

ルーフ・デルタ結線変圧器の技術開発

🔊 新幹線用電気設備，き電用変圧器，ルーフ・デルタ結線変圧器，解析技術

* 小川吉晴 Yoshiharu Ogawa ** 品田真也 Shinya Shinada

概要

有効接地系の新幹線用変電所（受電電圧187kV以上）に採用されるき電用トランスは，従来，変形ウッドブリッジ結線変圧器が採用されてきた。

これには巻線配置や構造に既存の技術を応用できるなどの優位な点がある反面，二次側の单相2組の出力電圧をそろえるために昇圧変圧器が必要となるなどの不利な点も共有していた。

これを解決するため，山陽新幹線建設当時はインピーダンス整合が困難との理由から，実用化が見送られていたルーフ・デルタ結線変圧器を再評価し，様々な協議・検討・検証を経て，新たに新幹線用変電所向けのき電用トランスとして実用化することができた。



九州新幹線新玉東変電所納入70MVAルーフ・デルタ結線変圧器

1. ま え が き

ルーフ・デルタ結線変圧器の実用化にあたり，山陽新幹線建設当時に採用が見送られる背景にあった， Δ 巻線インピーダンスの不ぞろいに起因する一次側中性点電流の抑制技術の習得が必要不可欠なテーマであった。

この課題の解決にあたり，2005年に(公財)鉄道総合技術研究所，(独)鉄道建設・運輸施設整備支援機構，東日本旅客鉄道(株)の三者が発起人となり，当社を含めた重電メーカー5社がこれに加わるかたちで再評価するワーキングが立ち上がった。当社は，この中で内鉄形ルーフ・デルタ結線変圧器の試作・検証を担当することとなった。

Δ 巻線各相のインピーダンスが不ぞろいとなる原因は，中相の巻線構成が他相と異なるルーフ・デルタ結線変圧器の構造的な特長による。当社は

この解決に向け Δ 巻線各相のインピーダンスと中性点電流の因果関係をシミュレーションにより解析し，計算式を導き出すことができた。

また，高度な解析技術と最適な巻線配置の検討，製造精度の向上などにより，従来は困難と思われたインピーダンス整合を図り，中性点電流を定格電流の5%以内とする目標を達成した。

2006年の東日本旅客鉄道(株)東北本線北白川変電所における66kV，10MVA試作機による検証試験を経て，実用化に成功した。

本稿では，ルーフ・デルタ結線変圧器の実用化に際し，各種検証において確認された特長的な現象について解析した結果を紹介する。

2. ルーフ・デルタ結線変圧器の構成と中性点電流

2.1 ルーフ・デルタ結線変圧器の構成

ルーフ・デルタ結線変圧器は、A座側のルーフ巻線（Λ巻線）とB座側のΔ巻線で構成される。各巻線を二次側のき電電圧に応じた巻数比とすることで、簡単な構成で3相2相変換を行うことができる。一次巻線側はY結線を用いているので、中性点が直接接地される超高圧用の3相2相変換変圧器として適用でき、A座B座に同一負荷を同時に供給した時に電源側電流は3相平衡した電流となる。

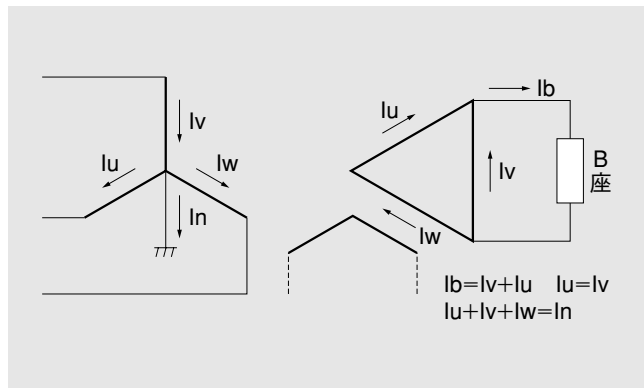
B座側Δ巻線のU・W相の電流容量はV相の1/2となり、三相変圧器として構成した時に、U・W相とV相で巻線の数・大きさが異なってくるが、インピーダンス特性は極力合わせる必要があり、高度な設計・製造技術が要求される。

2.2 中性点電流の要因と大きさ

ルーフ・デルタ結線変圧器の特異現象として、一次側中性点に電流が流れる現象がある。中性点に流れる電流の要因としては、B座側Δ巻線のインピーダンスの不ぞろいがある。以下に中性点電流の流れる原理を示す。

第1図に示すように、一次側のY結線が直接接地されるため、B座Δ巻線の各相のインピーダンスが異なっていると、 $I_u = I_w = 1/2 \times I_v$ にならずインピーダンスの値に応じた電流分布になり、一次側巻線の中性点に I_n が流れる。

この現象はルーフ・デルタ結線変圧器に限らず、変形ウッドブリッジ変圧器でも発生するが、ルーフ・デルタ結線変圧器では各相の巻線構成が同一



第1図 ルーフ・デルタ結線変圧器のB座側負荷時の電流分布
B座側の負荷電流は、Δ巻線に分流し一次巻線に変換される。

にならないため、この現象が顕在化する。従って、各相のインピーダンスを合わせる（インピーダンス整合）が重要になってくる。なお、A座側の負荷については、Λ巻線のU・W相の電流が同一になるので一次側の中性点電流は流れない。

ルーフ・デルタ結線変圧器における中性点電流の大きさは、インピーダンスの違いを回路網で解くことにより得られる。以下にインピーダンスと中性点電流の関係を示す。

B座側に負荷を取った時のV相の電流は式(1)で、U・W相の電流は式(2)となる。

$$I_v = \frac{(Z_u + Z_w)}{(Z_u + Z_w) + Z_v} \times I_b \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$I_u = I_w = \frac{Z_v}{(Z_u + Z_w) + Z_v} \times I_b \quad \dots\dots\dots(2)$$

この時、一次側の中性点電流は巻数比を1:1とすると、一次側の中性点 I_n 電流は式(3)となる。

$$I_n = I_v - (I_u + I_w) \quad \dots\dots\dots(3)$$

ここで、 Z_u, Z_v, Z_w : 各相のインピーダンス

I_u, I_v, I_w : 各相の巻線電流

I_b : B座側の負荷電流

式(1)(2)(3)より、中性点電流は式(4)となる。

$$I_n = \frac{(Z_u + Z_w) - 2 \times Z_v}{(Z_u + Z_w) + Z_v} \times I_b \quad \dots\dots\dots(4)$$

ここで、インピーダンス Z を $R + jX$ の形で表すと、中性点電流は式(5)となる。

$$I_n = \frac{(R_u + jX_u) + (R_w + jX_w) - 2 \times (R_v + jX_v)}{(R_u + jX_u) + (R_w + jX_w) + R_v + jX_v} \times I_b \quad \dots\dots(5)$$

2.3 中性点電流の検証結果

10MVA試作機では、インピーダンス整合の確認を行うと共に、中身状態で各相のインピーダンスを測定して、インピーダンス整合と中性点電流との関係を確認した。第2図に試作機での中性点電流の計算値と実測値を示す。ここで、横軸はリアクタンスの不ぞろいを、縦軸は中性点電流を示す。また、各点はタップ位置による測定値を示す。中性点電流の測定結果は理論値と一致した結果が得られ、インピーダンス整合により中性点電流を許容値以内にできることが確認できた。

試作機では、B座Δ巻線の各相の大きさを通電電流に応じたものとしているため、リアクタンスの不ぞろいがなくとも抵抗分の不ぞろいにより2%程

度の中性点電流が流れるが、容量の大きなターゲット器では、試作機に比べて%IXが大きくなり、%IRは小さくなるので、中性点電流に対する抵抗分の影響については少なくなる。

4. 電位振動

ルーフ・デルタ結線変圧器では、A座・B座共に外部に引き出されない接続点が存在する。この接続点では外部から侵入した雷サージが巻線内部の電位振動により拡大し外部端子より高い電圧になる。このため、この電位振動による発生電圧を正確に予測して絶縁設計を行う必要がある。

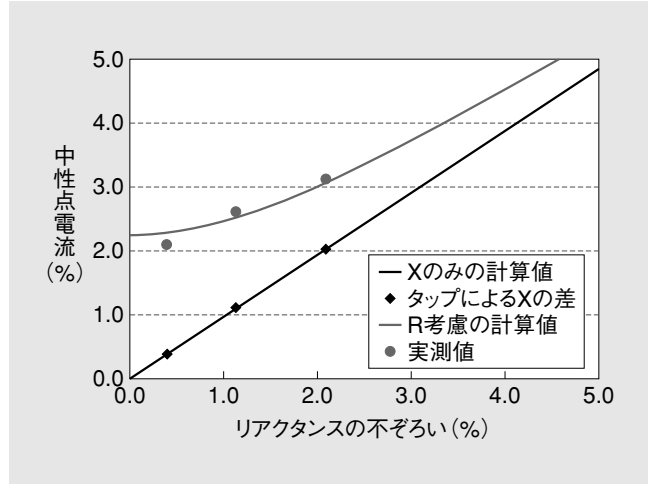
電位振動の計算は、巻線の相互インダクタンスと静電容量による等価回路(第3図)により、電子計算機でインパルス波形印加時の過渡解析を行って巻線各部の電圧を求めている。また、製作時にアナライザ試験を行って実機の値を確認している。スコット結線変圧器などは解析・実測の実績も数多くあるが、ルーフ・デルタ結線変圧器は新しい方式の変圧器であるため、10MVA試作機の製作にあたっては電位振動についても評価した。

試作機は275kV、150MVAクラスのターゲット器の縮小モデルという意味合いも持たせ、巻線配置や巻線の種類はターゲット器と同一として製作し、電位振動の解析及びアナライザ試験を行って比較した。第4図に電位振動計算の解析値と実測値を示す。これらは、波高値・振動周期共によく一致している。従って、ルーフ・デルタ結線変圧器においても従来と同一の計算プログラムを使用することが可能であり、ターゲット器においても同様に計算することで、雷インパルスに対する絶縁設計が可能である。

5. AT開放時の対地電位

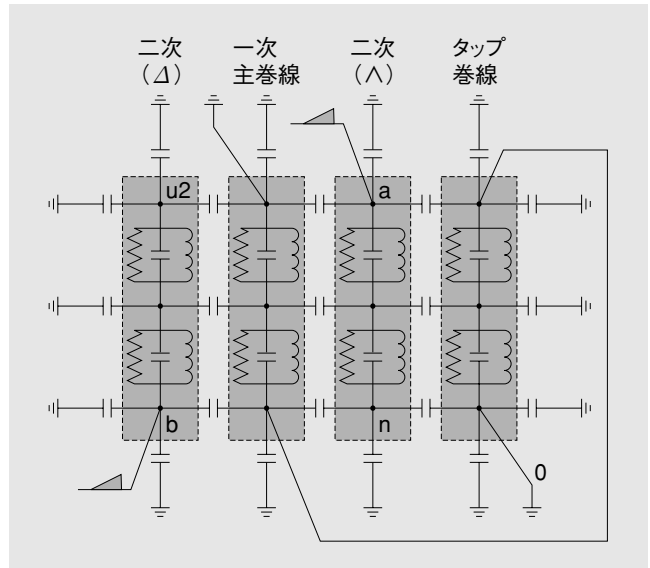
5.1 対地電位のベクトル図

ルーフ・デルタ結線変圧器は、変形ウッドブリッジ変圧器と異なり、A座とB座が接続されていない。また、巻線が対地に対して対称にならないため、負荷側のATが開放された場合には二次側の対地電位が各端子で異なってくる。このため、AT開放時の異相間混



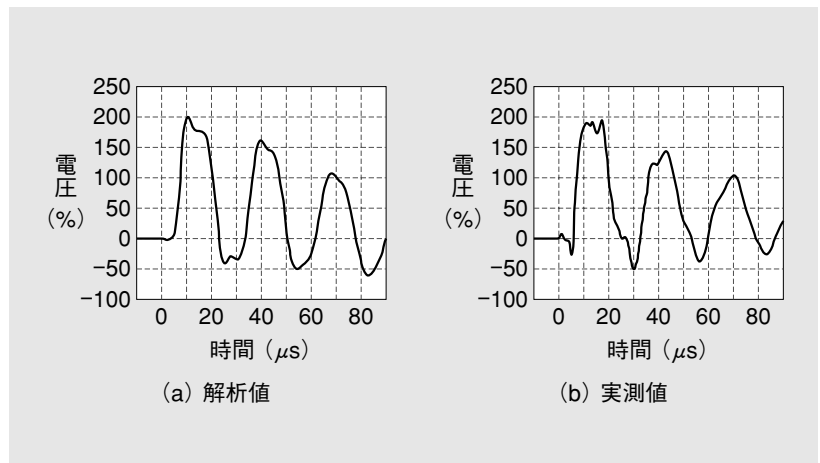
第2図 インピーダンス不ぞろいと中性点電流

タップの位置により、リアクタンスの不ぞろいの程度が異なってくる。また、抵抗分不ぞろいの影響はリアクタンス不ぞろいとは90度位相がずれて表れる。



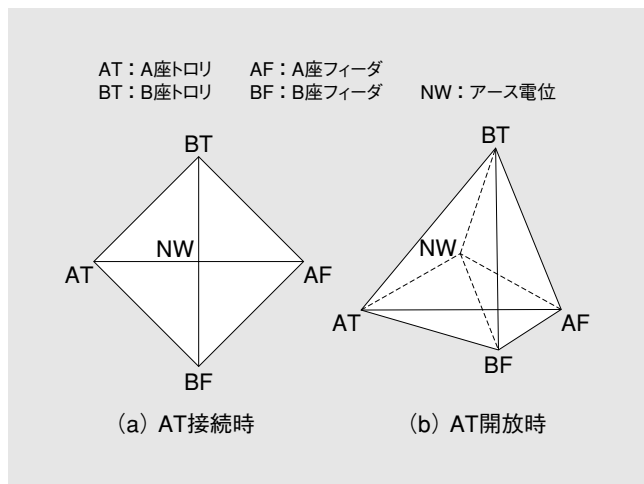
第3図 電位振動計算の等価回路

変圧器巻線の等価回路はインダクタンスと静電容量を組み合わせた回路で模擬している。



第4図 電位振動波形の計算値と実測値

電位振動の実測結果は、振動周期・絶対値ともほぼ解析値と一致していた。



第5図 ルーフ・デルタ結線変圧器の二次側対地電圧のベクトル図

AT接続時には各端子の対地電圧は同一であるが、AT開放時には中性点が移動し、各端子の対地電圧が異なった値になる。

触時には短絡電流は流れない。一方、AT開放時には第5図(b)ベクトル図に示すように各端子の対地電圧が異なり、保護回路の64B(母線地絡継電器)や84AB(異相短絡継電器)の整定値に影響する。

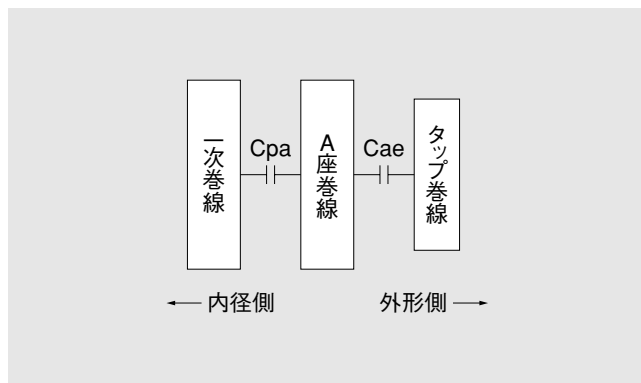
5.2 変圧器の構成との関係

AT開放時の各端子の端子電圧は、巻線間静電容量と対地静電容量で決まる。ルーフ・デルタ結線変圧器のみの特性としては以下のようなになる。

A座側はU・W相の巻線のみで構成されるため、高圧巻線との巻線間静電容量によりルーフ巻線の中性点電位が影響を受ける。第6図にA座巻線の配置を示す。当社製ルーフ・デルタ結線変圧器では、A座巻線の外側に接地電位に近いタップ巻線が配置されており、巻線間静電容量により中性点電位が極端に高くないようになっている。B座側は3相の巻線があり、デルタ巻線の中性点電位はほぼ三角形の中心になる。

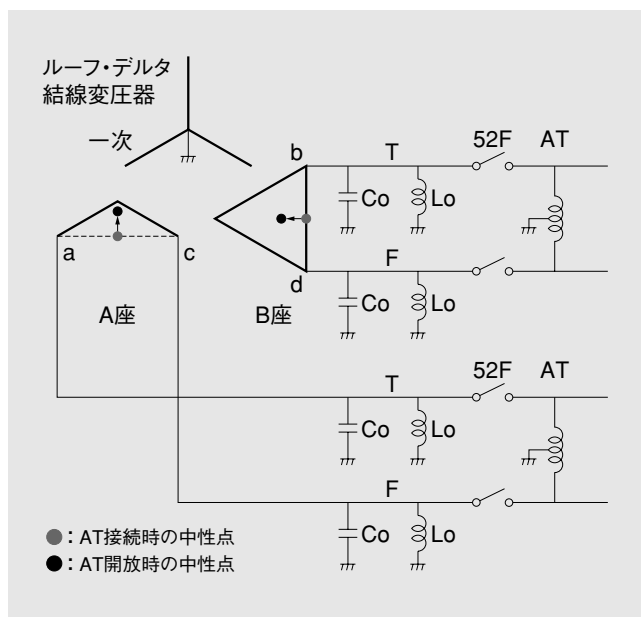
AT開放時の対地電位は、ルーフ・デルタ結線変圧器だけでなく、AT外部回路の対地静電容量の影響を受ける。外部回路の対地静電容量は中性点の電位をAT接続時の電位に近づける効果があるが、一般的な新幹線用変電所では、ルーフ・デルタ結線変圧器の静電容量に対して大きな値ではない。なお、外部回路で最も大きな対地静電容量を持つ機器はOT(逆スコット結線変圧器)である。

巻線間及び対地静電容量を正確に求めることで、AT開放時の対地電位(第5図(b)のベクトル)を求めることができる。



第6図 A座巻線の配置

A座巻線とタップ巻線間の静電容量Caeが対地静電容量に含まれるので、A座巻線の対地電圧が大きく移動しない。



第7図 鉄共振の発生メカニズム

回路の中性点は、AT接続時には青い点で示す位置にあるが、AT開放時には赤い点で示す位置に移動する。この時の過渡現象で対地静電容量CoとGPTの励磁インダクタンスLoによる減衰振動が発生する。

6. AT開放時の過渡現象

6.1 ルーフ・デルタ結線変圧器におけるGPT(接地形計器用変圧器)との鉄共振現象

ルーフ・デルタ結線変圧器は、ATを接続して巻線電位が固定された時とATが接続されない時の対地電圧が異なっている。このため、ATを開放した時には、第7図に示すように巻線の中性点電位が移動し対地電位に過渡現象が発生する。

この時、GPTの励磁インダクタンスLoが線形であれば、GPTの励磁インダクタンスと回路の対地静電容量Coによる共振周波数の振動は徐々に減衰する。しかし、実際のLoは非線形系であるため、鉄

心の磁気飽和により回路条件によっては電源周波数やその分数次数に共振して、過渡的に異常な電圧になったり共振が継続したりすることがある。いわゆる鉄共振と呼ばれる現象が発生する場合がある。

6.2 鉄共振発生の要因とシミュレーション

鉄共振の発生に関しては以下の要因が影響する。

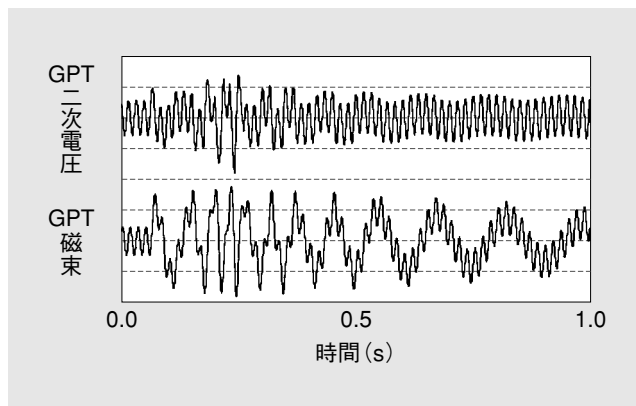
(1) 非接地時の巻線の対地電位 AT開放時の過渡現象は、非接地時の巻線の対地電位との差が大きいほど大きくなる。巻線の対地電位を決めるものは、巻線配置と巻線間、巻線対地間の静電容量、及び外部回路の対地静電容量である。

(2) 巻線及び回路の対地静電容量とGPTの励磁インダクタンス 鉄共振現象も共振現象であるので、回路の対地静電容量とGPTの励磁インダクタンスの値が影響する。GPTは非線系の励磁インダクタンスを有しているため、回路の対地静電容量と共振する範囲が広い。現在までの納入実機による実測結果(60Hz・50Hz各1変電所)では、鉄共振が発生する回路定数の範囲にあった。

(3) 対地回路の損失 過渡現象は回路の損失分により、減衰の速さや鉄共振の継続に影響する。対地回路の損失としては静電容量の誘電体損失(tan δ)やGPTの鉄損や負担抵抗などの損失が影響する。この内、誘電体損失は絶対値が小さく、GPTの負担はデジタル形の保護・計測器の普及により小さくなっており、鉄共振が発生し易い方向になっている。

(4) AT開放時の遮断電流の位相 一般の単相回路では、電流遮断後の過渡現象は力率1の場合は直流分が少なくなるが、ルーフ・デルタ結線変圧器では、中性点電位の移動方向が端子間の電圧と90°位相差があることから、負荷力率1で遮断するより負荷力率が低い方が過渡的な直流分が小さくなる。従って、AT開放時の負荷力率が低い方が鉄共振現象も発生し難い。新幹線用のき電線では、き電線の対地静電容量によりAT開放時の負荷力率は低くなるので、構内印加の場合でなければ鉄共振現象は発生し難いといえる。

(5) 鉄共振のシミュレーション AT開放時の過渡現象の解析は、第7図の回路をEMTP上でモデル化して行う。対地静電容量は、5項のAT開放時の対地電位を求めるために算出した値を用いる。



第8図 鉄共振発生時のシミュレーション波形例
AT開放時に鉄共振が発生し、異常振動が発生している。

鉄共振現象を正確に求めるためには、GPTの励磁特性及び巻線抵抗や負担を正確にモデル化する必要がある。また、負荷回路の力率を正確に模擬することが重要である。

第8図に鉄共振発生時のシミュレーション波形例を示す。第8図は構内印加でGPTの負担が数VAの条件であり、繰り返しの投入試験でGPTに残留磁束が残っている時にATを開放し、鉄共振が発生した例である。

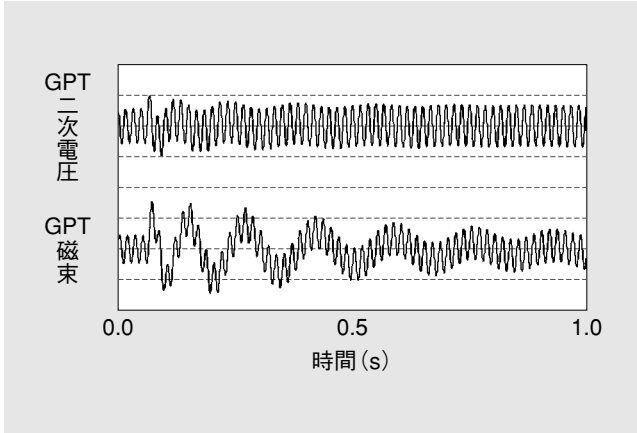
6.3 鉄共振の抑制

鉄共振が発生した場合には、GPTの鉄心が飽和し一次巻線に過大な電流が流れる。GPTは投入時の励磁突入電流を考慮した設計となっているので、短時間であれば問題無いが、鉄共振が継続するとGPTの巻線温度上昇が過大となり、不具合に結び付く。

対策としては、GPTの二次回路に抵抗を接続する方法がある。この方法によればGPTの直流分の影響を速く減衰することができ、鉄共振の発生を抑制することができる。第8図の条件で、GPT二次回路に120Ωの抵抗(負担100VA相当)を接続した時のシミュレーション結果を第9図示す。抵抗追加により、鉄共振が発生しなくなっていることが明らかになった。

7. む す び

以上のような解析技術を用いてルーフ・デルタ結線変圧器を実用化することができ、九州新幹線や東北新幹線にルーフ・デルタ結線変圧器を納入し、順調に運転している。今回の実用化に際し、10MVA試作機による検証の機会を与您に提供



第9図 GPT二次に抵抗を追加した時のシミュレーション結果

GPT二次側に抵抗を接続したことにより、対地静電容量とGPT励磁インダクタンスによる振動が安定的に減衰している。

た東日本旅客鉄道(株)，(独)鉄道建設・運輸施設整備支援機構，(公財)鉄道総合技術研究所に深く感謝する次第である。

・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》



小川吉晴 Yoshiharu Ogawa
変圧器の設計・技術開発に従事



品田真也 Shinya Shinada
電鉄用電気設備のエンジニアリング業務に従事

