

環境エネルギーに貢献するシステム制御

慶應義塾大学 理工学部システムデザイン工学科 滑川 徹 准教授

特集：環境に優しいエネルギー技術

1はじめに

サステイナブル社会の実現のために、限りある資源を有効利用し、CO₂排出を抑制し地球温暖化を防止するためのシステム制御技術の開発が、今まさに、希求されています。しかし相反する要求として、経済活動の発展と快適な社会、QOL (Quality of Life) の持続と発展のためには、高品質なエネルギーの継続的な安定確保と供給が求められます。益々大規模化・複雑化する環境エネルギー問題を解決するためには、計測制御技術を中心とするシステム科学がキーテクノロジーとなると期待されています。例えば、地球温暖化の予測・評価において、物質やエネルギーのグローバルな流れを知るための環境計測技術は大変重要で、より効率的かつ信頼性のあるデータを広範囲で得られるセンサネットワーク型の計測技術の開発が望まれています。また一方、エネルギー供給の観点からは、クリーンな分散型エネルギー源を中心とした電力エネルギーの統合的マネジメントによるエネルギーネットワークの構築技術が求められています。

このように「環境計測技術」と「エネルギー供給技術」の発展は、サステイナブルな社会の実現という人類に立ちはだかる制御問題における「計測(センサ)」機能と「制御(アクチュエータ)」機能に位置付けられます。

さて、この分野における具体的な最新の研究課題としては以下が挙げられます^{1) 2)}。

A. 環境・エネルギーのための分散型システム制御理論

分散制御、協調制御、大規模システム理論、ゲーム／チーム理論、予測制御、最適制御理論、推定理論、ネットワーク制御

B. エネルギーの安定確保と供給のための制御技術

スマートグリッド、電力需要予測、系統安定化問題、燃料電池のモデリングと制御、スマートシティ、スマートインフラストラクチャー

C. 環境計測制御技術

センサネットワーク、センサスケジューリング、ネットワークセンシング、リモートセンシング

以下では上記で3つに分類した「環境・エネルギーのための分散型システム制御理論」、「エネルギーの安定確保と供給のための制御技術」、そして「環境計測制御技術」のそれについて、個別に国内外の研究状況について解説していきます。

2 環境エネルギーとシステム制御

2.1 環境・エネルギーのための分散型システム制御理論

分散型電源の既存の電力網への導入は、系統の周波数変動や電圧変動を引き起こす要因となります。それらをシステム技術とIT技術、制御技術で解決する枠組みとして図1に示すようなスマートグリッドに関する研究が進んでいますが、その実現のためには分散・協調・最適制御技術が必要不可欠です。大規模システムでは、サブシステムごとに収集する情報とエネルギーが時間的・空間的に異なります。図2に従来型の集

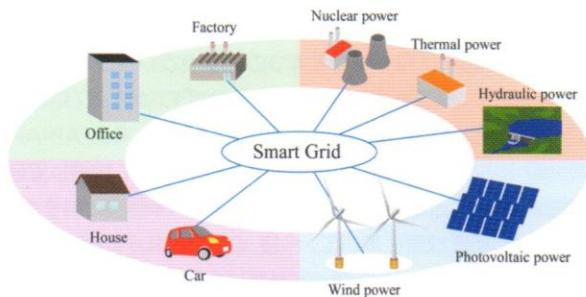


図1 スマートグリッド

中制御方式を、図3に分散制御方式のブロック図を示します。分散方式では各プラントが個々にコントローラを有しており、エネルギー・情報結合構造によって、情報とエネルギーを融通しあう構成となっています。各プラントでの制御目的が隣接しているプラントと異なる場合に、各コントローラの最適化が全体の最適化と矛盾する場合が生じてしまう可能性は否定できず、それが問題を複雑化しています^{3) 4)}。

分散制御方式は、サブシステムのコントローラ間での情報交換の有無によって Decentralized Control と Distributed Control に分類されますが、図3に示すものは隣接するコントローラ間で情報交換を行う Distributed Control の制御方式を表わしています。

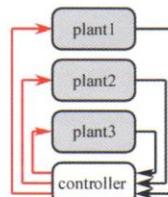


図2 集中式制御

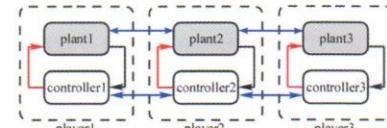


図3 分散制御(Distributed Control)

特に最近は、図4に示すような更に多くのサブシステムを持つ階層型の大規模システムに対する問題が取り扱われるようになってきましたが、このような複雑な分散制御問題に対して、情報結合構造を共分散拘束として表現するアプローチが提案され⁵⁾、それに対して予測制御問題が定式化されています。また反復勾配法などの最適化手法を分散型に拡張する方策についても研究が進んでいます⁵⁾。更には、これらの分散型システム制御手法が、本当に分散型電源を導入した系統の周波数制御に適用可能であるかを検証する数値実験に関する研究も盛んです⁶⁾。

また大規模停電を避けるためには、電力需要のピークを抑えることが極めて重要であることは良く知られていますが、そのための方策として動的かつ柔軟に電力価格を変更する「リアルタイムプライシング」についても検討が進んでいます。この問題は需要側と供給側との間の戦略的な相互関係として表現することができるため、制御工学、応用数学、経済学、電力

工学の境界分野の課題として、様々な研究者によって研究が進められていますが、その中でもゲーム理論、チーム理論に基いたアプローチが特に盛んに議論されているようです。

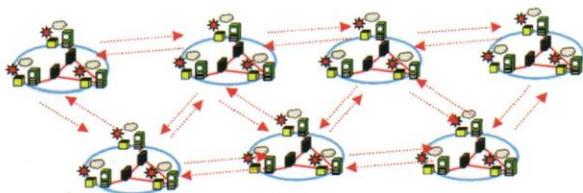


図4 エネルギー結合・情報結合された分散システム

2.2 エネルギーの安定確保と供給のための制御技術

電力供給計画策定には、正確な電力需要予測技術が欠かせません。様々な予測方式が提案されていますが、例えば、カルマンフィルタによる電力需要予測法では、一般には現在の電力需要が過去の電力需要と気温に依存したモデルとして表現され、この需要モデルに対して学習用データを基に未知パラメータの推定が行われます。平日の予測には充分な精度が得られているようですが、毎年カレンダー上で変化する祝日や、国民的大規模イベントが開催される日には、過去の需要履歴との相関が崩れ、予測が困難となります。これに対する対処法が今後検討されなければなりません⁷⁾。

電力の安定供給には、刻一刻と変化する需要に応じて過不足なく発電を行うリアルタイム制御が必要ですが、今後更に再生可能エネルギーが大量導入されると安定性に支障をきたす恐れがあります。発電機のシャットダウン、送配電線の短絡など一時的大規模外乱が生じたときに、電力システムが同期状態を保つことを「過渡安定性を保持する」と言います。この過渡安定に関する研究のうち、電力システムの同期条件について様々な研究が行われており、注目すべきものの1つにカリフォルニア大学の研究結果があります⁸⁾。そこでは、発電機を振動子のモデルで表現し、更に電力ネットワークの接続形態の情報を同期条件に組み込んだ同期条件について、検討が進んでいます。

2.3 環境計測制御技術

図5に示すように、小型の無線装置が内蔵された複数のセンサノードを相互に無線結合して構築される、センサネットワークによる環境計測制御技術が注目されています⁹⁾。各センサノードは観測機能だけでなく演算機能も有しており、センサ同士がネットワークを介して情報のやり取りを行うことにより、広範なエリアにおいて気温、湿度、CO₂濃度、風光、日射量などのエネルギー環境情報を取得することができます。また複数のセンサノードを用いるため、あるセンサノードが故障しても他のノードがデータ補間することで優れた耐故障性を発揮でき、更に、対象物をセンシングする際に、計測対象の未来の振る舞いを予測することにも応用できます。例えば、海洋汚染やガス漏れが生じた際に、汚染物質の拡散の動的な性質をデータ集約することによって近未来に被害を受ける地域へ警告情報を発信することが可能となるでしょう。このように災害監視、災害予報への応用も強く期待されています。

センサネットワークでキーとなる技術は分散型推定理論で

す。それは分散制御と双対をなす理論で、これも制御理論界でのホットトピックスの1つです。分散型フィルタリングを用いて複数のセンサ情報の合意形成により耐故障性と精度保証の向上が期待されており、特に被覆制御問題や無線通信制約を考慮したネットワーク最適化アルゴリズム、モバイルセンサネットワーク問題、電力消費と通信エネルギーの最適化問題¹⁰⁾については、現在も活発に研究開発が行われています。

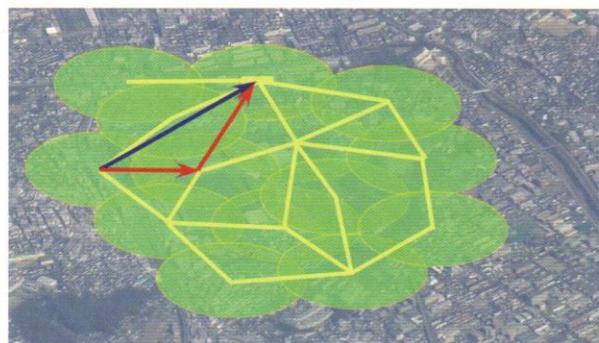


図5 センサネットワークによる環境計測システム

3 終わりに

環境エネルギーに貢献するシステム制御技術の国内外の研究の最新動向について、「環境・エネルギーのための分散型システム制御理論」、「エネルギーの安定確保と供給のための制御技術」、そして「環境計測制御技術」という3つの視点から紹介させて頂きました。

昨今の社会情勢を鑑みますと、システム制御研究者として、環境エネルギー問題にこれから真剣に立ち向かっていかなければならぬと考えております。多くの研究者・技術者の協力と競争が無ければ、革新的な制御技術は生まれません。ご興味をお持ちになった研究者・技術者の方の本分野への参画を心から御期待申し上げます。

参考文献

- 1) SICEエネルギー・環境システム制御技術調査研究会 HP
<http://www.sice-ctrl.jp/jp/wiki/wiki.cgi/rc/env?page=FrontPage>
- 2) 滑川徹, “制御理論は環境問題に貢献できるか”, SICEセミナー: 実践的な制御系設計「予測・分散・協調の制御: 環境への貢献を目指して」資料, pp.1-10, 2009.
- 3) 内田健康, “分散制御とチーム／ゲーム理論: 再訪と最近の展望”, 計測と制御, Vol. 46, No. 11, pp. 835-840, 2007.
- 4) 池田雅夫, “分散制御と大規模システム: 再訪と最近の発展”, 計測と制御, Vol. 46, No. 11, pp.841-846, 2007.
- 5) Karl Martensson and Anders Rantzer, “Gradient methods for iterative distributed control synthesis”, Proc. of 48th IEEE Conference on Decision and Control, 549-554, 2009.
- 6) 加藤太一郎, 滑川徹, “反復勾配法による分散制御を用いた電力ネットワークの系統周波数制御”, 第53回自動制御連合講演会, 資料 pp.1085-1090, 2010.
- 7) 滑川徹, 藤田裕之, 武田孝史, 金尾則一, “需要曲線の特徴を考慮したH ∞ フィルタによる電力需要予測”, 第10回計測自動制御学会制御部門大会資料, 2010.
- 8) Florian Dorfler and Francesco Bullo, “Synchronization and transient stability in power networks and nonuniform Kuramoto oscillators”, Proc. of American Control Conference, pp. 930-937, 2010.
- 9) 飯野穰, 畠中健志, 藤田政之, “センサネットワークと制御理論”, 計測と制御, Vol. 47, No. 8, pp. 649-656, 2008.
- 10) Takashi Takeda and Toru Namerikawa, “Optimal Sensor Network Configuration Based on Control Theory”, Advances in Wireless Sensors and Sensor Networks, Springer, pp.151-176, 2010.