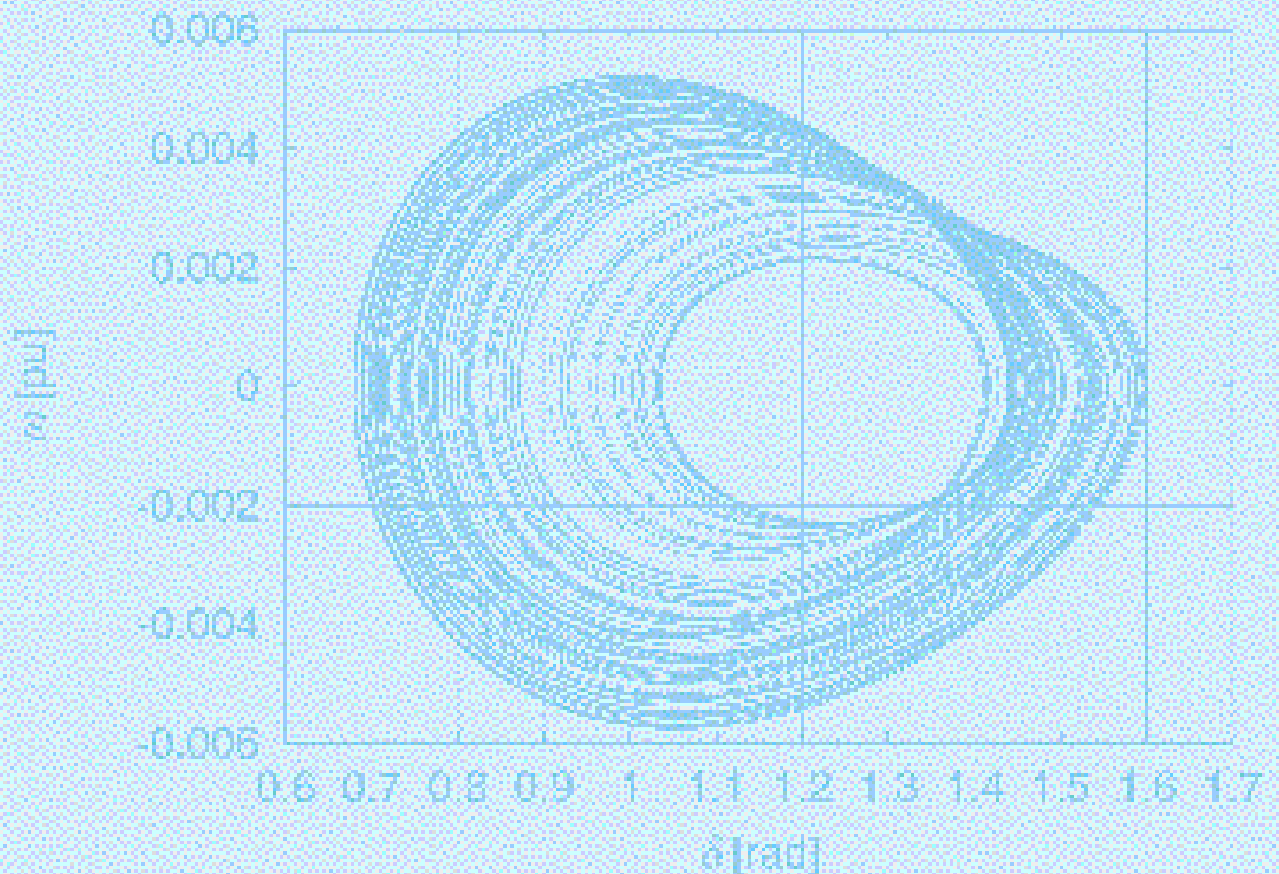
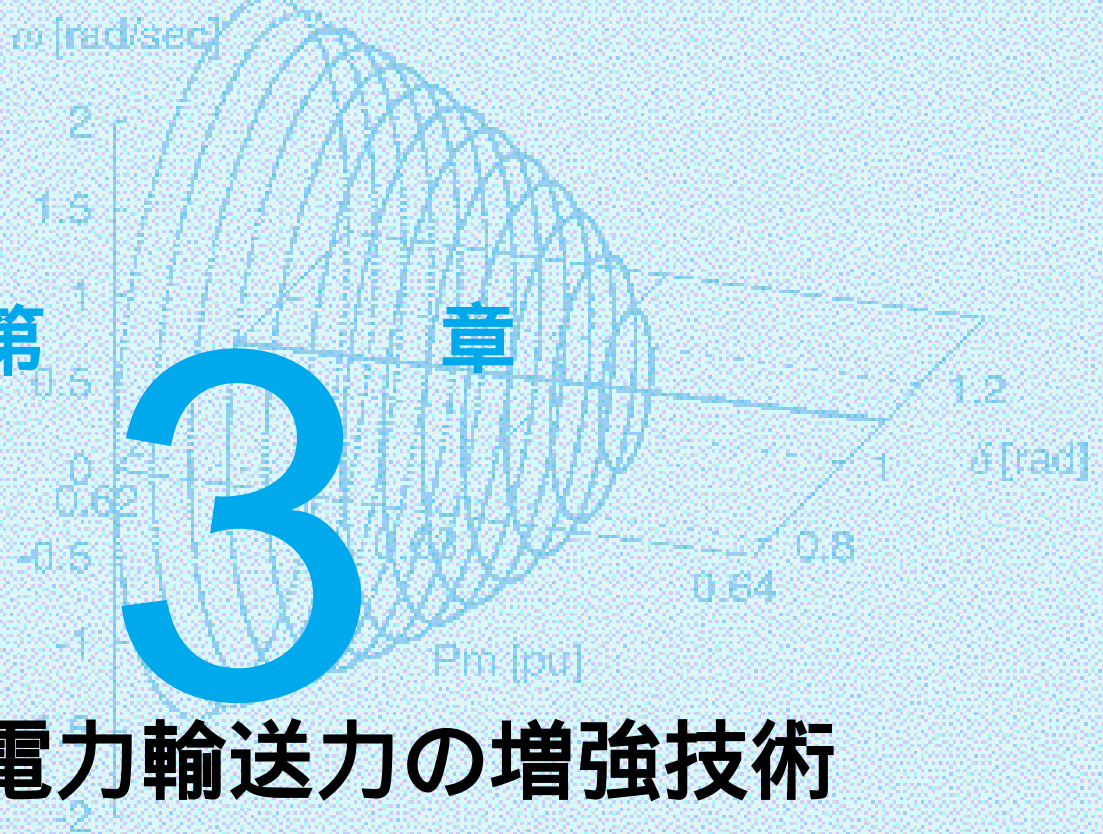


第

3

章

電力輸送力の増強技術



第3章 電力輸送力の増強技術 目次

狛江研究所電力システム部	上席研究員	井上 俊雄
狛江研究所電力システム部	主任研究員	吉村 健司
狛江研究所電力システム部	主任研究員	北内 義弘
狛江研究所電力システム部	上席研究員	高崎 昌洋

3 - 1 発電機励磁制御による電力輸送力の増強	25
3 - 2 直流技術による系統機能の強化	35



井上 俊雄（昭和57年入所）
電力系動特性解析のための火力・原子力プラントのモデリング、プラント特性を考慮した緊急時制御、電力系統の長時間動特性解析手法に関する研究に従事してきた。現在、主としてコンバインドサイクルプラントのモデリングならびに適応型発電機励磁制御方式の開発に取り組んでいる。



吉村 健司（昭和60年入所）
主に電力系統の定態安定度、特に系統安定化制御系の定数最適設計手法に関する研究に従事してきた。現在、大規模系統を対象とした高周波数の異常振動現象とその安定化対策に関する研究に取り組んでいる。



北内 義弘（昭和61年入所）
主に超電導発電機の安定度向上効果、特に発電機励磁制御系に関する研究に従事してきた。現在、発電機多入力安定化制御や電力系統のオンライン制御に関する研究に取り組んでいる。



高崎 昌洋（昭和58年入所）
主に直流送電を初めとするパワーエレクトロニクス機器の系統適用技術、解析・制御技術に関する研究に従事してきた。現在、自励式変換器を活用した電力システムの高機能化に関する研究に取り組んでいる。

第3章 電力輸送力の増強技術

大容量発電所の遠隔・偏在化、電力需要の大都市部への集中化、電力会社間の広域連系強化などによって電力系統の大規模・複雑化が進んでいる。これに伴い、落雷などによる系統事故時の系統動揺現象がより複雑になっている。またコスト低減などの観点から、電力輸送設備

の効率運用は今後ともより一層の推進が求められるため、電力輸送の増強技術はますます重要となる。

本章では輸送力増強技術として発電機励磁制御による系統安定度の向上対策と、直流技術による系統機能の強化について概説する。

3-1 発電機励磁制御による電力輸送力の増強

系統安定度を向上させる発電機の励磁制御(以下、PSSと呼ぶ)は、安定化制御の中でも発電機の運転に本来必要な励磁装置の制御装置や制御方式を変更するだけで系統安定度の向上を達成できるので最も経済的である。その反面、その制御には高度な考え方や理論が要求される。

当研究所では、図3-1-1に示すように、発電機の励磁制御に関して以下の3つの側面から同時に研究を進めている。

現用PSS制御系定数設定の最適化

従来から、PSS制御系の定数設計については、特定の

系統状態を想定した単純な系統での周波数応答解析が一般に用いられている。しかし、系統運用状態が大きく異なる場合、大規模系統において幅広い周波数領域の電力動揺現象が問題となる場合、従来手法に代わる新しいPSS定数設計手法が必要となる。

当研究所では、これまで大規模系統の固有値解析手法を用いたPSS定数最適化手法を提案し、ほぼ実用化の段階に至っている。その成果として、発電機有効電力出力(P)と発電機回転数(ω)を入力とする2入力形PSS(以下、P+形PSSと呼ぶ)定数設定に関し、複数の潮流断面を同時に考慮し、かつ、幅広い周波数帯の

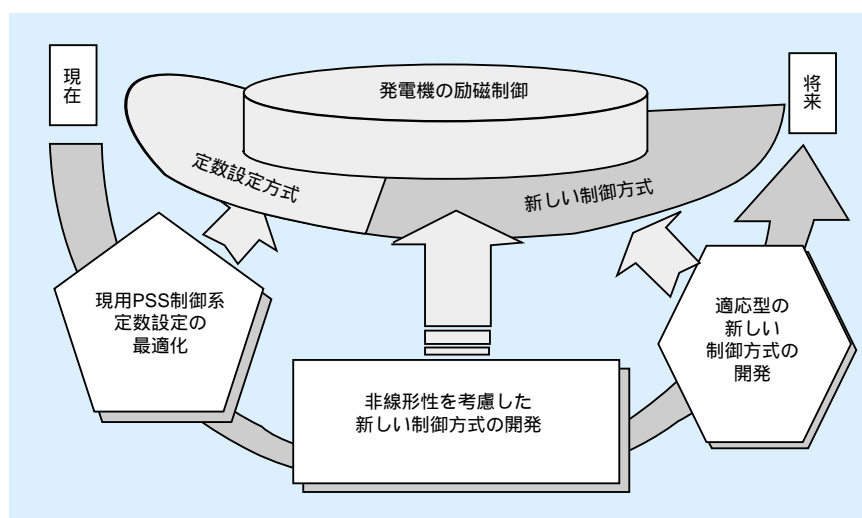


図3-1-1 発電機励磁制御への取り組み

動揺現象を良好に安定化する手法を3-1-1で述べる。

非線形性を考慮した新しい制御方式の開発

電力輸送設備の効率運用が一層推進され電力系統がその安定度限界近くで運用される状況下では、電力系統の非線形性の影響が強まる。この場合、電力系統を線形近似した上記のモデルで定数を設計したPSSでは、動揺抑制性能が低下することが懸念される。このため非線形性を考慮した制御方式の開発の必要性が今後ますます高くなっていく。

当研究所では、系統動揺形態からの知見に基づくファジィ制御方式を提案し、非線形性の影響が特に強い大擾乱に対して現用PSSより優れた制御性能が得られることを明らかにした。その成果として、ファジィ制御方式を改良・発展させた多入力PSS方式を当研究所の交・直流電力系統シミュレータに適用した検証実験結果を3-1-2で述べる。

適応型の新しい制御方式の開発

上記、は、ある系統状態を想定しそれに対して制御系の定数を設計し、設計後は以後その定数を固定とする制御方式である。このため、想定した系統状態では所期の安定化性能を発揮するが、想定から大幅に離れた状態ではその性能が低下することが懸念される。

これに対して、発電機の動揺状況に応じて適切に制御系の定数をオンラインで調整する、いわゆる適応型の制御方式は、より幅広い範囲の系統状態において安定化性能を維持でき(以下、ロバスト性が高いという)、将来的に有望な方式として期待される。

適応型の制御方式の研究は従来から国内外で実施されているが研究途上にあり、手法として確立して適用が検討されるまでには至っていない。

当研究所では、適応型制御方式の一つとして時系列モデルを用いた制御方式を提案し、そのロバスト性の高さを明らかにしている。その成果として、系統事故により系統構成が大きく変化した場合についてシミュレーションによる検証結果を3-1-3で述べる。

3-1-1 現用発電機制御系の最適設計による電力系統の安定化

従来から、PSSの設計では、ある一つの特定の系統状

態を想定し、発電機一台と送電線のみといった非常に簡略化された系統モデル(以下、一機無限大母線系統モデルと呼ぶ)が用いられている。しかし実際には、昼間と夜間のように系統の潮流状態が大きく異なったり、発電機のローカル動揺¹や広域動揺²のように動揺周波数も動揺様相も異なる現象が問題となる場合、特定の系統状態のみを想定する従来の設計手法では十分に系統の安定性を確保することができなくなる可能性が高い。

これに対応するため当研究所では、これまで大規模系統の固有値解析手法(S法³)を用いて、PSSの制御系定数を最適に設計する手法を提案し、ほぼ実用化レベルにある。ここでは、その成果の一つとして、新しいタイプのPSS(P+形PSS)の定数設定に関し、複数の潮流状態を同時に考慮し、かつ、ローカル動揺と広域動揺の両者をバランス良く良好に安定化する手法について述べる。

幅広い系統運用状態に対応するPSS定数最適設計手法

現在、電力各社で広く採用されている一機無限大母線系統を対象としたPSS定数設計手法(表3-1-1の現用設計手法)に替わるものとして、当研究所では新たに、複数の系統状態における安定性を同時に考慮したPSS定数最適設計手法を開発・実用化した(表3-1-1の新最適化手法)。大規模系統を対象にPSSを設計する際に、系統運用状態(例えば系統構成や潮流状態)が変化しても、それを事前に考慮することにより系統の安定性を確保するロバストな制御系の設計を可能とした。以下にその原理を簡単に述べる。

複数の系統状態の定態安定度の評価は、図3-1-2のように、ある系統状態における固有値を用いた F_i を系統状態数だけ足しあわせた関数 F として定量的に与える。関数 F は系統の安定性が悪いほど大きな値となる。したがって、PSS定数を最適化し系統の安定性を高めるためには、関数 F の値を最小にすればよい。そのためには、PSS定数(図3-1-2では α_1 、 α_2 として表現してい

*¹ローカル動揺：発電機固有の特性に基づく約1 Hz程度の比較的周波数の高い電力動揺

*²広域動揺：系統全体の発電機が動揺する約0.5 Hz程度の比較的周波数の低い電力動揺

*³電力系統の微小外乱に対する安定性(定態安定度)を解析するプログラム。系統の安定性は、S法により得られる「固有値(ダンピングとも言う)」の符号により判別することができる。現在、我が国の電力会社で広く用いられている。

表3-1-1 PSS定数設計手法の特徴比較

	系統対象規模	発電機モデル	PSSタイプ	設計対象条件	制御対象電力動揺
現用設計手法	一機無限大母線系統	簡略モデル	P形PSS	単一系統条件	ローカル動揺
新最適化手法	大規模系統	詳細モデル	P+ 形PSS、他 任意の形式	複数系統条件	ローカル&広域動揺

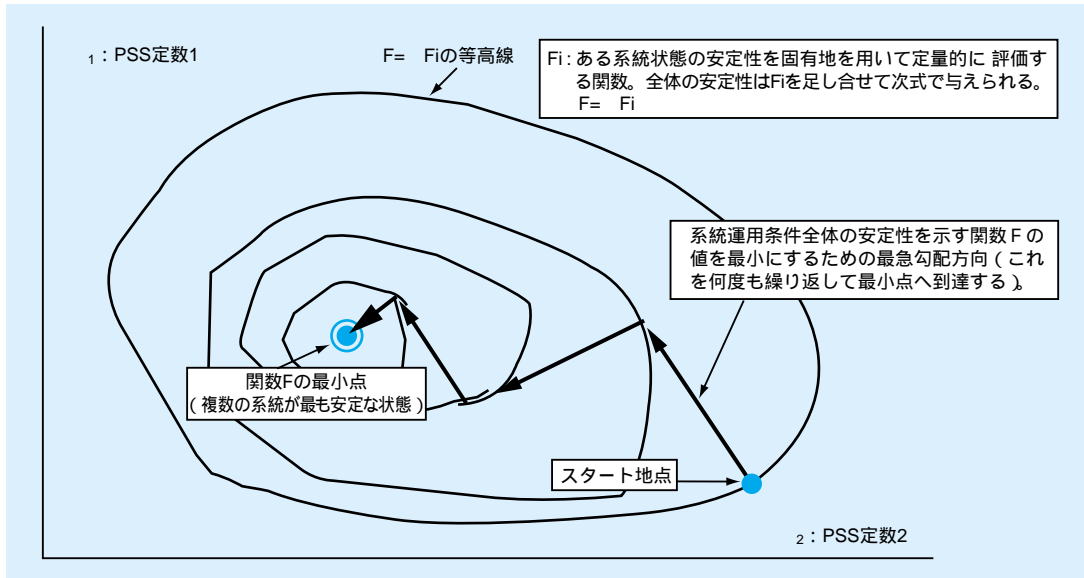


図3-1-2 安定性指標関数Fとその安定化の概念図

る)に対する固有値感度を用い、最急勾配法⁴により関数Fを最小化する。

ローカル動揺・広域動揺抑制のための2入力形PSS最適設計手法

ロバスト性の高い制御系設計のためには、のような複数の系統状態の安定化だけでなく、ローカル動揺や広域動揺といった動揺様相の異なる幅広い動揺周波数領域における安定性を確保する必要がある。

現用の制御機器を活用しかつ、周波数帯の異なる複数の動揺現象を抑制するためには、それぞれの周波数帯の動揺現象に効果的に作用するPSSを組み合わせ、発電機電圧を制御することが肝要となる。具体的には、図3-1-3に示すような発電機の有効電力出力(P)と回転子の回転数()をPSSの入力信号としたP+形PSSが有効である。基本的には、P形PSSがローカル動揺

に、形PSSが広域動揺抑制に効果的である。ただし、P形と形のPSSを組み合わせるとしても、P形と形を各々個別に定数を最適化しP+入力として組み合わせても必ずしも全体として最適とはならない。

そこで、複数系統状態の安定性を考慮しながら、P+形PSSの定数をP形形同時に最適設計する実用的な手法を開発した(表3-1-1:新最適化手法)。

モデル系統での検証結果

図3-1-4に示す系統モデルを用いて、開発した手法の有効性を検証した。この多機系統モデルは、我が国の60Hz系統を簡略に発電機18機で模擬したもので、各発電機固有の約1秒周期のローカル動揺だけでなく、約3秒周期の広域動揺現象が発生しやすい特徴を持つ。多機系統モデルの両端に位置する発電機G1およびG18にP+形PSSを設置し、その定数を最適化することにより開発した手法の有効性を検証した。このモデル系統において有効性が検証されれば、実系統への適用も現実的となる。

PSS定数を最適化する際、形PSSによる広域モード

⁴関数Fを最小化する最適化繰り返し計算の各ステップにおいて、図3-1-2のように関数Fの最も急勾配の大きい(最急勾配)方向へパラメータを変化させて計算を進め、最終的にFが最小となるパラメータを探索する手法。

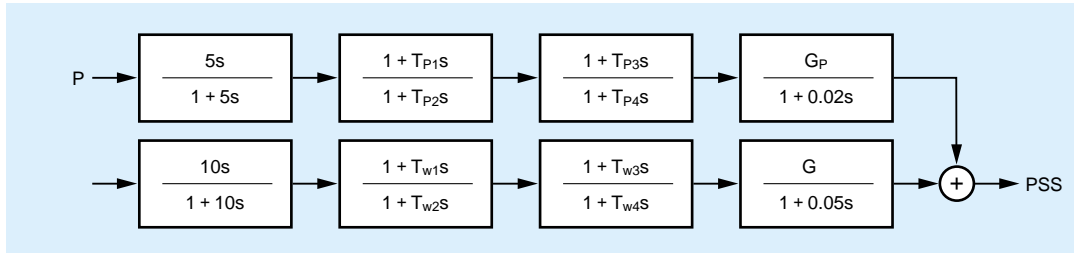


図3-1-3 P+ 形PSSブロック図

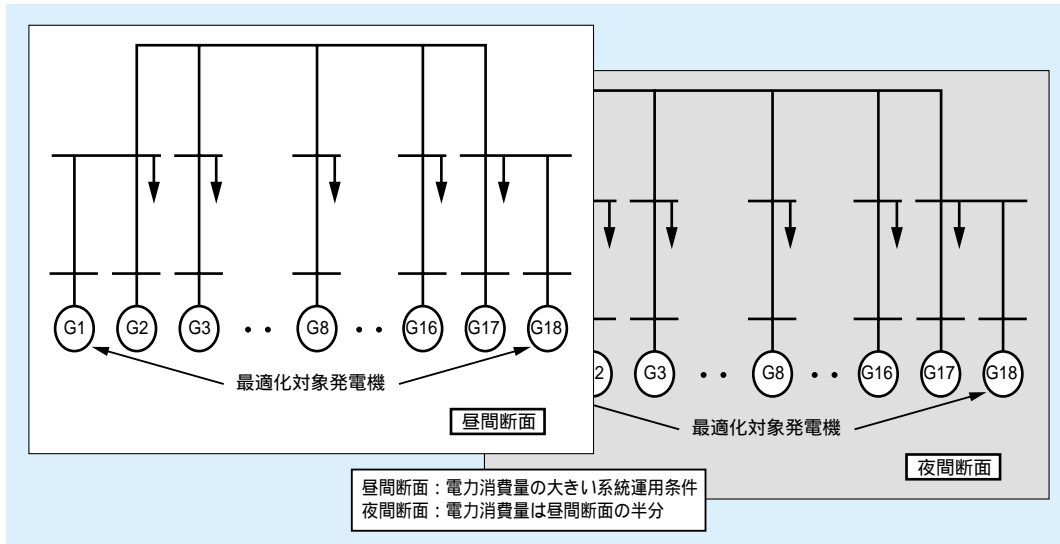


図3-1-4 18機長距離串形系統モデル

安定化のために、電力需要の大きい昼間を想定したモデル(以下、昼間断面)他に、電力需要の小さい夜間を想定した発電機容量・出力と負荷量を昼間モデルの値の半分としたモデル(以下、夜間断面)の2つを考慮した。また、PSS最適化対象発電機であるG1とG18のローカル動揺モードの安定化のために、従来手法と同様一機無限大母線系統モデルを考慮した。線路インピーダンスの値は、夜間断面において最適化対象発電機から多機系統モデルを見たときの短絡インピーダンスとした。このように、2つの多機系統モデルと2つの一機無限大母線系統モデルの合計4つの安定性を同時に考慮して、PSS定数を最適化した。P+ 形PSSの最適化対象パラメータは、図3-1-3で示すゲインと位相進み遅れ補償器の時定数(G_p 、 T_{p1} 、 T_{p2} 、 T_{p3} 、 T_{p4} 、 G_w 、 T_{w1} 、 T_{w2} 、 T_{w3} 、 T_{w4})とした。P形PSSのみを用いる場合は、 G_p 、 T_{p1} 、 T_{p2} 、 T_{p3} 、 T_{p4} を最適化した(この時、 $G_w=0$)。最適化検討ケースは、ベースケース(PSS定数最適化前)、G1、G18発電機のP形PSS定数最適化、G1、G18発電機のP+ 形PSS定数最適化、の3ケースとした。

図3-1-5に各ケースのシミュレーション結果を示す。各ケースの発電機動揺波形のうち上段は昼間断面、下段は夜間断面である。PSS定数最適化前は、昼間/夜間断面ともにG1とG18が大きく動揺する広域動揺が振動発散で不安定であり、ローカル動揺はほとんど顕在化していない(同図)。ケースでP形PSSを最適化することにより、昼間/夜間とも広域動揺は安定化できているが、シミュレーション開始後3秒間のローカル動揺が安定ではあるがケースより悪化している(同図)。P形PSSのみでも、ローカル動揺と広域動揺の両方を安定化できることが判るがその効果は十分とはいえず、もう一段の安定化が望まれる。ケースでP+ 形PSSへの新最適化手法の適用で、両動揺の安定性は更に向上した(同図)。シミュレーション開始後3秒程度の期間に現れるローカル動揺が支配的な領域、その後現れる広域動揺が支配的な領域共にケースよりも大幅に安定化されており、系統多断面を考慮したP+ 形PSS定数の最適化効果により幅広い動揺周波数領域での安定度向上効果が大きいことが明らかとなり、本手法

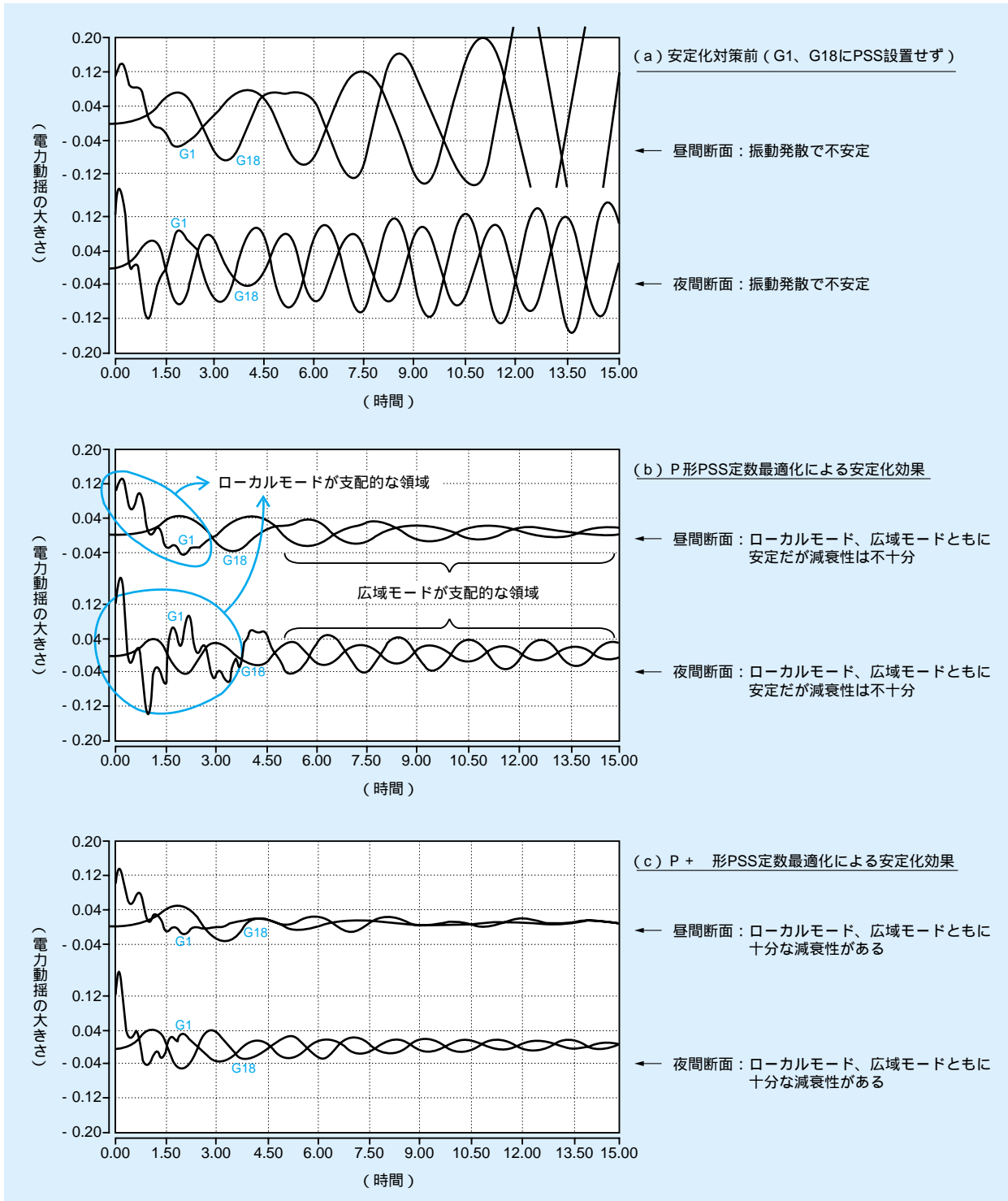


図3-1-5 P+形PSS定数最適化手法のシミュレーション検証例
(系統事故後の発電機G1とG18の電力動揺波形)

の有効性が検証された。

以上のように、実系統を簡略模擬した18機モデル系統に提案手法を適用し、ロバストな安定度向上効果が得られた。この結果は本手法が十分実用に耐えうるものであることを示しており、今後幅広い利用が期待で

きる。さらに、PSSの入力として今回用いた発電機自身の情報(Pや)だけでなく、発電機から遠方の情報(例えば連系線電力潮流)をPSSの入力信号とすることで、任意の発電機で任意の動揺現象を安定化させることも可能である。

3-1-2 多入力 PSS による安定度向上効果

3-1-1ではP+形PSSによるロバストな発電機励磁制御系の設計手法を述べた。しかし、系統運用状態が厳しくなり、長距離送電線で大電力を送電しなければならない条件下では、電力系統を線形近似モデルとして取り扱うことが難しくなる。

そこでこのような非線形性の強い条件下でも安定性を確保するために、当研究所で既に開発していたファジィ発電機励磁制御方式を改良し、ロバスト性が高く、かつ特に長周期動揺抑制に効果の高い多入力PSSを東北電力(株)、(株)日立製作所との共同研究により開発した。また、実機相当のソフト・ハードによって構成される多入力PSSの試作機を製作した。ここでは、多入力PSSの概要、定数設定方法および当研究所「交・直流電力系統シミュレータ」における多入力PSS試作機の性能検証試験結果について述べる。

多入力PSSの概要

図3-1-6に提案した多入力PSSの概略図を示す。多入力PSSは、基本的には前述のP+形PSSに追加する形として、非線形性の強い条件下でも動揺の減衰性を

確保するため発電機無効電力出力(Q)を入力するQ入力ブロックと、発電機の過渡動揺第1波脱調を防止するための過渡安定度向上論理ブロック(回路ブロック)から成る。以下にそれぞれのブロックを簡単に説明する。

Q入力ブロック

一般に系統事故発生後の発電機内部相差角の変化と発電機有効電力の変化はほぼ比例の関係があるが、安定度的に厳しい長距離・大電力送電系統においてはその関係が変化し、有効電力の非線形性が強くなる。すなわち、相差角の変化に対して有効電力変化の度合いが小さくなる特性となる。このような系統状況においては、有効電力を入力信号とするPSSは効果が小さくなり、系統事故後に良好なダンピング制御効果が得られなくなる。

一方、発電機無効電力(Q)の変化の度合いはその逆に、上記状況下において、相差角に対してほぼ比例する特性となり、有効電力変化よりも大きくなる。したがって、P+形PSSに無効電力(Q)を追加して入力することにより、系統運用条件の厳しさが増しても、長距離・大電力送電系統における長周期動揺現象に対し良好なダンピング向上効果が得られる。

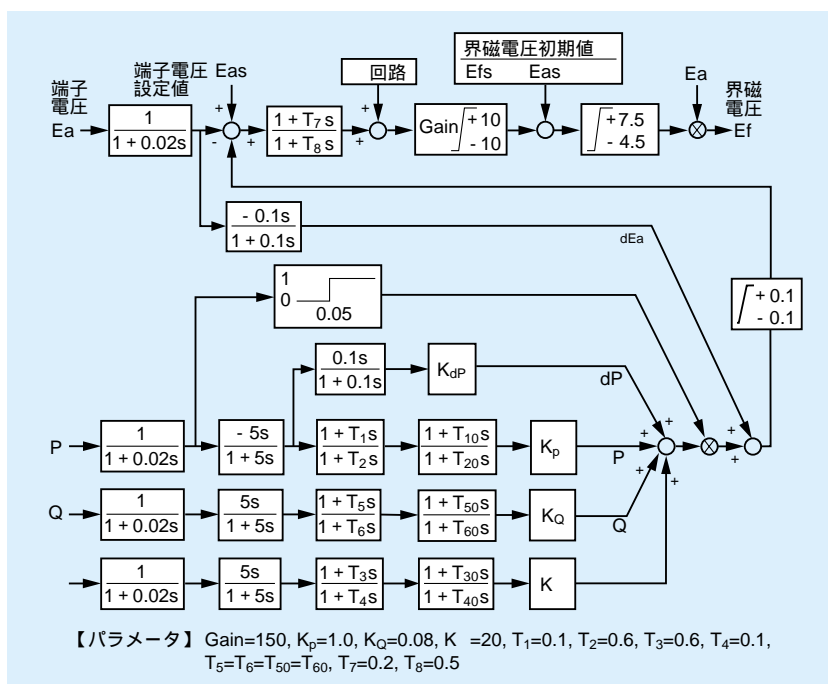


図3-1-6 多入力PSS付きAVRの設計例(サイリスタ励磁方式)

過渡安定度向上論理ブロック

系統に事故が発生すると発電機は加速するが、そのまま加速が収まらずに脱調に至る場合がある。それを第1波脱調と呼ぶが、この過渡動揺第1波における過渡安定度を向上させるため、(2)のQ入力ブロックとは別の論理ブロックを開発した。これは、発電機至近端において短絡事故が発生した場合に、有効電力偏差 P の値を積分し、その値の大きさにより界磁電圧 E_f を発電機励磁系の上限值まで強制的に突き上げる回路(回路) である。これにより発電機の内部電圧を事故直後に急速に上昇させることができ、第1波脱調を防止できる可能性が高くなる。

多入力PSSの定数設定方法

$P+$ 形PSS部分とQ形PSS部分に分け、その定数を設定する。最初に $P+$ 形PSS部分の制御定数を前述(3-1-1)の $P+$ 形PSS定数最適化手法によって設定し、その後Q形PSS部分を線形化モデルにおいて0.3 ~ 1.0 [Hz] 程度の低周波数(長周期)の同期化力係数⁵および制動力係数⁶を増加させるように設定する。Q入力ブロック部分は低周波数領域を制御対象としているため、発電機の励磁機の違いによって設定を変える以外は、ほとんどの機種の発電機に同一の推奨値を適用することができる。なお、Q形PSSを導入すると、それに付随して短周期の安定性の悪い動揺現象が発生する可能性がある。したがって、実系統へ導入する際には図3-1-6に示すように、Q形PSSと併せて発電機電圧の変化分 dE_a と発電機有効電力出力の変化分 dP を加える必要がある。

交・直流電力系統シミュレータでの検証結果

長周期および短周期動揺が混在する複雑な実系統の特徴を再現するために、交・直流電力系統シミュレータにおいて、図3-1-7に示す長距離串形4機系統を構成した。実機相当のソフト・ハードにより構成される多入力PSSの試作機を無限大母線から最も遠い発電機1

に適用し、多入力PSS定数設定法の有効性、限界送電電力とダンピングの向上効果および系統状態の変化に対するロバスト性を確認した。

図3-1-7において送電線1回線の地絡事故を発電機3と4の間の送電線中間点で発生させ、発電機1から右端の無限大母線への送電電力の限界値を $P+$ 形PSSと多入力PSSで比較した。図3-1-8にその検証結果を示す。発電機が4台とも系統に接続されているケースを基本ケースとした。発電機1に設置した多入力PSSの定数はこの基本ケースを対象に設計した。次に、発電機2 ~ 4を1台ずつ系統から切り離した3種類の系統構成変更ケースを実施した(発電機切り離しの際は、負荷1 ~ 負荷3も減少または切り離した)。同図に各ケースの限界送電電力の比較を示す。基本ケースだけでなく、系統構成が変化した全てのケースにおいて $P+$ 形PSSよりも多入力PSSの方が限界送電電力を5 ~ 10(%)程度大きくできることが明らかになった。

また、同図は基本ケースで発電機1の出力が50(kW)時における各発電機の電力動揺波形である(太線がPSSを設置した発電機1)。多入力PSSのダンピング向上効果が大きいことが分かる。これらの結果より、限界送電電力とダンピング効果の両面で多入力PSSが優れていることが検証された。なお上記に併せて、実際の発電機への適用に当たって問題となる可能性のある、発電機回転数検出精度の影響、発電機の瞬時電圧の高調波ひずみ、自励式サイリスタの点弧時のノイズ、系統事故時の瞬時電流波形の直流分、あるいは不平衡故障時の動作に対して、試作機が問題無くその能力を発揮できることも確認している。

これにより、多入力PSSの実用化の見通しが得られたので、今後は実機系統への適用が期待できる。

3-1-3 適応型発電機励磁制御方式の開発

3-1-1および3-1-2において、現用発電機励磁制御系あるいはそれを改良した制御系による安定度向上効果を述べた。これらは、あらかじめ想定した系統運用状態の下での安定性を確保するために、オフラインで事前に制御系定数を設計し、設計後はその定数は基本的には固定とされる。また、複数の重要な系統運用状態を考慮することにより、通常の運用範囲におけるロバスト性は確保で

⁵同期化力係数：系統擾乱発生時に発電機動揺を引き戻そうとする力。一般にこの値が大きいと過渡安定度が向上する。

⁶制動力係数：発電機動揺の減衰を早めようとする力。一般にこの値が大きいと定常安定度が向上する。

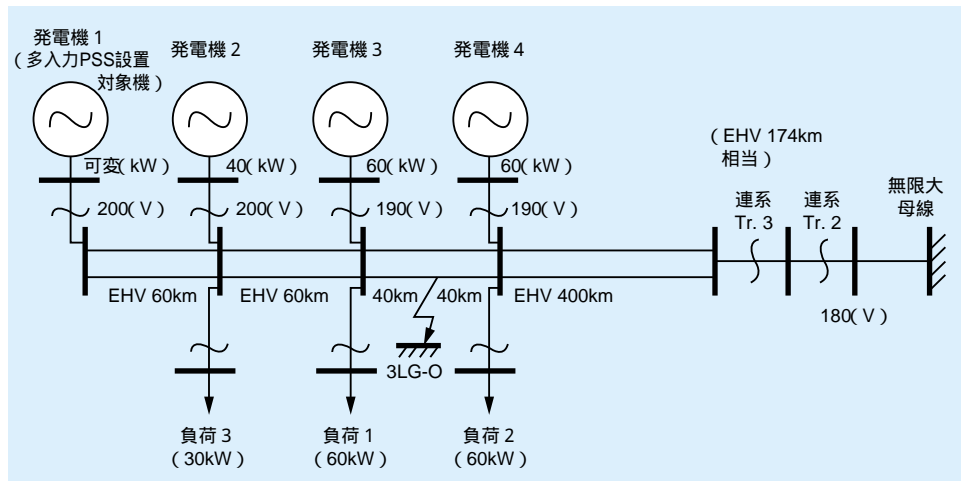


図3-1-7 交・直流電力系統シミュレータ4機系 試験系統

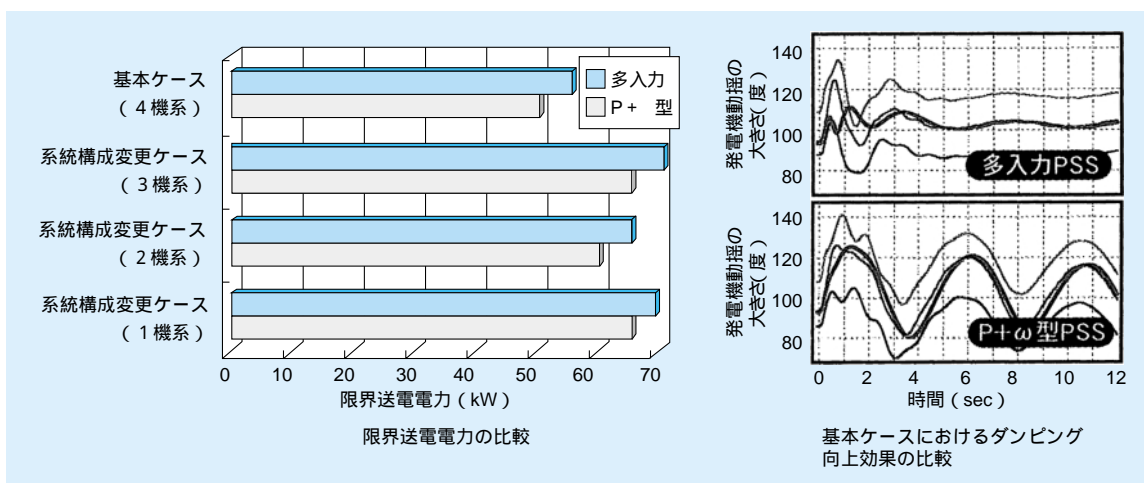


図3-1-8 多入力PSSとP+型PSSのシミュレータ検証試験結果の比較

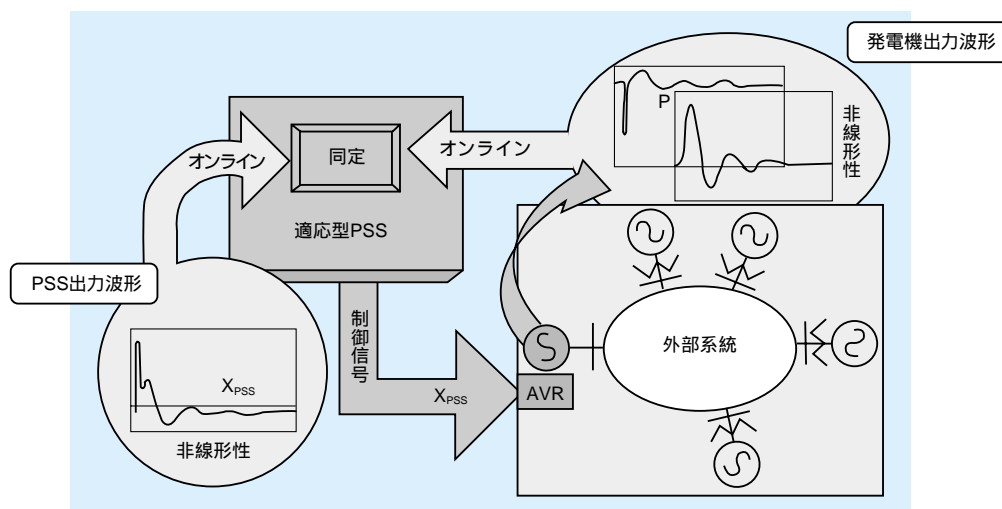


図3-1-9 適応型PSS方式の概略図

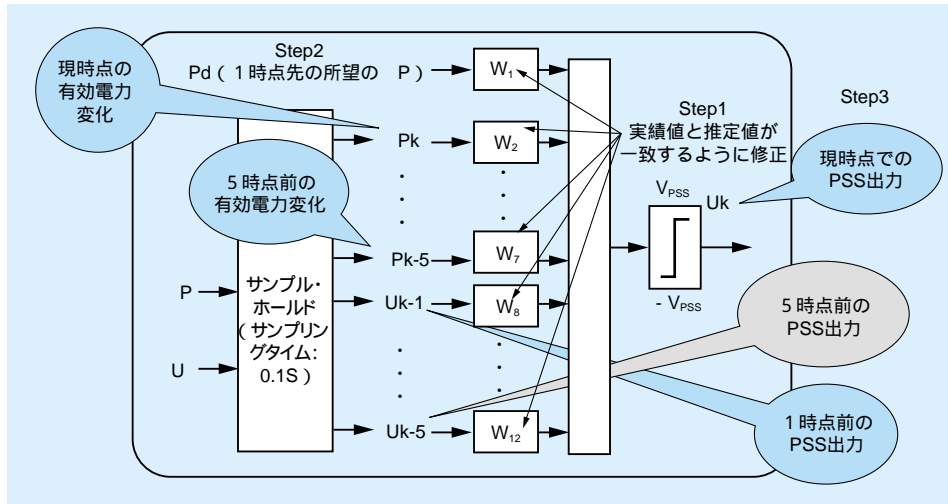


図3-1-10 提案した適応型PSS方式

きるが、送電線に事故が発生し事故後の系統構成が大きく変化するなど制御系設計時の想定外の状況となった時などでは、安定性が確保できなくなることが懸念される。

そこで当研究所ではより一層のロバスト性の向上を図るために、系統事故時の発電機の動揺特性をオンラインで同定し、時々刻々のその特性に合った適切な制御を実施していく方式を新たに提案した。

提案した適応型制御方式の概要

図3-1-9に提案した適応型PSS方式の考え方を示す。発電機動揺時の有効電力(P)波形とPSS出力(X_{PSS})波形データに基づき、両者間の動的な関係を時系列モデルとしてオンラインで同定する。そして、この時系列モデルを用い、発電機の回転数()の変化に比例した有効電力変化が生じるようなPSS出力を算定し発電機励磁制御系(AVR)へ送出する。これにより、系統状態に左右されない極めてロバスト性の高い制御系として期待できる。

図3-1-10に提案方式の具体的な構成を示す。入力信号は発電機有効電力変化(P)とPSS出力(U)であり、過去の時点から現時点(時間間隔0.1秒)までの実測値を時系列として保存している。各ステップの処理内容は次の通り。

- Step 1 : 時系列モデルのパラメータの修正
 発電機動揺中の有効電力変化(P)とPSS出力(U)の実測値から、時系列モデルのパラメータ($W_1 \sim W_{12}$)を修正する。すなわち、現時点の有効電力変化(P_k)が実測されたならば、時系列モデルを用いて1時点

前に出力したPSS出力(U_{k-1})の推定値を逆算する。もし、時系列モデルのパラメータが真値であれば、この推定値は1時点前の実績値と一致する。しかし通常はそうではないので、推定と実績が一致するように各パラメータをオンラインで修正する。

Step 2 : 有効電力変化(1時点先)所望値の決定
 PSS出力によって生じる発電機有効電力変化が発電機の回転数変化に比例するように制御すれば発電機を安定化することができる。このため、現時点の回転数変化に比例した値を1時点先の有効電力の所望値(P_d)とする。

- Step 3 : PSS出力の算定
 時系列モデルによって、1時点先の有効電力変化を予測することができる。この変化が、Step 2で決定した有効電力変化の所望値(P_d)と一致するよう現時点のPSS出力(U_k)を決定する。すなわち、Step 1で修正したパラメータ($W_1 \sim W_{12}$) およびStep 2で決定した1時点先の所望値(P_d)をもとに、5時点前から現時点までの有効電力変化($P_{k-5} \sim P_k$)と、5時点前から1時点前までのPSS出力($U_{k-5} \sim U_{k-1}$)を用い、現時点でのPSS出力(U_k)を算定する。

モデル系統での検証結果

図3-1-11の10機モデル系統を用いて提案の適応型PSSの性能をシミュレーションにより検証した。このモデル系統は系統事故発生前はループ状の系統構成となっている。提案手法のロバスト性を示すために、同図A、

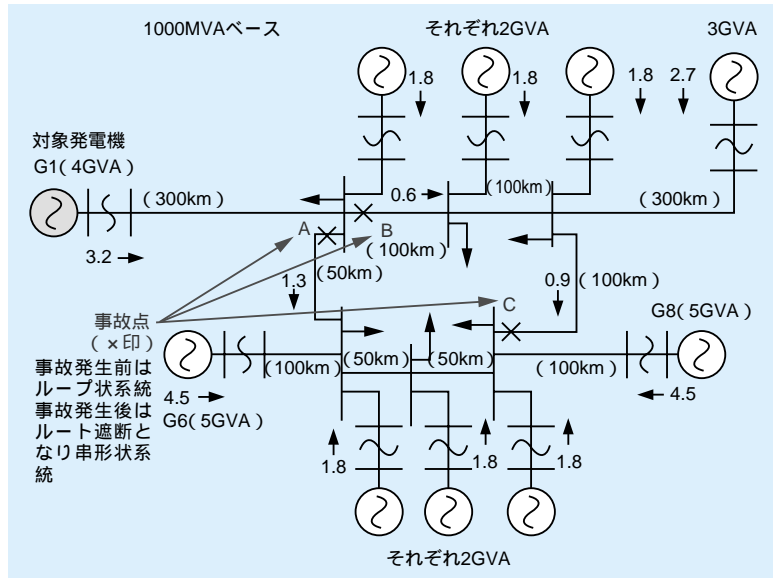


図3-1-11 モデル系統

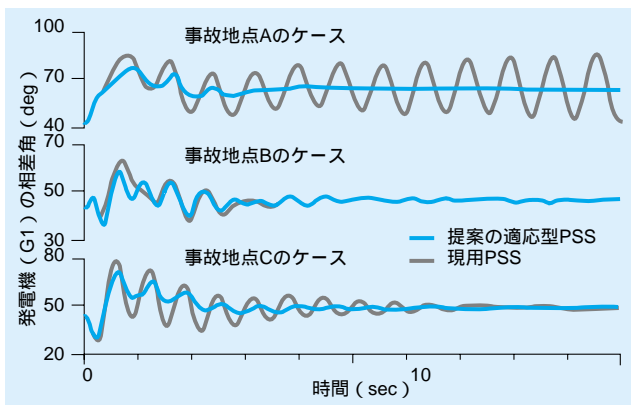


図3-1-12 提案方式と現用方式の動揺抑制性能比較

B、Cの3個所で事故をそれぞれ発生させた。事故後の送電線開放により元のループ系統構成は大きく変更され、長距離串形系統へと変化している。

提案の適応型PSS方式と現用PSS方式を発電機G1に適用し、上記事故を発生させて安定化効果を比較した。送電線ルート遮断後の系統状態が異なる事故地点(A,B,C)に対して、その結果を図3-1-12に示す。事故Bケースは両方式の差はほとんど無く十分な安定性を確保している。事故Cケースでは両方式とも安定であるが提案手法の方が若干減衰率が悪い結果となった。しかしながら、事故Aケースにおいては、現用方式では徐々に動揺が振動発散するのに対して、提案方式は十分な安定性を示し、提案方式の系統構成の変化に対する適応性の

高さを示すロバスト性の高さを明らかにした。

以上のように、系統構成が大きく変化するような状況においても、その系統状態をオンラインで的確に把握し、それに発電機励磁系を適応させていく提案手法は現用の制御系に比べて高いロバスト性を有することを明らかにした。ただし、場合によっては現用PSSよりも減衰が悪くなるケースもあるため、今後は提案方式の適用性を広げるために、パラメータ修正の速応性と収束性を改善する必要がある。

3-1-4 発電機励磁制御系の一層の高度化を目指して

3-1節では、電力系統の安定化制御としての発電機の励磁制御に関し、当研究所で進めている研究の最近の成果を3つの側面から紹介した。現用PSS制御系定数の最適化の側面からは2入力(P+)形PSS定数の最適化手法を提案し、非線形性を考慮した新しい励磁制御方式の開発の側面からは多入力PSS方式を提案した。また、将来的に有望である適応型制御方式の開発の側面から、時系列モデルを用いた制御方式を提案した。今後は、これら3つの側面からの研究から得られた成果や知見を相互に活用することで、発電機励磁制御系のより一層の高度化に役立てたい。

3 - 2 直流技術による系統機能の強化

電力供給におけるコストと信頼度の協調のため、流通設備の利用率向上や電源、負荷の不確実性に柔軟に対応できる設備形成が重要となっている。パワーエレクトロニクス技術は、電力流通網の制御性を高め、大規模停電の防止、系統安定度向上や短絡容量軽減などの系統対策を低コストで合理的に実現することを可能とする。これにより、電力自由化などの環境下において、最適潮流制御や信頼度制御を行うための極めて有効な手段として活用することができる。

電力流通分野におけるパワーエレクトロニクス技術には、いわゆる FACTS 機器⁷と直流送電がある。直流送電に関しては、非同期連系による事故波及防止や短絡容量軽減が、一方 FACTS 機器に関しては、分散配置による安定度向上が主たる導入目的となる。また、直流送電は、環境性や経済性から、ローカル電源に代わる負荷供給や都市供給、さらには再生可能エネルギーによる分散型電源の集約送電への適用も期待されている。

直流技術による系統機能の強化とは、電力供給の信頼度と品質を確保しつつ、経済的な設備形成、運用を行うための手段として、系統の制御性を高めることを指す。


直流送電用などの交直変換器については、今後、自励式変換器⁸の適用が主流となるものと考えられる。自励式変換器は、連系する交流系統に依存することなく高速に有効・無効電力を調整可能な電圧源であり、交流系統から見れば極めて制御性の良い発電機とみなすことができる。このため、雷事故などによる系統動揺時の安定運転性能と有効・無効電力の調整能力に優れ、そのことが他励式変換器にはない画期的な導入メリットを生み出す。しかしながら、大容量の直流送電用として実用化するためには、設計合理化によるコスト低減と損失低減が大きな課題となっている。

本節では、まず自励式変換器の利点と適用効果をま

とめ、自励式直流送電による電力系統の高機能化方策について整理する。次に、コスト低減に向けた設計合理化のため、新たに開発した系統事故時の過電流、過電圧抑制方式について紹介する。

3-2-1 自励式変換器の利点と適用効果

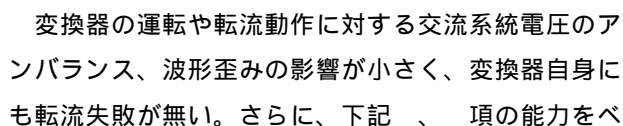
自励式変換器の応用装置としては、STATCOM(自励式 SVC : Static Compensator)と UPFC(自励式移相変圧器 : Unified Power Flow Controller)が既に実運用に入っている。また、自励式直流送電に関しては、標準化によるコスト低減を図った数万 kW 規模の HVDC Light が実用化されている。数十万 kW クラスの直流連系(BTB)用変換器についても、わが国の連系強化技術開発プロジェクトにおいて、実規模実証器を実系統に接続して検証試験を行っている。この成果により、大容量器への自励式変換器の適用についても技術的な素地は整いつつある。

電圧形自励式変換器は、 図 3-2-1 に構成と動作原理を示すように自らの転流動作により直流電圧を切り刻む形で交流電圧を発生している。従って、直流電圧が維持されている限り、自励式変換器は交流系統から見て電圧源として機能する。これにより、直流送電への適用を考えた場合、他励式変換器では実現できない次のようなメリットが得られる。

電源としての運転、負荷供給

無電源あるいはそれに近い系統への電力供給が可能である。回転機に比して慣性の非常に小さい電圧源に相当し、制御性に優れる。ただし、過負荷耐量は変換器の定格設計(素子電流耐量)により決定され、回転機よりは通常小さく制限されるが、一方では短絡電流を増加させない利点ともなる。

弱小交流系統との連系

変換器の運転や転流動作に対する交流系統電圧のアンバランス、波形歪みの影響が小さく、変換器自身にも転流失敗が無い。さらに、下記、 項の能力をべ

⁷ FACTS : Flexible AC Transmission System の略。パワエレ機器を主体として交流電力系統をより柔軟に制御するシステム。

⁸ 自励式変換器 : 装置内部に電源を持って運転する交流・直流変換器。これに対して、系統の電圧を用いて運転を行う変換器を他励式変換器と呼ぶ。

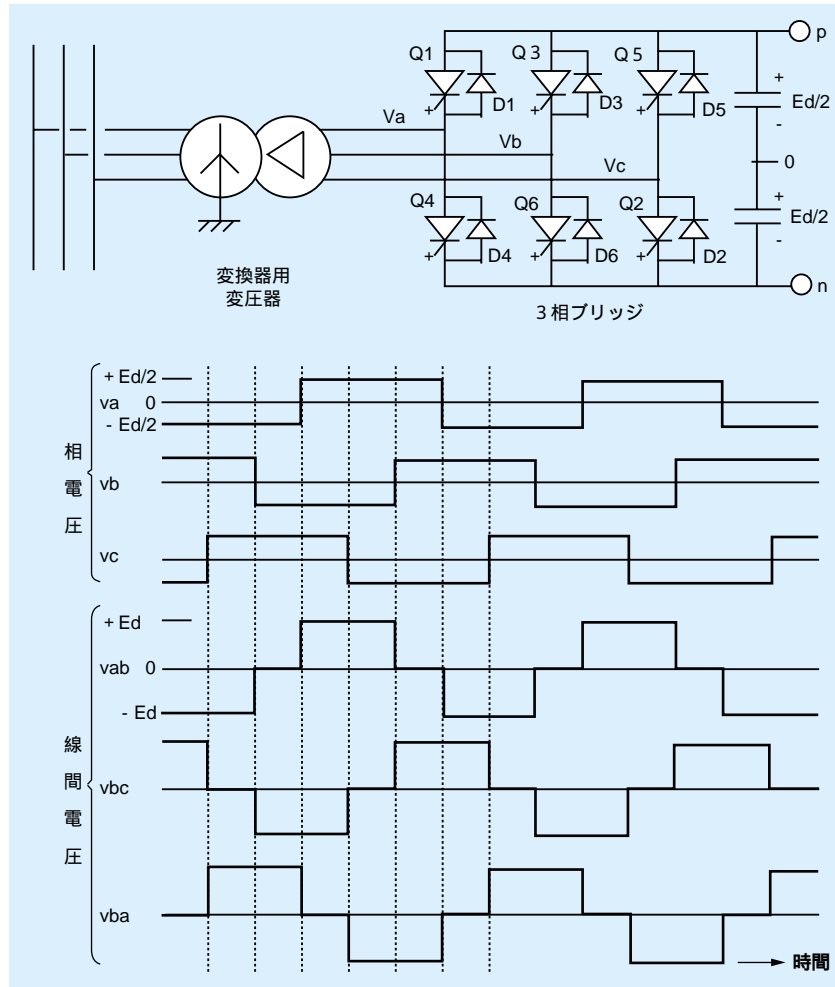


図3-2-1 3相電圧形変換器の基本構成と動作原理

ースに、交流電圧制御が可能となることから、電圧安定性にも優れるため、短絡容量が小さい弱小交流系統との連系においても、安定な運転が可能である。

無効電力供給能力

自励式変換器によって有効電力(P)と無効電力(Q)を制御できる範囲(以下、有効・無効電力可制御領域と呼ぶ)は、図3-2-2に示す円内の領域である。変換器が系統に供給できる皮相電力最大値は、変換器の実効値電流容量で決まり、系統電圧が定格の場合にはMVA容量に一致する。同図に他励式変換器の有効・無効電力可制御領域との比較を示すが、自励式変換器の特徴が、無効電力を供給できる点にあることがわかる。このため、他励式システムのような調相設備が不要となる。従って、系統事故時の交流側過渡過電圧など調相設備を原因とする過電圧が、自励式システムにおいては発

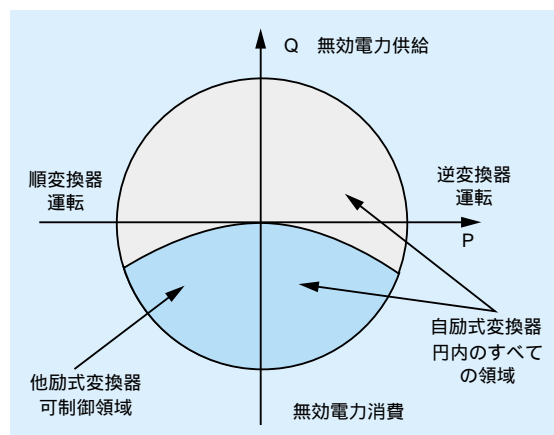


図3-2-2 有効・無効電力可制御領域

生しなくなる。

また、放射状系統においては、無効電力不足による電圧低下が送電容量の限界を決定しているケースが多く、無効電力供給能力を持つ自励式変換器の導入により、輸送力の向上効果が期待できる。

留意すべき点は、最大出力が変換器の電流容量により制限されるため、系統電圧が低下すれば、それに比例して可制御領域も同心円状に低下することである。従って、事故時などの交流電圧低下時に、変換器からの無効電力供給により系統電圧を維持したい場合、有効電力を絞らない限り、無効電力を供給できないといった制約を生じる。

高速な有効・無効電力独立制御

交流系統との連系時には、通常、系統電圧を制御入力とし、これに対して所望の有効・無効電力(実際にはこれに対応した交流電流)を系統に流し込むために必要な変換器出力電圧を発生している。すなわち、図3-2-2の円内に対応した有効・無効電力を系統に供給するために必要とされる出力電圧を発生することで、有効・無効電力可制御領域に対応した有効、無効電力が供給できる。変換器制御における有効・無効電力の独立制御は、変換器出力電圧の大きさと位相という2つの制御自由度を利用して、交流電流を調整することで実現している。

この能力は、系統の安定化制御や最適潮流制御の実現に威力を発揮する。例えば系統事故時の安定化については、変換器の有効電力と無効電力を協調して制御することで、周波数と電圧双方の変動を同時に抑制することが可能となる。

PWMによる高調波抑制

PWM(パルス幅変調)制御⁹の採用により、高調波フィルタの削減あるいは省略が可能となる。この効果は、PWMパルス数を大きくするほど高くなるが、一方では損失の増大につながり、コストを最小とする設計が求められる。フィルタの削減は、調相設備が不要となることと相まって、現状の他励式システムに比して、変換所敷地面積の大幅な削減につながる。

3-2-2 自励式直流送電による系統高機能化

自励式直流送電には、自励式変換器のみにより構成

⁹ PWM : Pulse Width Modulationの略。自励式変換器の変換タイミング指令を出すパルス信号の長さを自在に変えて所望の出力を発生させる方式。

される直流送電(図3-2-3)の他に、自励式変換器と他励式変換器の組合せによる直流送電の2つの構成がある。

自励式直流送電の活用には、基幹系統においては、大規模停電防止と流通設備の利用率向上を同時に実現する具体的な方策を考えることが重要となる。この前提として、わが国の基幹系統は、概ね電源開発に先んじて整備されてきており、電源、負荷の極端な偏在がない限り、21世紀中葉の所要送電量に対応した骨格はほぼ出来上がっていると見てよい。一方、需要地系統(2-2参照)においては、信頼度とコストの協調に加えて、環境性にも優れるシステムを構築するため、中小規模直流送電の利用方法と定量的メリットを明らかにする必要がある。

ここでは、自励式直流送電の活用方策をいくつか提示し、それぞれの導入効果について考察する。これらは、電力システムの将来像を描いていく上での要素技術となるものである。

小規模負荷供給、電源送電

図3-2-4に示すように本系統と小規模の地域系統あるいは電源を結ぶものであり、容量的には100MW程度までのシステムを想定している。負荷供給を受ける地域系統としては、離島などディーゼル発電に依存している地域が考えられ、経済性や環境面に利点がある。一方、負荷供給とは逆に、需要地とは離れた小規模電源(風力、太陽光など)の出力を集約し、送電する電源系統への適用も考えられる。これらはいずれも、HVDC Lightの適用分野に挙げられている。

直流送電のシステム構成としては、全ての端子を自励式変換器で構成する場合と、順変換器側については他励式変換器を利用するハイブリッド構成とが考えられる。このときの選定基準は、順変換器側においても電圧安定化などの無効電力制御を必要とするかどうかによる。

都市供給

都市部においては、今後電力需要が2倍近くまで増加することが予想され、都市供給系統の輸送力倍増が大きな課題となる。この対策の一つに交流送電線の直流化が挙げられる。154kV～275kV、数十kmの交流架空送電線を直流化した場合、1.5～2.4倍の輸送力増強が可能となり、同条件の交流ケーブルの場合でも相当の

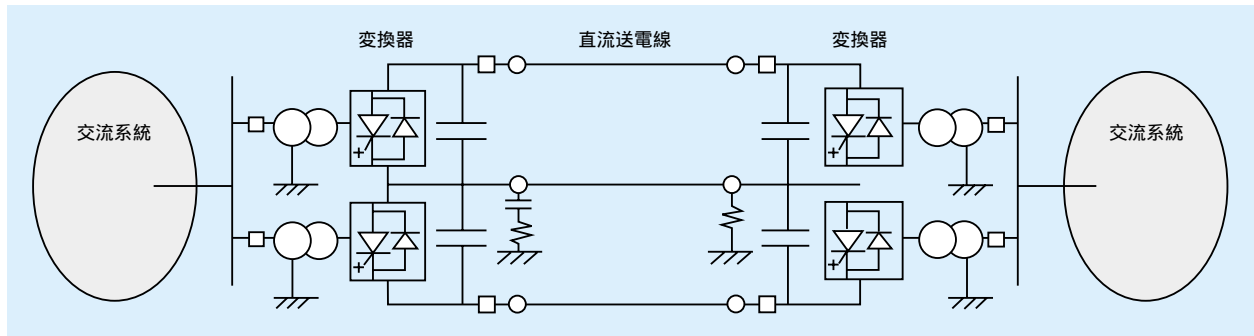


図3-2-3 自励式変換器のみにより構成される二端子直流送電システム

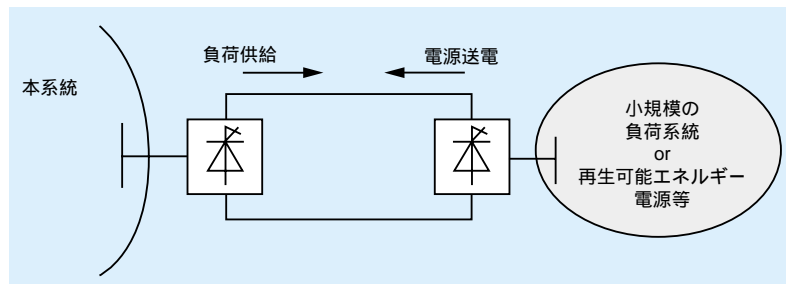


図3-2-4 小規模負荷供給あるいは電源送電への適用

効果が期待できる。

都市部への高密度電力供給を考えれば、受電側変電所のコンパクト化を図り、短絡容量の小さい系統への安定供給を実現できることから、自励式変換器の活用が有効である。また、直流化の一形態として、電源から直接都市部の需要地に供給する自励式多端子のケーブル送電システムなども考えられる。

周波数変換

50/60Hz 系統を連系する周波数変換設備は、200 ~ 250 万 kW 程度に増強すれば、想定し得る規模の需給変動などには概ね対応できよう、との検討結果がある。すなわち、現状連系容量の倍増となるが、連系地点を考慮した場合、他励式変換器の利用では同期調相機などの電圧安定化対策が必要となる可能性が高い。

自励式変換器を適用した場合、系統側の対策なしに安定な容量増加が可能となるとともに、隣接する他励式システムの安定化にも寄与できるため、適用のメリットは大きい。また、調相設備などを要因とする高調波不安定現象についても、ほとんど問題とならない。

直流連系

直流連系については、放射状系統における直流分割

とループを構成する多点連系への適用が考えられる。

まず、6 エリアからなる図3-2-5 のモデル系統を用いて、自励式変換器による直流分割の適用効果を示す。このモデル系統において、1 から 6 のエリアは、各々 1 発電機と 1 負荷からなる簡略化した地域系統を示す。いま、エリア 1 から 6 への輸送力(可能融通電力)を事故点の $F_1 \sim F_6$ のうち、最も条件の厳しい場所の送電線 3 線地絡事故に対する安定度限界で評価するものとする。直流連系の容量は、交流送電線の熱容量に対応した 3 GW(1 GW は 100 万 kW)とした。直流連系導入前の交流系統では 1.7GW の輸送力が、同図の分割点に直流連系を導入することで、直流限界容量の 3GW まで輸送力が増大することがわかる。放射状系統においては、このような効果は、直流連系の位置を動揺の中心(節)近くとするほど高い。分割点によってはかえって逆効果となる場合もあり、適正な分割点を選定することも大きな課題となる。なお、自励式変換器を採用することのメリットは、分割点の系統状態によらず、短絡容量が小さい地点においても直流の安定運転には問題が無いことである。

次に、多点連系への適用については、ループ潮流の制御が第一の目的となる。さらに、直流連系に系統事故時の安定化制御を具備することで、交流系統安定化に必要な SVC などの設置量を、他励式の場合に比

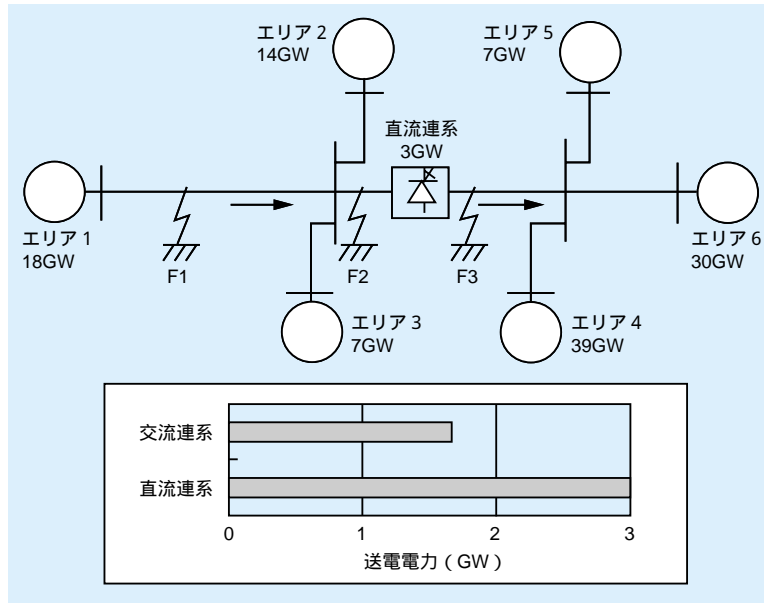


図3-2-5 放射状系統への直流連系の適用効果

して大幅に低減できる可能性がある。

広域直流多端子連系

図3-2-6は、図3-2-5と同じ放射状モデル系統をベー

スに、直流多端子系統の一導入形態を示したものである。端子1の容量が、並列する交流ルート¹の熱容量(3GW)に等しいケースを想定し、事故点F₁~F₃の送電線3線地絡事故に対する最も厳しい条件における安

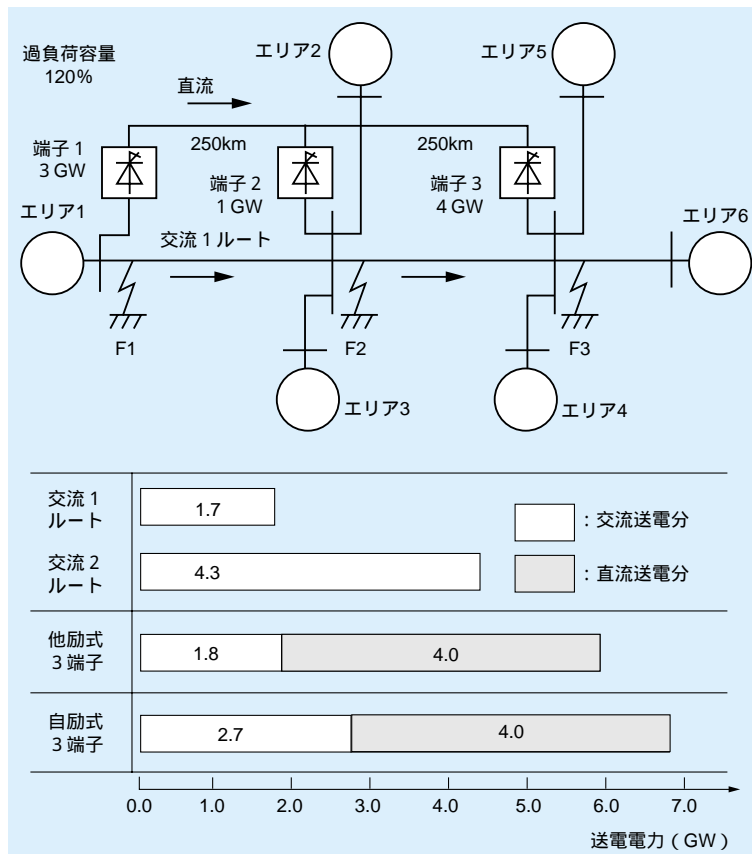


図3-2-6 自励式直流多端子の適用による輸送力向上効果

定度限界でみたエリア 1 から 6 への電力輸送力の評価を行った。端子 2、3 の定格容量はそれぞれ 1 GW、4 GW である。なお、いずれの端子とも 120% の常時過負荷容量を持つものとし、無効電力はこの範囲内で供給可能とした。

このときの輸送力を、交流を 2 ルート化したケース、および他励式変換器を採用したケースとの比較で示した。自励式変換器を採用することにより、直流送電による安定な送電容量の増加に加えて、並列する交流ルートの送電容量も熱容量限界近くまで増加 (1.7 から 2.7GW へ増加) できる。自励式変換器の運転継続に基づく事故時安定化制御 (有効・無効電力モジュレーション制御) により、系統電圧の維持とダンピングの向上を同時に実現することで、このような輸送力向上効果が得られる。

3-2-3 設計合理化のための制御保護方式開発

制御保護方式開発のねらい

自励式直流送電の系統適用にあたっては、変換器の高電圧・大容量化、低損失化、高信頼度化のみならず、システムの設計合理化によるコスト低減が重要である。設計合理化を実現するには、直流送電システムの交流側および直流側での系統事故時の過電流、過電圧の抑制方式を確立する必要がある。これにより、変換器の過負荷耐量設計や絶縁設計、また直流送電線の絶縁設計の合理化が可能となる。

さらに、過電流、過電圧抑制により、直流送電システムを保護停止することなく運転継続できるため、自励式変換器が持つ系統安定化機能をフルに活用することが可能となる。これにより、他励式システムに見られる、SVC などの安定化対策が不要となるため、特に弱小系統との連系において大幅なコスト低減が期待できる。

ここでは、自励式変換器を用いた直流送電の形態毎に、これまでに当研究所において開発した過電流、過電圧の抑制制御方式とその効果を紹介する。

自励式変換器のみで構成される直流送電の制御保護方式

図 3-2-3 に示した二端子の自励式直流送電システムを

対象として、EMTP 解析¹⁰ および交直流電力系統シミュレータ試験により次のことを明らかにした。

(i) 交流送電線事故に対する過電流、過電圧抑制方式

PWM パルス数を適切に選定した上で、変換器電流制御の高速化を図ることで、変換器過電流が抑制できる。図 3-2-7 のような変換器過電流は、変換器制御のむだ時間 (CPU 演算と信号伝送に要する制御の遅れ時間) が主な発生原因となっている。このため、このむだ時間を補償する変換器制御方式を開発し、交流事故時の変換器の最大過電流を、従来方式の半分以下の 1.3pu 程度まで低減した (図 3-2-8)。これにより、同じ素子であっても変換器の定格電流を大きく設計することができるため、素子の利用率向上によるコストダウンが可能となる。

また、事故除去後欠相状態となる 2 回線同相 1 線地絡事故に対しても、安定に運転継続可能な制御方式を開発した。これにより従来の他励式システムでは同期調相機などを設置しない限り運転ができなかった欠相期間においても、自励式システムでは、定格の約 40% の送電電力が確保できる。

(ii) 直流送電線事故に対する過電流、過電圧抑制方式

接地回路定数の適切な選定と事故発生直後の瞬時ゲートブロック¹¹を行うことで、変換器過電流を抑制しながら、直流送電線の電圧上昇を低減することができる。これにより、絶縁設計からみた直流送電線の建設コストは他励式システムと同等となる。

さらに、直流遮断器を用いて事故電流 (制御により直流定格電流程度に低減) を遮断することで、他励式システムとほぼ同等の高速な送電再開が可能となる (図 3-2-9)。

自励式変換器と他励式変換器の組合せによる直流送電の制御保護方式

都市供給や離島送電などの一方向送電には、他励式 (順) 変換器と自励式 (逆) 変換器を組み合わせたハイブ

*¹⁰EMTP : 電磁界瞬時値解析プログラム。Electromagnetic Transients Program の略。電力系統の電圧と電流を生波形 (瞬時値) のままで計算機処理する汎用プログラム。解析領域の非常に短い詳細検討に効果的。これに対して、当研究所の Y 法は実効値解析プログラムと呼ばれる。

*¹¹瞬時ゲートブロック : 事故検出により変換器の運転を一時的に停止させる保護動作。

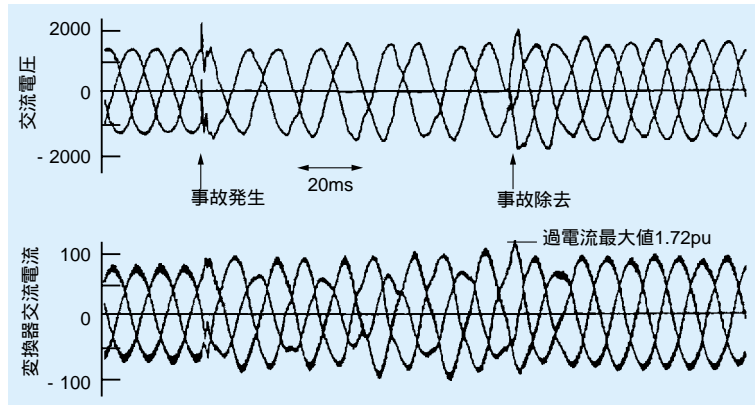


図3-2-7 交流系1回線1LG事故時の変換器過電流

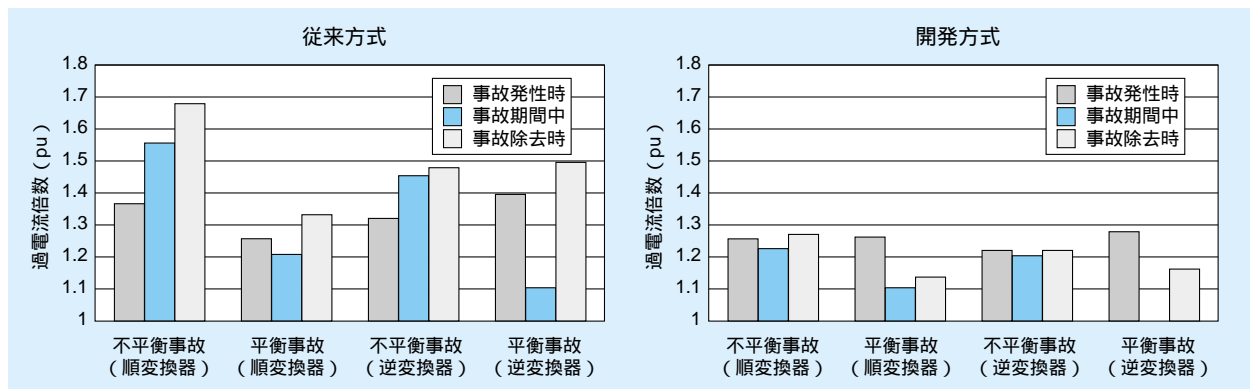


図3-2-8 過電流抑制効果の比較

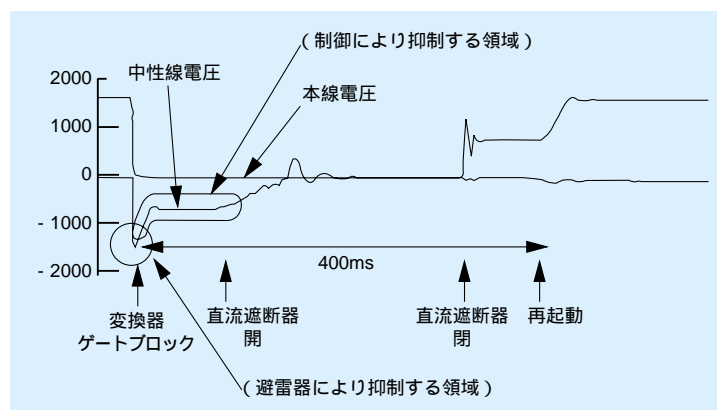


図3-2-9 直流送電線地絡時の直流過電圧の抑制

リッド式直流送電の適用が考えられる。このようなシステムに関しては、自励側交流線路事故時の過電流、過電圧抑制方式として、上述の自励式変換器のみのシ

ステムと同じ制御方式が適用できる。他励側事故時には、従来の他励式システムと同様の制御で充分である。これに対し、直流線路事故に対しては、変換

器過電流を抑制しながら、中性線および健全極の過電圧を抑制するいくつかの方策を明らかにした。

中性線接地抵抗を適切な値に選定するとともに、自励式変換器の瞬時ゲートブロック方式を採用することにより、直流線路の絶縁レベルを従来の他励式直流送電と同程度とすることができる。

自励式変換器の直流端にダイオードを直列に接続した構成を採用することで、自励式変換器の絶縁レベルが約20%低減可能となる。

3-2-4 直流技術の広範囲な系統導入実現を目指して

既設設備の利用率向上や都市への高密度電力供給、さらには環境性に優れる負荷供給などを実現する上で、自励式変換器の系統適用が広範囲に進んでいくことは確実である。今後は、さまざまな導入形態に関し、技術的および経済的メリットをより具体的かつ定量的に提示するとともに、実用化に向けた開発課題を明確にしていく予定である。