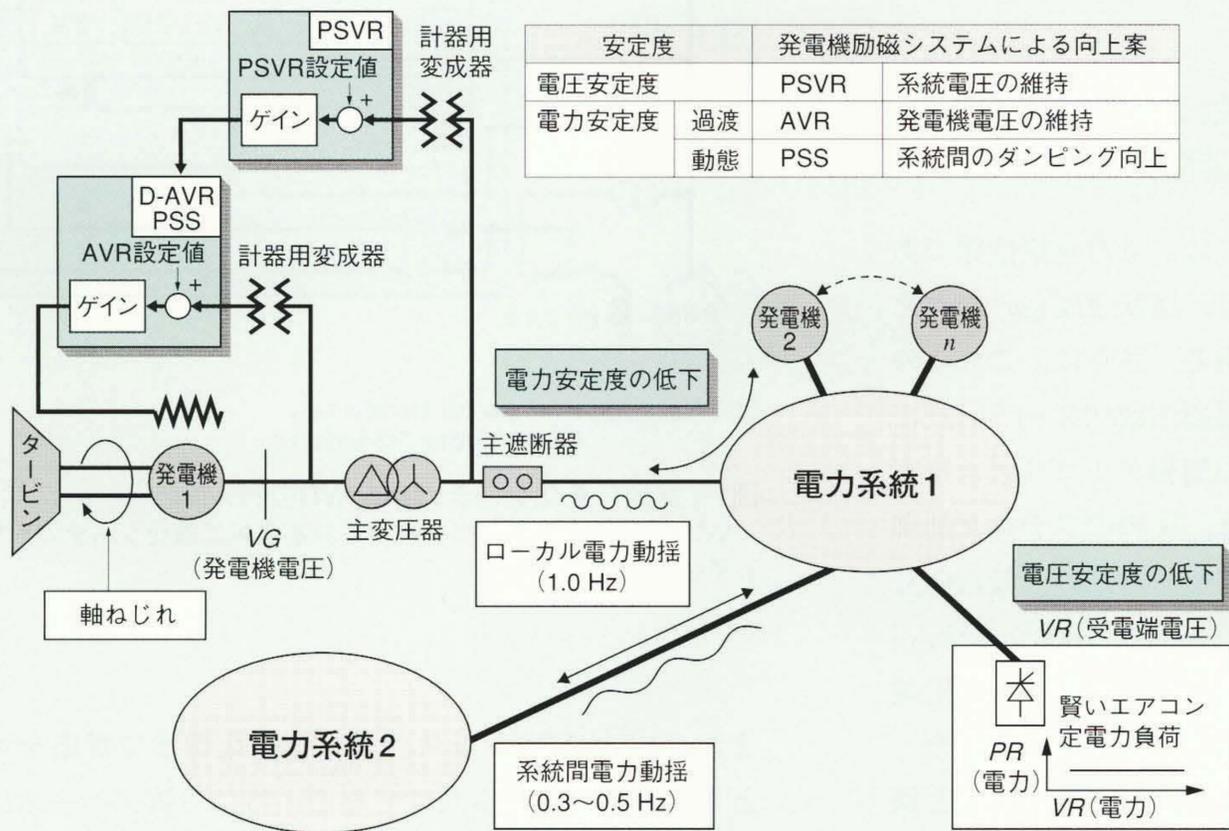


最新の発電機励磁制御システム

—デジタルAVRと電力系統安定化技術の導入—

Recent Developments on Generator Excitation Control System

北内義弘 Yoshihiro Kitauchi 萬城 実 Minoru Banjō
 白崎 隆 Takashi Shirasaki 北村 哲 Satoshi Kitamura
 林 邦誉 Kunitaka Hayashi



注：略語説明
 PSVR (Power System Voltage Regulator)
 AVR (Automatic Voltage Regulator)
 D-AVR (Digital AVR)
 PSS (Power System Stabilizer)

電力系統と安定度
 安定度には「電力安定度」と「電圧安定度」があり、これらの向上が電力系統の運用に重要である。

近年、電力系統の規模が拡大するにつれて、電力の安定供給と電力系統の円滑な運用がますます重要となってきた。特に、電力系統の大容量長距離送電化・広域運用化とエアコンなどの定電力非線形負荷の増大に伴い、系統安定度は低下傾向にあるため、電力と電圧安定度の確保・向上は、いっそう重要な課題となっている。

安定度の向上策としては、送電線での昇圧や直列コンデンサの採用などの主回路の改善による方法があるが、D-AVR(デジタル自動電圧調整装置)、PSS(電力系統安定化装置)およびPSVR(送電電圧制御発電機励磁装置)を使用した発電機励磁制御による方法がコストメリットの高い方法として注目されている。

日立製作所は、これらの発電機励磁制御を最新の32ビットRISC(縮小命令セットコンピュータ)プロセッサを使用した「HIACS-7000システム」で構成し、電力系統の安定運用に適した高速・高信頼な励磁システムを実現して実用に供している。

1 はじめに

電力系統の大容量化、広域運用の拡大と定電力負荷の増大により、電力系統の安定度は電力安定度と電圧安定度とも低下傾向にあり、これらの向上が急務となってきた。特に電力安定度は、従来の発電機間で発生する1.0 Hz程度の電力動揺のほか、電力系統間で発生する0.3~0.5 Hzの長周期の電力動揺の抑制が解決すべき課題としてクローズアップされてきている。

ここでは、特に系統安定度向上に有効な発電機制御を行う最新のデジタル励磁システムについて述べる。

2 電力系統安定度と励磁制御

電力系統安定度には、負荷変動などが発生しても電圧を一定に回復、維持できる能力を示す「電圧安定度」と、並列運転する発電機間で発生する電力動揺を速やかに抑制し、電力を一定に維持できる能力を示す「電力安定度」がある。運用にあたっては、最も厳しい運用条件を考慮したうえで、これらを十分に確保する必要がある。

電力系統安定度の向上方法としては、系統電圧の昇圧、送電線の増設、直列コンデンサの設置、SVC(静止形無効電力補償装置)の設置などの主回路の改善による

方法と、発電機励磁の制御による方法がある。

主回路の改善による方法は根本的な対策ではあるが、改造規模が大きくなる。これに対して、制御による方法は、デジタル制御装置を用いると、制御アルゴリズムの改善で発電機の能力を最大に引き出すことが可能となり、経済的効果が大きい。

3

D-AVR(デジタル自動電圧調整装置)と PSS(電力系統安定化装置)

電力安定度の励磁制御を行うには、電力動揺情報である有効電力(P)、内部周波数(f_q)、回転速度(ω)などを高精度、高速に検出する必要がある。さらに、これらの入力信号を用いて、広い電力動揺周波数(0.3~1.5 Hz)に対して制動力を確保できるような制御アルゴリズムを実現する必要がある。このためには、従来のアナログ制御方式では、きめ細かい制御が困難であるため、最新の32ビットデジタル技術を駆使した「HIACS-7000システム」を採用してCD-AVR(コンパクトデジタル自動電圧調整装置)を開発し、これにPSSをソフトウェアで実現した。

CD-AVRでは、PSSによる電力系統の安定度向上と保守性の向上を実現するために、以下の点に配慮している。

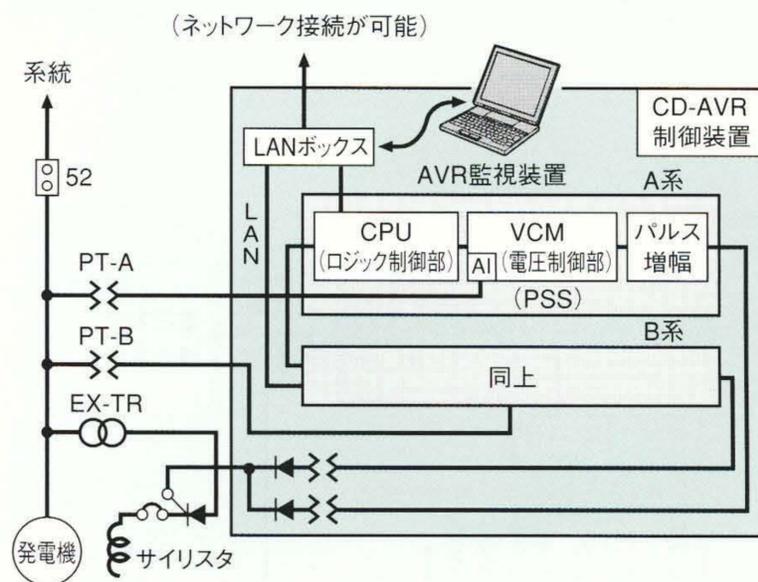
(1) 交流瞬時値用アナログ入力(AI: Analog Input)と高速電圧制御を統合したVCM(Voltage Control Module)を開発し、コンパクト化を図るとともに、広域電力安定化制御に必要な高速で高精度な信号検出を実現した。

(2) サイリスタ制御の特徴を生かした並列二重化システムの実現により、信頼性を高めるとともに、片系異常時での電圧変動と系統に与える影響を、待機二重化システムと比べて少なくした(図1参照)。

(3) マンマシン系では、制御定数の設定や運転状態の監視・記録および警報表示を、盤内収納のAVR(Automatic Voltage Regulator)監視装置上のウィンドウ画面から一貫した操作でできるようにし、また、表形式のオンライン設定値変更と高速ヒストリカルトレンド機能の充実により、今後特に重要となる系統安定化装置の設置に伴う現地試験やパラメータチューニングを、特別な試験器材なしで簡単に実施できるようにした。

(4) AVR監視装置にCAD機能を持たせることによってロジック図と制御プログラムとの一対一対応による可視性の向上を図るとともに、ドキュメントの一元管理により、保守・管理を容易とした。

(5) 電圧制御部、パルス増幅器および監視装置を2面に収納し、従来機比50%以下の省スペース化を実現した。



注：略語説明 PT (Potential Transformer)
EX-TR (Exciter Transformer)

図1 並列二重化システムCD-AVRの例

VCMの採用により、コンパクトな高信頼二重化システムを構成している。

また、1,000 MWクラスの大容量発電機まで対応を可能とし、新設プラントだけでなく、特に設置スペースに制限のある更新案件にも適用できるようにした。

なお、日立製作所は、東北電力株式会社東新潟火力発電所第2号機(350 MW)と同社女川原子力発電所第3号機(825 MW)にCD-AVRを納入している。

3.1 PSS

現在、PSSの方式には、有効電力を入力信号とする ΔP 方式(ΔP -PSS)が広く使用されている。この方式は、電力動揺周波数が1.0 Hz程度のローカルな発電機間の電力動揺の抑制に適している。

しかし、広域運用に伴う電力系統間で生じる低周波数の動揺に対しては、有効電力に含まれる系統動揺情報が少なくなることから、 ΔP -PSSの効果は小さくなる。この対策として、低周波数でも有効な内部周波数(f_q)または回転速度(ω)とを組み合わせた $\Delta P + \Delta \omega$ PSSが使用されるようになってきた。ただし、 ω には系統動揺情報のほかに、タービン・発電機系の軸ねじれ振動も含むので、使用にあたっては、ノッチフィルタなどの配慮が必要となる。

4 多入力PSS

発電機の励磁制御での電力安定度向上策としては、 ΔP -PSSが広く採用されているが、最近では広域安定化の目的で $\Delta P + \Delta \omega$ (または Δf)方式のPSSが実用化され

ている。しかし、ますます厳しくなる長距離送電システムの安定度確保と、系統状態の変化に影響を受けにくい制御性能(ロバスト性)を実現するために、 $\Delta P + \Delta \omega$ 方式PSSに無効電力 ΔQ を追加した多入力PSSを、東北電力株式会社、財団法人電力中央研究所および日立製作所と共同で開発した。

ΔQ は ΔP に比較して、系統状態の影響をあまり受けずに、系統と発電機間の内部相差角($\Delta \delta$)成分をほぼ一定の割合で含むため、電力系統間で発生する0.3~0.5 Hzの低周波の電力動揺を抑制するのに有効である。

多入力PSSに、さらに過渡安定度向上回路(ν 回路)を付加することにより、過渡・動態安定度ともに優れた効果を発揮する。

また、 ω 信号の代わりに発電機内部誘起電圧の周波数信号 f を用いた場合も、 ω 信号とほぼ同等の効果があることを確認できた。周波数信号は、電圧・電流信号から演算で直接検出できるので、電磁ピックアップなどの付属装置を必要とせず、電磁ピックアップの設置が困難な水力発電機の場合でも多入力PSSが実現できる。

多入力PSSを適用した場合の従来方式に対する電力安定度向上効果について、図2に示す12機モデル系統で検証した結果を図3に示す。

なお、検証は、商用D-AVRを用いた検証盤とRTDS(Real-Time Digital Simulator)とを組み合わせ、実系統を模擬して実施した。

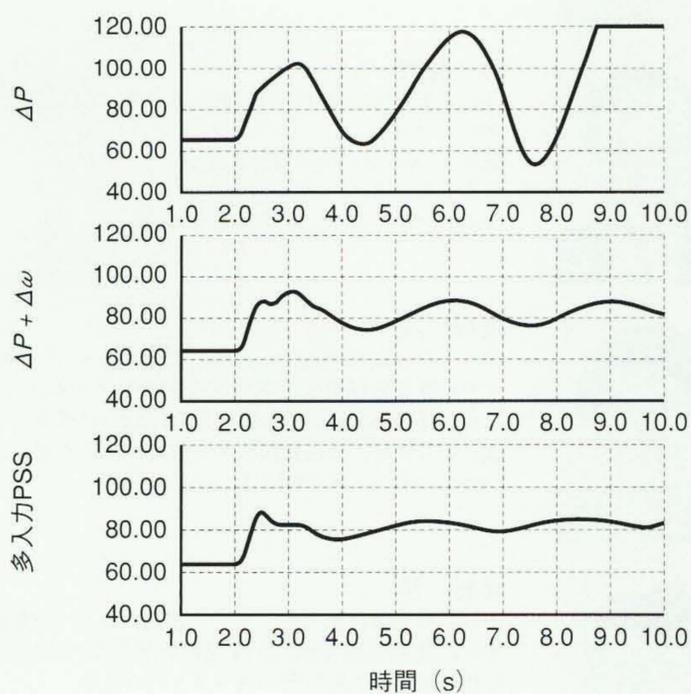
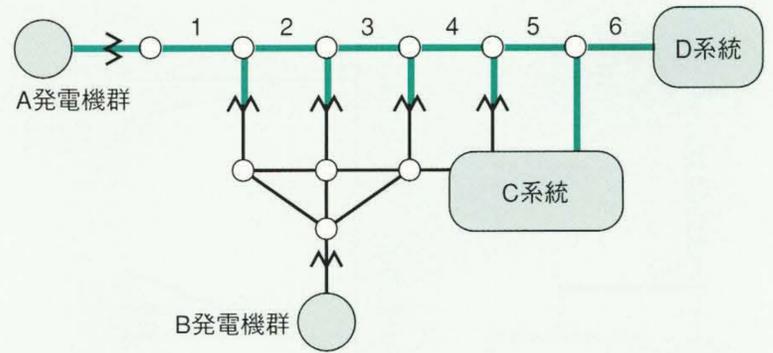


図2 12機モデル系統の概略図
安定度評価に使用した広域電力系統モデルの概略を示す。



注: 太線 (500 kV系統), 細線 (275 kV系統)

図3 電力安定度向上効果の試験結果例(系統短絡事故除去後の相差角変化)

多入力PSSは事故除去後の相差角変化が少なく、過渡・動態安定度とも安定度向上に優れている。

5 電力系統の電圧安定性を向上させる電圧制御装置

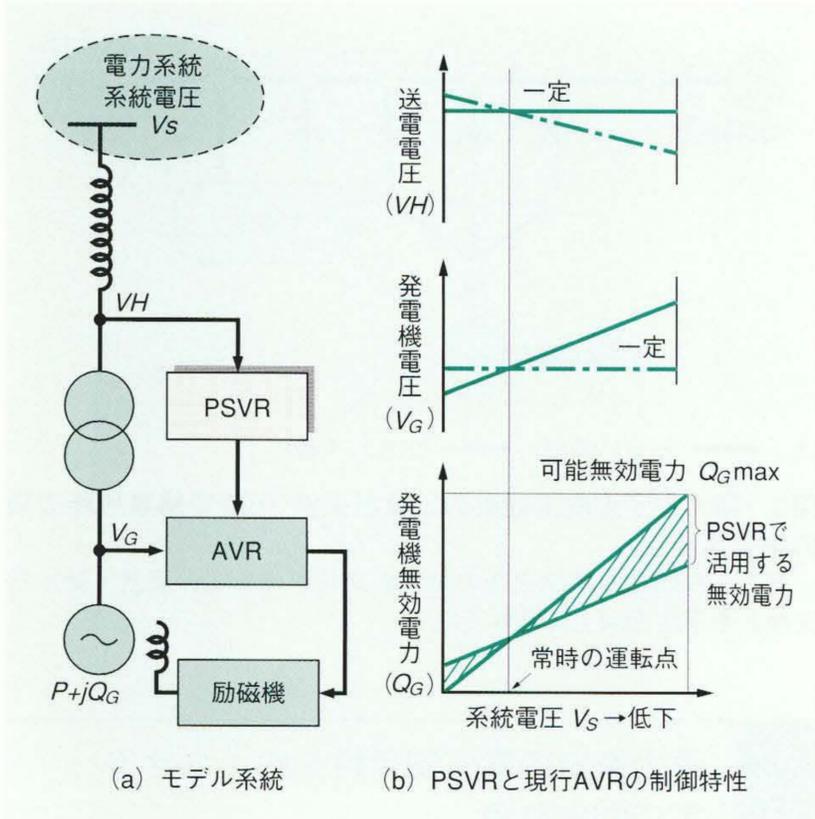
5.1 電圧安定度向上の必要性と動向

冷房需要などの定電力に近い電圧特性を持つ負荷の増加や都心部の275 kVケーブル系統の拡大、大規模電源の集中による長距離送電系統の出現などにより、電力系統の電圧安定性は厳しくなる傾向にある。

負荷の増加に対する電圧安定対策として一般に採用されるのは、負荷端に電力用コンデンサや同期調相機を設置することである。一方、電源側の対策として、発電所の昇圧変圧器の高圧側である送電電圧制御を発電機の励磁制御で行うPSVR(Power System Voltage Regulator)の研究開発を東京電力株式会社と日立製作所ほかが共同で行った。基幹系統の電圧安定性に最も貢献する50万V系統全般と275 kV系統に接続される発電所にこのPSVRを設置し、運用を開始した。

5.2 PSVRの原理と効果

図4(a)に示すような1機対無限大系統モデルを基に、PSVR制御した場合と現行AVRで制御した場合の系統電圧低下時の送電電圧、発電機電圧および無効電力の関係を同図(b)に示す。同図(b)に示すように、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PSVRで送電電圧を一定制御するので、昇圧変換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、無効電力を増加させる制御が行われる。これに対して現行AVR制御では、発電機電圧を一定に制御するので無効電力の発生が少なく、送電電圧は系統電圧低下に比例して低下することとなる。結局、PSVRの目的は、同図(b)の斜線部分の無効電力を多く



注：—— (PSVR制御), - - - (現行AVR制御)

図4 系統電圧低下時のPSVR制御特性

PSVRの使用により、発電機の無効電力供給能力を有効に活用できる。

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にある。

PSVRを設置するだけで、1,000 MWクラスの発電機の例では400 MVar以上の無効電力供給能力を有効に利用でき、電力用コンデンサや同期調相機への設備投資を抑えることが可能となるので、経済的メリットも大きい。

5.3 PSVR装置

PSVRでは、電圧制御ゲインの増加に伴う電力動揺安定度の低下防止や、発電機間の無効電力の変動抑制、発電機の運用限界値内での運転ができるように制限機能を追加するなど、安定運用のくふうを凝らしている。

PSVR設置時は隣接機の等価インピーダンスが小さくなるので高精度の制御が要求され、また、送電電圧の設定変更などは電力系統全体での高精度の計画運用が必要となる。このため、最新のPSVRは、日立製作所の高機能、高速デジタルコントローラである“HIACS-7000”を中核として構成し、系統構成や系統運用条件の変化に応じて設定変更が予想される制御定数は、設定パネルのテンキーからユーザーが容易に変更できるようにした。

6 おわりに

ここでは、発電機の励磁制御による系統安定度向上のための具体案として、D-AVR+PSSとPSVRについて述べた。

電力系統安定度については、将来のグローバル化による運用の高度化やこれに連系する発電機への負荷の多様化・複雑化、さらに、昼夜や曜日、季節などによる系統条件にも常に対応できるように、パラメータの自動設定技術を新たに開発する必要がある。

これらについても、PSSの出力と内部誘起電圧の動揺波形から自動チューニングする方法を検討済みであり、今後、実機試験や運用データなどのノウハウを蓄積し、これらの見知の適用を図っていく考えである。

参考文献

- 1) 北内, 外: 長周期動揺抑制用多入力PSS試作機のシミュレータ試験, 電気学会全国大会, 6-276(1999)
- 2) 天野, 外: プロニー解析に基づく励磁系の同定と比率加算系PSSの自動設計方法, 電気学会論文集B, 7~8(1998)
- 3) 道上, 外: 電圧安定性を向上する新しい発電機励磁方式(PSVR)の開発, 適用, 電気学会論文集B, 110(1990)
- 4) 木村, 外: 高信頼・次世代監視制御システムの火力発電所への適用, 日立評論, 82, 2, 159~164(平12-2)

執筆者紹介



北内 義弘

1986年財団法人電力中央研究所入所, 電力システム部 所属
現在, 電力系統の解析, 制御, 運用の研究に従事
電気学会会員
E-mail: kitauchi@criepi.denken.or.jp



白崎 隆

1978年東北電力株式会社入社, 研究開発センタ 所属
現在, 電力系統解析, 制御, 運用の研究に従事
電気学会会員
E-mail: w780231@tohoku-epco.co.jp



林 邦誉

1991年東京電力株式会社入社, 系統運用部 系統運用計画グループ 所属
現在, PSS, PSVRの設計に従事
電気学会会員
E-mail: t0726695@pmail.tepco.co.jp



萬城 実

1973年日立製作所入社, 電力・電機グループ 情報制御システム事業部 制御設計本部 発電制御システム設計部 所属
現在, 発電機励磁制御装置の設計, 開発に従事
電気学会会員, 計測自動制御学会会員, 情報処理学会会員
E-mail: mbanjo@omika.hitachi.co.jp



北村 哲

1964年日立製作所入社, 電力・電機グループ 情報制御システム事業部 制御設計本部 発電制御システム設計部 所属
現在, 発電機励磁制御の取りまとめに従事
電気学会会員
E-mail: kitamura@omika.hitachi.co.jp