

交流電磁接触器の動的挙動の解析

和田 正義(わだ まさよし)

吉本 博(よしもと ひろし)

北出 雄二郎(きたいで ゆうじろう)

1 まえがき

電磁接触器は、モータの駆動回路などの始動・停止の切換を行う開閉装置で、負荷回路のスイッチングを行うための可動・固定接点や電磁石などから構成される。電磁石の駆動電源としては、交流または直流を用いるタイプがあるが、交流駆動のものは、安価であることや商用電源が直接使用できることから、市場での流通量は9割程度を占める。

交流電磁接触器は、一般的に電磁石の動作が速く、負荷回路を閉じる際(接点閉動作時)に、接点自身もしくは電磁石同士の衝突による衝撃力が接点部に伝搬することで、接点の衝突が短時間に繰り返し生じるバウンス(チャタリング)と呼ばれる現象が発生する。以上のような一連の動作を解析的に把握するためには、接点と電磁石の衝突や振動などの現象を含んだ電磁接触器の過渡的な挙動を明らかにする必要がある。交流駆動の電磁石は、電気-磁気回路系、機械系が相互に作用して動作するため、総合的な挙動を解析するためにはそれぞれの系を連成させ、解析ステップを細かくする必要がある。

これまで電磁石を含むシステムの解析手法として有限要素法が広く用いられてきた。この方法では、ある時刻における電磁石の磁束分布や磁界強度は精度よく求められる。しかし、1回あたりの解析時間に長時間を要することから、一連の動作に対し解析ステップを細かく分割して計算することが困難であり、したがって機械系の動的挙動が正確に把握できない恐れがあった。さらに、さまざまな状況における挙動を解析することにも時間的限界があった。また、電磁石同士の衝突や接点の動作も含めた総合的な連成解析を行った例はこれまでほとんどない。

今回、上記のような衝突現象や接点部も含めて電気-磁気回路系、および機械系それぞれを定式化し連成させることで、電磁接触器の過渡的な挙動を解析するシミュレータを開発した。本シミュレータは、動作時の各時刻に対する解析精度は有限要素法ほど高くないが、ステップごとの解析時間が短いために、一連の動作を細かく分割して解析できることが特徴である。また、微分方程式により、電磁接

触器をモデル化することにより、高速な解析を可能にした。これにより、設計段階においてパラメータ変化の影響を考慮するような場合に多くの解析ができるようになった。

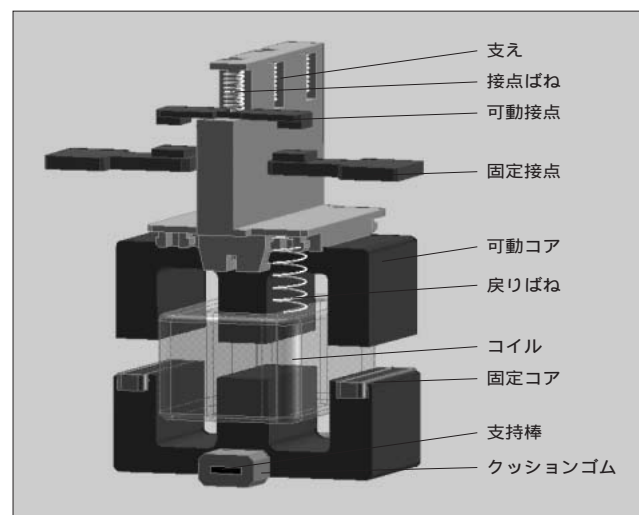
本稿では、さまざまな条件において電磁接触器の総合的な動的挙動を短時間で計算する動的連成シミュレータについて報告する。

2 電磁接触器の構造と動作

2.1 電磁接触器の構造

電磁接触器のモデルを図1に示す。アクチュエータである電磁石は、可動・固定コアおよびコイルにより構成され、可動コアには、支えと呼ばれる可動接点を格納する部品が連結されている。可動接点には、接点閉時に固定接点に対し接触圧力が付加されるように、接点ばねが取り付けられている。また、固定コアは、コア衝突時の衝撃を吸収するためのクッションによって、支持棒を介して筐体(きょうたい)により支持されている。

図1 電磁接触器モデル



和田 正義

電磁接触器、配線用遮断器の開発に従事。現在、(株)富士電機総合研究所機器技術研究所副主任研究員。博士(工学)、日本ロボット学会会員。IEEE 会員。



吉本 博

電磁接触器の開発を経て、自動販売機の開発に従事。現在、(株)富士電機総合研究所機器技術研究所。電気学会会員。



北出 雄二郎

電磁気応用機器、超音波応用機器の研究開発に従事。現在、(株)富士電機総合研究所機器技術研究所長。日本機械学会会員。

2.2 電磁接触器の動作

図2および図3を用いて、回路の開動作について説明する。同図上段は、接点の接触状態を示しており、電圧が0Vおよび10Vは、接点の開状態および閉状態をそれぞれ示している。また、同図中段および下段は、可動接点および可動コアの速度をそれぞれ示している。電磁石に電圧が印加されると、可動コアが固定コアに向かって吸引されるとともに、可動コアと接続している可動接点も固定接点に向かって移動する。接点間の距離よりもコア間の距離の方が長いため、最初に接点同士が衝突し（図2，A部）バウンスが生じる。その後も可動コアは移動し、数ms経過後、固定コアに衝突する（図2，B部）。衝突後、コア同士は吸着して一体となって振動し、一定の時間が経過後、静止する。

図2 電磁接触器の動作

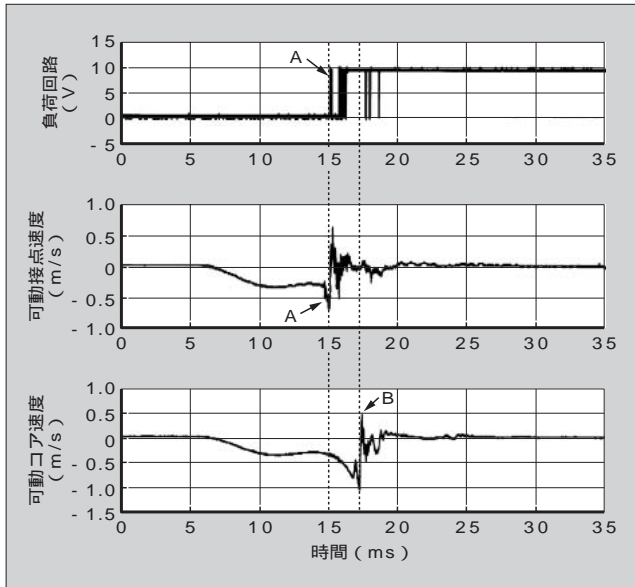
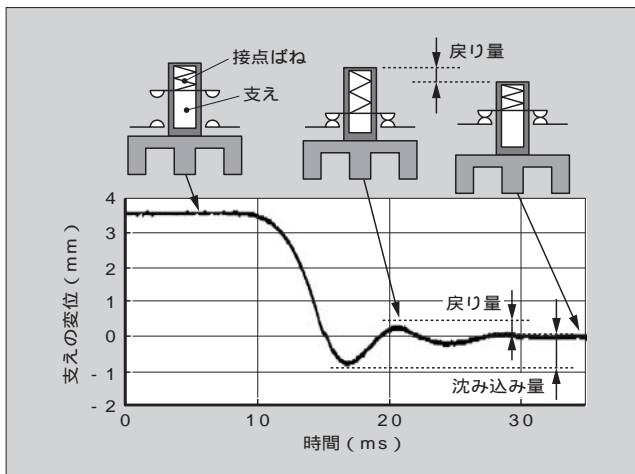


図3 支えの変位



③ 連成解析シミュレータ

3.1 シミュレータの概要

今回開発したシミュレータは、電磁接触器の吸引動作における動的挙動が解析できる。

解析モデルは、大きく分けて機械系、電気回路系、磁気回路系の三つの部分から構成される。図4に機械系—電気系モデル、図5に磁気回路モデルを示す。

上述の系で考慮している項目を以下に記す。

3.1.1 機械系

- (1) 接点の並進、回転動作と衝突現象
- (2) 固定、可動、両コアの並進動作と衝突現象
- (3) 支えの並進動作と可動コアとの衝突現象
- (4) 各部位を支えるばね、クッション構造のばね定数、粘性係数

3.1.2 電気回路系

- (1) コイルに印加させる電圧、コイルに流れる電流
- (2) コアの動作に伴うコイルのインピーダンス
- (3) くま取コイル（Sコイル）の電圧、電流

3.1.3 磁気回路系

- (1) コアの各部に流れる磁束
- (2) 空げき、コアのインピーダンス
- (3) Sコイルにより発生する磁束

図4 機械系—電気系モデル

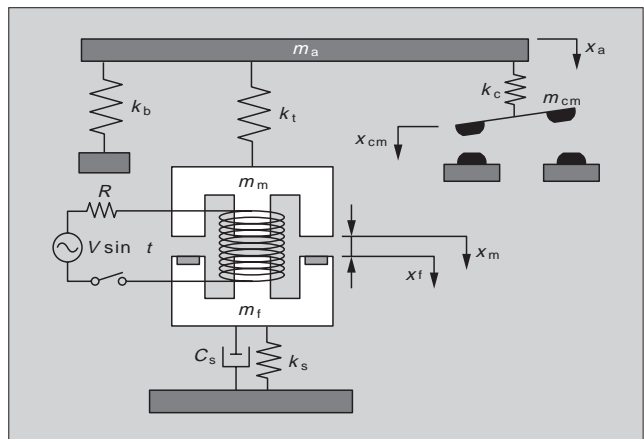
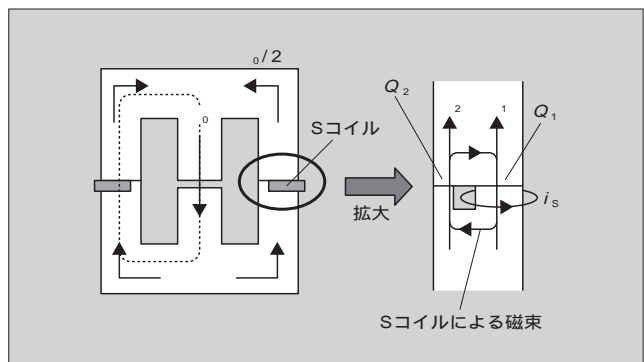


図5 磁気回路モデル



3.2 基礎方程式

基礎方程式を機械系，電気回路系，磁気回路系に分けて記す。

3.2.1 機械系の運動方程式

$$m_a \ddot{x}_a = -k_b x_a - k_t (x_a - x_m) - k_c (x_a - x_{cm}) \dots\dots\dots(1)$$

$$m_m \ddot{x}_m = -k_t (x_m - x_a) + F_m - f_q(\dot{u}, u) \dots\dots\dots(2)$$

$$m_t \ddot{x}_t = -k_m x_t - C_m \dot{x}_t - F_m + f_q(\dot{u}, u) \dots\dots\dots(3)$$

$$m_{cm} \ddot{x}_{cm} = -k_c (x_{cm} - x_a) + f_w(\dot{u}, u) \dots\dots\dots(4)$$

m : 質量 x : 変位 k : ばね定数

C : 粘性係数 F_m : 電磁吸引力

○添え字

a : 支え b : 復帰ばね c : 接点ばね

t : 連結ばね cm : 可動接点中心

f : 固定コア m : 可動コア

q : コア w : 接点

衝突力 :

$$f(\dot{u}, u) = \begin{cases} (1 + p\dot{u})H \cdot u^{1.5} & u \geq 0 \text{ and } \dot{u} \geq -1/p \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \dots\dots\dots(5)$$

\dot{u} : 相対速度 u : 相対変位

H : ヘルツの力の定数 p : エネルギー損失係数

3.2.2 電気回路の基礎方程式

$$L \frac{di_0}{dt} + Ri_0 = V \sin t \dots\dots\dots(6)$$

L : コイルのインダクタンス

R : コイル抵抗 $V \sin t$: 印加電圧

i_0 : コイル電流 : 電源周波数

3.2.3 磁気回路の基礎方程式

吸引力 :

$$F_m = -\frac{1}{2\mu_0} \left\{ \frac{0^2}{S_0} + 2 \times \left(\frac{1^2}{S_1} + \frac{2^2}{S_2} \right) \right\} \dots\dots\dots(7)$$

磁束 :

$$\phi_0 = \frac{Ni_0}{R_m} \dots\dots\dots(8)$$

インダクタンス :

$$L = \frac{N^2 \phi_0}{i_0} \dots\dots\dots(9)$$

S コイル部の磁束 :

$$\phi_0/2 = \sqrt{\phi_1^2 + \phi_2^2 + 2\phi_1\phi_2 \cos \theta} \dots\dots\dots(10)$$

$$= \tan^{-1} \left(\frac{2\phi_1\phi_2}{R_s Q_2} \right) \dots\dots\dots(11)$$

$$\phi_1 Q_1 + \phi_2 Q_2 = i_s \dots\dots\dots(12)$$

S_i : 接極面積 ($i = 0, 1, 2$)

ϕ_i : 磁束 ($i = 0, 1, 2$)

μ_0 : 空気の透磁率 N : コイル巻き数

Q_i : S コイル部の磁気抵抗 ($i = 1, 2$)

R_s : S コイルの抵抗

θ : R_{m1} 部の漏れ係数

○添え字

0 : 中央脚部 1 : S コイルがある部位

2 : S コイルがない部位

4 シミュレーションによる解析と実験結果

開発したシミュレータを用いて，さまざまな状況における電磁接触器の挙動を解析した。また，同条件における実際の電磁接触器における各部位の挙動も測定し，解析結果と比較することで，シミュレータの解析結果の妥当性を検証した。電磁石励磁時の交流電源の投入位相を変えて各種挙動を評価した。

4.1 投入位相に対する接点間およびコア間の衝突速度

図6に交流電源の投入位相を変化させた場合の，接点間およびコア間の衝突速度の変化を実測値と解析値とについて比較した結果を示す。本結果から，投入位相の変化に対する点間およびコア間の衝突速度の変化の様子は，ほぼ一致していることが分かった。興味深い点として，投入位相を変化させると，接点の衝突速度とコアの衝突速度の大小が入れ替わる位相条件があることである(図6，A部)。この速度の関係についても，シミュレーション結果と，実測がよく一致していることが確認できる。

4.2 詳細動作の比較

シミュレーション解析と実験結果の比較として，上述の接点とコアの衝突速度の大きさが逆転する投入位相60度の結果を図7に示す。同図(a)はシミュレーション結果であり，動的な電磁吸引力(上段)，機械動作(中段)，回路電流および電圧(下段)をそれぞれ示す。電圧印加後，電流の上昇に伴って電磁吸引力が負荷を上回り，可動コアが吸引され始めるが，動作の途中から，電磁吸引力がばね負荷を下回る現象が見られる。これは交流電源が零点を交差することに起因する。このとき，ばね負荷により可動コアは減速されるものの，慣性力によって固定コアまで到達し，吸引動作は完了する(図7，A部)。接点の衝突後から可動コアが減速することから，接点の衝突速度よりも，可動コアの衝突速度が遅くなる。

以上により，本シミュレータの妥当性が確認できた。

図6 衝突速度比較結果

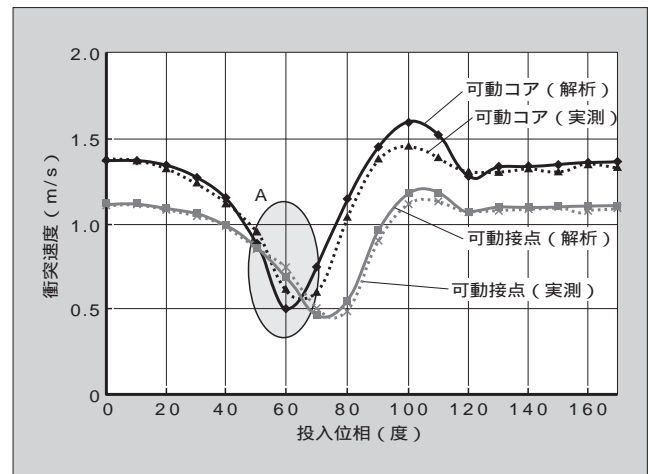
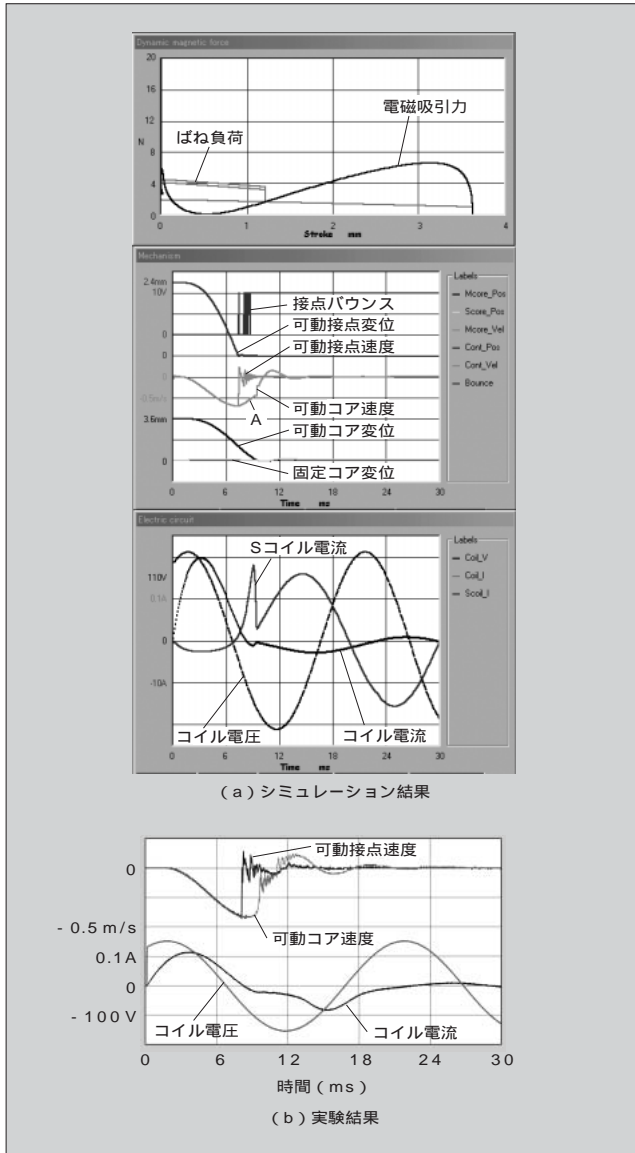


図7 シミュレーション結果の例 (投入位相 60度)

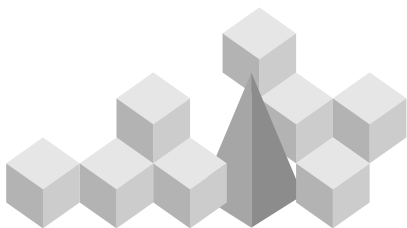


5 あとがき

機械的な挙動が高速で、吸引力などのパラメータ変化率が大きい交流電磁接触器に対し、機械運動系および電気-磁気系を微分方程式により定式化し、それぞれの相互作用を考慮した連成シミュレータを開発することで、各部の動的な挙動を解析可能とした。本シミュレータを用いて、交流電源の投入位相を変化させ、接点およびコアの衝突速度の変化を解析し、実機と同様の動作特性を示すことを確認した。これにより、交流駆動の電磁接触器に対する基本解析モデルの妥当性が検証できた。

参考文献

- (1) 茂木晃. 電磁装置とその設計. 電気書院. 1962.
- (2) 石黒敏郎ほか. 交直マグネットの設計と応用. オーム社. 1965.
- (3) 中田高義ほか. 交流電磁石の設計と応用. 森北出版. 1991.
- (4) Muramatsu, N. et al. Measure to Reduce the Bounce of a Movable Part in an Electromagnetic Contactor. AS ME. vol.123.
- (5) Braumann, P. et al. Analysis of the interrelation between mechanical and electrical phenomena during making operations of contacts. The 17th International Conference on Electric Contact Phenomena. 1994, p.29-38.
- (6) Wada, M. et al. Dynamic Analysis and Simulation of Electromagnetic Contactors with AC Solenoids. The IEEE International Conference on IECON. 2002.





*本誌に記載されている会社名および製品名は、それぞれの会社が所有する
商標または登録商標である場合があります。