

# 低圧気中遮断器 “World Super AE Vシリーズ Cクラス”

Low Voltage Air Circuit Breakers "World Super AE V Series C-class"

信太秀夫\*  
Hideo Shida  
江古憲一\*  
Kenichi Ego  
岩下説志\*  
Hisashi Iwashita

相良雄大†  
Yuta Sagara

## 要 旨

三菱電機の低圧気中遮断器の現行機種である“World Super AEシリーズ”(以下“AE-SWシリーズ”という。)は、市場投入から10年以上が経過しており、その間、欧州の競合他社はモデルチェンジによる性能アップだけでなく、ローレンジシリーズをラインアップし、ミドル/ローレンジ市場を狙った製品構成を充実させてきた。また、近年では、ビルや生産現場の省エネルギー志向の高まりによって集中監視/制御など、計測・ネットワーク対応の要求とともに、受配電盤製造時の省施工化の要求も高まっている。

このような背景から、特に、海外の商業ビル、ホテル、

マンション等、現行機種では参入が難しかった市場をターゲットに、ローレンジモデルでありながら、リモート投入動作を標準化した新形低圧気中遮断器“World Super AE Vシリーズ Cクラス”をラインアップした。

新形低圧気中遮断器の主な特長は次のとおりである。

- (1) リモート投入操作の標準機能化
- (2) 水平垂直切替え端子の採用
- (3) 付属装置(AX(警報スイッチ)/SHT(電圧引き外し装置)/UVT(不足電圧引き外し装置))取付けの容易化
- (4) 消費電力と保守点検部品の削減



## 低圧気中遮断器“World Super AE Vシリーズ Cクラス”

World Super AE Vシリーズ Cクラスは、低圧受配電市場では業界初となる電磁ソレノイド式投入機構を採用し、スプリング機構、投入装置、電動投入ばね圧縮機構の機能を一つに集約した。部品点数を削減することで、保守点検時の停電時間の短縮及び保守点検部品の削減を実現した。

## 1. ま え が き

当社の低圧気中遮断器の現行機種であるAE-SWシリーズは、市場投入から10年以上が経過しており、その間、欧州の競合他社はモデルチェンジによる性能アップだけでなく、ローレンジシリーズをラインアップし、ミドル／ローレンジ市場を狙った製品構成を充実させてきた。また、近年では、ビルや生産現場の省エネルギー志向の高まりによって集中監視／制御など、計測・ネットワーク対応の要求とともに、受配電盤製造時の省施工化の要求も高まっている。

このような背景から、特に、海外の商業ビル、ホテル、マンション等、現行機種では参入が難しかった市場をターゲットに、ローレンジモデルでありながら、リモート投入動作を標準化した新形低圧気中遮断器“World Super AE Vシリーズ Cクラス”(以下“AE Vシリーズ Cクラス”という。)をラインアップした。

AE Vシリーズ Cクラスの主な特長及び低圧受配電市場では業界初<sup>(注1)</sup>になる電磁ソレノイド式投入機構の技術開発と、短時間耐電流性能実現の解析手法について述べる。

(注1) 2020年11月12日現在、当社調べ

## 2. AE Vシリーズ Cクラスのラインアップと特長

### 2.1 AE Vシリーズ Cクラスのラインアップ

当社の低圧気中遮断器のラインアップを表1に示す。今回ラインアップした新機種は630～1,600Aフレーム(表1の黒太線枠部分)である。

### 2.2 AE Vシリーズ Cクラスの特長

#### 2.2.1 リモート投入操作の標準機能化

受配電盤に使用される低圧気中遮断器は、リモート投入操作のニーズが高く、標準機能化が求められている。現行機種では、投入ばねを用いたばね操作機構に加えて、別途、ばねの蓄勢及び開放操作が必要になる。このため、図1に示すように、付属装置として蓄勢用にモータ、開放用に投

入コイルが用いられていたが、標準機能化にはばね操作機構含めて、これらの機能集約が必要であった。そこで、電磁ソレノイドを用いた操作機構を開発し、これらの機能を集約することでリモート投入操作の標準機能化を実現した。

#### 2.2.2 ユーザーフレンドリ設計

##### (1) 水平垂直切替え端子

受配電盤の急な仕様変更に対応するため、水平垂直切替え端子を開発し、主回路接続端子の水平端子形と垂直端子形への切替えが容易にできる構造にした。

##### (2) 付属装置(AX(警報スイッチ)／SHT(電圧引き外し装置)／UVT(不足電圧引き外し装置))取付けの容易化

受配電盤製造時の省施工化の要求を達成するために、低圧気中遮断器で改造頻度の多い付属装置AX, SHT, UVTを本体上部に集約し、該当箇所の本体カバーだけを部分的に着脱できる構造にした(図2)。

#### 2.2.3 消費電力と保守点検部品の削減

現行機種AE-SWシリーズは投入ばねを用いたばね操作機構のため、投入操作前に投入ばねをモータで蓄勢

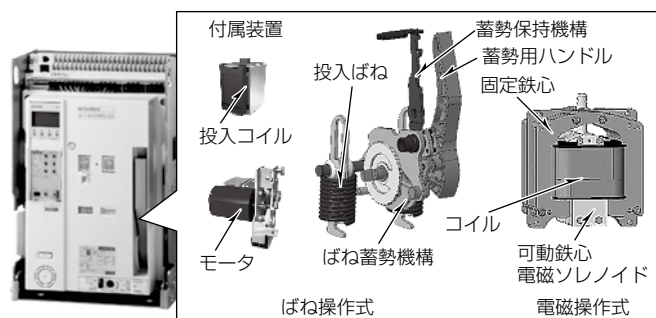


図1. リモート投入操作機構の変更

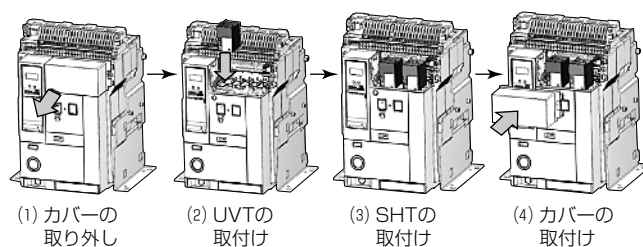


図2. 付属装置の取付け手順

表1. 低圧気中遮断器のラインアップ

アンペア フレーム サイズ	630	1,000	1,250	1,600	2,000	2,500	3,200	4,000	5,000	6,300
AEV シリーズ Cクラス (新機種)	AED630-CV	AED1000-CV	AED1250-CV	AED1600-CV	—	—	—	—	—	—
AE-SW シリーズ (現行機種)	AE630-SW	AE1000-SW	AE1250-SW	AE1600-SW	AE2000-SWA	—	—	—	—	—
	—	—	—	—	AE2000-SW	AE2500-SW	AE3200-SW	AE4000-SWA	—	—
	—	—	—	—	—	—	—	AE4000-SW	AE5000-SW	AE6300-SW

(チャージ)する必要があった。AE Vシリーズ Cクラスは、電磁ソレノイド操作機構のため、チャージ操作が不要になり、低消費電力を実現した。同時に、機構部を新規設計することで、保守点検時の停電時間の短縮及び保守点検部品の削減も実現した。

### 3. AE Vシリーズ Cクラスの技術的特長

#### 3.1 電磁ソレノイド操作機構の開発

電磁ソレノイド操作機構の開発は、ソレノイドが受ける機械的反力の最小化(投入機構の最適化)と、ソレノイドの高出力化が課題である。これに対して、ロバスト最小化技術の開発で投入機構を最適化するとともに、電磁ソレノイドの新構造開発で高出力化を達成し、課題を解決した。

##### 3.1.1 投入機構の最適化

投入機構の最適化は、新たに粒子群最適化(PSO)法を活用することで実現した。この手法は、数式化した機構の挙動及び力の釣合いに対して、式(1)に示す、要求仕様との誤差を評価する関数 $J$ を定義して自動で最小化する、つまり、要求仕様に沿った機構配置を自動探索する方法である。このとき、要求仕様の項は複数存在するため、図3に示すとおり、評価関数 $J$ は多次元的な波形になるが、この手法では局所解ではなく全体の最小解を探索可能である。また、評価関数 $J$ には、ソレノイドが受ける機械的反力の項も含んでおり、通常の方法と比較して、全要求仕様含めて、ばらつきを下げることに成功した。

$$J = a_1(L_1 - L_{1max})^2 + a_2(L_2 - L_{2max})^2 \dots + a_n \sum \left( \frac{\partial F}{\partial P_n} \right) \quad (1)$$

- $a_i$  : 各要求パラメータの重み係数
- $L_i$  : 各要求パラメータ設計値
- $L_{imax}$  : 各要求パラメータ最大値
- $F$  : 機械的反力
- $P_n$  : 各機構部品の位置

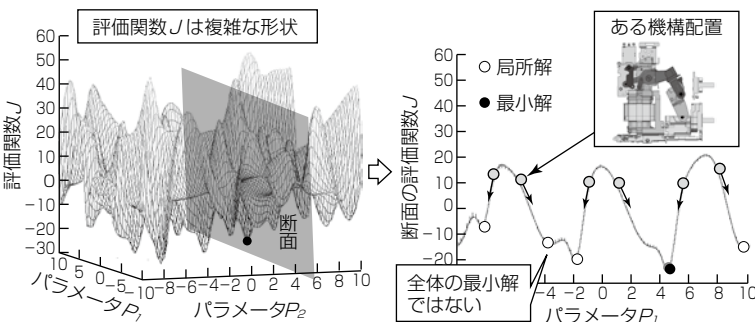


図3. 評価関数のイメージ

#### 3.1.2 電磁ソレノイドの高出力化

電磁ソレノイドの高出力化には、高いコイル電流域での動作が必要になる。図4は典型的なコイル電流波形である。電磁ソレノイドが動作すると、コイルの逆起電力によって電流が低下する。例えば、初動が早い(遅い)電磁ソレノイドの動き出しを点A(A')、動作完了を点B(B')とすると、鉄心が磁気飽和しない場合、出力はおおむねコイル電流の二乗に比例するため、高出力化には初動時の電流(初動電流)を増加させることが重要である。

図5に、通常の電磁ソレノイドと開発品の概略図を示す。共通点は、可動鉄心と固定鉄心の吸着面をテーパにした点である。これは、吸着面が平坦(へいたん)な場合に比べて、可動-固定鉄心間の距離 $b$ を短縮して磁気抵抗を低下できるため、コイル電流が一定の場合、初期位置の出力を増加できる。ただし、この構成では、図4のとおり、コイル電流は徐々に増加するため、テーパ形状の場合、平坦形状に比べて初動電流が低下する。

そこで、この課題を解決するために新たに可動鉄心と固定鉄心間に突起部を設けた。これによって、初期位置の可動鉄心には、出力方向に対して逆向きの磁氣的吸着力が付与されるため、出力が低下して初動電流が増加する。可動鉄心の動作後は、突起部間の空隙が拡大するため、磁気抵抗が増加して磁氣的吸着力は消失するため、出力は改善する。図6は定格操作電圧DC110Vで出力を比較した図である。この構造によって初動電流を約1.7倍(3.0→5.2A)増加させて、通常の電磁ソレノイドに比べて約50%の高出力化を実現した。

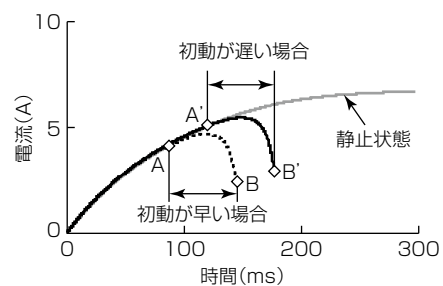


図4. 電磁ソレノイドのコイル電流波形

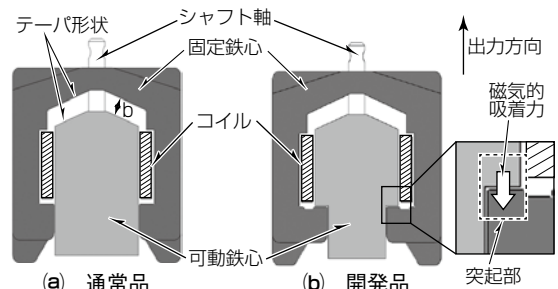


図5. 電磁ソレノイドの概略図



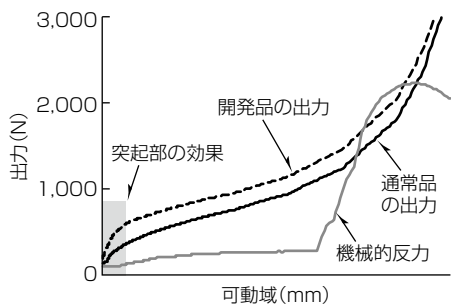


図6. 電磁ソレノイドの出力比較

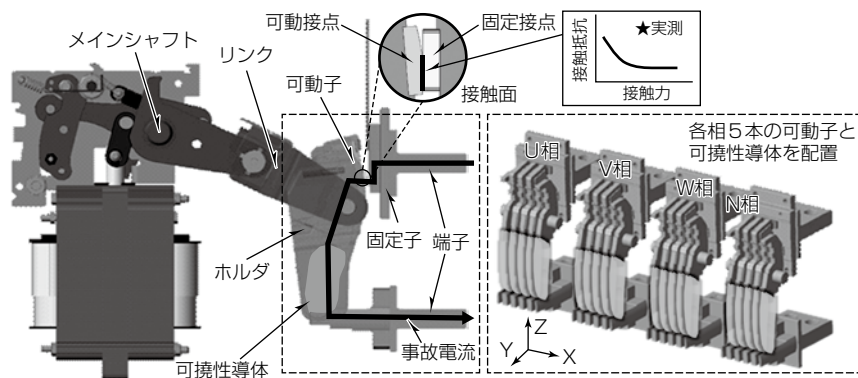


図7. 電磁界解析モデル

### 3.2 短時間耐電流性能実現の解析手法

#### 3.2.1 短時間耐電流性能

短時間耐電流性能とは、事故電流が発生してから他の遮断器等で遮断するまでの間、事故電流を安定して通電する性能である。AE Vシリーズ Cクラスは、事故電流50kArmsで1秒間の短時間耐電流性能を持つ。この間、通電導体に発生する数百～数千Nのローレンツ力を制御して、接点間での接触不良による発弧や応力集中による樹脂部品の破損等を防止する必要がある。

そこで、この課題を解決するために電磁界解析と機構解析を連携させ、事故電流通電時の部品の挙動や発生応力を定量化して制御することで短時間耐電流性能を達成した。

#### 3.2.2 短時間耐電流の電磁界解析モデル

電磁界解析ソフトウェアを用いて、事故電流通電時のローレンツ力を定量化した。図7はその解析モデルである。各相に可動子と可動子に接合された可撓(かとう)性導体(以下“可動導体”という。)が1極当たり5組並列配置される。入力条件は過渡電流を考慮した三相の事故電流50kArmsで、各可動導体に枝分かれする電流(分流)分布を解析して、XYZ方向に発生するローレンツ力を時刻歴で出力した。各可動導体は、端子部の電流経路による磁場でY方向のローレンツ力を受ける。そのほか、各可動導体は枝分かれした分流電流によって、互いに引き合う向き(X方向)にローレンツ力が発生する。このX方向のローレンツ力には、他相を流れる事故電流の磁場の影響も重畳される。

なお、この解析は、各可動導体の電流分布を精度よく解析するため、表皮効果を考慮するとともに可動-固定接点の接触面に生じる接触抵抗は、実測結果を組み込んでいる。

#### 3.2.3 短時間耐電流の機構解析モデル

機構解析については、各可動導体のXYZ方向のローレンツ力を時刻歴で入力し、部品の弾性変形や運動量を過渡的に解析した。図8はその機構解析モデルである。なお、

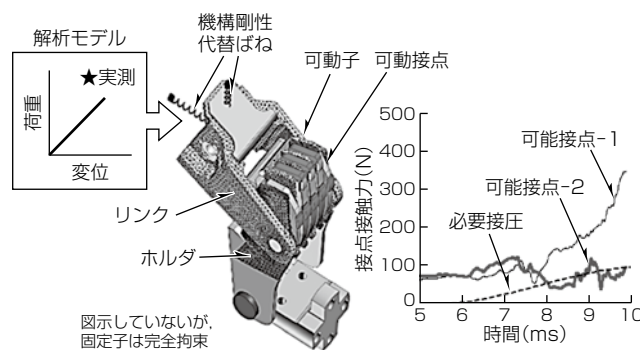


図8. 機構解析モデル

固定子は図示していないが、解析上で完全拘束している。この解析モデルは、計算コストを削減するため、メインシャフトを含めた機構部品をばねで代表させ、ばね定数は実測結果を組み込んでいる。

この解析によって、リンクやホルダに発生する応力だけでなく、可動-固定接点間の接触力を時刻歴で定量評価できる。例として、短時間耐電流中に接点間で発弧したケースの解析例も図8に示す。解析条件は、電流50kArmsの投入位相V相ゼロ度である。発弧したU相で、可動接点5個のうち2個を抽出して接点接触力を時刻歴で示す。なお、必要接圧は、溶融電圧と接点反発力から算出しており、接点接触力が必要接圧を下回ると接触不良になるというしきい値である。解析結果では、約8ms時点で可動接点-2の接点接触力が必要接圧を下回っており、実機の発弧タイミングと一致することを確認し、解析結果の妥当性を検証した。

この解析技術を活用することで、各部品の寸法公差や組立てばらつきを考慮した設計が可能になり、短時間で短時間耐電流性能を確立するとともに、高い信頼性を確保できた。

## 4. むすび

低圧気中遮断器の新機種の特長と、それに搭載した電磁ソレノイド操作機構の技術開発と短時間耐電流性能実現の解析手法について述べた。今後、ローレンジ機種種の拡充と新形ハイレンジ機種種の開発に取り組んでいく。