

和文題目:

電力系統とハイブリッドシステム: 何がハイブリッド?

著者:

薄 良彦*

English Title:

Power grids and hybrid systems

Author:

Yoshihiko SUSUKI*

アイ・サイ問答教室

電力系統とハイブリッドシステム: 何がハイブリッド?

新年度を迎えた問答先生の研究室では、アイ先生が新しく配属された4年生のサイ君と卒業研究について話をしています。

アイ 「サイ君、卒業研究にむけて先週出したハイブリッドオートマトンの課題、ちゃんとやってきたんか?」

サイ 「一応、まあ」

アイ 「一応ではなんもわからへんやないか。君の答えを説明してみい」

サイ 「えっと…… (技術的な話が続くため、省略)」

アイ 「なるほど。もうちょっとで研究の本筋へ移れるな。サイ君の卒業論文のテーマは、ハイブリッドシステムを用いて電力系統を解析することやな。なんで、こんなアプローチを採用するんや。サイ君はどない考える?」

サイ 「はい。系統では電圧・周波数・電力などの物理量が連続的に変動していて、リレーなどの切替え機器やFACTSなどのスイッチングを利用したパワーエレクトロニクス機器などが存在しているので、ハイブリッドシステムによる系統の解析が必要だと思います。また昨年8月に関東でもありましたが、最近広域大停電が国内外で発生しています。このような停電の解析や抑制に向けてもハイブリッドシステムによる取扱いが必要に思いますが……」

アイ 「んんんん……!? サイ君の答えにはハイブリッドの認識がまさしく「混在」してて、研究背景や目的が整理できとらん。系統構成の観点からハイブリッド性を考えるんか、系統に生起する現象・ダイナミクスがハイブリッド性をもっているんか、電力系統の制御あるいは操作がハイブリッド性をもつか。これらを整理することが電力系統という実システムの研究では重要やし、サイ君がいうた大停電の抑制を考えるのに大事やろ」

サイ 「はあ……??」

アイ 「わかってへんようやな。まず系統構成の観点から考えようや。電力系統というのは、発電機という回転機械や電氣的・機械的負荷などが電気回路を介して結合した大規模なネットワークや。せやから、系統構成は電気系と機械系が結合しているという意味でたしかにハイブリッドやな」

サイ 「たしかに。ただ、この観点は僕の卒業論文では重要ではないように思います。僕の卒論は系統構成ではなく、現象の解析に近いように……」

アイ 「その通りや。次にその現象・ダイナミクスの観

点やけど、さっきサイ君がいうたりレーや電力変換機器では、その機能の基本に機械的・電氣的断続動作があるな。この断続動作は非常に短時間で行なわれることは知ってるやろ。一方、系統の運用目的であるエネルギーの輸送という観点でみると、送電電力の変動などは数秒・数分から数時間の時定数をもってる。系統の言葉で潮流というたりするけど、その時定数の大きさを想像させるわな。こう考えると系統に生起する現象はマルチタイムスケールダイナミクスと理解するべきやな」

サイ 「なるほど。そうしますと連続的動作と離散的動作を対象にしているハイブリッドシステムの定式化は、電力系統の現象・ダイナミクスの近似でしかないのでは?」

アイ 「その通りや。その近似という観点が系統解析と制御を行なう上で重要や。さっきいうた数秒から数時間に至る現象についてやけど、その数理モデルはすでに多数提案されてる。電力変換機器のスイッチング動作なんか、まだまだ研究が不十分やけどな。ただ、こんな詳細なモデルは高次元でかつ非線形やからなかなか扱えへん。しかも、現象のメカニズムを理解して制御するには多くの場合、冗長や」

サイ 「たしかにそうですよね。現象を忠実に再現する、例えばある波形を計算機上で作り出すことが目的なら議論は別ですが、定量的に再現したところで現象のメカニズムを理解したことにはなりませんよ」

アイ 「そうやそうや。こんとにある特定の現象に限定した数理モデルを考えることが重要で、ハイブリッドシステムの出番や。例えば、電力系統における同期運転とそのダイナミクスを考えてみよか」

サイ 「はい」

アイ 「同期運転は系統固有のダイナミクスと多数の制御系の動作に支配されていて、その同期運転により僕らは日頃安心して電気を使えてるんや。ここで、落雷や樹木接触などの故障が発生して、ある送電線が使えんようになる場合がある。このことで故障発生前のエネルギーバランスがくずれて、それぞれの発電機が定常時とは異なる大きな動揺を示すんや。そして悪い場合には、発電機の回転速度が許容値を越えて系統から脱落してまう。そうすると、またエネルギーバランスがくずれて、他の発電機の回転速度も許容値を越えて系統から続けて

脱落しよる。この現象は停電波及の一般的なシナリオで、例えば、2003年の北米・カナダ、イタリアなどで観測されたんや」

サイ 「はぁ」

アイ 「この現象をモデル化しようとする、回転機械である発電機の時定数に比べて送電線の故障や発電機の脱落自体は十分時定数が短いとみなせるな。せやから、送電線切替と発電機のダイナミクスの相互作用は、離散事象と常微分方程式をあわせた数学モデル、つまりハイブリッドシステムでモデル化して解析できるわけや」

サイ 「ハイブリッドシステムを用いて電力系統を解析するにはどのような現象と制御を考えるかが重要なんですね」

アイ 「まあシステム制御分野では、なんでもそうやけどな。ほかにいうと、発電機の機械的動揺が系統内を空間的に伝搬していく現象が最近報告されてるんや。これなんかは常微分方程式をモデルとして用いるよりも、偏微分方程式を用いた方が現象を定性的かつ定量的に評価できる。そんな動揺伝搬の抑制を送電線切替を用いて考えるには、送電線切替を表現する離散事象と偏微分方程式を併せて考える必要があるんや。これなんか、最初にいうた系統制御のハイブリッド性に相当するで」

サイ 「なるほど」

アイ 「電力潮流の変動は時定数のかなり長い現象やと、さっきいうたな。そうすると電力潮流の変動を考えるには、個々の発電機の動作や送電線切替だけではなくて、負荷配分や電力取引に関わるマーケットのダイナミクスとの相互作用を考えることも重要になってくるんや。これなんか、潮流変動を差分方程式でマーケットのダイナミクスを離散事象でモデル化できて、ハイブリッドシステムの研究テーマとしておもしろいなあ。ところで、サイ君。今までの話をふまえると君の研究内容はどない整理できる？」

サイ 「えっと…… 僕の場合は、発電機の機械的動揺と送電線切替の相互作用を現象のターゲットとしていますので、先程のアイ先生の内容に非常に近いと思います。僕は切替毎に変化する系統構成に離散変数を割り当て、各離散変数に対して発電機のダイナミクスを表わす常微分方程式を検討しようとしています。これはもしかしたら、先生から与えられた課題のハイブリッドオートマトンを用いて、現象を統一的に記述できるのではないのでしょうか？」

アイ 「その通りや。そのモデルを構築できれば、ハイブリッドオートマトンに関する理論的成果から現象のメカニズムを検討できるで。例えば、ハイブリッドオートマトンの可到達性を考えることで現象発生不可避免性を系統制御を含めて議論できる。このことは電力系統の安定性という具体的な問題に有益なアプローチを与えるし、この先にはハイブリッドオートマトンに基づく安定性評価手法の確立やソフトウェアの開発につながっていくんちゃうか」

サイ 「なるほど。アイ先生、ハイブリッドシステムを用いた電力系統の解析というのは以前から行なわれているものなのですか？」

アイ 「ハイブリッドシステムという形式を陽に考慮した研究成果は複数報告されてるで。発電機の機械的動揺に関連した過渡安定問題への取り組みは無いけど、現象のハイブリッドモデルや電圧安定問題に関する検討結果は色々報告されてる。ちゃんと調べて勉強しいや」

ここで問答先生がアイ先生とサイ君のところにやってきました。

問答 「おっ、研究やっとな。おおいに結構、結構」

アイ 「今、サイ君の研究の背景や目的について話していたところです」

問答 「そうか。サイ君の卒論はたしかハイブリッドシステムがテーマやったなあ」

サイ 「はい」

問答 「最近は何んでもかんでも「ハイブリッド」いうて……。現象の理解や制御に向けた数学モデルの1つの候補と捉えるべきや。作ったような問題だけやとったらかんで」

アイ 「その通りだと思います。大事なことは、ハイブリッドシステムという切口から電力系統の解析や制御について、従来の延長線上にない新たな視点を提供できるかですよね。先程サイ君には言いましたが、多数の研究者がこの分野で良い仕事をされていますし、これから取り組まないといけな課題もたくさんあります。関連した話題が今年システム制御情報学会誌に掲載されるらしいですし、地道な研究と着実なアウトプットを続けたいですね」

こうして問答先生の研究室の日々は過ぎていくのでした。ただ、サイ君の研究が進展し、無事卒業できるかどうかは定かではありません。

* 京都大学大学院 工学研究科 電気工学専攻