

耐震強化型 550kV 気中断路器

■ 高橋 徹夫
Tetsuo Takahashi

■ 永田 清志
Kiyoshi Nagata

■ 大山 友幸
Tomoyuki Oyama

■ 神田 一彦
Kazuhiko Kanda

1 はじめに

550kV 2000A・4000A・8000A 水平中心一点切 THB 形気中断路器の耐震性能向上を目的として、同断路器用の軽量化型導電部および衝撃緩衝装置付き中間ピンジョイントを製品化した(形式 THB5-L)。

2011 年東北地方太平洋沖地震では、550kV THB 形断路器において、操作がいし、支持がいしが破損するといった、これまでに経験のない甚大な被害を経験した。今後同規模の地震が発生した場合でも機器性能が維持できるように、550kV THB 形断路器の耐震強化改良を行った。製品化にあたっては、耐震強度の検証のため実加振試験を行うとともに、耐震解析モデルを構築し、断路器の耐震性能向上メカニズムの確認、FEM(Finite Element Method) による地震応答解析を実施した。

2 仕様

今回耐震強化した550kV 2000A・4000A・8000A 水平中心一点切 THB5 形断路器の主な仕様を表1に示す。

表1 550kV 2k/4k/8kA 水平中心一点切 THB5 形断路器の仕様

名称	水平中心一点切断路器		
構成	単柱操作 三角すい支持		
形式	THB5 形 L 式		
定格	電圧(kV)	550	
	電流(A)	2000・4000・8000	
	短時間耐電流	63 kA / 通電時間: 2 s	
絶縁強度		対地	同相主回路間
	雷インパルス(kV)	1800	$1800+550\sqrt{2/\sqrt{3}}$
	開閉インパルス(kV)	1175	1175
	商用周波(kV)	475-635-475	840
準拠規格	交流断路器 JEC-2310		

3 550kV 断路器の構造と耐震強化策

今回耐震強化した単柱操作三角すい支持型の550kV 8000A THB5 形断路器を図1に示す。導電部は三角すい構成の支持がいしで支えられ、鉛直の単柱構成である操作がいしによって導電部を開閉操作する。操作がいしの上端・中間・下端部はピンジョイント構造で、導電部の支持はしていない。

今回、中間ピンジョイント機構の改良および導電部の軽

量化による耐震強化を実現し、既設がいし装置・架台・操作装置は流用することで、既設 THB 形断路器との互換性や対策費の低減にも配慮した。

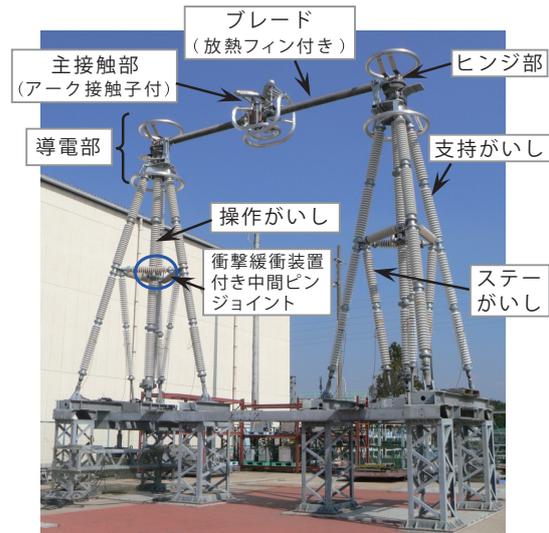


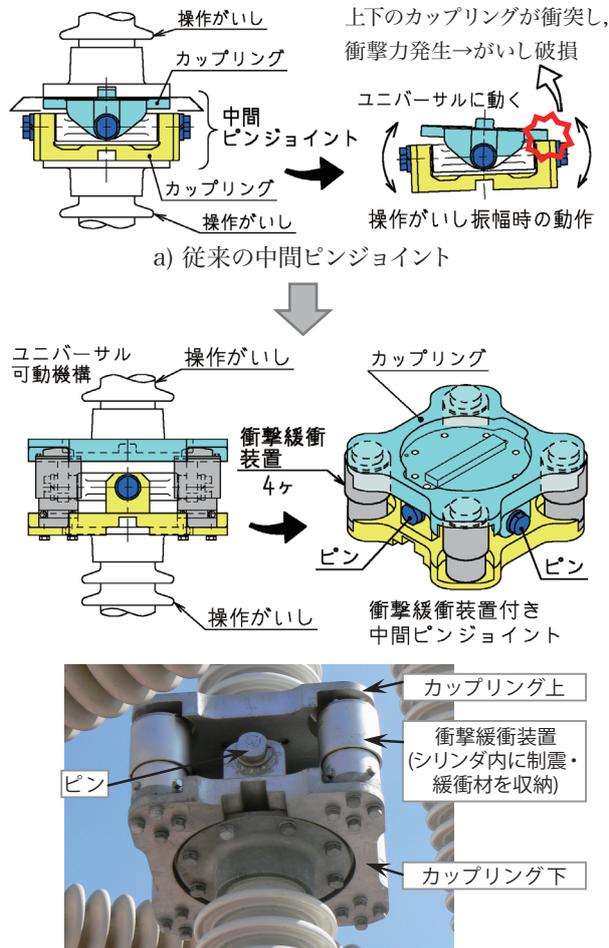
図1 550kV 8000A THB5形断路器 (1相分)

3.1 中間ピンジョイントの改良

従来形の550kV THB 形断路器は、過去の地震(1987年福島県沖地震)において、操作がいしが破損したことを踏まえて、地震動による応力が集中する操作がいしの中間部にピンジョイント機構を設け、操作がいしの曲げ応力を緩和する免震構造としていた。しかし、2011年東北地方太平洋沖地震は、日本の耐震設計基準(JEAG5003)⁽¹⁾を大きく上回る地震動レベルであったことから、中間ピンジョイントは、振幅限界を超える変位量で振られ、構成部品同士が激しく衝突した。これにより発生した設計値を上回る応力によりがいしが破損に至った。この被害原因を踏まえ今回、制震・緩衝材を用いた衝撃緩衝装置付き中間ピンジョイント(図2)を開発し、当該の550kV断路器に搭載した。

この開発にあたっては、従来形の THB 形断路器との互換性を持たせるという制約条件の下、地震動による操作がいしの応答性、動作特性や、がいしに発生する応力を突き詰め、制震能力が最適となる衝撃緩衝装置を開発した。同装置は効果的に機能が発揮されるよう、操作がいしの振幅量および衝撃緩衝装置の構成・カップリング形状等が好適に考慮された構造となっている。また、設計にあたっては、3次元解析モデルによる構造解析を用い、振動時にカップリングに発生する応力について評価しながら最適な構造設

計を行った。一例を図3に示す。衝撃緩衝装置付き中間ピンジョイントを搭載することで、前述の衝撃力は同装置により吸収され、がいし破損を防ぐことができ、制震・緩衝材の高い減衰性により、過大な地震動による操作がいしの振幅増幅を抑えることができる。



b) 開発品の衝撃緩衝装置付き中間ピンジョイント
図2 操作がいしおよび中間連結機構部

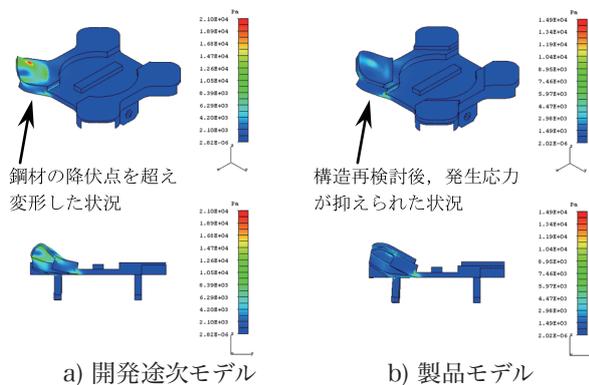


図3 カップリングの3次元モデルによる構造解析

3.2 導電部の軽量化

気中断路器のようながいし形機器は、頭頂部の重量を抑えることで耐震性能が向上するため、衝撃緩衝装置付き中間ピンジョイントの開発と併せ、頭頂部に位置する導電

部を軽量化し、更なる耐震強化を図った。軽量化にあたり、ブレード・シールドリング・アーク接触子は、運転実績のある550kV THB2形・TVCB2形をベースに開発を行い、ヒンジ部は、大幅な部材サイズの低減を行った。8000A用導電部の構造を図4に示す。また、軽量化方策の主な内容を以下に示す。

なお、主接触部については、従来器と同等の通電性能の確保、また、従来器の長年の運転実績および保守対応性を考慮して、接点部品をTHB形と同構造とした。

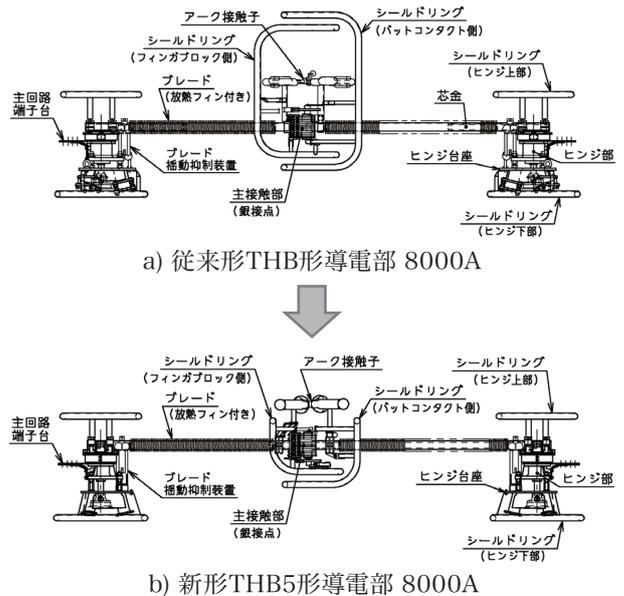


図4 THB形およびTHB5形導電部構造比較

(1) ブレードの材質・構造変更 ブレードの材質を銅からアルミニウムに変更した。従来の銅管のブレードには、自重によるたわみ防止として鋼管の芯金を挿入していたが、管の厚さを上げることで芯金を省いた。また、2000/4000A用ブレードについては、管のサイズアップによりブレードの放熱性を上げ、放熱フィン省いた。8000A用ブレードについては、従来器THB形の放熱フィン付き構造を踏襲したが、フィンの材質をブレードと同様に銅からアルミニウムに変更し軽量化を図った。

(2) ヒンジ部の構造変更 ヒンジ部重量の大半を占めるヒンジ台座およびヒンジ胴体(軸受け座)を強度低下することなく軽量化した。構造を最適設計に見直すことにより、ヒンジ台座の板厚を低減し、ヒンジ胴体のサイズを縮小化した。

なお、ヒンジ部接点のローラコンタクトは、550kV THB2形と同一とし、部品を共通化した。

(3) シールドリングの材質・構造変更 ヒンジ部用シールドは、部材を鋼管からアルミニウム管に変更した。また、アーク接触子付き主接触部用シールドは、可視コロナの発生を効果的に抑制する構造に改良したアーク接触子を併用することで、シンプルな形状に改良した。

(4) 導電部重量の低減率 軽量化モデルチェンジによる導電部重量の低減率は、2000/4000A 用は約 34% 減、8000A 用は約 39% 減である。なお、軽量化設計を進めるにあたり、機器頂頭部重量の低減度合いと耐震強度向上度合いとのメカニズムを地震応答解析により確認し、重量低減量の目標を定めた。

4 耐震性能の確認試験

4.1 実加振試験による耐震強度検証

THB5形断路器の耐震強度が適用先ユーザの要求仕様を満たすことを確認するため実加振試験を実施した。

4.1.1 供試器

供試器を図5、諸元を表1に示す。

なお、供試器の加振対象単位は、加振台サイズの都合上、片側極分とした。

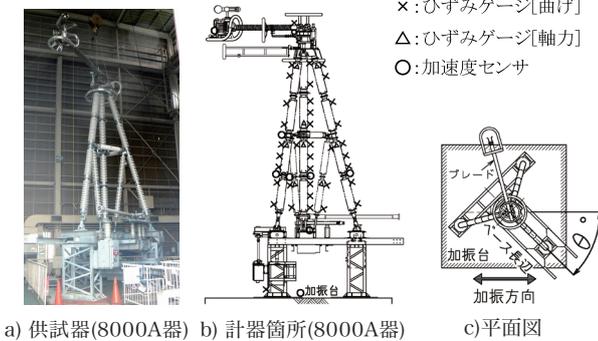


図5 供試器

4.1.2 加振試験の内容および試験項目

供試器の耐震強度および衝撃緩衝装置付き中間ピンジョイントの性能・諸特性を確認するため、共振振動数探索試験および耐震強度確認試験を実施した。試験の内容を表2に示す。

加振方向は、機器の長辺方向および短辺方向の加振が一般的だが、今回、操作がいしについては、衝撃緩衝装置の配置と加振方向による耐震性能への影響を見極めるため、表2の条件にて試験を実施した。また、支持がいしについては、当該550kV断路器は三角すい構成であることから、振動方向によって耐震性能に相違があるため、過去の知見から判明している耐震性能最苛酷方向にて加振試験を行い、適確に耐震性能を見極めた。

耐震強度確認試験においては、JEAG5003に基づく3 m/s² 共振正弦3波に加えて、適用先ユーザが要求する耐震性能を直接試験にて確認するため、6 m/s² 共振正弦3波や、国内外の高レベル実地震動波を印加した。

4.1.3 耐震性能

表3、表4に主な試験結果を示す。2000/4000A器および8000A器ともにJEAG5003に対する安全率は2以上であり、基準を十分に満足する。また、操作がいしの減衰定数は15%以上で十分に大きい。これは衝撃緩衝装置の高い

減衰性によるものであり、これにより加速度の大きな地震や、継続時間の長い地震に対して十分に耐震性を保つことができる。(ボルト締結が主体構造物の減衰定数の目安:5~12%⁽¹⁾)

表1 供試器諸元

項目	仕様		
機種	水平中心一点切断器/4段積器		
定格	電圧 550kV / 電流 2000/4000A および 8000A		
がいし装置 (中実がいし)		2000/4000A	8000A
	操作	高強度	高強度
	支持	高強度	普通強度
	ステー	なし	あり(普通強度)
操作がいし 中間可動部	衝撃緩衝装置(4ヶ)付き中間ピンジョイント構造		

表2 加振試験条件

	内容
加振方向	(1) 操作がいし装置: 2種方向(下図参照) a) 加振方向に装置一つずつ b) 加振方向に装置二つずつ
	(2) 支持がいし装置: 機器の耐震性最苛酷方向 a) 2000/4000A 器: ベース長辺方向に対し 60° b) 8000A 器: ベース長辺方向に対し 45° 注記 角度は図5のθ°となる。
試験項目(主要地震波)	(1) 共振振動数探索試験 周波数 0.5~10Hz を持つランダム波にて加振
	(2) 耐震強度確認試験 a) 共振正弦3波試験: 水平 3 m/s ² ・6 m/s ² b) 実地震動波試験: ① 東北地方太平洋沖地震波(被害のあった変電所の地表面最大加速度の地震波) ② ノースリッジ地震波 ⁽²⁾ (海外地震)

表3 がいし部安全率 2000/4000A器 実加振試験結果

	操作がいし	支持がいし
3 m/s ² 共振正弦3波	2.8 (1.9) ^{b)}	3.6
固有振動数	1.9 Hz	5.0 Hz
減衰定数	15 %	13 %
6 m/s ² 共振正弦3波	1.3 (0.9) ^{b)}	1.6
東北地方太平洋沖地震波 ^{a)}	2.1 (1.4) ^{b)}	1.5
ノースリッジ地震波	2.9 (1.9) ^{b)}	3.9
注 ^{a)} 被害のあった変電所の地表面最大加速度の地震波		
注 ^{b)} ()内の値は、高強度を普通強度にした場合の換算値		

表4 がいし部安全率 8000A器 実加振試験結果

	操作がいし	支持がいし
3 m/s ² 共振正弦3波	2.7 (1.8) ^{b)}	2.5
固有振動数	2.8 Hz	5.2 Hz
減衰定数	17 %	4.9 %
6 m/s ² 共振正弦3波	1.3 (0.9) ^{b)}	1.4
東北地方太平洋沖地震波 ^{a)}	1.8 (1.2) ^{b)}	1.0
ノースリッジ地震波	2.2 (1.5) ^{b)}	2.3
注 a) および 注 b) は、表3に同じ。		

4.2 地震応答解析による耐震強度の確認

実加振試験と併せて、実加振試験で採取した地震応答特性データを利用し、550kV THB形断路器についてFEM(Finite Element Method)による地震応答解析を行った。

4.2.1 解析モデル

供試器 8000A 器(4 段器)の解析モデルを図6に示す。

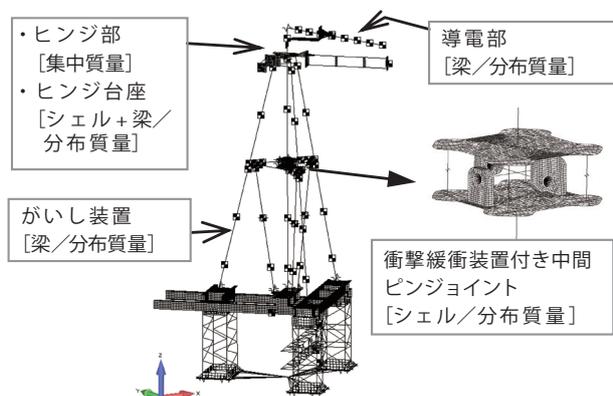


図6 供試器8000A器(4段器)の解析モデル

4.2.2 解析の高度化

表5, 表6に主な解析結果を示す。入力波は、水平加速度 3m/s^2 および 6m/s^2 共振正弦3波とし、加振方向は実加振試験の条件に合わせた。

本断路器は三角すい構成の複雑ながいし装置を備えたものであるが、精緻な解析により解析結果は実加振試験結果と近似した。今回構築した解析モデルは、想定地震波や実加振試験では入力不可能な高レベル地震波に対する耐震解析に活用でき、地震被害想定評価に資するものである。今後起こりうる高レベル地震動について実加振試験を実施することなく耐震性能評価が可能となった。

表5 がいし部安全率 2000/4000A器 解析結果

	操作がいし	支持がいし
3m/s^2 共振正弦3波	2.6	3.5
固有振動数	2.0 Hz	5.0 Hz
6m/s^2 共振正弦3波	1.3	1.8

表6 がいし部安全率 8000A器 解析結果

	操作がいし	支持がいし
3m/s^2 共振正弦3波	2.8	2.9
固有振動数	2.8 Hz	5.1 Hz
6m/s^2 共振正弦3波	1.4	1.4

5 従来器との互換性可他機種への展開

今回開発した衝撃緩衝装置付き中間ピンジョイントおよびTHB5形導電部は、従来器THB形と互換性があり、容易

に既設器への取り付けが可能である。したがって機器全体を取り替えることなく、大幅な耐震強化が可能である。また、衝撃緩衝装置を応用することで他機種(550kV THB2/3形・TVCB2形・TPD2形)の耐震性能向上も可能である。

6 おわりに

今回、耐震強化を目的とした550kV 2000/4000A・8000A THB5形断路器の衝撃緩衝装置付き中間ピンジョイントおよび軽量化型導電部を開発した。衝撃緩衝装置および導電部軽量化の効果により、THB5形断路器は耐震設計基準の2倍以上の安全率を有し、高レベル地震動に対しても十分な耐震性能を有する。また、本耐震強化対策品は従来器と互換性があり、容易にTHB形へ取り付けが可能な構造となっており、2000/4000A器は、2012年12月に既設器へ初適用し運転を開始し、また、8000A器は、2015年10月に初号器納入予定である。今後は今回得た知見を活かし、他機器への耐震強化施策の展開および更なる耐震性能向上を目指していく所存である。

■参考文献

- (1) 一般社団法人 日本電気協会 日本電気技術規格委員会：「変電所等における電気設備の耐震設計指針」, JEAG5003-2010 (2010)
- (2) 一般社団法人 電気協同研究会：「変電設備仕様の国際化」, Vol.63, No.4 pp.37-49 (2008)



高橋 徹夫

電力プラント事業本部
断路器製造部 所属



永田 清志

電力プラント事業本部
断路器製造部 設計グループ 所属
気中断路器の設計および開発業務に従事



大山 友幸

電力プラント事業本部
断路器製造部 設計グループ 所属
気中断路器の設計および開発業務に従事



神田 一彦

技術開発本部
技術研究所 解析・試験技術グループ 所属
製品の解析技術開発に従事