

四日市火力変電所154kVガス絶縁開閉装置 母線断路器故障について

1 故障発生状況

平成22年12月8日(水)5時21分に、四日市火力変電所において、154kV4-5号発電機乙母線断路器(乙580)の故障により、154kV母線保護継電装置の短絡保護継電器が動作し、154kV乙母線に接続するすべての遮断器を遮断し故障除去しました。この故障により、瞬時電圧低下(0.07秒程度)が発生しました。

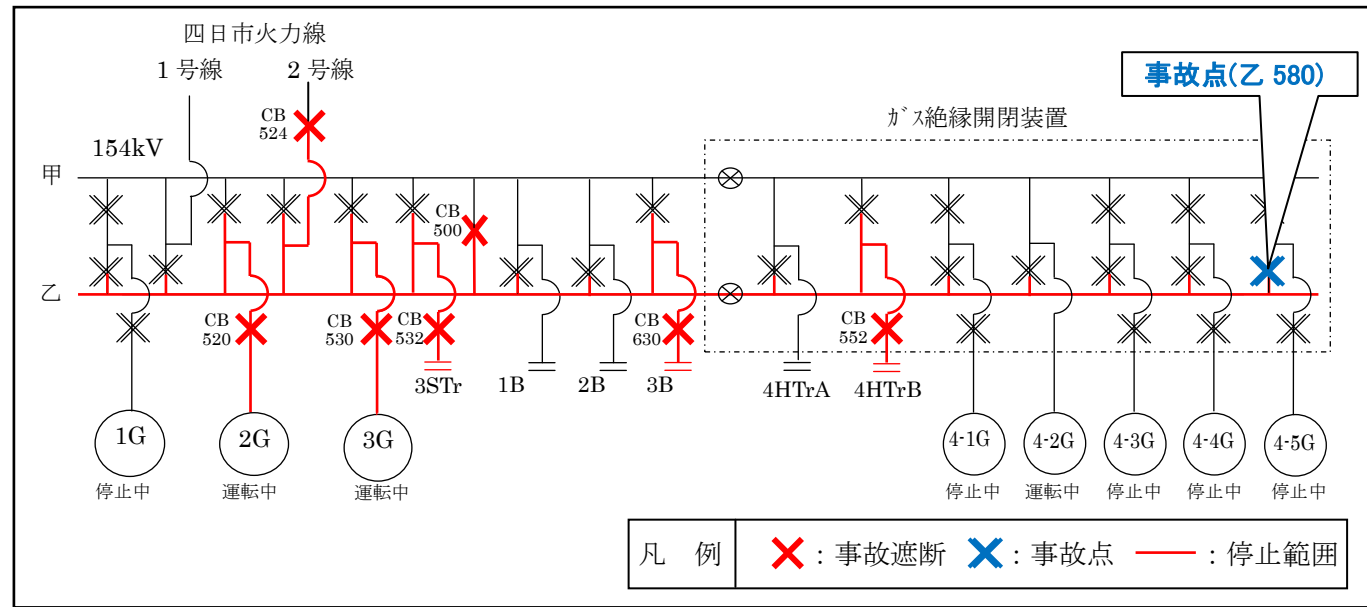


図1 四日市火力変電所系統状況図

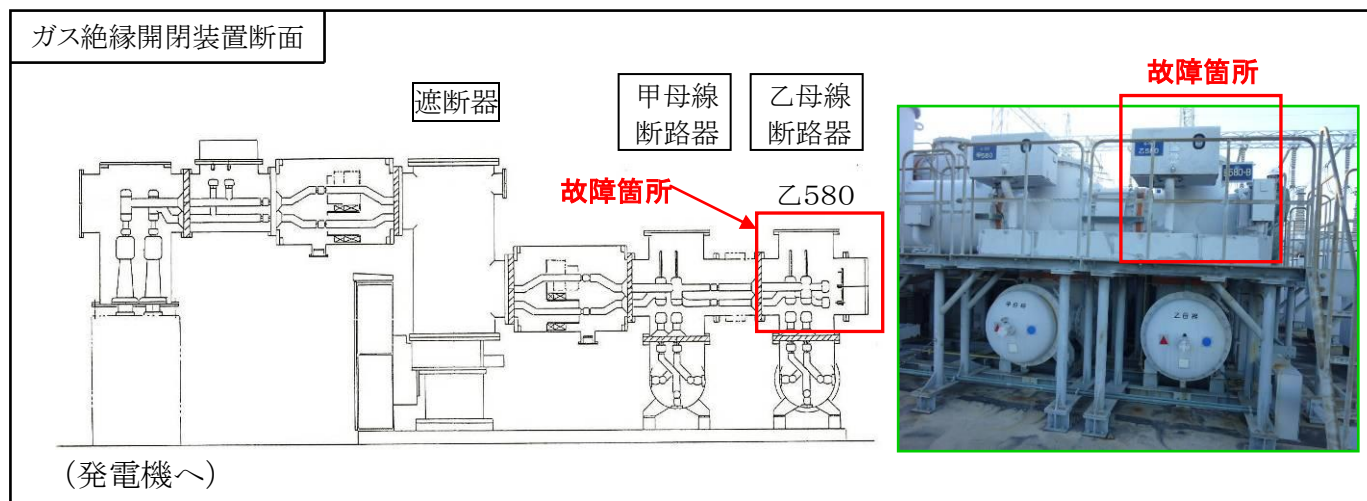


図2 ガス絶縁開閉装置 構造図

2 短絡(絶縁破壊)の原因について

絶縁破壊があった当該断路器の内部点検の結果、断路器上部の機構部レバーのボルト脱落・落下を発見しました。再現試験により、このボルトの落下が絶縁に与える影響を検証しました。

(1)ボルト落下時の経路

解体調査の結果、白相と青相の導体間付近にボルトが落下していたことおよびボルト表面の溶損を確認しました。また、同形の実機にて行ったボルトの落下再現試験により、機構部のボルトが脱落すると図3の様な経路で落下し、白相と青相の導体のアーク痕跡付近を通過することがあることを確認しました。

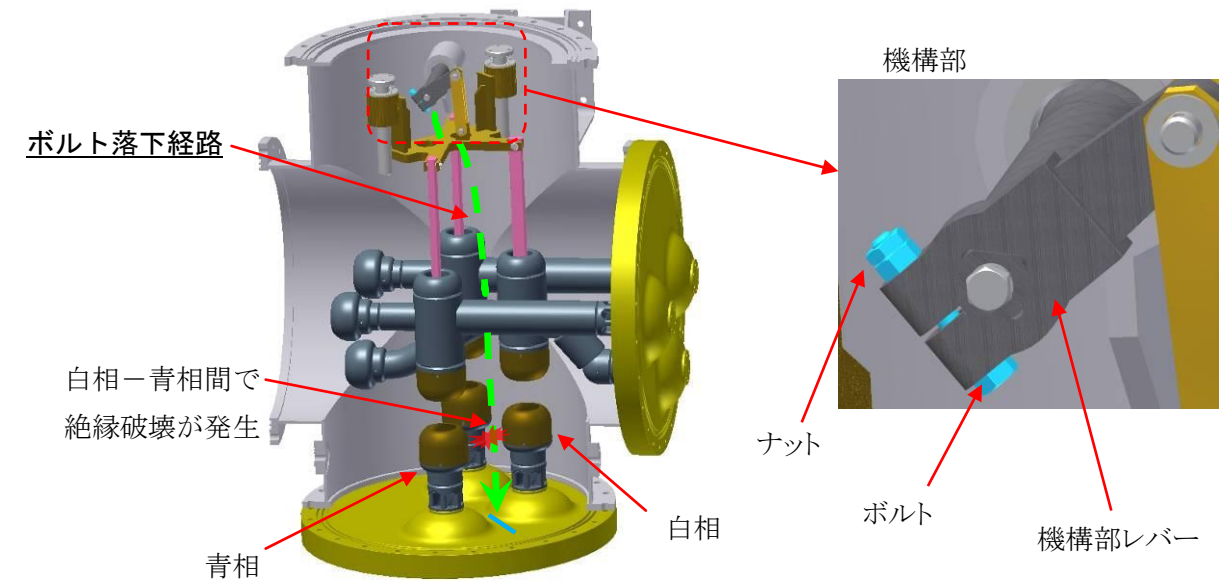


図3 ボルト落下試験・絶縁破壊状況

(2)ボルトによる絶縁破壊

ボルトをアーク痕跡付近の白相と青相の導体間に配置した状態で絶縁破壊試験を行い、運転電圧で絶縁破壊することを確認しました。



図4 絶縁破壊試験

これらの結果から、ボルト落下により白相と青相の間で絶縁破壊が発生し、3相短絡に至ったと判断しました。

3 ボルト落下の原因調査について

(1) ボルトが落下する条件について

実機モデルによる検証試験結果より、ボルトが落下する条件が確認できました。

- ボルト・ナットは、正規に締め付けられている状態(締結力10kN)では、動作回数が増えても締結力は低下しない。
- 何らかの要因により、締結力が2kN以下となった場合は、動作回数増加に従って締結力が低下していく。(検証試験では動作回数 2,250 回～3,700 回で締結力がゼロkNに低下)
- ボルト締結力がゼロkNの状態では、動作回数増加に従ってナットが徐々に脱落方向に移動し、概ね 100 回程度でナットが脱落する。→ これにより、ボルトも脱落する。

(2) 小さなボルト締結力が生じた原因について

2kN以下というボルト・ナットの小さな締結力が生じた原因について、物理現象面および作業面から検証を行いました。

ア ボルト締結の痕跡について

ボルト・ナットが締結する機構部レバーの表面観察の結果、締結行為の痕跡とみられる圧痕がみられました。このため、締結作業が少なくとも 1 回以上は行われたと判断します。

イ 「手締めでの締結」に関する評価について

手締めによる締結力はほぼゼロであること、締結力がゼロからの状態では 100 回程度でナットが脱落すること、当該器の動作回数が 2,500 回程度であることを考慮すると、手締め作業であった可能性は低いと判断します。

ウ 「小さな締結力(2kN以下)で締結」に関する評価について

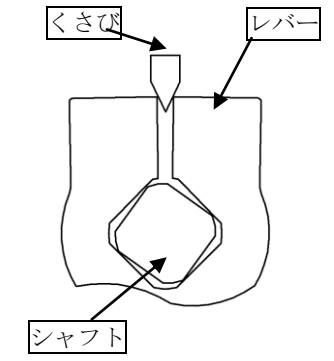
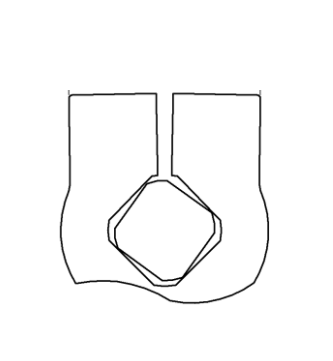
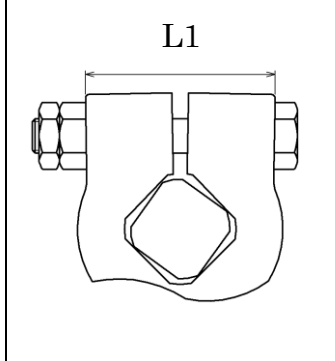
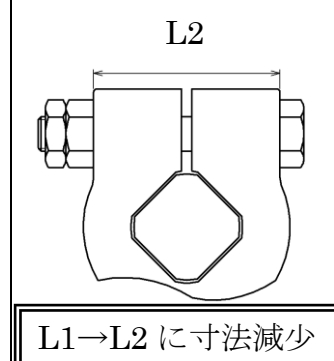
正規の締結力と小さな締結力(2kN以下)では、締結行為に大きな隔たりがあることから、間違って小さな締結力(2kN)で締めてしまう可能性は低いと判断しました。

※締結力がゼロの状態から、正規の締結力(10kN)を発生させるまでのレンチの回転角は約 120 度ですが、小さな締結力(2kN)までは 20～30 度であり、回転角に大きな隔たりがあります。

※締結の手ごたえも、10kNと 2kNでは大きく異なります。特に 2kNは力を掛け始めるとすぐに到達する感触であり、2kN以下に留める締め方は非常に難しい。

エ 正規に締結後、何らかの原因で締結力が低下した可能性について

作業の中でボルト締結力低下に至る要因を発生させる可能性の評価を行った結果、レバーをシャフトにはめる当時の作業手順において、レバーにくさびを挿入した状態でシャフトをレバーにはめた後、くさびを取り外していたため、レバーとシャフトの間に極めて希に微小な噛み込みが発生する可能性があり、後にボルト締結力を低下させることが判明しました。

①シャフト挿入	②くさび外し	③ボルト締結	④噛み込み解消
くさびを挿入した状態でシャフトをレバー角穴に挿入	くさびを取り外すが角穴接触部の摩擦で噛み込みを保持	ボルトを締結するが、噛み込みは保持	断路器動作により噛み込みが解消
			
ボルト締結力低下 再現試験状況	モデル実験 ^{※1} 実機実験 ^{※2}	発生確率 ^{※3} 3% (3/100)、最大低下時:10.4kN → 1.8kN 発生確率 ^{※3} 9% (9/100)、最大低下時: 8.9kN → 1.3kN	

※1 シャフトとレバーだけでハンマリングによりボルト締結力が低下することを確認した予備実験

※2 同形実機において、断路器の開閉動作で締結力が低下することを確認した実験

※3 レバーを固定し挿入したシャフトを回転させ、意図的に噛み込みを再現しようとした場合の発生確率

【推定されるボルト脱落メカニズム】

- レバーシャフト組み立て時に噛み込みが発生。この状態で、ボルトを正規の締結力にて締結
- ↓
- 断路器動作により、噛み込み解消し、ボルトの締結力が低下(2kN以下)
- ↓
- 断路器動作により、ボルト締結力がさらにゼロまで低下
- ↓
- 断路器動作により、ナットが徐々に移動し、ボルト・ナットが脱落

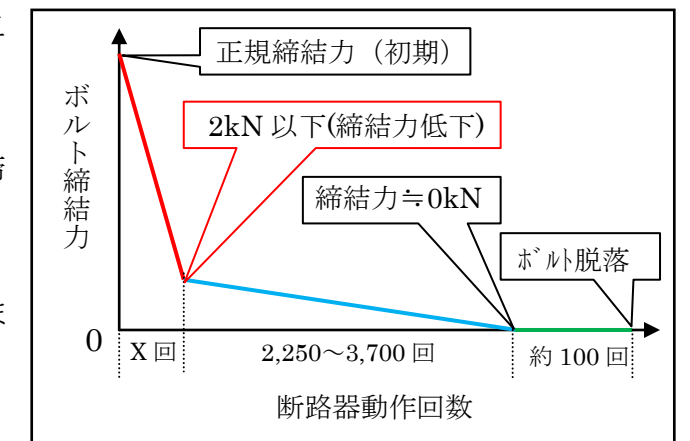


図5 ボルト緩み進展フロー

(3) ボルト脱落原因に関するまとめ

- 「(2)ア～ウ」により、ボルト・ナット締結時の単純な製造作業ミス(ボルト・ナット締め忘れ、締め付け不足等)とは考えにくい。
- 検証試験の結果より、機構部を組み立てた際にレバーとシャフトの間に微小な噛み込みが発生し、その後の開閉動作により噛み込みが解消しボルトの締結力が低下、更にその後の開閉動作によりボルトの締結力が無くなり、最終的に脱落したものと判断します。

なお、当該器の動作回数は2,500回程度であったが、四日市火力変電所の他の同形器の内部点検結果では、動作回数が3,500回程度のものもあったものの、全てボルト締結力の低下が無かったこと、検証試験においても噛み込みの再現性が非常に低かったことから、特殊な現象であると考えられます。

4 再発防止策について

今回の検証試験から、レバーに噛み込みがあったとしても、ボルトの締結力が無くなるまでには2,250～3,700回を要します。

弊社としては、再発防止に万全を期する観点から以下の対策を実施します。

- 四日市火力変電所の全ての同形の断路器については、速やかに、レバー部およびボルト・ナットを点検し、噛み込みが発生しないレバー（図6参照）^{※4}に変更した上でボルトを再締結します。
- 他の発電所等においても、当該器と同様にくさび作業を行っていたレバーを有する断路器について、動作回数1,000回を基準にレバー部およびボルト・ナットを点検し、噛み込みが発生しないレバー^{※4}に変更した上でボルトを再締結します。

※4 逃げ穴を設けてレバーに適度な弾性をもたせることにより、くさびを用いずにシャフト挿入・ボルト締結できます。くさびによる作業が無いため、このレバーでは噛み込みは発生しません。このレバー形状は当社設備では、500kV GISなどで実績があります。

なお、同レバーを現地機器に組み込む前には、工場にて連続開閉試験を実施し、断路器としての総合動作を確認します。

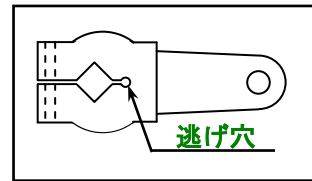


図6 逃げ穴付きレバー

以 上