

大学の研究・動向

電力システムの構築・運用・解析に関わる非線形現象の解明

電気工学専攻電気システム論講座電力システム分野

上 田 ● 亮

ueda@kuee.kyoto-u.ac.jp

1 はじめに

電気電子工学の発展過程において種々の非線形現象が利用されて来た。例えば同期現象が挙げられる；多くの発電機が同じ速度で運転されることや、送受信器の搬送波が同一周波数の発振を持続することである。一方多くの非線形現象が異常現象として回避されて来たのも周知の事実である。例えば、分数調波成分の出現が送電系統における電力伝送を妨げたり、鉄心の磁気飽和特性に基因する鉄共振現象が変圧器の焼損事故をもたらしたことなどである。

一般に非線形現象は、それらの数式モデルを構築することが容易でないのみならず、数式モデルを解くことが困難ないしは不可能なため、現象の発生メカニズムや性質の系統的な解明が為されているとは言い難い。そのため非線形現象を積極的に利用する場合、あるいは回避する場合においても、経験的・部分的な現象の把握によって個別対処的に目的が達成されているのが実状である。我々の研究室では、電気電子工学に関連するいくつかの代表的な非線形現象の解明とそれらの応用(可能性)について研究を行っている。以下に、数例を挙げ紹介する。

2 同期発電機の特徴表現と電力システムへの応用

同期発電機は電力系統の要であり、その特性を精密に把握することは電力システムを効率よく安定に運転するために不可欠である。同期機の種類と特性の関係を明らかにして、それを表現する精密なモデルを確立すること、さらにそれを応用して電力システムの性能を向上させる研究を進めている。現在サーチコイルによって内部磁束が観測できる実験用同期発電機を5台、電力輸送の実験を行うための模擬送電線実験設備および負荷装置を保有し、これらを用いた実験によって、理論モデルの検証を行いながら、同期機モデルの精密化の検討を行っている。

同期機の磁気飽和を表現するモデル 同期機の表現モデルとして従来からパークの表現が用いられている。この表現は電流と磁束が比例関係(線形関係)にあるとして導かれている。ところが実際には鉄心の磁気飽和のために、厳密な比例関係は成立していない。一部に飽和を考慮した表現も用いられているが、運転条件によって飽和部位が時々刻々と変化する様子を正しく表現することは出来なかった。すなわち、磁気飽和状態が界磁電流、電機子電圧、両者の合成値の何れにより定まるのか明確な説明のない状況である。

このため、同期機の鉄心形状および巻線構造から機内磁束を表す磁気回路の構築を試みる。ここで鉄心の飽和を磁気回路中の非線形抵抗で表現し、内部磁束の分布を計算するモデルを導く(図1)。これにより端子電圧・電流を計算する表現モデルが導出される。これらにより、界磁電流・電機子電流から電機子磁束・界磁磁束を正しく算定できる表現を得ている^[1]。さらに、鉄心中の飽和部位の場所によって同期機の特徴に違いがみられることを明らかにしている。この結果、ある条件を満たす同期機では界磁電流算定法として起磁力法が厳密に成立するものの、一般の同期機の飽和特性は起磁力法で説明し尽くせるものではなく、かなり複雑なことが判明した。

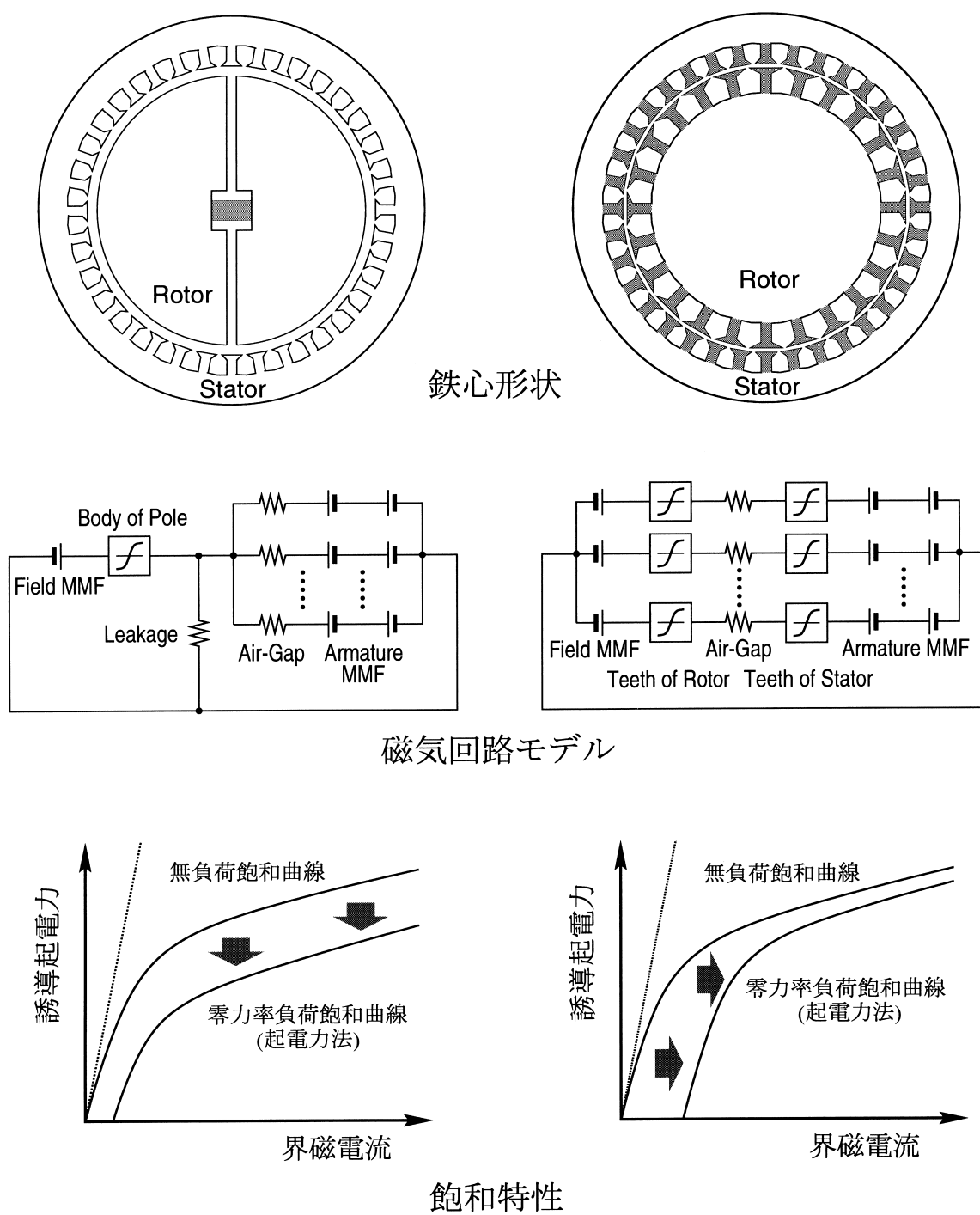


図1 磁気回路の構成

こうした結果に電力会社の運用者・電機メーカーの設計者も関心を示しており、系統解析技術や同期機の制御技術の向上につながると期待される。今後、計算機による磁界解析手法と合せ、より精密な表現モデルを作るとともに、それらを統一的に表現できる「モデルの標準形式」の確立をめざしている。

電力系統の高調波を抑制する同期機 近年、パワーエレクトロニクスの発達にともない、電力系統に流入する高調波電流が増加している。高調波電流は系統電圧に歪を生じさせ、力率改善コンデンサ等の電力機器に異常音を生じさせたり、焼損事故を引き起こしている。そこで電力系統に不可欠な同期発電機を改良することにより、系統の高調波対策に役立てる方法を研究している。通常、同期機は回転子巻線を直流で励磁しているが、ここでは第6高調波電流で励磁することにより固定子巻線に第5あるいは第7高調波が発生することを利用する。現在までに特殊構造の同期発電機とその制御装置を試作し、実験を進めている。同期発電機は回転子に3相あるいは2相の巻線をもち、巻線型誘導機あるいは可変速同期機と同様な構造になっている。制御装置は、系統内に設定した検出点の高調波電流を監視しており、観測された高調波電流ベクトルを、同期機の回転子座標上に射影して、励磁電流を算出している。実験室内の模擬送電線にこれらの装置を接続し、高調波負荷から発生した高調波電流が吸収できることを確認した^[2]。

こうした実験室レベルでの成功を踏まえて、現在では同期機を実電力系統に組み込んで実験が出来るように、電力会社・電機メーカーと研究協力体制をしいて検討を重ねている。100kVA クラスの実用化試作機の製作を進めており、配電変電所に仮設して配電線に接続し、高調波を吸収する実験を実施する予定である。

3 パワーエレクトロニクス回路の構成と動作特性に関する研究

パワーエレクトロニクス技術は、産業界では広く使用され基盤技術となっていることは言うまでもない。近年では、大容量・高耐圧の電力用スイッチング素子が開発され、電力系統の種々の制御にパワーエレクトロニクスの技術が適用され始めている。ところが、パワーエレクトロニクス技術というのは、スイッチング動作を基本とする電力回路であり、その動作は不連続に回路を切換えて状態空間を接合することによる、平均的出力の調整を行う技術と言える。この様なスイッチング素子を含むシステムでは、異なる物理法則に基づく時定数の異なる現象が共存し、かつシステムとして必ずしもキルヒホッフの回路法則に従わない。このようなシステムはハイブリッドシステムと呼ばれている^[3]。すなわち、パワーエレクトロニクス回路のスイッチング制御技術を、従来のアナログ回路の連続系の理論で検討することは無理があり、回路設計、システム設計、さらには回路の動作特性の把握には新たな理論構成の枠組みが必要となっている。この基本となるのはスイッチング回路理論や非線形回路理論である。

この様なスイッチング系の理論および数値解析においては、不連続性に伴う解析上の問題点を避けるために種々の工夫が必要である。従来のパワーエレクトロニクス回路に関して主として用いられている解析手法には、スイッチング周期間において平均値によってシステムを線形化して解析する方法や、周期的に回路構成が変化することを考慮したサンプルデータによる解析法がある。特に、状態変数の平均による方法ではスイッチングサイクル間の情報は一切失われ、またモデルからもスイッチング周波数以上の早い現象の情報が消えてしまう。これを、回路方程式からなる状態方程式に基づいて解析を行う際には、理想的なスイッチを仮定するとシステムの右辺が不連続となり、容易に解析を行うことができない。その結果、スイッチ要素が増えたパワーエレクトロニクス回路ではその動作の安定性などを理論的に検証することが難しくなっているのが現状である。また、現実のシステムの構成に際してもこの様な点まで考慮した動的な回路構成論が確立されていない。この様な理由で、パワー

エレクトロニクス技術が回路理論の域にまで達しない状態に留まっていると言っても過言ではない。以上のような状況を考えると、パワーエレクトロニクス回路の解析、およびそのスイッチングの最適化法の確立のためには、システムの動的シンセシスを考慮した理論的取り組みおよびその実システムへの適用が不可欠となっている^[4]。

従来、経験則に従って発展し、熟成期に入ったパワーエレクトロニクス技術を、システム技術としてさらに発展させるためには、ハイブリッドシステムとしての特性を考慮した理論を確立することが不可欠である。同時に、現実の回路に現れるスイッチング現象のダイナミクスを再度見直していく地道な作業が必要となる。本研究では、この様な点に着目し、実際のパワーエレクトロニクス回路のモデルの再検討を始めている。その結果、新たなモデルに基づくパワーエレクトロニクス回路の動作に関して解析的、実験的検討を進め、スイッチングによる非線形性まで考慮した解析的議論を可能にする方向性を得た。最近始めた研究でもあり、その成果はまだまだ未熟な段階ではあるが、今後の一連の研究を通じてパワーエレクトロニクス技術の一層の発展に寄与して行くことを目指している。

4 電気電子回路・システムにおける非線形現象の解明

回路・システムには種々の非線形現象が生じるが、それらの工学的有意性はさておいて、現象そのものの発生機構とそれらの基本的な性質を把握するために行っている研究を紹介する。

カオス現象の発見とカオス理論創造への貢献 1960年代初頭に行っていた、周期信号を注入した自励振動回路に生じる周波数引込現象の研究および鉄共振回路に生じる高調波振動の研究において、アナログ計算機実験により観測していた不規則振動が、二次元非自励方程式系の大域構造に由来するカオス現象の最古の例として世界的に認知されるに至った(図2)。ささやかではあるが、これらは本電気工学教室発信の一成果と自負している^[5]。

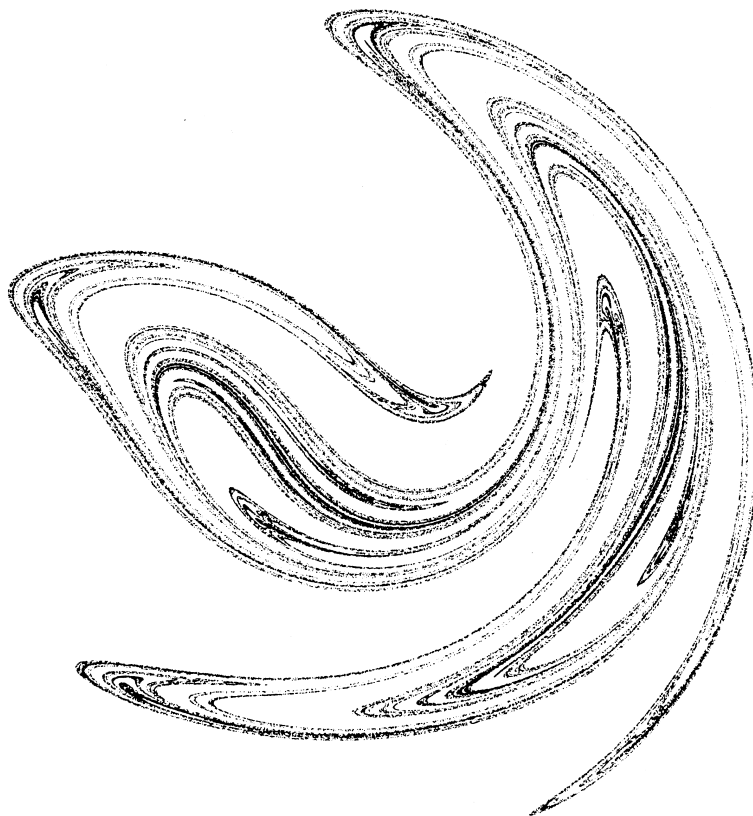


図2 カオスアトラクタ

これにより第三の平衡状態が物理的に存在することが見いだされたが、他の2つ、すなわち平衡点・周期解と比べてその複雑さが注目され、これを情報系に応用することにより複雑系と呼ばれる学問分野が形成されつつある。そこでは物質自身ではなく、その上に仮想的に出現する情報源としての性質が統一的に扱われ、革新的な考え方をもたらすものと期待される。

電力系統の過渡安定問題・電圧不安定現象 電力系統は、発電量と消費量が常時動的平衡状態を保つことによって動作・機能している。したがって、安定状態を維持するためには電力系統の動作特性を熟知しておくことが望ましい。ところが、簡単な構成をした電力系統でも、その数理解析モデルは連立非線形方程式となり、解の全貌を把握することは困難である。本研究課題では高次元非線形方程式の解の大域構造を解明することが問題解決の核心である。電力系統の過渡安定問題では安定な運転状態を表わすアトラクタの引力圏およびその境界の大域構造(フラクタル状引力圏境)に関連する研究を行っている。また、電圧崩壊現象は引力圏境とカオスアトラクタの大域分岐現象(クライシス現象)によって生じることを系統的に解明しつつある^[6]。

種々の非線形現象(時間遅れ系・生体系)の解明 我々が長年に亘って蓄積してきた経験と数理解析的手法を駆使して、時間遅れをもつ非線形系に生じるアトラクタ・引力圏およびそれらの分岐現象を系統的に解明しつつある。また、心臓の拍動リズムに見られる不規則性の解明およびそれらの数理解析モデルについても研究を行っている。

参考文献

- [1] 高瀬, 上田, 飽和を有する同期機の空隙磁束モデル, 電学論誌D, Vol.116-D, No.8 (1996) 862-867.
- [2] F. Takase, M. Tominaga, Y. Ueda, T. Temma, T. Genji, K. Oku, T. Hira, and A. Ashizawa, Harmonic Compensation Using a Synchronous Machine with Resonant Field Circuits, *IEEE Trans. on Energy Conversion*, Vol.12, No.2, June (1997).
- [3] 黒江, パワーエレクトロニクスシステムのシミュレーション技術_現状と課題_, 電学論誌D, Vol.118-D, No.7/8 (1998) 822-827.
- [4] 引原, パワーエレクトロニクスと非線形力学の接点, システム/制御/情報, Vol.41, No.7, (1997) 240-245.
- [5] Y. Ueda, The Road to Chaos, (Aerial Press, Inc., 1992).
- [6] H. Ohta and Y. Ueda, Global Bifurcation Caused by Unstable Limit Cycle Leading to Voltage Collapse in an Electric Power System, *Chaos, Solitons and Fractals*, Vol.9, No.6, (1998) 825-843.