電機端子電圧偏差信号と加算され、自動電圧調整器ＡＶ

Ｒ内の調節器２２において調整されたのちにサイリスタ８を介して界磁電流を制御する。
【００４２】
この回路構成によれば、送電電圧制御界磁装置ＰＳＶＲの出力は自動電圧調整器ＡＶＲ内の調節器２２を経由して界磁制御に至る。本発明では、発電機の界磁電流の大きさにより、界磁制御系統の制御ゲインを、発電機の界磁電流の大きさに応じて変化させているが、この実現には、送電電圧制御界磁装置ＰＳＶＲから自動電圧調整器ＡＶＲ内の調節器２２を介して界磁制御に至る一連の界磁制御系統のいずれかの調節器における制御ゲインＫａを図７の補償回路２０により可変に設定すればよい。つまり送電電圧制御界磁系統に関する一巡伝達関数における調節器の制御ゲインＫａが可変に設定されればよい。図９では、自動電圧調整器ＡＶＲ内の調節器２２の制御ゲインＫａを可変に設定している。
【００４３】
具体的に制御ゲインを可変に変更可能な制御系統内の部位は、一つは図７と同様に自動電圧調整器ＡＶＲ内の調節器２２のゲインを変更することであり、他の方法は送電電圧制御界磁装置ＰＳＶＲ内の調節器の制御ゲインを可変に調整することである。本発明はいずれであってもよく、このことは以下に説明する他の制御系統の場合にも言い得ることである。
【００４４】
ただし、自動電圧調整器ＡＶＲ内の調節器２２のゲインを変更する場合と、個別の制御系統内の調節器の制御ゲインを変更する場合とでは、補償回路２０として備えるべき特性が相違していることから適宜に好適な関数が設定されるべきであることは言うまでもない。また個別の制御系統の制御ゲインはそのままにしておいて、どの制御の場合であっても自動電圧調整器ＡＶＲ内の調節器２２のゲインを共通に変更するときには、制御系統によっては必ずしも制御ゲインが最適化されない場合も起こりうるので、ある程度平準化された効果となることを許容せざるを得ないことが考えられる。
【００４５】
なお送電電圧制御界磁装置ＰＳＶＲを用いて電力系統の電圧が制御される経緯は、以下のようになっている。まず母線電圧Ｖｈが検知されて送電電圧制御界磁装置ＰＳＶＲに取り込まれ、この処理結果が自動電圧調整器ＡＶＲの設定電圧に反映されて自動電圧調整器ＡＶＲにより電磁電流が定まり、発電機の端子電圧が変更され、変圧器送電線を介して電力系統の電圧Ｖｈに反映される。
【００４６】
この制御では、電力系統の電圧が低下すると、送電電圧制御界磁装置ＰＳＶＲは自動電圧調整器ＡＶＲの設定電圧を上げるように作用し、これにより界磁電流は図３に示すように増加し、そしてそれと同時に、同期インダクタンスが界磁電流に応じて変化し、発電機の応答特性が最適状態からそうでない状態に変化してしまうことになる。この点、本発明では制御ゲインが界磁電流の大きさに応じて可変とされる結果、応答性が改善されている。
【実施例３】
【００４７】
実施例３は、具体的な調整対象として自動無効電力調整装置ＡＱＲに関与する事例である。自動無効電力調整装置ＡＱＲは、発電機の無効出力を有効出力の関数で与えられる基準値になるように界磁電流を自動的に制御する装置である。送電損失の軽減と無効電力潮流の適正化を目的として、需要端に近く無効電力調整効果の大きい火力発電所や揚水発電所でこの方式をとる場合がある。
【００４８】
図１の界磁制御装置５内には、自動無効電力調整装置ＡＱＲを備える構成例が示されている。さらに図１０は、自動無効電力調整装置ＡＱＲの具体的な構成例を示している。図１０によれば、無効電力検出部１３において発電機端子電圧Ｖｇと負荷電流Ｉｇから無効電力を算出し、無効電力設定部１４が与える設定無効電力との差分ΔＱを減算器２１で求め、これを例えば積分回路１６において積分して設定電圧とし、これを自動電圧調整器ＡＶＲの設定電圧に反映する。

【００４９】
実施例３の場合における比例ゲインＫａの可変調整は、実施例１，２と同様に界磁電流の大きさに従って変更することができるが、自動無効電力調整装置ＡＱＲを構成するときには、界磁電流に代えて無効電力を用いることができる。つまり、無効電力は界磁電流に代用可能な要素であり、界磁電流の等価物と位置付けることができる。
【００５０】
無効電力が界磁電流の等価物として採用可能である理由は、以下のようである。まず無効電力Ｑは、有効電力Ｐと力率ＰＦから、（３）式により求めることができる。
［数３］
$$Q = P \cdot [\sqrt{(1 - PF^2)}] / PF \quad (3)$$
またここで、力率ＰＦは、その回路内にある抵抗Ｒとコイルのインダクタンスから（４）式で求まることができる。
［数４］
$$PF = R / \sqrt{(R^2 + (2\pi f L)^2)} \quad (4)$$
一方、発電機の同期インダクタンスＬｓは図３のように界磁電流Ｉｆにより変化する。図１１は、横軸に界磁電流Ｉｆ，縦軸に力率ＰＦを示した図である。力率１を境にして、進み力率（ＰＦ　ｌｅａｄｉｎｇ）と遅れ力率（ＰＦ　ｌａｇｇｉｎｇ）とで対称な特性を示す。このことは、界磁電流Ｉｆが変化すれば力率も変化するので、界磁電流Ｉｆの代わりに力率を使用することができることを意味している。同様に、界磁電流Ｉｆが変化すれば力率も変化し、無効電力Ｑも変化するので界磁電流Ｉｆの代わりに無効電力Ｑを使用することができることを意味している。このように、力率ＰＦと無効電力Ｑは、界磁電流Ｉｆの等価物と位置付けることができる。
【００５１】
図１０の自動無効電力調整装置ＡＱＲでは、無効電力Ｑを入力として適正な制御ゲインを与える補償回路２０Ｑを備え、これにより界磁制御系統内の制御ゲインを可変に調整する。補償回路２０Ｑは、界磁電流の等価物である無効電力Ｑの大きさが大きいときに、前記界磁制御系統の調節器の制御ゲインを低減する。この場合にも界磁制御系統内のいずれの箇所において制御ゲインを可変とするのかは、適宜採用可能な事項である。図１０では、自動電圧調整器ＡＶＲ内の調節器２２の制御ゲインＫａを可変に設定している。
【実施例４】
【００５２】
実施例４は、具体的な調整対象として自動力率調整装置ＡＰＦＲに関与する事例である。自動力率調整装置ＡＰＦＲは、発電機力率を一定となるよう界磁電流を自動的に調整する装置をいう。小容量の発電機で発電機電圧を一定に保つのに必要な無効電力を発生させると発電機が過電流になることがあるため、一般にこの装置が設置されることが多い。
【００５３】
図１の界磁制御装置５内には、自動力率調整装置ＡＰＦＲを備える構成例が示されている。さらに図１２は、自動力率調整装置ＡＰＦＲの具体的な構成例を示している。図１２によれば、自動力率調整装置ＡＰＦＲは有効電力検出器４２で発電機Ｇの有効電力を検知して力率演算器４３で力率ＰＦを求め、演算器４４で目標力率と計測した力率の差分に応じた処理を行い、その処理結果を自動電圧調整器ＡＶＲの電圧偏差に反映する制御構成である。なお、電圧偏差に反映するにあたり、電圧目標設定器９０Ｒの設定電圧を変更する方法と偏差電圧に加算する方法とがあるが、本発明はそのいずれであってもよい。この点は、他の制御系統でも同じである。
【００５４】
実施例３で説明したように、力率ＰＦは界磁電流Ｉｆの等価物であることから、図１２の自動力率調整装置ＡＰＦＲは、力率ＰＦを入力として適正な制御ゲインを与える補償回路２０ＰＦを備え、これにより界磁制御系統内の制御ゲインを可変に調整する。補償回路２０ＰＦは、界磁電流の等価物である力率ＰＦの大きさが大きいときに、前記界磁制御系統の調節器の制御ゲインを低減する。図１２では、自動電圧調整器ＡＶＲ内の調節器２２

の制御ゲインＫａを可変に設定している。この場合にも界磁制御系統内のいずれの箇所において制御ゲインを可変とするのかは、適宜採用可能な事項である。

【実施例５】

【００５５】

実施例５は、具体的な調整対象として系統安定化装置ＰＳＳに関与する事例である。系統安定化装置ＰＳＳは、事故時の発電機端子電圧変動に即応して、急速に界磁電流を増加することにより、発電機内部誘起電圧を高めて同期化力を増大させ、安定度を向上させることができる。これにより、安定度上とくに問題となる進み力率運転時の動態安定度が著しく改善される。しかしながら、高速度、高ゲインの自動電圧調整器ＡＶＲの採用は、同期化力は増大するが、半面、制動力を弱める特性を有しており、系統構成や運転の状態によっては、自動電圧調整器ＡＶＲによる二次的動揺を発生するおそれがある。この対策として、発電機の回転速度や出力の変化分を検出して、安定化信号を自動電圧調整器ＡＶＲに入力し、制動力を増加させている。

【００５６】

図１の界磁制御装置５内には、系統安定化装置ＰＳＳを備える構成例が示されている。さらに図１３は、系統安定化装置ＰＳＳの具体的な構成例を示している。図１３によれば、周波数検出器１１１で検出した系統周波数ｆと電力算出器１１２で検出した有効電力Ｐとから、演算器（電力変動算出部）１１３において系統安定化信号を求め、これを用いて自動電圧調整器ＡＶＲの設定電圧を修正している。

【００５７】

この系統では、実施例１と同様の補償回路２０を設置することで本発明の初期の目的を達成することができる。図１３では、自動電圧調整器ＡＶＲ内の調節器２２の制御ゲインＫａを可変に設定している。

【実施例６】

【００５８】

実施例６では、実施例１から実施例５において説明した制御ゲイン調整を、発電機系側の運転状態に応じて変更することを提案する。

【００５９】

ここで運転状態とは、起動時、通常出力運転時、停止時などの区別であり、例えばこれらの運転状態に置いて界磁電流が同じであっても、制御ゲインがそれぞれに適した値とするものである。これは、（２）式に示した調節器２２の比例ゲインＫａが、運転状態毎に相違するものを適用したということである。

【００６０】

実施例６により、運転状態に応じて適正化された制御ゲインによる運転が可能となる。

【実施例７】

【００６１】

実施例１から実施例６では、制御定数のうち比例制御における比例ゲインを変化させる事例について説明してきたが、本発明の同等の効果は積分制御における制御定数である積分ゲインＫｉ、制御時定数Ｔｉ（積分ゲインＫｉ＝１／積分時定数Ｔｉ）を変化させることでも得ることができる。

【００６２】

実施例７では、積分制御における制御定数である積分ゲインＫｉ、制御時定数Ｔｉを変化させることについて、自動電圧調整器ＡＶＲを代表例として説明する。図７に例示した自動電圧調整器ＡＶＲのＡＶＲ演算部２２は、比例積分制御を行うものであり、具体的な制御回路構成が図１４に示されている。図１４のＡＶＲ演算部２２は、電圧偏差信号ΔＶを入力し、電圧偏差信号ΔＶを比例演算する比例演算部５３と、電圧偏差信号ΔＶを積分演算する積分演算部５４により構成され、その和を出力としている。

【００６３】

図１４によれば、電圧変成器ＰＴ１で検出した発電機端子電圧Ｖｇと設定電圧$Ｖ_{0}$の偏差（電圧偏差ΔＶ）を減算器２１で求め、ＡＶＲ演算部２２内の比例演算部５３と積分演

算部５４においてそれぞれ比例分と積分分を求め、加算器２４で加算して得た比例積分信号によりサイリスタを制御し、界磁電流を制御する。

【００６４】

なおＡＶＲ演算部２２における演算は、比例ゲインをＫａ、積分時定数をＴｉとするとき、（５）式で表すことができる。

［数５］

ＡＶＲ演算部２２出力＝Ｋａ・ΔＶ＋（１／Ｔｉ）∫ΔＶｄｔ　　（５）

この場合には、補償回路２０として比例ゲインＫａ用の補償回路２０Ｐと積分時定数Ｔｉ用の補償回路２０Ｉを備え、それぞれの補償Ｋａ，Ｔｉを比例演算部５３と積分制御部５４に反映する。なお、積分ゲインＫｉ＝１／積分時定数Ｔｉの関係にあることから、積分時定数Ｔｉを変更するということは、積分ゲインＫｉを変更したことと等価である。ただし、図１４では積分時定数Ｔｉによる補償を行うために、積分時定数Ｔｉ用の補償回路２０Ｉの特性は、直流界磁電流が大きいほど積分時定数Ｔｉが大きくされるという関係にある。

【００６５】

以上要するに本発明は制御装置における制御定数を直流界磁電流により変更するものであり、この場合の調節器が比例制御を行うものであれば比例ゲインＫａを変更し、調節器が積分制御を行うものであれば積分ゲインＫｉあるいは１／積分時定数Ｔｉを変更すればよい。また調節器が比例積分制御を行うものであれば、比例側、積分側の一方を変更してもよいし、双方を変更するものであってもよい。制御系統全体における個別事情を反して決定されればよい。

【００６６】

なお上記の実施例１から実施例７を通じて、同期機の界磁制御装置を構成することについて説明してきたが、これは同期機の界磁制御方法として発明を把握することも可能である。この場合に本発明は、「電力系統に接続された同期機の界磁を制御する同期機の界磁制御方法であって、同期機の界磁コイルに流れる電流を操作する界磁制御系統の制御定数を界磁電流または界磁電流の等価物の大きさに応じて可変に調整することを特徴とする同期機の界磁制御方法」ということができる。

【符号の説明】

【００６７】

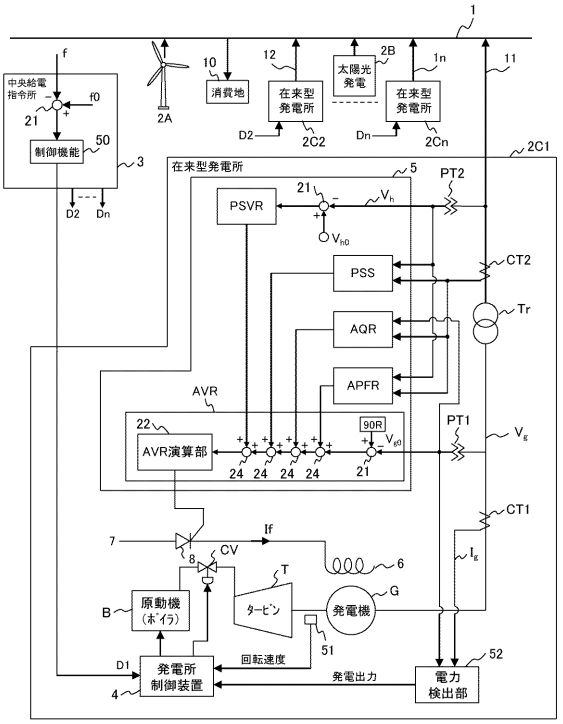
１：電力系統
２Ａ：風力発電所
２Ｂ：太陽光発電所
２Ｃ１～２Ｃｎ：在来型発電所
３：中央給電指令所
４：制御装置
５：界磁制御装置
６：界磁コイル
７：交流電源
８：サイリスタ
１０：電力系統全体の負荷
１１，…１ｎ：送電線
１４：無効電力設定部
２０、２０Ｑ、２０ＰＦ：補償回路
２１：減算器
２２：ＡＶＲ演算部
２４：加算器
３１：電圧検出基準電圧設定部
３２：無効電力配分部
３３：位相補償回路部

３４：出力リミッタ
４２：有効電力検出器
４３：力率演算器
４４：演算器
５０：制御機能
５１：回転速度検出器
５２：電力検出器
９０Ｒ，９０Ｈ：電圧目標設定器
１１１：周波数検出器
１１２：電力算出器
１１３：演算器
ｆ：系統周波数
ｆ０：一定周波数
τ：時定数
Ｄ１、Ｄ２、…Ｄｎ：出力指令値
Ｔ：タービン
Ｇ：発電機
Ｂ：蒸気発生器
ＣＶ：蒸気加減弁
ＣＴ１，ＣＴ２：変流器
Ｔｒ：変圧器
Ｉｆ：直流界磁電流
Ｉｇ：発電機端子電流
Ｖｇ：発電機端子電圧
Ｖｇ０：設定電圧
Ｖｈ：母線電圧
Ｖｈ０：基準電圧
Ｑ：無効電力
ＡＶＲ：自動電圧調整器
ＰＳＶＲ：送電電圧制御界磁装置
ＰＳＳ：電力系統安定化装置
ＰＴ１，ＰＴ２：電圧変成器
ＡＱＲ：自動無効電力調整装置
ＡＰＦＲ：自動力率調整装置

【図面】

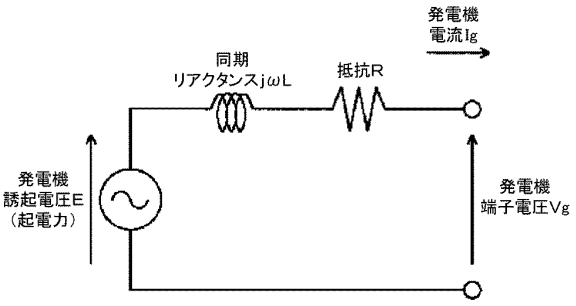
【図１】

図 1



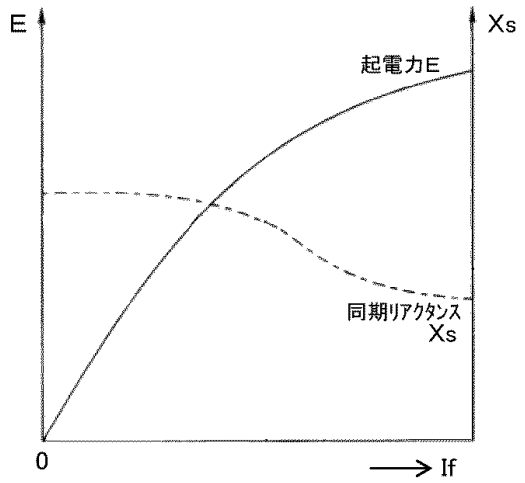
【図２】

図 2



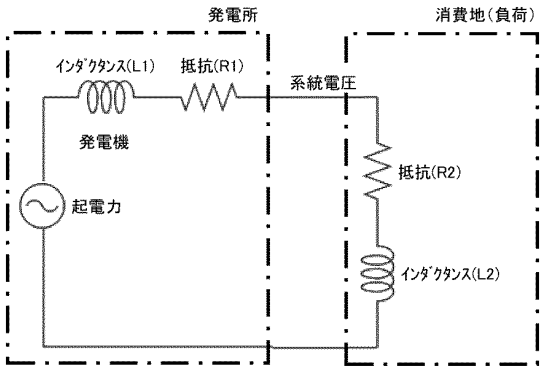
【図３】

図 3



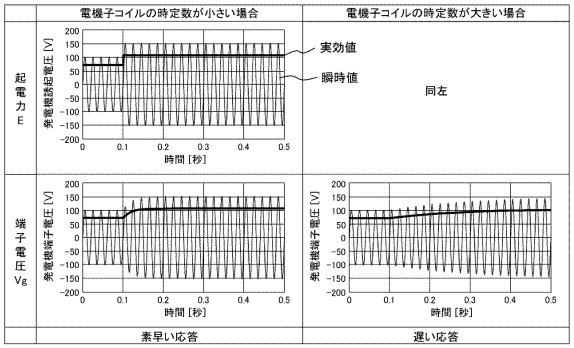
【図４】

図 4



【図５】

図 5



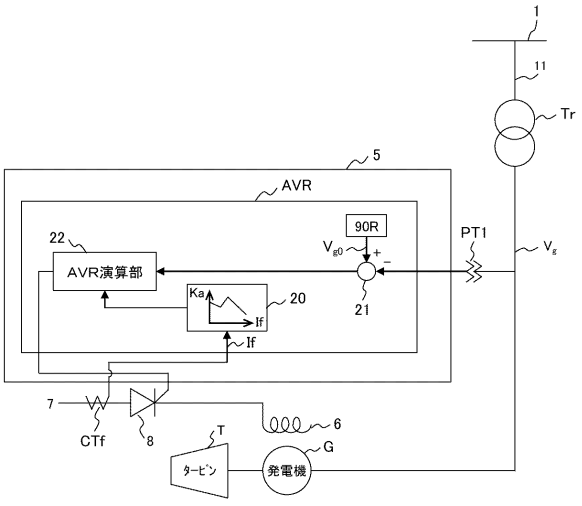
【図６】

図 6

No.	意味（和名）	制御量	操作量	目的	安定度の区分	説明
1	AVR: Automatic Voltage Regulator（自動電圧調整装置）	発電機端子電圧	発電機励磁電流	発電機の端子電圧の維持	電力安定度（過渡）	発電機端子電圧が基準値になるように励磁電流を自動的に制御する装置
2	PSVR: Power System Voltage Regulator（制御発電機励磁装置）	主変2次電圧	AVR 設定電圧	系統電圧の維持	電圧安定度	AVRに送電線送り出し母線電圧の補正信号を重畳加えることにより，送電線送り出し母線電圧が基準値になるように自動的に制御する装置
3	AQR: Automatic Q Regulator（自動無効電力調整装置）	主変1次側無効電力	AVR 設定電圧	〃	〃	発電機の無効電力出力が基準値になるように励磁電流を自動的に制御する装置
4	APFR: Automatic Power Factor Regulator（自動力率調整装置）	主変1次側力率	AVR 設定電圧	〃	〃	発電機力率が基準値になるように励磁電流を自動的に制御する装置
5	PSS: Power System Stabilizer（系統安定化装置）	発電電力，周波数	AVR 設定電圧	安定度向上	〃	事故時の発電機端子電圧変動に即応して，急速に励磁電流を増加することにより，発電機内部誘起電圧を高めて同期化力を増大させ，安定度を向上させる

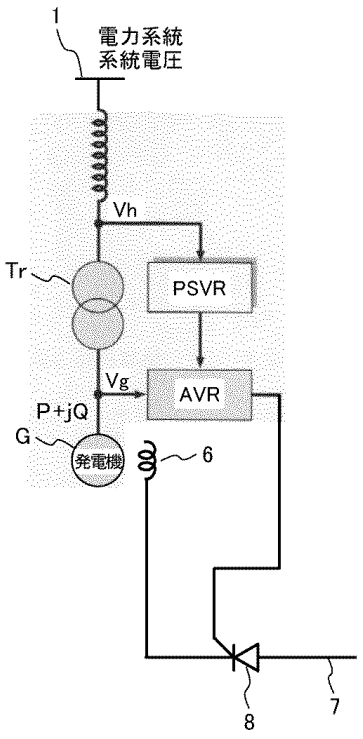
【図７】

図 7



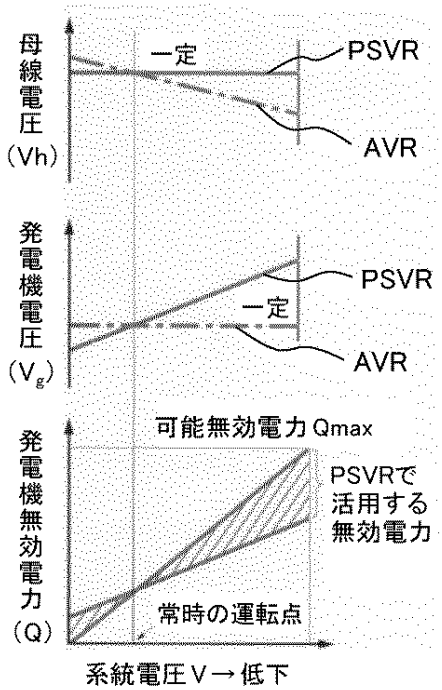
【図８ａ】

図 8a



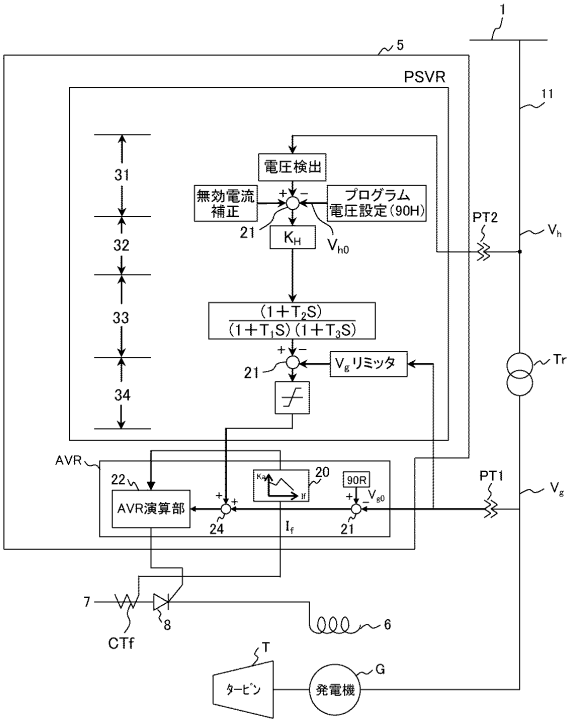
【図８ｂ】

図 8b



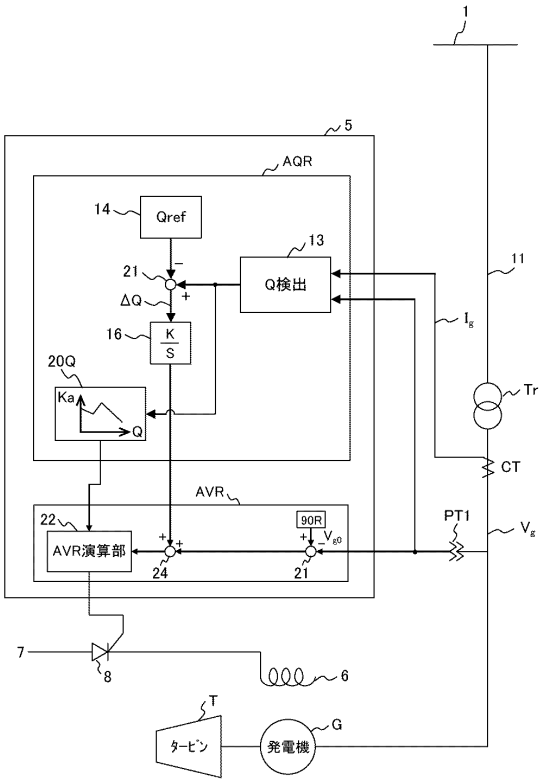
【図９】

図 9



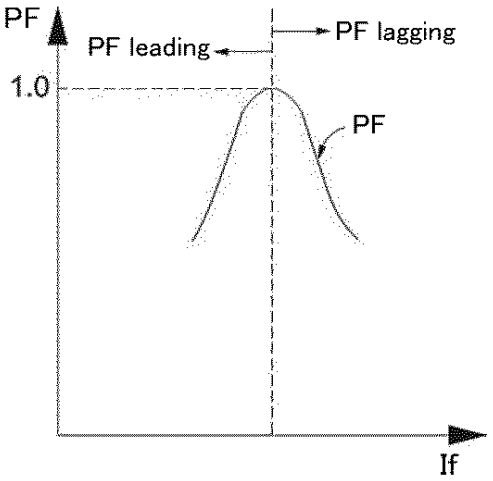
【図１０】

図 10



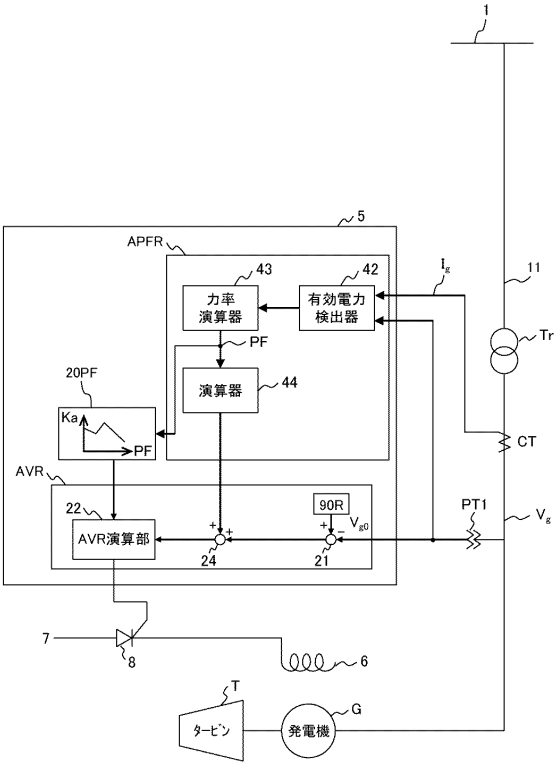
【図１１】

図 11



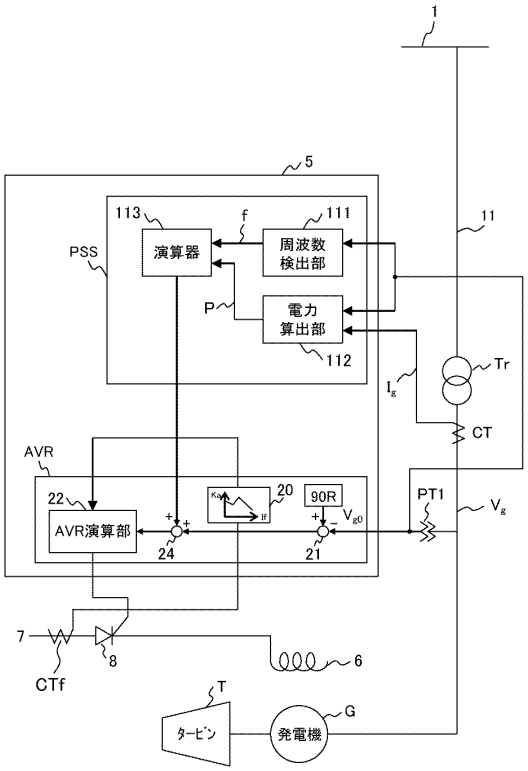
【図１２】

図 12



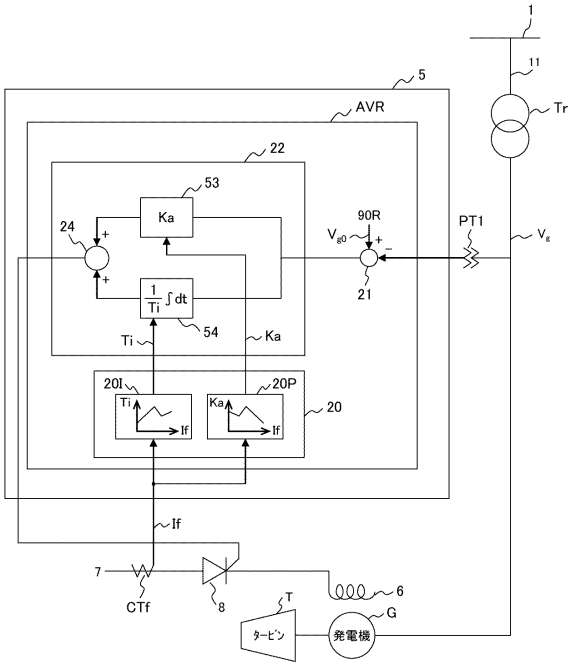
【図１３】

図 13



【図１４】

図 14



フロントページの続き

(56)参考文献　　特開平０３－０５６１００（ＪＰ，Ａ）
特開２００２－１３６１９４（ＪＰ，Ａ）

(58)調査した分野　(Int.Cl.，ＤＢ名)
Ｈ０２Ｊ　３／００ －　５／００
Ｈ０２Ｐ　９／００ －　９／４８