

スマートメータ用電磁操作開閉器への 電磁界・運動連成シミュレーションの適用

蓑田強平*
小倉健太郎*
小林哲也**

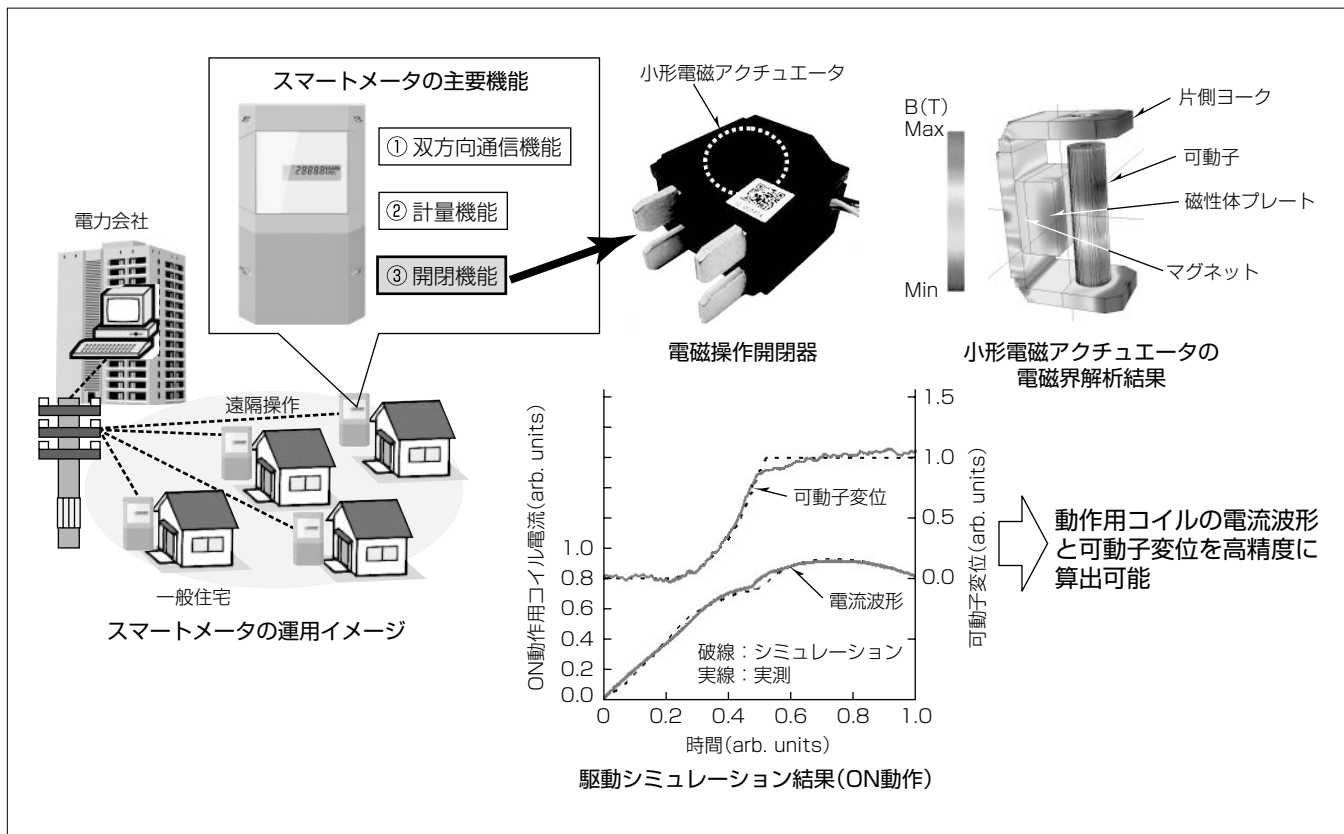
Application of Coupled Simulation of Electromagnetic Field and Motion to Electromagnetically Actuated Relay for Smart Meter
Kyohei Minoda, Kentarou Kokura, Tetsuya Kobayashi

要 旨

近年、ICT(Information and Communication Technology)の活用によって送配電網の電力の流れを供給側・需要側の両方から制御し、需給バランスを最適化するスマートグリッドが日本を含めた世界各国で注目されている。スマートグリッドの構成要素として導入が進みつつあるスマートメータは双方向通信機能を持ち、リアルタイムで電力量を計量し、電力供給回路の遠隔開閉(ON/OFF)制御が可能という特長を持つ。ON/OFF動作を可能とする開閉器の基本性能として、①安定なON/OFF動作、②ON/OFF状態の安定保持が必要である。今回、三菱電機ではこれらの要求を満たすため、電磁操作開閉技術を適用し電磁操作開閉器(AC100V 60A)を開発した。この開発では、一方向組立てが可能な組立て性に優れた片側ヨーク構造にマグネ

ットを採用することで、小形かつ無電力でON/OFF状態の保持が可能な電磁アクチュエータ構造を考案し、電磁界シミュレーションによる電磁力解析から保持力や駆動力を最適化した。また、電磁力と電磁アクチュエータの動作を連成させた駆動シミュレーションの実施によって、設計上流段階で安定したON/OFF動作の可否を定量的に把握することを可能にした。この結果、試作器製作前に部品組立て時のばらつきなどを含めた動作特性の最適化を図ることができ、開発の効率化が可能となった。

本稿ではこれらの手法を用いた小形電磁操作開閉器の構造最適化及び駆動評価のための電磁界・運動連成シミュレーション技術について述べる。



スマートメータ用電磁開閉器の開発

スマートメータの開閉機能を実現するための電磁操作開閉器の開発で、電磁力と電磁アクチュエータの動作を連成させた電磁界・運動連成シミュレーションを実施し、スマートメータに搭載可能な小形化・無電力でのON/OFF保持を実現した。

1. ま え が き

スマートグリッドの構成要素として導入が進みつつあるスマートメータは双方向通信機能を持ち、リアルタイムで電力量を計量し、電力供給回路の遠隔開閉(ON/OFF)制御が可能という特長を持つ。ON/OFF動作を可能とする開閉器の基本性能として、①安定なON/OFF動作、②ON/OFF状態の安定保持が必要である。今回、当社ではこれらの要求を満たすため、電磁操作開閉技術を適用し電磁操作開閉器(AC100V 60A)を開発した。今回の開発では、開閉器の電磁アクチュエータの運動方程式および駆動コイル部の電気回路方程式を連成して計算し、開閉器全体構造の最適化を図った。

本稿では、電磁操作開閉器の駆動評価に用いた電磁界・運動連成シミュレーション技術について述べる。

2. スマートメータの構成

2.1 スマートメータの主要機能

図1にスマートメータの主要機能を示す。スマートメータは双方向通信機能(図1①)、リアルタイムでの電力量の計量機能(図1②)及び遠隔操作によるON/OFF可能な開閉機能(図1③)で構成している。開閉器は電力の安定供給(ON/OFF状態保持)と安全なON/OFF動作の2つの性能が要求される。当社は電磁操作開閉技術と品質工学を適用することで、独自の方式によるスマートメータ用の電磁操作開閉器を開発した。

2.2 電磁操作開閉器の構成

図2は電磁操作開閉器の構造を示した模式図であり、電力供給回路である通電部と通電部をON/OFF動作させる電磁操作装置で構成している。電磁操作装置の電磁アクチュエータには一方向組立て可能な片側ヨーク構造を採用し、これに可動子、ON/OFF動作用コイル、マグネット、磁性体プレートなどを組み込んでいる。マグネットと磁性体

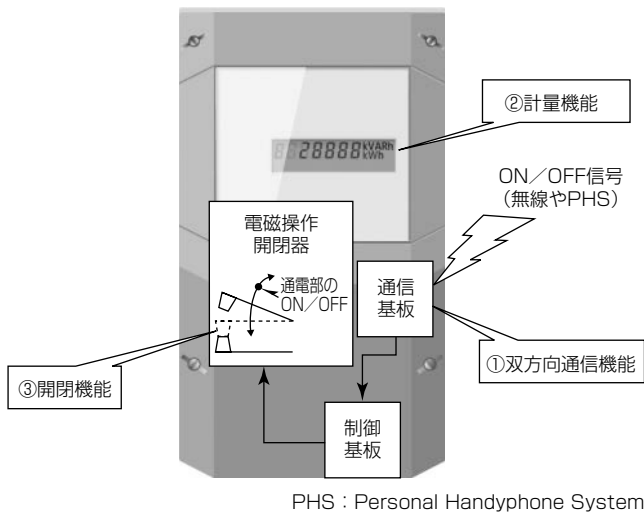


図1. スマートメータの主要機能

プレートで構成される高効率な磁気回路と安定した駆動特性によって2接点を同時に開閉する機構を確立し、無電力でON/OFF状態保持が可能な構造を実現した。電磁アクチュエータと通電部の間の中継部材は駆動棒、押し込みバー、接圧ばねで構成している。通電部は機械耐久性及び通電耐久性に優れた低損失Ag(銀)系電気接点と可とう導体を採用した。

2.3 電磁操作開閉器の基本動作

図3に電磁操作開閉器のON動作過程を示す。以下同図を基にON動作について述べる。

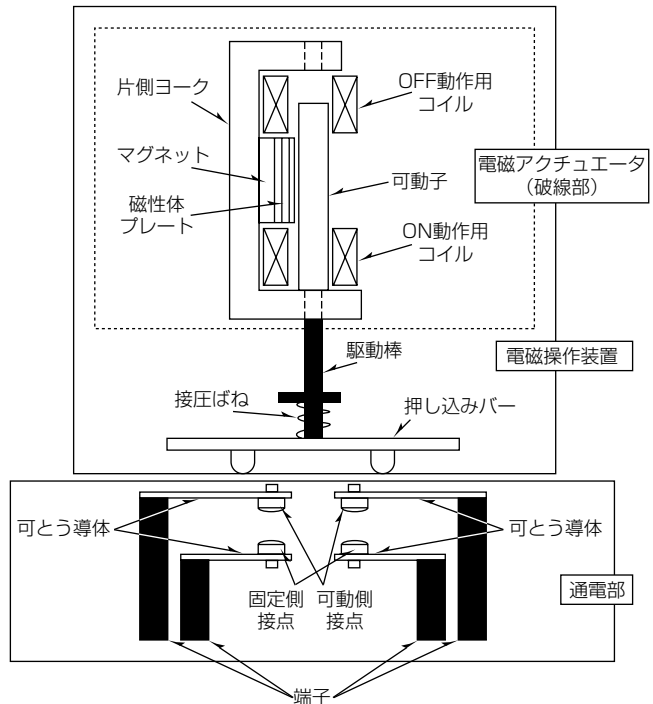


図2. 電磁操作開閉器の構造

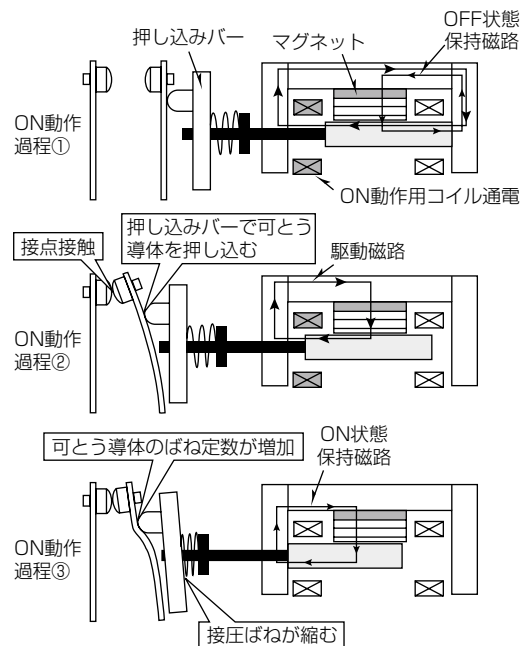


図3. 電磁操作開閉器のON動作過程

【過程①】 OFF状態ではマグネットの磁束による吸着力によって可動子が保持されている。ON動作用コイルへ電圧を印加すると通電が始まり、磁束が発生し、OFF状態保持磁路中の磁束をキャンセルし始める。

【過程②】 さらにON動作用コイルに電流が流れ、可動子に作用するON方向への駆動力が増加し、マグネットによるOFF状態保持力を超えた時点で可動子が動作を開始する。動作中は駆動磁路が形成され、可動子は押し込みバーによって可とう導体を押し込み、接点が接触する。

【過程③】 さらに可動子がON方向への動作を継続し、接点は接触状態のまま押し込みバーが可とう導体を押し込む。その結果、可とう導体のばね定数が増加し、接圧ばねが所望の終荷重まで圧縮され、可動子がヨークと当接すると動作を完了する。

OFF動作は、ON動作と同様である。

3. 電磁界・運動連成シミュレーション技術

3.1 電磁界・運動連成シミュレーション技術の原理

電磁アクチュエータの駆動力は可動子変位と動作用コイル電流に依存するため、静的な荷重評価ではその挙動を想定するのが困難である。電磁アクチュエータを設計する上で、その動作をシミュレーションで把握することは非常に有用である。ここでは、電磁界・運動連成シミュレーションの原理と手法について説明する。

シミュレーションに必要な値となるコイル鎖交磁束量 ϕ 、発生電磁力 F_{mag} 、コイルのインダクタンス L は可動子の変位 x 及びコイル電流 I に依存する。特に L については非線形の磁気特性となるため、 $L=\phi/I$ とならず $d\phi/dI$ して取り扱う必要がある。これらの連立方程式を解くには計算コードが複雑になり、計算時間も長くなる。簡易な計算コードであれば、コードの改訂を行う作業も容易となるため、3つの値(ϕ , F_{mag} , L)を x , I を変数とした関数として取り扱うように設定した。図4はその ϕ の一例で、この図を駆動特性マップと呼ぶ。駆動特性マップは電磁界シミュレーションの静解析によって作成することが可能であり、適切な補間を施すことで電磁アクチュエータの任意の条件下での磁気特性を算出することができる。このマップを関数として準備した上で、電磁アクチュエータの運動及び駆動コイル部の電気回路を連成して計算する。

電磁アクチュエータ可動子の運動方程式を式(1)に示す。ここで、 m ：可動子の重量、 $F_{friction}$ ：摩擦力である。摩擦力については実測値を使用し、校正している。

次に電磁アクチュエータのON/OFF動作用コイルに接続する電源電圧に関する回路方程式は式(2)のように表現できる。ここで、 $V(t)$ ：電源電圧、 R ：外部配線抵抗及びコイル抵抗の和、 ϕ である。ここで、式(2)の右辺第2、3項は $d\phi/dt$ を偏微分展開した形で表現している。

$$m \frac{d^2 x(t)}{dt^2} = F_{mag}(x(t), I(t)) - F_{friction}(x) \dots\dots\dots(1)$$

$$V(t) = I(t) \cdot R + L(x(t), I(t)) \cdot \frac{dI(t)}{dt} + \frac{d\phi(x, I)}{dx} \frac{dx(t)}{dt} \dots(2)$$

図5に、実機におけるON動作特性の実測結果及び計算結果を示す。図中には可動子の変位波形とON動作用コイルに流れる電流波形を示しており、実測と計算とが良く一致していることが分かる。なお、可動子変位波形の動作完了直前(時間0.5~0.6)の領域では、実測とシミュレーションで若干ずれが生じている。これは可動子がマグネット方向へ偏心していることが原因であり、シミュレーションの高精度化のためには可動子の偏心を模擬することが今後の課題である。

3.2 電磁操作開閉器全体の駆動シミュレーション

最終的に電磁操作開閉器全体の挙動をシミュレーションするためには、弾性体(接圧ばね、可とう導体)の動作を式(1)に反映する必要がある。接圧ばねは図2の可動側接点

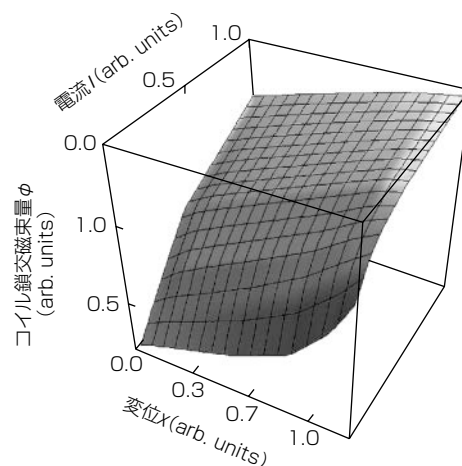


図4. 駆動特性マップの一例 (コイル鎖交磁束量の変位及び電流に対する変化)

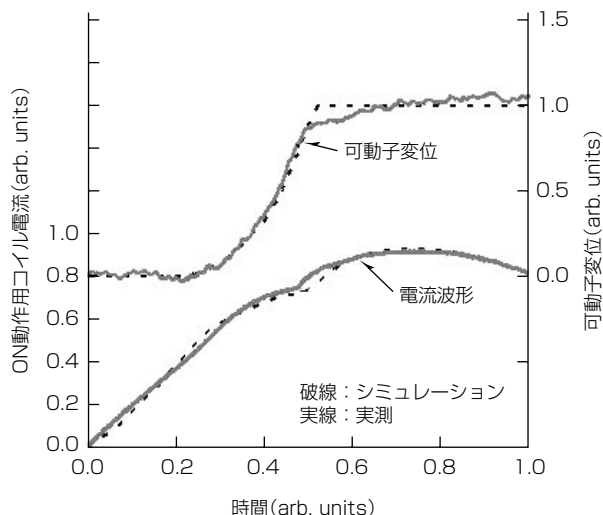


図5. 電磁アクチュエータ単体のシミュレーションと実測の動作波形比較(ON動作)

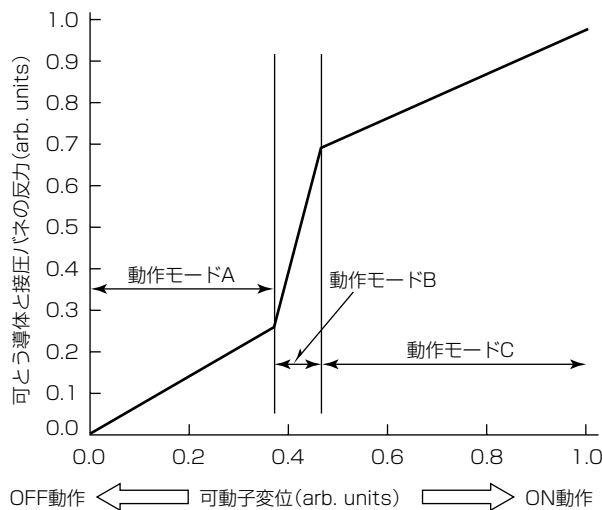


図6. 可とう導体と接圧ばねの反力特性

と固定側接点が接触すると縮み始め、可とう導体は接触の前後で荷重モデルが片持ち梁(はり)モデルから一端固定他端支持梁モデルに変化するため、可とう導体の反力特性に変曲点が発生する。この特性は図6のように3つのモードに分けられる。動作モードAは図2中の押し込みバーによって可とう導体が押し込まれて発生する反力が現れる領域である。動作モードBは可動側接点が固定側接点に接触した結果、一端固定他端支持梁状態となり、接点部が自由な状態に比べ反力が増大する領域となる。動作モードCは可とう導体の反力が接圧ばねの初荷重を超えるため、通電部は剛体とみなすことができ接圧ばねのみ圧縮される領域である。この反力特性を式(1)に適用すると式(3)として表現できる。 F_{spring} は可とう導体と接圧ばねの反力を示している。先に述べた電気回路方程式(2)と運動方程式(3)を連成して計算することで、電磁操作開閉器全体の駆動特性を明確化し、接圧ばねや可とう導体の最適化を図った。図7に実機のON動作特性における実測結果及び計算結果を示す。可動子変位波形は、計算と実測はおおむね一致していることが分かる。これらから、電磁界・運動連成シミュレーション

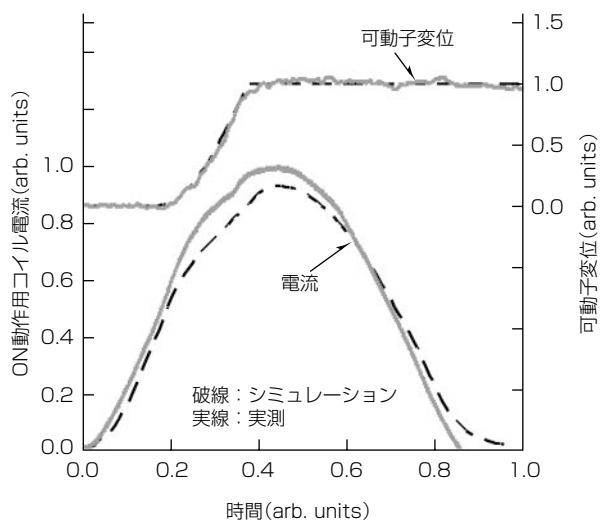


図7. 電磁開閉器全体の動作におけるシミュレーションと実測波形の比較 (ON動作)

の採用によって実機を高精度に模擬することが可能であり、かつこのシミュレーション手法によって設計上流段階から電磁アクチュエータと各種弾性体(可とう導体と接圧ばね)とを組み合わせた総合性能評価が可能であることを確認した。

$$m \frac{d^2x(t)}{dt^2} = F_{mag}(x, I) + F_{spring}(x) - F_{friction}(x) \dots \dots \dots (3)$$

4. む す び

スマートメータの遠隔負荷開閉を可能とする電磁操作開閉器の開発に電磁界シミュレーションを適用し、スマートメータに搭載可能な小形かつ無電力によるON/OFF状態保持が可能な開閉器の構成を検討した。さらに、電磁界・運動連成シミュレーションによる電磁操作開閉器全体の駆動評価を実施した。これらシミュレーション技術の実用化によって、設計上流段階で開閉器全体の駆動特性を定量的に把握でき、開発期間の短縮を図ることが可能となった。今後も、更なるシミュレーションの精度向上に向けて検討を継続し、開閉器の高性能化を追求していく。