

■ 佐藤 裕康
Hiroyasu Sato

1 はじめに

解析技術の進歩に伴い、解析専任者でなくとも設計者レベルで容易に扱える解析ソフトが増えてきた。また、3D-CADの普及により、CADデータを解析用モデルデータとして活用できることが一般的になり、解析を活用した開発設計の効率化が期待できる。

ここでは、従来、経験則や試作評価の繰り返しの頼ることが多かった電磁ソレノイドの設計について、過渡電磁界解析ソフトを導入し、設計の効率化を図った事例について紹介する。

2 電磁ソレノイドの解析手法

2.1 電磁ソレノイドとは

電磁ソレノイドは、電磁力を利用して電気エネルギーを直線運動の推力に変換するアクチュエータである。

その中でも直流電源で駆動するDCソレノイドは、シンプルな構造で大きな推力が容易に得られ、動作も高速であるので、さまざまな分野で広く利用されている。

コイルに通電することで磁界を生じさせ、可動鉄心・固定鉄心・ギャップ（空気）から構成される磁気回路に磁束を流し、ギャップに生じる吸引力により可動鉄心を動作させる。ソレノイド単体では通電を止めても吸引前の状態に復帰しないので、一般的には復帰ばねと合わせて用いられている（図1）。

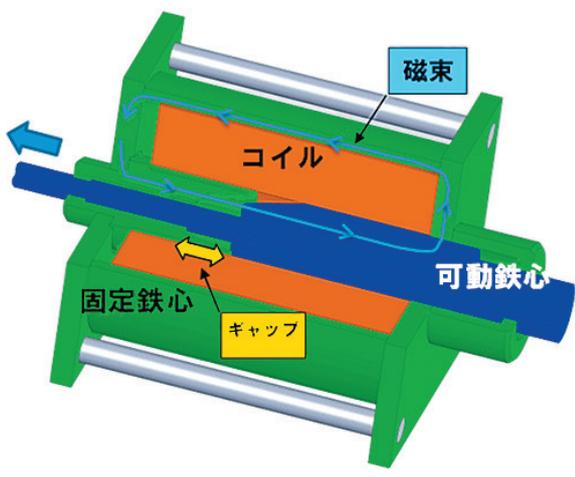


図1 電磁ソレノイドの構造

2.2 電磁界解析の必要性

ON-OFFの状態を制御する場合、市販品ではメーカーから定常状態（電流やギャップが一定）での吸引力のデータが提供されているので、負荷を上回る吸引力が得られる仕様を選定することができる。過渡応答解析と比較するため概要を説明する。もともと磁気回路は電気回路と以下に示すとおり類似性がある。

電気回路の電流 I を示すオームの法則

$$\text{電流 } I \text{ [A]} = \text{電圧 } E \text{ [V]} / \text{抵抗 } R \text{ [\Omega]} \cdots \text{式 (1)}$$

磁気回路の磁束 ϕ を示す法則

$$\text{磁束 } \phi \text{ [Wb]} =$$

$$\text{起磁力 } F \text{ [A]} / \text{磁気抵抗 } R_m \text{ [A/Wb]} \cdots \text{式 (2)}$$

ただし以下に示すように、磁気回路では定常状態でもその計算は容易ではない。

(a) 電気回路では、抵抗 R は一定として考えれば良いが、磁気回路における磁気抵抗 R_m は、全磁束 ϕ に依存する磁束密度により非線形に変化する。

(b) 電気回路では、導体と絶縁体の導電率には明確な格差があるが、磁気回路における磁性体と非磁性体の透磁率は、無視できない差であり、空気中に流れる漏れ磁束も考慮しなくてはならない。

具体的に、電磁ソレノイドの吸引力を求めるにはギャップに流れる全磁束 ϕ が必要である。全磁束 ϕ を求めるには、式 (2) に示すように起磁力 F を各部の磁気抵抗 R_m の合計で割る必要があるが、一方で、各部の磁気抵抗 R_m は、前項 (a) で記述したとおり、全磁束 ϕ に依存する磁束密度により決定される。磁気抵抗 R_m を決定するには、磁束 ϕ が分かっている必要はないが、逆に磁束 ϕ を求めるには、磁気抵抗 R_m が分かっている必要はないため、矛盾が生じる。このように、磁気回路の種々のパラメータは、電気回路のように代数式で解を得ることはできない。また、実際には漏れ磁束も磁束密度により変化するため、さらに複雑になる。

従来は、電磁ソレノイドを設計する場合には、各部の磁束密度に仮定値を当て込み概略の吸引力を求めていたが、当然のことながら高い精度は得られず、試作を繰り返し修正していく必要があった。

電磁界解析ソフトでは、有限要素法などの数値解析で近似解を得る方法を用いて、実用的な設計が行えるようになっている。

2.3 過渡解析

電磁ソレノイドで動作時間や動作速度などの応答性が問題となる場合には過渡解析を行う。過渡解析では可動鉄心の運動を伴うため、磁気回路と電源回路だけでなく、機械的負荷の動条件と組み合わせて、以下のような刻々と変化するパラメータを算出しながら行う必要がある。各回路連携の概要を図2に示す。

- (a) コイルの自己誘導起電圧
- (b) コイルの電磁誘導起電圧
- (c) 渦電流
- (d) 電気回路
- (e) 負荷曲線・運動系の質量 可動部の運動方程式

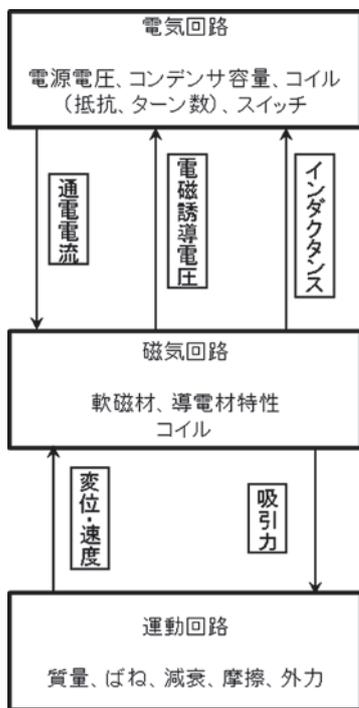


図2 電磁ソレノイドの構造

前述のとおり、磁気回路、電気回路、運動回路を同時に解くことはできないので、まず初期条件における磁気回路の定常解を求め、その結果から電気回路、運動回路の解を得て、次のステップでその結果を反映して磁気回路の計算を行うことを繰り返す。したがって、同時には解を得られないが、ステップを細かくすることで実用的な近似解を得ることを可能としている。

3 解析事例

3.1 電力用遮断器のトリップコイル動作時間予測

電力用遮断器は、回路短絡などの事故電流を速やかに遮断するため、事故検知から数十msでの遮断動作が求められる。この要求を実現する操作機構の一つとして、電動ばね操作方式がある。この方式では、駆動源となる

遮断ばねをあらかじめ電動機で蓄勢し、ラッチを掛けて保持しておく。遮断指令によってこの遮断ばねのラッチを引き外すことで、速やかな遮断動作を行うものである。

ラッチ引き外しには電磁ソレノイドが使用されるが、遮断時間にはこの動作時間も含まれるため重要な要素となる。また、駆動回路の電源容量との関連から、動作電流にも制限がある。

この解析では、コイルの連続作動定格電圧以上の電圧を印加し、動作時間を縮める手法の適用を検討したものである（ラッチ引き外しは数十ms以内に完了するため、コイルの過熱は問題とならない）。

ラッチは250Nで3mm押し込むと外れると想定した。電磁ソレノイドの押し込み量は裕度を考慮し5mmとし、ギャップ5mmでの吸引力が250N以上得られるサイズを選定した（図3）。

上記の負荷条件で、表1に示す5種類のコイル仕様についてDC100Vを印加し動作させた場合のストロークとコイル電流を求めた。表1および図4、図5に解析結果を示す。

解析の結果、ピーク電流値が5A前後で最も動作時間が短くなるコイル仕様としてケース3のコイル仕様を選定した。その後、実器で検証した結果、図6、図7に示すように、実測値との比較でも十分な精度が得られることが確認できた。

この事例では、電磁ソレノイドの解析の経験者であれ

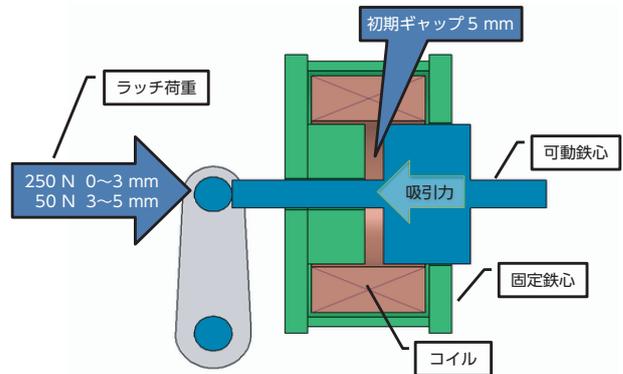


図3 引き外し荷重条件

表1 コイル仕様および結果

Case	コイル仕様			解析結果	
	連続作動 定格電圧 (V)	コイル 巻数 (回)	コイル 抵抗 (Ω)	トリップ 開始時間 (ms)	トリップ前 ピーク電流 (A)
1	26	1,150	19	26.0	3.1
2	20	950	12	20.7	4.3
3	16	780	8	17.0	6.3
4	13	580	5	13.1	10.3
5	10	470	3	10.7	16

ば, モデル作成から解析結果を得るまで1日程度で行え, 従来電磁ソレノイドの選定に必要であった実器での

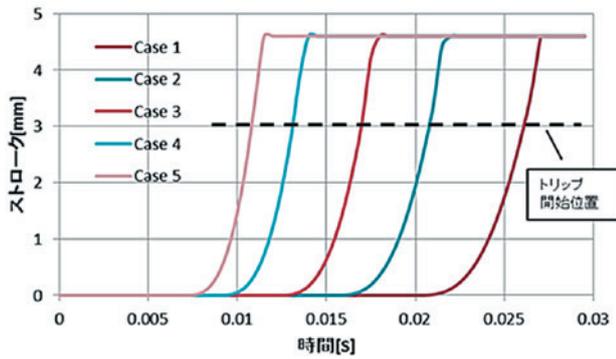


図4 ストローク

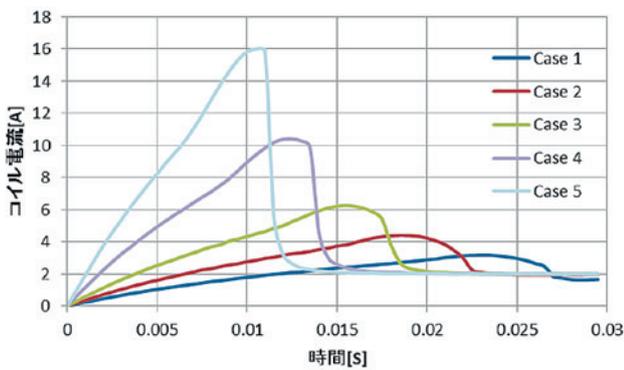


図5 コイル電流

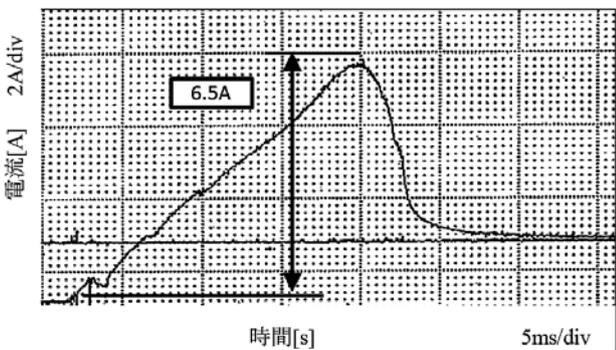


図6 コイル電流実測値

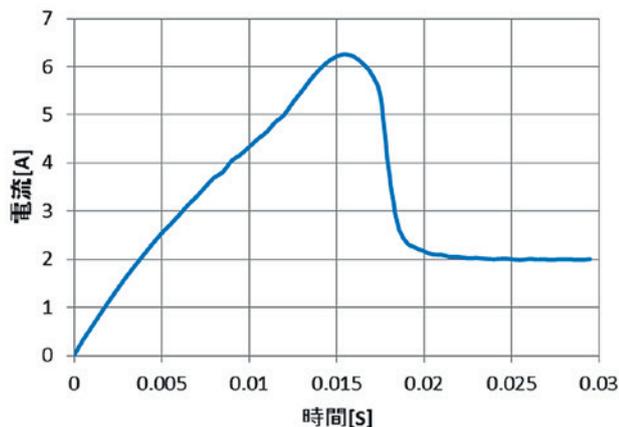


図7 コイル電流解析値

比較検証工数が削減できる。さらに周囲温度や電源電圧変動による影響も解析上で予測可能となり, 開発の効率化, 高度化が期待できる。

3.2 解析事例2 遮断器の電磁ばね操作機構

電力用真空遮断器の操作機構として, 3.1 で示した電動ばね操作方式に替わり, コイルと永久磁石を組み合わせた自己保持型電磁ソレノイドを使用した電磁ばね操作方式の採用事例が増えている。

電磁ばね操作機構の構造および動作原理の一例を図8に示す。

電磁ばね操作機構は, 電動ばね操作方式で必須のばね巻き上げ用の歯車や機械的ラッチ機構が不要となり, 注油などのメンテナンスが削減できる利点がある。一方,

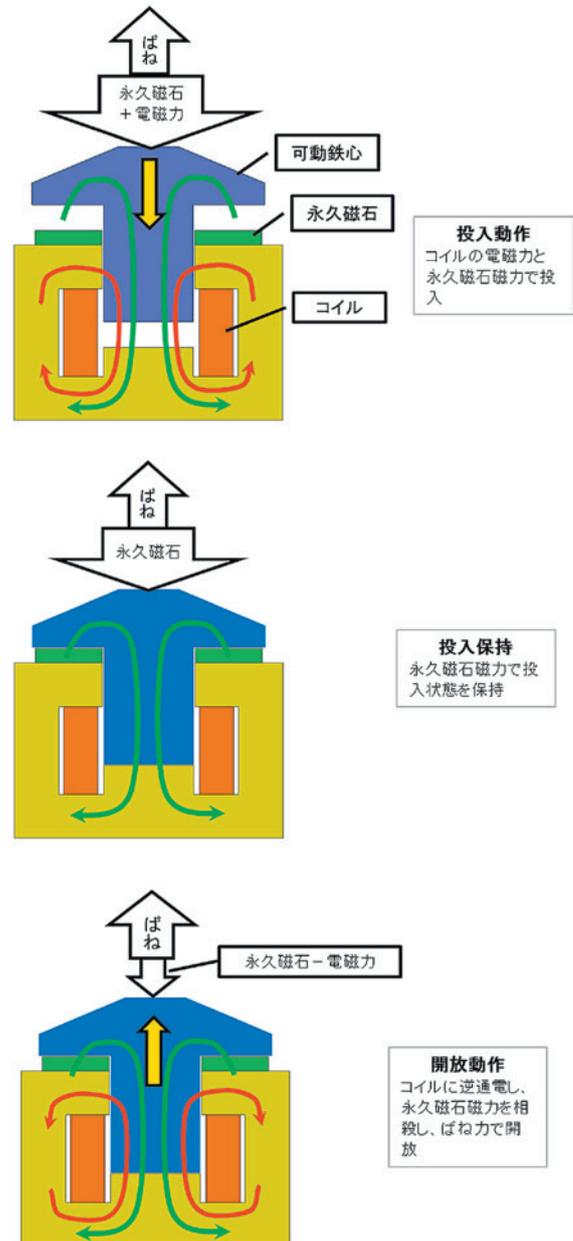


図8 コイル電流

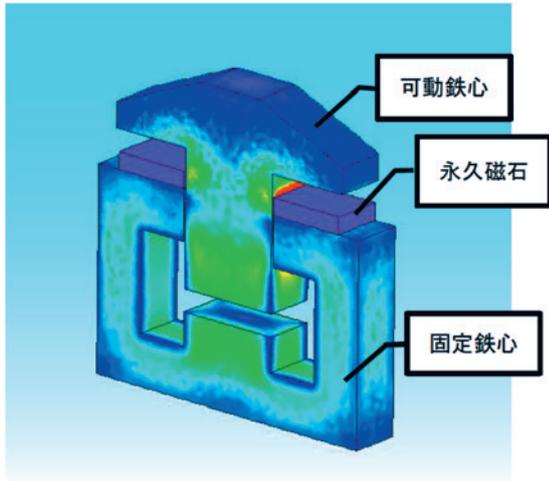


図9 渦電流の分布状況

従来電磁ばね操作機構には投入動作時のピーク電流が大きいとの課題があったが、電磁界解析技術の導入による高効率化や、遮断部となる真空バルブのコンパクト化による可動部の軽量化などから、ピーク電流の低減が進んで普及が広がっている。

真空遮断器用の電磁操作機構の設計において特徴的なのは、動作開始から完了までの時間や、遮断部接点の接触位置近傍での動作速度を要求されることである。真空バルブでは規定の電流を投入・遮断するため、接点部の動作速度の範囲が指定されており、これを満足する必要がある。

さらに、引き外し動作の挙動の検討も重要となる。確実に引き外し動作を行うためには、コイルや永久磁石磁力、ばね開放力などのバランスを適切に調整する必要があり、電磁界過渡解析が必須である。

以上のような条件を考慮し、製品化に向けてさまざまなモデルを検討中である。そのひとつとして、図9に示すモデルで渦電流の影響調査のため解析を行い比較した事例を示す。磁気回路内の磁束が変化すると、その磁束の変化を妨げるように渦電流を生じる。高速に動作する場合には影響が大きくなる。渦電流の影響で動作時間が長くなり、コイル電流も増加していることが確認できる(図10、図11)。

4 今後の展開

4.1 他分野の解析ソフトとの連携

今回紹介した事例でも、リンク機構のリンク比や回転モーメント、部品同士の衝突現象などは電磁界解析ソフト内での運動解析では直接反映できないため、別途その影響を考慮する必要が生じている。より解析の精度を高めるためには、機構解析ソフトや制御回路シミュレータなどとの連成解析が必要となる。他の解析ソフトにおい

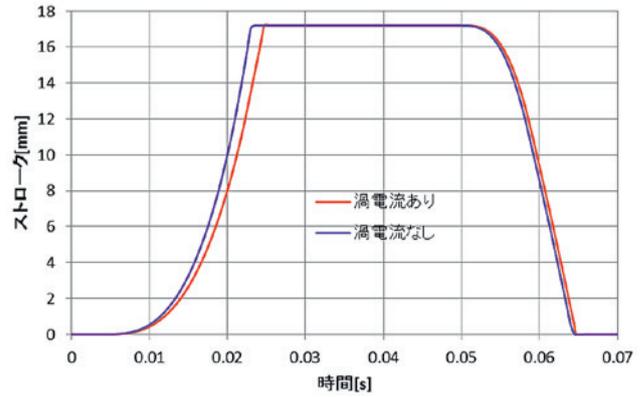


図10 過電流有無でのストロークの比較

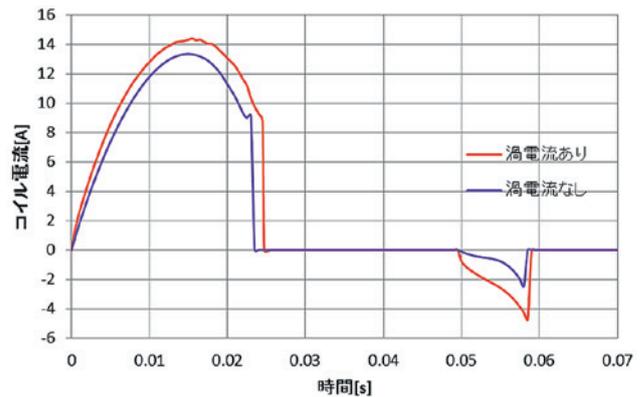


図11 過電流有無でのコイル電流の比較

ても、同一の3DCAD データを活用して解析が行いやすい環境に配慮したい。

4.2 最適化計算手法の導入

数値解析を活用した設計においても、直ちに最適設計が得られる訳ではなく、解析上での試行錯誤が必要である。現在の解析ソフトでは、性能に影響する複数のパラメータを自動的に変更しながら多数の解析を行い、最適解に収束させていく最適化手法が用意されている。

5 おわりに

電磁ソレノイドの設計では、従来設計手法では精度が得られないため、構想段階から電磁界解析ソフトを活用することが有用である。構想段階では、設計者自ら解析条件を変えながら、得られた結果からアイデアが得られることも多い。また試作の精度も高まることで、トータルで開発の効率化が期待できる。

今後も解析事例を増やし、多くの設計者が手軽に解析が行える環境を整え、お客さまへ品質の高い製品を短期間で提供できるよう進めていきたい。

佐藤 裕康

電力プラント事業本部
開閉装置製造部 開閉装置製造部ミニクラッドグループ 所属