

ルーフデルタ結線変圧器

🔊 ルーフ・デルタ結線，変形ウッドブリッジ結線，変圧器，インピーダンス整合，電位振動，コンパクト化

* 神尾幸嗣 Koji Kamio

概要

従来，有効接地系統の新幹線用変電所（受電電圧187kV以上）に設置されるき電用変圧器として，変形ウッドブリッジ結線変圧器が採用されてきた。

変形ウッドブリッジ結線変圧器は，Y結線と二組のデルタ結線で構成され，各座で電圧が異なることから一方に昇圧用変圧器が必要で，結線方式が複雑となっていた。

そこでこれに代わる変圧器として，ルーフデルタ結線変圧器が再評価され，検証器による実証試験を経て実用化された。当社は2009年に九州新幹線新玉東変電所にルーフデルタ結線変圧器の1号器を納入し，現在までに九州・東北・北海道の新幹線設備に合計10台を納入した。



ルーフデルタ結線変圧器

1. ま え が き

山陽新幹線の建設では，商用電源系統への連系を経済性・信頼性・技術的観点などの角度から検討し，超高压電力系統より1段落としのき電用変圧器を介してき電する方式が採用された。超高压電力系統は中性点直接接地系統のため，「単相負荷が電源系統へ与える不平衡などの影響を極力軽減すると同時に不平衡負荷の状態でも中性点接地電流をほとんど流さない結線方式」を有する変圧器が必要であった。その一つであるルーフ・デルタ結線は巻線容量を小さくでき，軽量化できることが当時から理解されていた。しかし，その巻線配置が複雑であることやインピーダンス整合が困難であることから採用を見送られ，最終的に変形ウッドブリッジ結線変圧器が採用された。

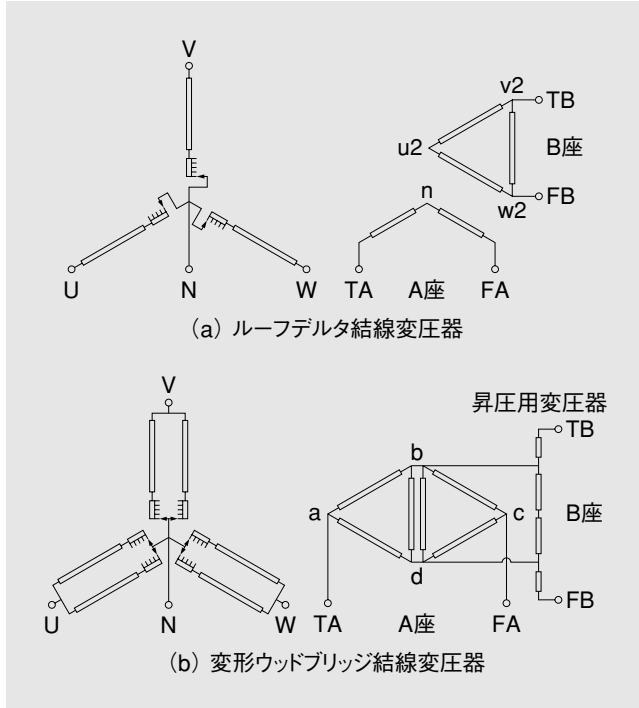
その後，九州新幹線の着工に合わせ，1998年頃
*変圧器工場

からルーフ・デルタ結線方式が再度検討され，ミニモデルによる実験を経て，2004年に東日本旅客鉄道(株)（以下，JR東日本），(独)鉄道建設・運輸施設整備支援機構と電機メーカー各社で構成されるワーキンググループで，実際の系統への適用検討が開始された。ワーキンググループでは，仕様の検討・仕様の標準化・技術課題の整理を実施し，2006年に当社がJR東日本 北白川変電所に納入した検証器を対象に，実列車負荷による運用検証が行われ，採用可であることが確認された。本稿では，ルーフデルタ結線変圧器の製品化について紹介する。

2. 巻線構造

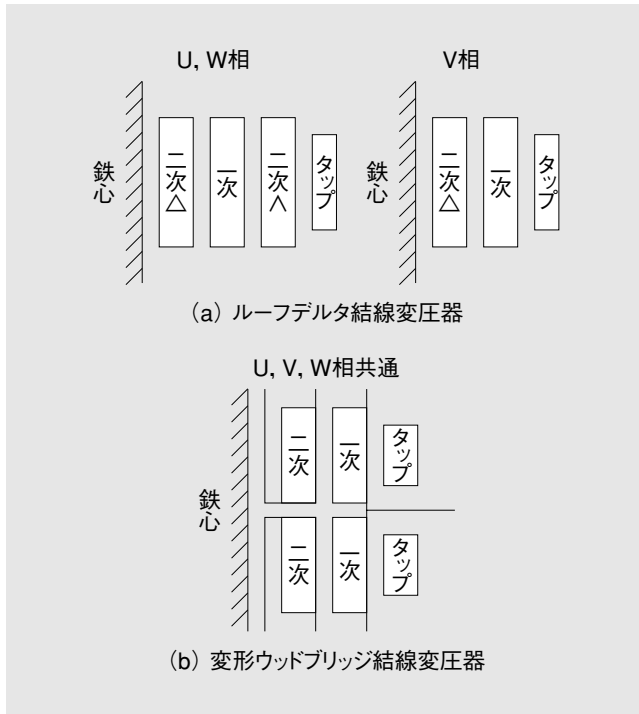
ルーフデルタ結線変圧器は，新幹線の上り下り二組の単相負荷に電力を供給する目的で超高压系統に設置される。

従来，新幹線設備には変形ウッドブリッジ結線



第1図 結線比較

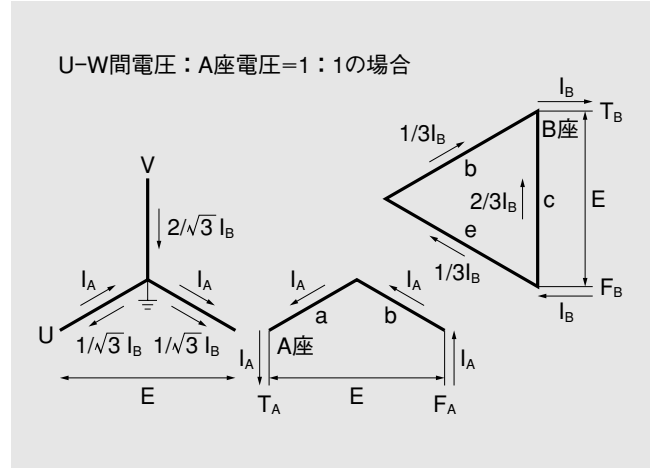
ルーフデルタ結線変圧器と変形ウッドブリッジ結線変圧器の結線の比較を示す。ルーフデルタ結線変圧器では昇圧用変圧器が不要となる。



第2図 巻線配置

ルーフデルタ結線変圧器と変形ウッドブリッジ結線変圧器の巻線配置の比較を示す。ルーフデルタ結線変圧器ではUW相とV相で巻線構成が異なる。

変圧器が使用されていた。変形ウッドブリッジ結線変圧器は、第1図(b)に示すようにY結線と二組のデルタ結線で構成され、二組ある二次側(各々をA座、B座と呼ぶ)で各座の電圧が異なる



第3図 電圧及び電流分布概念図

ルーフデルタ結線変圧器の端子間誘起電圧及び各巻線の電流分布を示す。

第1表 ルーフデルタ結線変圧器と変形ウッドブリッジ結線変圧器の比較

ルーフデルタ結線変圧器と変形ウッドブリッジ結線変圧器を比較し、ルーフデルタ結線変圧器の優位点を示す。

ルーフデルタ結線変圧器	変形ウッドブリッジ結線変圧器	ルーフデルタ結線変圧器の優位点
U相 3巻線 V相 2巻線 W相 3巻線 合計 8巻線	主変圧器 U相 4巻線 V相 4巻線 W相 4巻線 小計 12巻線 昇圧用変圧器 4巻線 合計 16巻線	<ul style="list-style-type: none"> 巻線数が半減 (16巻線→8巻線) 巻線数の低減により、簡素化が可能
巻線配置：挟み込みスプリット巻線	巻線配置：軸方向上下は位置スプリット巻線	内鉄形変圧器の場合、変形ウッドブリッジ結線変圧器でも挟み込みスプリット巻線配置も可能であるが、質量低減、巻線絶縁構成の簡素化から軸方向上下配置スプリット巻線を採用

ことから、一方に昇圧用変圧器を必要とするなど、結線方式が複雑だった。そこで、これに代わる変圧器として、第1図(a)に示すルーフデルタ結線変圧器が選定された。

第2図に巻線配置を示す。ルーフデルタ結線変圧器は、一次側のY結線と二次A座側のルーフ巻線(Δ巻線)とB座側のデルタ結線で構成されている。各々の巻線を二次側の電圧に合わせた巻数比とすることで、昇圧用変圧器が不要となる。A座側のルーフ巻線は、V相のないY結線と同等で、B座側のデルタ結線はUW相の電流容量がV相の1/2となる。第3図にルーフデルタ結線変圧器の各巻線の電圧及び電流分布概念図を示す。

第1表にルーフデルタ結線変圧器と変形ウッドブリッジ結線変圧器の比較を示す。ルーフデルタ結線変圧器の優位点は、A座・B座巻線が電氣的に

絶縁された結線方式であるため、B座△巻線の線間電圧を60kVとすることで昇圧用変圧器を省略できることである。

変形ウッドブリッジ結線変圧器に比べ、総巻線数が16巻線→8巻線と半減し、変圧器の質量・油量・損失を低減でき、き電用変圧器として機器のコンパクト化や省エネ化を実現した。

一次巻線はY結線を適用しているため、中性点が直接接地される超高压電源系統用の三相-二相変換用変圧器として適用することができ、二次A座・B座に同一負荷を同時に供給した場合に電源側電流は三相平衡した電流となる。

二次巻線は、三相変圧器として構成した場合、UW相とV相で巻線の数及び大きさが異なるため、各相の短絡インピーダンスを極力合わせる必要がある。各相の短絡インピーダンスの不ぞろいは、一時中性点に中性点電流を増大させる要因となる。このため、巻線製作には高度な設計・製造技術が要求される。検証器を製作したことで明確となった課題は以下の2点である。

- (1) 一次中性点電流推定精度向上のための短絡インピーダンスの精度向上
- (2) 二次（A座）（n点）及び二次（B座）（u2点）の電位上昇

3. 短絡インピーダンスの精度向上

前述のとおり、ルーフデルタ結線変圧器は、二次（A座）V相巻線が存在せず、二次（B座）ではUW相とV相で巻線容量が異なるため、巻線設計が異なっている。通常短絡インピーダンスの計算手法では、十分な精度が得られず、一次中性点電流の推定に支障がでる。仮にUW相とV相で全く同じ諸元で巻線設計を実施すると、計算なしでも各相の短絡インピーダンス整合の問題は全くなくなるが、二次（B座）巻線のUW相とV相では二次電流が1：2であるため、設計は巻線容量の大きいV相に合わせ、V相で二次（A座）の巻線を省略しても寸法をつめない設計となり、製品としては必要以上に大きくまた重くなるためコンパクト化は見込めない。検証器では、二次（B座）の各相の電流密度を一定にし、V相の巻線設計を標準的な2巻線変圧器と同じ設計にすることで、製品化に向けた巻線設計を試行した。

巻線設計の異なるB座各相の短絡インピーダンスの整合を実現するために、ベクトルポテンシャル法による数値計算を採用し、精度向上を図ったが、計算結果の実測補正による精度向上が製品化に向けた課題となった。ベクトルポテンシャル法による数値計算は、高い設計精度が必要となる特殊構造の機器や保証値の厳しい場合に使用する検討法であり、これに検証器に代表される特殊構造をもつ機器の実測データを考慮し、評価することで、短絡インピーダンスの計算精度の問題を解決し、一次中性点電流のより高い推定が可能となった。UW相とV相で異なる巻線設計をすることで、製品のコンパクト化を実現した。

4. 電位上昇評価の精度向上

ルーフデルタ結線変圧器では、A座・B座ともに外部へ引き出されない接続点がある。この接続点は、二次（A座）（n点）及び二次（B座）（u2点）である。この接続点では外部より雷サージが侵入した場合、巻線内部の電位振動により外部端子よりも高い電圧が発生する。このため、この電位振動による発生電圧を予測し、絶縁設計を行う必要がある。

ルーフデルタ結線変圧器は、類似した巻線構造を持つ変圧器がほとんどないため、電位振動計算結果からの巻線の分担電位の推定が非常に困難だった。ルーフデルタ結線変圧器の二次電圧の標準仕様は60kVであるため、絶縁設計で考慮すべき電位上昇は140号相当以上となることが想定され、製品の信頼性を確保しつつコンパクト化を図るためには、精度の高い分担電圧の推定が必要不可欠であった。

検証器で中身完成時に電位分布測定を実施し、測定結果が電位振動計算結果からの推定値との良い整合が確認できた。類似器からの評価が困難な中で検証器のデータは有用であり、製品化の設計でこのデータを活用し、設計段階で精度の高い推定を実現した。その推定値を二次（A座）（B座）の巻線設計に反映させ、絶縁寸法及び構成を適正なものとし、コンパクト化を実現した。

5. む す び

これらの問題を解決し、ルーフデルタ結線変圧

第2表 ルーフデルタ結線変圧器の納入実績

現在までの当社でのルーフデルタ結線変圧器の納入（製作）実績を示す。

納入年	納入先	仕様	台数
2009年	JR九州(株) 九州新幹線 新玉東変電所	220kV 70MVA	2
2010年	JR東日本(株) 東北新幹線 新古川変電所	275kV 120MVA	1
2010年	JR北海道(株) 津軽海峡線 吉岡変電所	187kV 80MVA	1
2010年	JR東日本(株) 東北新幹線 新郡山変電所	275kV 120MVA	1
2010年	JR東日本(株) 東北新幹線 新古川変電所	275kV 120MVA	1
2011年	JR北海道(株) 津軽海峡線 吉岡変電所	187kV 80MVA	1
2012年	JR東日本(株) 東北新幹線 新郡山変電所	275kV 120MVA	1
2012年	JR北海道(株) 新函館変電所	187kV 60MVA	2
製作中	JR東日本(株) 東北新幹線 新盛岡変電所	275kV 120MVA	2
製作中	JR東日本(株) 東北新幹線 新福島変電所	275kV 120MVA	2
	合計		14

器の製品化を実現し、これまでに、九州・東北・北海道の新幹線設備として10台を製作し、納入した。第2表に納入実績を示す。九州と東北では、既に新幹線の営業運転が開始されており、当社が納入した変圧器も商用運用されている。運用開始からこれまで順調に運転を続けており、2011年3月の東日本大震災でも大きな故障もなく運用を継続している。引き続き、新幹線の機器リプレイス計画へも参画し、日本全国にわたる新幹線の安定運行に寄与していく所存である。

・本論文に記載されている会社名・製品名などは、それぞれの会社の商標又は登録商標である。

《執筆者紹介》



神尾幸嗣 Koji Kamio
変圧器の電気設計に従事