

パワーエレクトロニクスシステムにおける 実践的モデリングとシミュレーション技術

パワーエレクトロニクスにおける
実践的モデリングとシミュレーション技術調査専門委員会編

目次	
1. まえがき	3
2. 実践的モデリングとシミュレーション手法の動向	5
2.1 スイッチング素子のモデリングおよび電力変換器のシミュレーションとその動向	5
2.2 モータ（ドライブシステム）のシミュレーションとその動向	10
2.3 配電システムのスマート化に向けた解析技術	15
2.4 パワーエレクトロニクスにおけるシステムシミュレーションとその動向	21
2.5 シミュレーション技術、各種シミュレータとその動向	26
3. 実践的モデリング事例	39
3.1 デバイスのモデリング	39
3.2 SiC-MOSFET を適用した電力変換システムのモデリング	44
3.3 階層化チョッパモデルのリアルタイムシミュレーション（Real-Time Simulation; RTS）	56
4. 標準的モデル	67
4.1 委員会 Web サイト	67
4.2 回路紹介	67
5. あとがき	72

パワーエレクトロニクスにおける実践的 モデリングとシミュレーション技術調査 専門委員会委員

委員長 石川 裕記(岐阜大学)
幹事 加藤 真嗣(神戸市立工業高等専門学校)
重松 浩一(名古屋大学)
幹事補佐 井上 征則(大阪府立大学)
委員 青柳 滋久((株)日立製作所)
阿部 貴志(長崎大学)
市原 純一(AZAPPA(株))
伊東 淳一(長岡技術科学大学)
今岡 淳(名古屋大学)
上田 雅生(メンターグラフィックスジャパン(株))
上村 浩文(富士電機(株))
大河内 裕太(ローム(株))
大橋 俊介(関西大学)
小笠原 悟司(北海道大学)
香川 秀樹((株)SimEngine)
柿ヶ野 浩明(立命館大学)
加藤 利次(同志社大学)
加藤 久嗣(田淵電機(株))
木村 紀之(福井工業大学)
桐淵 岳(オムロン(株))
久保田 裕孝(三菱重工業(株))

委員 黒江 康明(関西大学・同志社大学)
甲野藤 正明(ヤンマーホールディングス(株))
斉藤 亮治
佐藤 大介(長岡モーターディベロップメント(株))
佐々木 広明(キーサイト・テクノロジー(株))
庄山 正仁(九州大学)
関末 崇行(アンシス・ジャパン(株))
高木 茂行(東京工科大学)
玉田 俊介(東芝インフラシステムズ(株))
寺園 勝志((株)安川電機)
野田 琢((一財)電力中央研究所)
平山 斉(鹿児島大学)
舟木 剛(大阪大学)
堀口 剛司(三菱電機(株))
馬 躍((株)村田製作所)
松野 知愛(Myway プラス(株))
水野 佑美(サイバネットシステム(株))
森實 俊充(大阪工業大学)
山口 忠(岐阜大学)
横山 智紀(東京電機大学)

1. まえがき

パワーエレクトロニクス（以下、PE）システムは電力変換器、電源装置、負荷によって構成される。それぞれの構成要素は日進月歩で性能が向上している。その効果を踏まえながら PE システムの高効率化や高性能化、地球環境問題対策などの実現を目指して、多様な研究開発が続けられている。これらの研究開発において、多くの過程でシミュレーションが実行されており、今やシミュレーションは必要不可欠となっている。シミュレーションを行うための重要な要素として、解析対象を数式化あるいは数値化するモデリング手法と、立式から求解に至る数学的過程において精度よい解析を計算機に実行させるシミュレーション技術が挙げられる。シミュレーション技術には、離散値に対する数学的求解法や計算機機能の有効活用も含まれる。これらはそれぞれにおいて様々な手法が検討されているが、これらの適切な組み合わせが効率の良い、合理的な、あるいは精度の良いシミュレーションを実現する。

PE システムのシミュレーション^{(1) (2)}において、まず行う作業が構成要素モデルの構築である。解析対象とする構成要素の物理量の関係を数式または数値で表現してモデルに記述する。例えば、電気回路素子であれば電圧降下と素子電流の関係、モータであれば入力電圧とモータ電流、モータ電流とトルク、トルクと回転速度の関係である。構成要素モデルはシミュレータにあらかじめ用意されている場合もあればユーザー自身が構築する場合もある。モデルの分類は2通りある。一つ目の分類はモデル記述表現による分類である。モデルが模擬する物理現象が数式で表されたモデルは数式モデル、実測結果や解析結果などから得られた数値をブリアプロセッサによりテーブル化したモデルはテーブル参照モデルと呼ばれる。このほかに、複数のシミュレータを使用して、関係する解析結果を互いに使用するモデルもある。二つ目の分類は物理現象のモデリング手法による分類である。理論的根拠に基づいた数式モデルやテーブル参照モデルを理論モデル、発生現象を等価回路で表現したモデルは等価回路モデル、実測値を近似式で表現した数式モデルや実測値をテーブル化したテーブル参照モデルはビヘイビアモデルと呼ばれる。ビヘイビアモデルは実際に発生する物理現象を再現するモデルとして、より高い精度の解析結果が求められる場合に適用されることが多い。次に、構成要素モデルを接続してシステムを構築し、システムの制御系を設計する。制御対象の物理量に対する応答の要求を満たすように制御器を選択し、制御ゲインを決定する。

以上の手順を踏まえて PE システムモデルを構築し、シミュレーションを実行すれば、システム全体の挙動が結果として得られる。シミュレーションを実行する際、シミュレータでは「ソルバ」と呼ばれる計算エンジンが起動し、システムを解析するための方程式の立式および求解演算が行われる。システムの方程式は、エネルギーを扱う接続網に対しては非因果律、信号を扱う接続網に対しては因果律を

用いる。非因果律は入出力の概念がないキルヒホッフの法則や運動方程式、熱平衡式など、エネルギー保存則に帰着する関係式が該当し、因果律には入出力が明示される伝達関数が該当する。一般に、PE システムではシステムの方程式は連立方程式となる。求解演算において、システムの方程式が連立微分方程式となる場合には、後退オイラー法、台形法、ギア法などの離散値に対する積分公式を用いた陰解法が適用される。一方、リアルタイムシミュレータのように連立方程式を解く必要がない場合は前進オイラー法といった陽解法が適用される場合もある。得られた結果はポストプロセッサによりユーザにわかりやすく表示され、発生現象の解明や設計の妥当性検証の一助となる。

PE システムのシミュレーションでは、解析精度の向上を目的として複数のシミュレータを用いる場合がある。シミュレータは開発経緯からそれぞれ有利性や強みを持つ分野・領域があり、これらの分野・領域では解析精度に対する信頼性が高い傾向にある。複数のシミュレータで解析するには、それぞれのモデルや解析結果を互いに交換する必要がある。あるシミュレータでの演算結果を他のシミュレータに引き渡す逐次的解析手法を「連携解析」、「弱連成」と呼ぶ。電磁界解析結果をテーブル化してモータモデルを構築する場合や、複数のシミュレータを実行して解析結果を互いにやり取りする場合がこれに該当する。一方、モデルの表現すなわち数式やテーブルそのものを引き渡し、連立方程式に組み込むことで、発生現象の因果関係を表現する手法を「連成解析」、「強連成」と呼ぶ。モデル交換と呼ばれる手法がこれに該当する。

PE システムのシミュレーションを難しくする要因の一つに、電力変換器のスイッチング動作が挙げられる。スイッチング素子をオン状態とオフ状態の2値モデルでモデリングする場合、電圧や電流がスイッチング動作により断続することから非線形解析を必要とする。非線形解析で2次以上の高次積分公式を適用するとスイッチング前後両方の解析値が演算に用いられるために正しい結果が得られず、結果として数値振動が現れることがよくある。これを避ける目的でスイッチング動作の発生を検出し、適用する積分公式を変更するシミュレータも多い。もう一つの要因として、モータ電流と回転速度のように応答時定数が大きく異なるスティフな系を扱うことが多いことである。モータ駆動システムにおいて、スイッチング期間で発生する過渡現象の影響を考慮しながらモータの速度応答を解析する場合、このシステムはスティフな系が複数混在するマルチドメインシステムとなる。マルチドメインシステムのシミュレーションでは、シミュレーション上の離散化された時刻の間隔である計算時間刻みの設定は重要である。計算時間刻みとシミュレーションに要する時間はトレードオフの関係にあるため、着目する現象によってはソルバの計算負荷を軽減する縮退要素の適用も一つの選択肢になる。

このように効率的かつ高精度なシミュレーションを目指して、モデリング手法やシミュレーション技術が発展してき