

大学の研究・動向**電力システムの解析・制御から要素技術まで**

工学研究科 電気工学専攻 電気システム論講座 電力システム分野
教授 大澤 靖 治
助手 山 本 修
助手 周 軍

1. はじめに

電力は言うまでもなく現在社会を支える最も重要なインフラの一つであり、また、電力システムは最も複雑な人工システムの一つである。現在、電力システムは、地球環境問題、電力自由化、分散電源などをキーワードとして変革の時代を迎えている。電力システム研究室では、電力システムの要素技術からシステムの解析制御まで、幅広く基礎的な研究を行っている。要素技術については、電力機器の絶縁設計、特に高電圧真空遮断器の開発に関わる固体絶縁支持物の絶縁設計ならびに絶縁劣化の判定に関する研究を、システム技術に関しては、電力システムの静特性のモデリング手法とそれを利用した静的電圧安定性の評価、変動性電源を含む電力システムのエネルギー貯蔵装置による安定化制御、無効電力による電圧維持能力の評価などの研究を行っている。本稿では、当研究室における最近の取り組みのいくつかを紹介する。

2. 分散電源を含む電力システムの静特性モデリングと電圧安定性解析

CO₂などの温室効果ガスによる地球温暖化の対策の一つとして、太陽光、風力などの自然エネルギーを利用した発電の導入が精力的に進められている。分散電源とは、これらの自然エネルギー発電に加えて、燃料電池、エンジン発電、マイクロガスタービン発電などの比較的小容量で、大容量電源に比べて電力消費地の近くに設置することのできる電源のことを指す。小容量であっても発電効率が比較的高い、熱も利用すれば（コージェネレーション）さらに高効率になる、送配電設備の増強を遅らせることができる、などのメリットのため、今後ますます増加すると考えられている。分散電源が需要地近くにかなりの容量で接続（連系）されると、電源から負荷（需要地）に向かって一方向に電力が流れる従来の電力システムとは異なって、負荷端の電圧上昇などの問題が発生する恐れがある。多数の分散電源が連系された電力システムの電圧問題（電圧安定性）などを解析するのに適した電力システムのモデル化手法、解析手法について研究を行っている。

2. 1 電力システムの静的構造のエルミートモデリングとその特徴

電力システム静特性の表現の基礎となる母線（端子）電圧と母線電力の関係式を電力方程式と呼ぶが、これは母線電圧が未知数であるために極めて高次元の非線形代数方程式となる。母線電圧や母線間アドミタンスの複素数を極座標ではなく直角座標で表現すること（エルミート電力方程式）によって母線電圧と系統構成要素（母線間アドミタンス）を分離して扱うことが可能となり、電力システムの静特性を明確に把握することができる。例えば、電力システムの構成が母線電圧に与える影響をより容易に扱うことができるようになる。

2. 2 エルミートモデリングの応用：静的電圧安定性のロバスト解析

静的電圧安定性のロバスト解析とは、電力システムの静的構造にある範囲内の変動があった場合、

母線電圧が安定範囲に留まるかどうかを調べることである。特に電力変動に対して母線電圧がどの程度変動するかを知り、電圧崩壊を予防することは、電力システムの運用上重要な意味を持つ。エルミートモデリングを行うことによって、以下のような成果が得られた。

- 1) 母線電圧上(下)界と母線電力、静的構成要素の間の不等式を導出した。それらの不等式によって、母線電圧上(下)界が系統構成状態と母線電力指定値から決定することが可能になり、従来の固有値を用いる方法と比較して母線電圧の上(下)界関係を明確に描くことができる(文献[1])。
- 2) 母線電力の変動、系統構成要素の変化などによる母線電圧上(下)界不等式を導いた。母線電圧に関する上(下)界不等式と同様、母線電圧変動も系統構成と母線電力の影響を受けるが、上界と下界の幅を小さくすることができた。一例として、図1に示す例題系統に対して、電力変動による母線電圧変動の上(下)界を求めると図2のようになる。横軸は電力変動、縦軸が電圧変動であり、点線が上(下)界を、ドットが実際の母線電圧変動を示す(文献[2])。

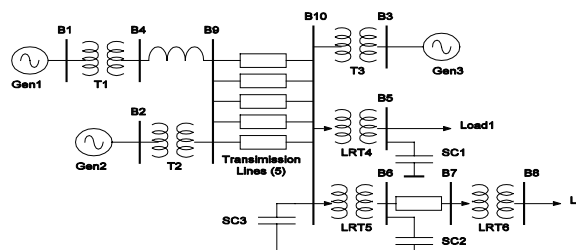


図1. 3機10母線電力システム

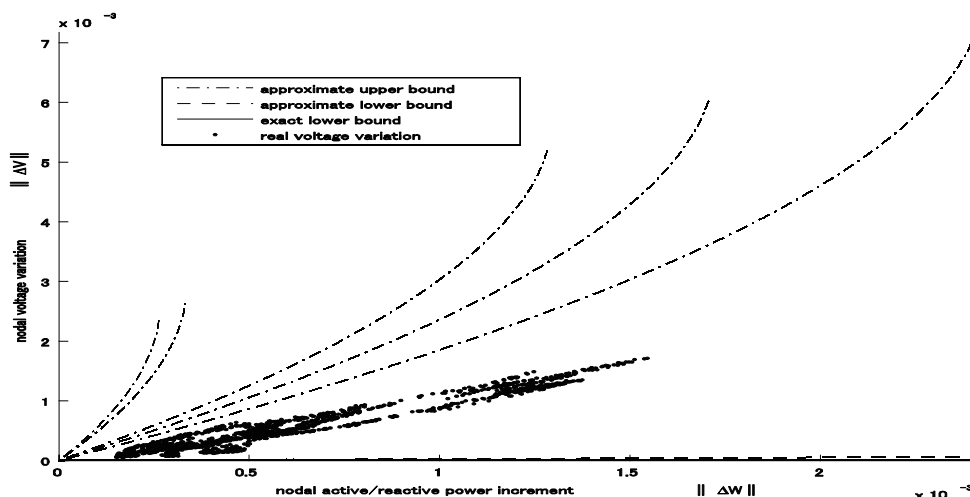


図2. 例題電力システムの電圧変動の上(下)界

3. 風力発電を含む電力システムのエネルギー貯蔵装置による安定化

風力発電は自然エネルギー発電の中では低コストであるため、多くの国で積極的に導入されつつある。我が国においても2010年度に300万kWという政府の導入目標が掲げられている(2005年度の導入実績は約108万kW)。しかし、風力発電の出力は風速によって大きく変動するため、系統容量(電力システムの全発電容量)に対してある割合以上の風力発電が導入されると、風力発電の出力変動に起因する周波数変動や電圧変動、系統動揺などが問題化する。我が国においては、風況の良好な地域は北海道、東北、九州など、系統容量の比較的小さい地域と重なっており、風力発電の導入が電力システムからの制約によって制限される程度まで導入がすでに進んでいる。風力発電をさらに導入するために、出力変動の抑制装置(蓄電池)とのセットでの導入が行われようとしている。我々はSMES(超伝導磁気エネルギー貯蔵装置)による風力発電出力変動の影響軽減の検討を行っている。

SMESとは、超伝導コイルに直流電流を流して磁気エネルギーの形で電力を貯蔵する装置であり、交流電力システムとは交直変換装置を介して接続される。本質的なエネルギー形態の変換がないので貯蔵効率が非常に高い、パワーエレクトロニクスを利用した交直変換装置の制御によって電力だけでなく無

効電力も高速に制御できる、などの利点を有するため、電力の貯蔵だけではなく電力系統の各種の制御、例えば、発電機の動揺や電力動揺を抑制する系統安定化制御などに有望であると期待されている。瞬低（瞬時電圧低下）対策装置としてはMW規模のものがマイクロSMESの名称ですすでに実用化されており、世界で10台以上が使用されている。量産効果によって価格が低下すれば、利用がさらに広がるものと考えられる。

当研究室では、風力発電を含む電力系統の風力発電出力変動による影響を、マイクロSMESを複数台分散設置することによって軽減することを想定し、最適な設置位置を決定する手法について検討を行っている。発電機の動揺の程度を表す評価指標を定義し、決められた数のマイクロSMESを、評価指標を最小化するように配置する問題、あるいは、評価指標をある値以下にするために必要なSMESの最小の数を求める問題などを、組合せ最適化問題の解法であるタブー探索や遺伝的アルゴリズムを適用して解き、手法の優劣を検討している [3]。

4. 真空用高電界絶縁スペーサの開発研究

真空中で高電界を用いる機器にとって固体絶縁支持物（スペーサ）の表面に沿う放電（沿面放電）の抑制は極めて重要である。その理由は真空部分に形成される間隙と、必然的にそれと並列に形成される絶縁支持物表面とでは、表面の絶縁耐力が著しく低いためである。

真空中で高電圧ないし高電界に対する絶縁を必要とする機器には電力システムにおける真空遮断器のほかに、電子・陽電子やイオン・重イオンなどの荷電粒子の発生器・加速器、パルスパワー機器、電子顕微鏡、マイクロ波管、X線管などがある。また、SED（Surface-Conduction Electron-Emitter Device）やFED（Field Electron emitter Device）などを用いる次世代薄型ディスプレイ（FPD：Flat Panel Display）、さらには人工衛星搭載の太陽電池アレイにおけるカバーガラスでも高電界絶縁が必要である。このように電力工学、電気電子工学、高エネルギー物理学、宇宙工学、産業応用、さらには医療・医学に関わる機器でも真空中の電気絶縁は基盤技術として重要である。これらの機器で使用される電圧波形はそれぞれの機器の要求に応じて数10 nsのパルス電圧から直流および商用周波交流電圧、さらにはマイクロ波領域の高周波電圧とほとんど全ての範囲にわたっている。沿面絶縁距離についてみると小さいもので100μm、大きいものでは1000 mm以上にもなる。

真空中では絶縁物表面の帯電が引き金となって沿面放電に至る。すなわち、真空中に固体絶縁物があると、固体と陰極および真空部が接する3重点の電界が強いため、比較的低い電圧でも電子が陰極から電界放出機構によって放出され、そのうちのいくつかは真空部から絶縁物の表面に入射する。これによって絶縁物の表面は電子と反対極性の正極性に帯電する。正に帯電することによって3重点の電界はますます強くなって電子の供給が増し、また絶縁物に対して電子が引き込まれやすくなるので加速度的に帯電が進む。このようにして帯電が進むと、電子の衝撃時に吸着ガスが放出されるので、真空が局部的に破れて気体放電が起こる。したがって、沿面放電を抑制するためには帯電現象を把握するとともに、絶縁物の形状や表面状態を工夫して帯電しにくい絶縁支持物を開発する必要がある。

ここでは、高電圧真空遮断器の開発研究に関連して、これまで不明であった交流電圧による帯電現象を実験的に明らかにした例を示す。実験に用いた模擬スペーサは円柱型で、ガラスや高分子製である。帯電の観測には陰極に埋め込んだ静電プローブを用いた。実験の結果、まず、帯電電荷は電圧位相によらず常に正極性である

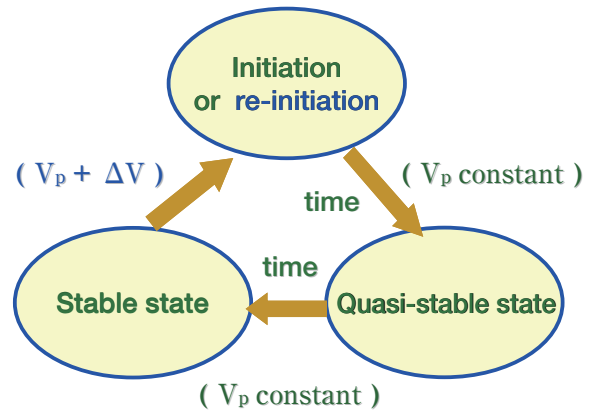


図3. 交流電圧印加時の帯電過程

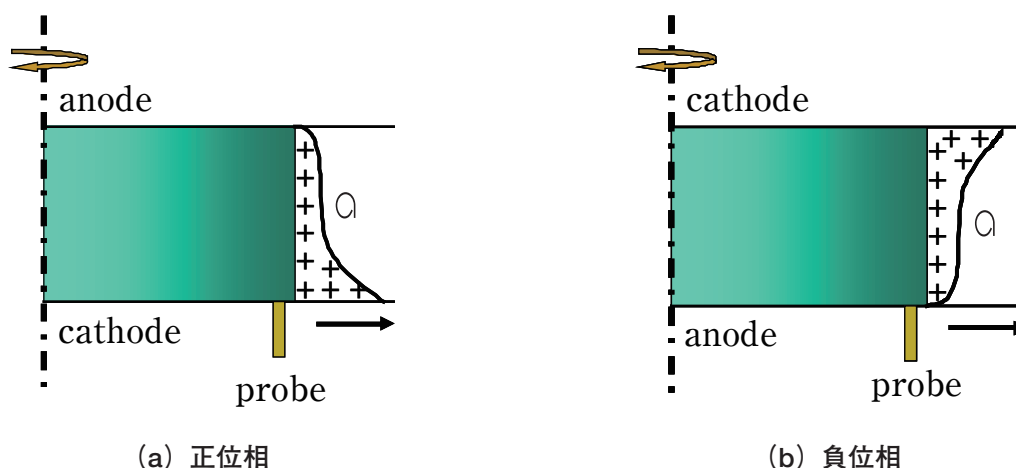


図4. 準安定状態における正・負位相の電荷密度分布

ことがわかった。また、印加電圧一定のもとでの帯電の過程として、図3に示すように、開始（電圧をステップ上昇したときは再開）、準安定状態、安定状態の3つの過程を経ることが明らかになった。シミュレーションによると準安定状態は、図4のように、電圧位相に応じて電荷密度の分布が変移することを示すと考えられる。スペーサの表面が光学的に滑らかな場合にはこの状態が維持され、安定状態に至らない。サブミクロンの粗さになると、現在のところ理由は不明であるが、転移が抑制されるために安定状態が達成される。また、表面を数ミクロンまで荒らすと表面の凹凸が電子の運動を阻害するので帯電しなくなる。

このような帯電現象は模擬スペーサの長さ10～50mmの広い範囲で確認された。また、表面を荒らして帯電を抑制することにより沿面放電電圧が1.5～2倍にも上昇することがわかった。この帯電抑制法は既にX線CT用のX線管などでも取り入れられ、今後のさらなる応用が期待される。

5. おわりに

当研究室で最近行っている主な研究内容を紹介した。これまでは電力システムの解析・制御が中心課題であったが、昨年4月から山本助手をスタッフとして迎えたことによって電力システムの構成要素に関する研究が加わり、研究の幅が広がった。電力システム工学は古くからある分野であるが、はじめに述べたように、電力自由化（規制緩和）、分散型電源の増加、電力需要の伸びの鈍化など、新しい流れに対応できるような基礎研究を進展させていきたいと考えている。

参考文献

- [1] J. Zhou and Y. Ohsawa, Quadratic function expressions and static structure characteristics in power systems, *IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, vol.1, no.3, 285-297, 2006.
- [2] J. Zhou and Y. Ohsawa, Robustness evaluation of static voltage stability through structural characteristics of power systems, *Proceedings of 2006 International Conference on Power System Technology*, Chongqing, China, 2006.
- [3] Y.-Z. Li, K. Wada, Y. Ohsawa and J. Zhou, Optimal allocation of micro SMES units for power system stabilization by means of genetic algorithm, *Proceedings of 2006 International Conference on Power System Technology*, Chongqing, China, 2006.