“WS-Vシリーズ”の電子式・漏電遮断器用釈放リレーのタグチメソッドを用いた電磁力設計

牧田　陽*　杉本康浩**
中川隆文*
春名一志*

Design Technologies of Electromagnetic Relay Using Taguchi Method for MCCB and ELCB of "WS-V Series"

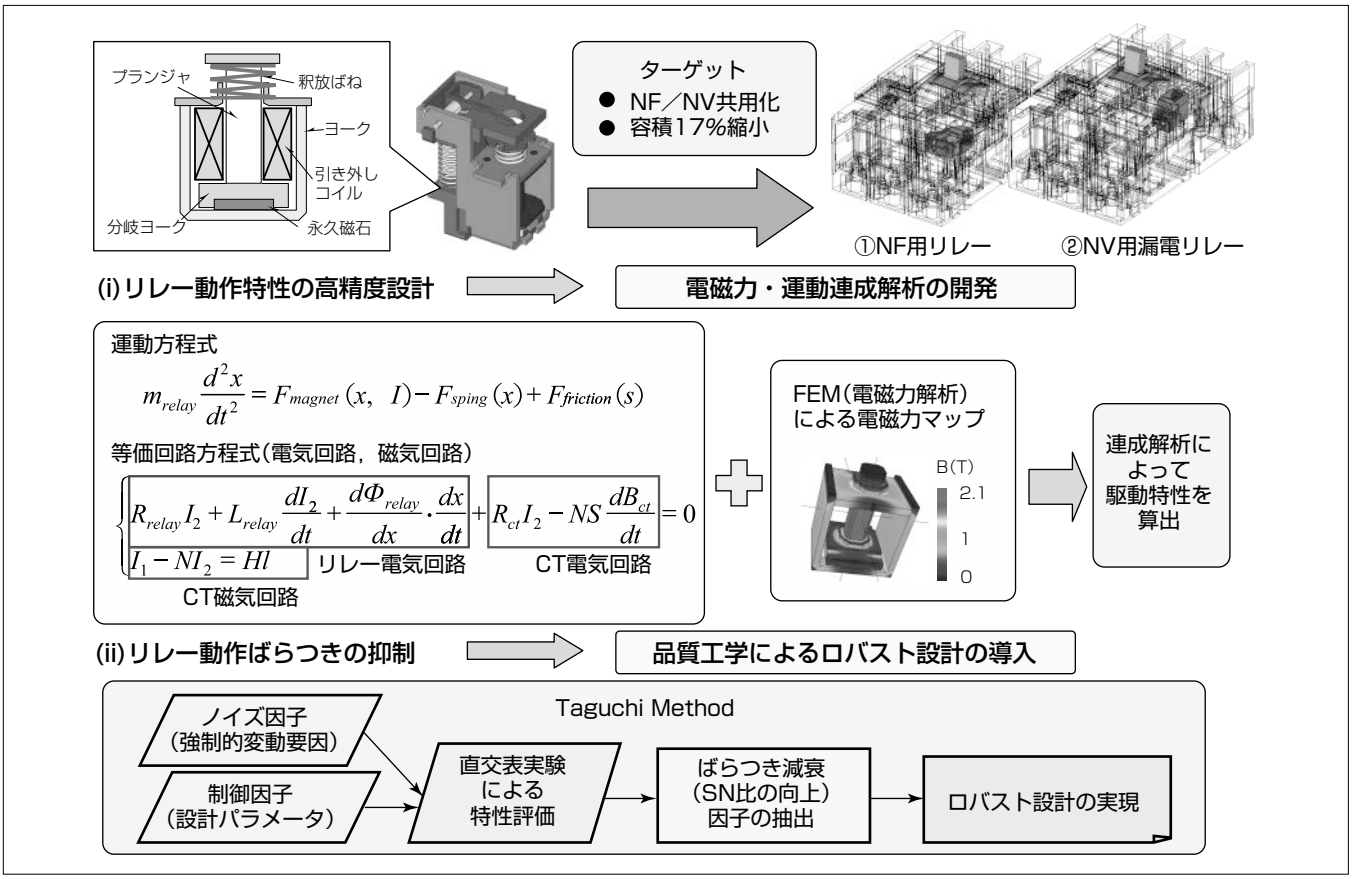
Yo Makita, Takafumi Nakagawa, Kazushi Haruna, Yasuhiro Sugimoto

要　旨

電子式遮断器や漏電遮断器の引き外し機構のキーパーツの一つとして，釈放リレーが使われている。このリレーは外部信号によりリレーを動作させ，これをトリガーとして，短絡事故や漏電事故時のトリップ(引き外し操作)を行うもので，永久磁石により無電力で吸着保持し，引き外しコイルを励磁して吸着力を相殺する電磁力を加えると，ばね力により釈放動作する。

遮断器の小型化と動作信頼性を補償した設計を行うためには，釈放リレーの高効率化と過渡的な釈放動作を精度良く再現できる解析技術が重要となる。そこで，釈放リレーの動作特性を解析するために，電磁界運動連成解析による電磁駆動設計技術を構築した。また，リレーの動作ばらつきを低減するために，タグチメソッド(品質工学)を用いて部品の公差と組立てばらつきや使用条件を考慮したロバスト設計を実施した。

その結果，開発初期品と比較してリレー容積を17%縮小し，動作電流ばらつきを5 mA以内(3σ値)に低減した。また，動作特性解析技術により動作時間の安定性を検証した。今回開発した設計技術を用いることにより，開発工程においても試作コスト低減や開発期間の短縮化を達成した。本稿では，構築した釈放リレーの駆動設計技術とタグチメソッドによる電磁力最適設計技術について述べる。



新型ノーヒューズ遮断器WS-Vシリーズの電子式・漏電遮断器用釈放リレーのタグチメソッドによるロバスト設計

動作特性の高精度解析手法として，電磁力と力学運動を連成解析した電磁駆動設計技術を構築し，タグチメソッド(品質工学)を適用した釈放リレーのロバスト電磁力設計を実施した。その結果，本体容積を17%縮小化し，電子式遮断器と漏電遮断器にも共用可能な動作電流ばらつきの小さいリレーを開発することができた。

*先端技術総合研究所(工博)　**福山製作所

1. まえがき

電子式遮断器や漏電遮断器の引き外し機構のキーパーツの一つとして，釈放リレーが使われている。釈放リレーは永久磁石と電磁石で構成されており，永久磁石を設けることで無電力で吸着状態を維持し，コイルを励磁して永久磁石による吸着保持力を相殺する電磁力を加えることで，短絡事故や漏電事故時のトリップ(引き外し操作)を行う。

遮断器の更なる小型化と動作信頼性向上を補償するためには，釈放リレーの高効率化と過渡的な動作解析が重要となる。そこで，リレーの動作特性を解析するために，電磁界運動連成解析による電磁駆動設計技術[1]を開発した。さらに，リレーの動作ばらつきを低減するために，タグチメソッド(品質工学)[2]を用いて部品の公差と組み立てばらつきや使用条件を考慮したロバスト設計を実施した。

これらの結果を“WS－Vシリーズ”電子式・漏電遮断器の釈放リレーの小型・高効率化設計に反映した。本稿では構築した釈放リレーの駆動設計技術とタグチメソッドによる電磁力最適設計技術について述べる。

2. 釈放リレー電磁駆動設計

2.1 釈放リレーの構造と動作原理

釈放リレーの断面図を**図1**に示す。釈放リレーは，プランジャ，ヨーク，分岐ヨーク，引き外しコイル及び永久磁石で構成される磁気回路部と，引き外し動作時の駆動力になる釈放ばねで構成される。

釈放リレーの動作原理について述べる。釈放動作時以外は永久磁石によってプランジャは吸着保持されている。釈放動作時は，プランジャに吸着保持時に通過する磁束と反対方向の磁束を発生させるよう引き外しコイルに通電し，プランジャの吸着力を減少させ，釈放ばね力が吸着保持力より大きくなると引き外される。

釈放リレーの小型化や動作の高効率化(動作ばらつき低減)を確立するためには，この動作原理を精度良く再現できる解析技術を構築する必要がある。また，ばね荷重や磁性材料の磁気特性のばらつき因子，さらに寸法公差等の製造上のばらつき要因を十分考慮した上で，最適設計値を抽出することが重要となる。そこで解析技術の高度化として，**2.2節**で述べる電磁界運動連成解析を適用した。また，各種ばらつきの動作特性への影響を考慮した設計を実現するため，**3章**で述べるタグチメソッドによるロバスト設計を適用した。

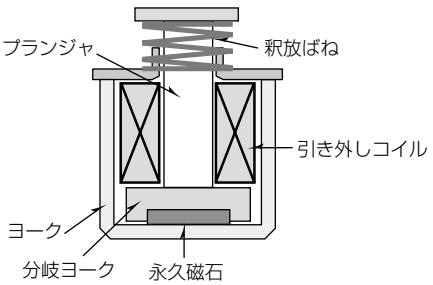


図1．釈放リレー断面図(吸着状態)

2.2 電磁界運動連成解析技術の適用

有限要素法電磁界解析と運動を連成した釈放リレー電磁駆動解析技術について述べる。この手法は，まず釈放リレー磁気回路内のプランジャに発生する磁束ϕ_{mrd}と電磁力F_{mrd}のコイル電流I_2及びプランジャ位置xに対する依存性を，有限要素法三次元電磁界解析によって算出する。さらに，次に説明する式(1)～式(4)を連成解析することで，従来の有限要素法を用いた電磁界運動連成解析に比べ，計算時間の高速化を図る[3]。

式(1)は電気回路方程式であり，左辺2項目は釈放リレー駆動時の磁気特性の変化に伴うインピーダンス変化を示す。また，右辺は釈放リレー駆動電源であるブレーカ本体搭載の電流センサ(CT)の二次出力成分である。式(2)，式(3)はCTの磁気飽和による影響を考慮するための式である。

$$(R_{mrd}+R_{ct})\cdot I_2+\frac{d\phi_{mrd}(x(t),\ I_2(t))}{dt}=NS\frac{dB_{ct}}{dt} \quad \cdots\cdots(1)$$

$$I_1-NI_2=Hl \quad \cdots\cdots(2)$$

$$B_{ct}=\mu H \quad \cdots\cdots(3)$$

x ：釈放リレーストローク
R_{mrd} ：釈放リレーコイル抵抗
R_{ct} ：CT抵抗
Φ_{mrd} ：釈放リレー鎖交磁束
N ：CT巻線ターン数
S ：CT鉄心断面積
l ：CT磁路長
I_1 ：1次電流(導体通電電流)
I_2 ：2次電流(CT出力)
B_{ct} ：CT内部磁束密度
μ ：CT内部透磁率
H ：CT内部磁界

式(4)は運動方程式であり，駆動部質量m_{mrd}，電磁力F_{mrd}，ばね力F_{sp}，及び摩擦力をF_{fric}として，次のように表現できる。

$$m_{mrd}\frac{d^2x}{dt^2}=F_{mrd}(x,I_2)-F_{sp}(x)+F_{fric}(x) \quad \cdots\cdots(4)$$

この駆動解析手法を用いた釈放リレー動作時のコイル電流と動作ストロークの解析結果と実測値の一例を**図2**に示す。コイル電流値並びに動作ストロークとも解析結果は実測値を精度良く再現しており，動作時間を考慮した釈放リレー駆動設計技術として，この解析技術が有効であることが確認できた。

3. タグチメソッドの適用

3.1 評価特性の選定

今回の開発でタグチメソッドを適用したシステムは，釈放リレーの磁気回路構成である。動作電流と動作電流ばらつきがともに小さい(望目特性)ほど，理想的な磁気回路構成であるとした。

3.2 制御因子とノイズ因子の抽出

制御因子は設計寸法等，対象とするシステムの中で設計者が自由に設定できるパラメータであり，最適水準が分かればそれを設計値に採用できる。一方，ノイズ因子は，環境変化や個体差等のシステムの中で設計者が制御できない因子として定義され，性能ばらつきの原因となる。**図3**は特性要因図と呼ばれるもので，両因子を構成する代表的な要因をそれぞれ表記した。

今回の設計では，制御因子として**図3**中の要因の中から電磁力特性に有効な設計寸法として**表1**中のA～Hの8因子を抽出した。ノイズ因子についてはばね荷重，永久磁石の着磁量(Br)等，**表2**中の4因子を抽出した。**表1**，**表2**には抽出した項目のほか，各項目における水準も示した。また**表3**にL18直交表における水準割り付けを示す。

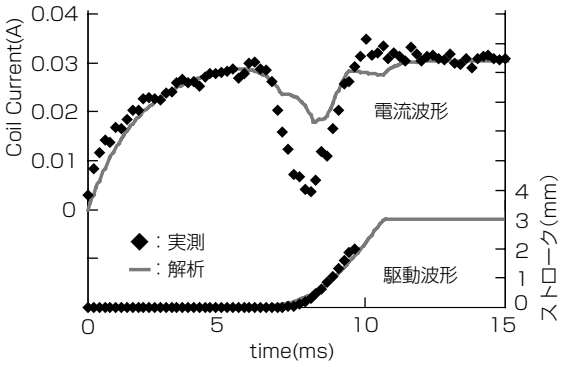


図2．釈放リレー動作時の解析と実測の波形比較

表1．制御因子

制御因子	水準1	水準2	水準3
A　可動子長	短	長	
B　永久磁石Br	減	標準	増
C　分岐ヨークgap	小	中	大
D　分岐ヨーク幅	小	中	大
E　ヨーク厚	小	中	大
F　軸受け長	小	中	大
G　軸受けgap	小	中	大
H　可動子径	小	中	大

表2．ノイズ因子

ノイズ因子	水準1	水準2
寸法公差	＋側	－側
摩擦力	小	大
ばね力	大	小
永久磁石Br	大	小

表3．L18直交表

実験	制御因子							
No.	A	B	C	D	E	F	G	H
1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	2	2	2	2	2	2
3	1	1	3	3	3	3	3	3
4	1	2	1	1	2	2	3	3
5	1	2	2	2	3	3	1	1
6	1	2	3	3	1	1	2	2
7	1	3	1	2	1	3	2	3
8	1	3	2	3	2	1	3	1
9	1	3	3	1	3	2	1	2
10	2	1	1	3	3	2	2	1
11	2	1	2	1	1	3	3	2
12	2	1	3	2	2	1	1	3
13	2	2	1	2	3	1	3	2
14	2	2	2	3	1	2	1	3
15	2	2	3	1	2	3	2	1
16	2	3	1	3	2	3	1	2
17	2	3	2	1	3	1	2	3
18	2	3	3	2	1	2	3	1

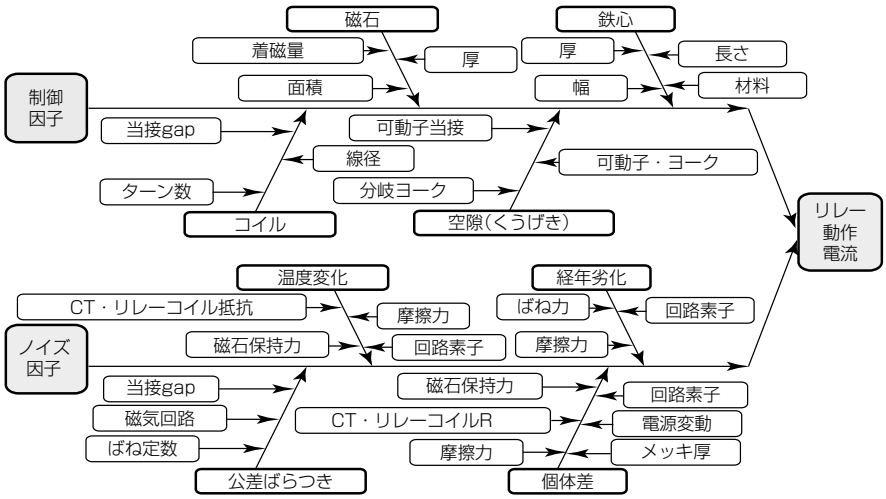


図3．釈放リレーの特性要因図

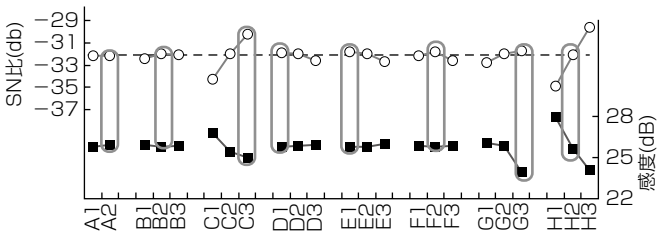


図4．釈放リレーの要因効果図

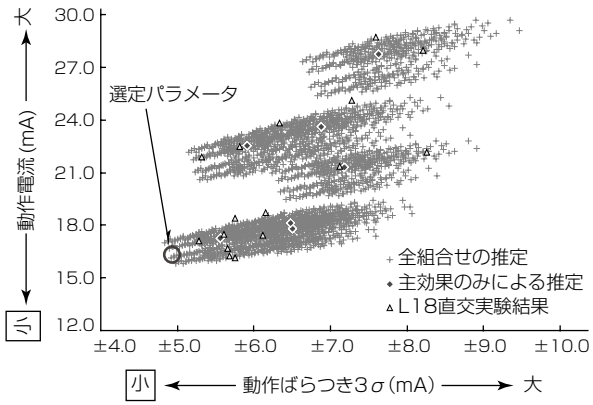


図5．釈放リレーの特性分布図

3.3 L18直交表による設計パラメータの最適値抽出

図4はL18直交表に基づいて実施した解析結果から得られた要因効果図と呼ばれるもので，**表1**中の制御因子A～Hによる感度及びS/N比(Signal to Noise ratio)の変化を示している。**図5**は制御因子A～Hの全組合せの感度及びS/N比を，動作電流及び動作電流ばらつきに換算した特性分布図(Performance Robustness Map)である。**図4**の縦長の円で囲んだ水準が動作電流と動作ばらつきを最も小さくすることができる最適水準である。最適水準を選出することで動作電流が16±5mA(**図5**中の丸の位置)まで低減可能であることを確認した。**図4**の最適水準を設計パラメータとした試作器を製作し，実測による性能評価を実施した。

3.4 確認実験

性能評価は4台の試作器を用いて試料ごとに各100回の釈放動作電流を実測し，動作電流の平均値とばらつき(3σ値)を計算した。実測とタグチメソッドによる推定値の比較を**図6**に示す。推定値16±5mA(ばらつき3σ値)に対し，16±4.3mA(同)の実測結果が得られた。これらのことからタグチメソッドによるパラメータ設計によって，動作電流と動作電流ばらつきがともに低減できており，この設計手法による有効性を確認できた。

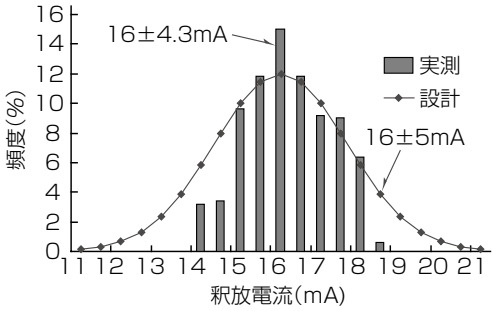


図6．釈放リレーの動作電流ばらつき

これらの結果をWS-Vシリーズ電子式・漏電遮断器に搭載する釈放リレー設計に反映し，小型・高効率化を図ることができた。

4．むすび

本稿では，WS-Vシリーズ電子式・漏電遮断器における釈放リレーの小型・高効率化(動作ばらつき低減)を目的として，タグチメソッド(品質工学)による電磁力設計を行った。その結果，開発初期品に対し，容積を17%縮小し，動作電流ばらつきを5mA以内(3σ値)に低減できた。さらに，タグチメソッドの適用によって試作回数が減り，開発期間を縮小することができた。今後，この手法の適用拡大を進めていく。

参考文献

(1) Takeuchi，T.，et al.：An Electromagnetically actuated vacuum circuit breaker developed by electromagnetic analysis coupled with motion，IEEJ Trans. PE，**124**，No.2，321～326（2004）
(2) 田口玄一：技術開発のための品質工学(品質工学応用講座)，日本規格協会（1994）
(3) 竹内敏惠：電磁界運動連成解析による電磁駆動設計技術，三菱電機技報，**79**，No.11，699～702（2005）