

零相変流器における三次元非線形動的電磁界解析

特集

松本 廣太(まつもと こうた)

工藤 高裕(くどう たかひろ)

浅野 久伸(あさの ひさのぶ)

1 まえがき

漏電遮断器は低圧回路の地絡・過電流保護の主要機器として大いに発展・普及しており、近年、省施工性や省スペース化などの要求に対して、小型化・外形寸法の標準化など柔軟な対応を図ってきた。零相変流器(ZCT)は漏電検出部の主要部品であり、一次側導体に地絡による漏れ電流が発生した場合に誘起電流が発生し、二次側コイルで検出する。電磁界解析については有限要素法や並列計算技術^{(1)~(3)}などの各種手法により三次元解析、大規模解析への対応が図られて、コンピュータの高性能化と相まって実用的な解析が可能となってきた⁽⁴⁾。

三次元非線形動的電磁界解析により誘導電流を求め実機に適用した例はあまりないが、今回漏電遮断器の主要部品のZCTに適用して実用的な結果を得た。解析法は、空間のメッシュ分割が不要で要素分割も比較的粗くてよいという特徴がある積分要素法を用いた。ZCTの三次元非線形動的電磁界解析の適用例を、解析モデルと実機データとの比較検証を中心として紹介する。

2 零相変流器

図1にZCTの外観を示す。ZCTは、微小な地絡電流を検出し、漏電遮断器を動作させる重要な働きをする。

漏電遮断器に電動機が接続された場合、過渡突入電流により、ZCTの二次側に電圧が生じ、あたかも地絡が発生したときと同じ現象が発生する。過渡突入電流においてZCTの二次側に電圧を生じさせない性能は平衡特性と呼ばれる。ZCTは、この平衡特性を定格電流の10倍以上保つこと、微小な地絡電流を正確に検出することが要求される。

ZCTの構造は、鉄心に透磁率の高いパーマロイを用いて微小電流の検知を可能にし、30 ~ 500 mA までの定格感度電流に対して正確に検出する。また、過渡突入電流により、ZCTの二次側に電圧を生じさせるのを防ぐために鉄心をシールド板とシールドケースで囲んでいる。図2に

図1 ZCTの外観

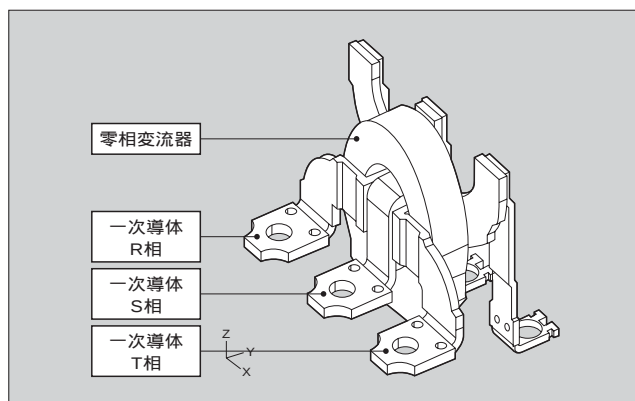
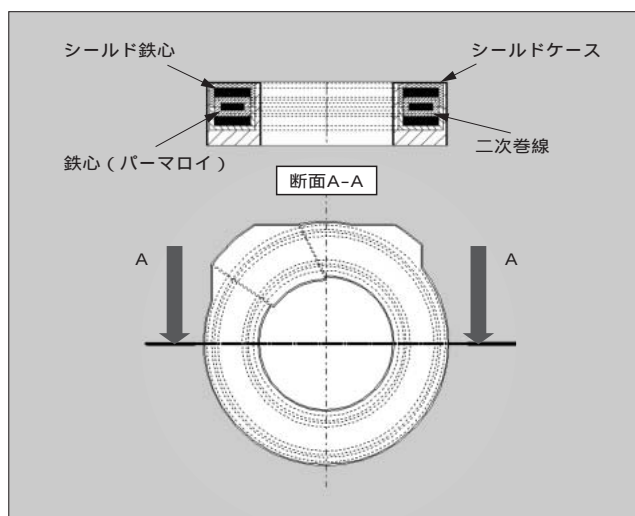


図2 ZCTの構造



ZCTの構造を示す。

3 三次元非線形動的電磁界解析

近年、電磁界解析においては有限要素法(FEM)⁽⁶⁾、境界要素法(BEM)、モーメント法、時間領域差分法(FDTD)などの解析手法が適用され、コンピュータの高速化や並列



松本 廣太

技術計算支援業務および技術計算運用管理業務に従事。現在、富士電機アドバンステクノロジー(株)機器技術研究所。日本機械学会会員。



工藤 高裕

低圧遮断器などの開発に従事。現在、富士電機アドバンステクノロジー(株)機器技術研究所副主任研究員。電気学会会員、日本応用磁気学会会員。



浅野 久伸

低圧遮断器の開発設計に従事。現在、富士電機機器制御(株)器具事業部技術開発・生産センター開発部。

計算により、高精度化、大規模化、高速化が図られている。電磁界解析においては空間も解析範囲に含む解析手法があるが、この場合、空間もメッシュ分割が必要になる。解析対象が複雑な場合、解析全体に占めるメッシュ分割の負荷は現在もなお大きい。空間のメッシュ分割を必要としない解析手法の一つとして積分要素法がある。また、積分要素法の場合は、有限要素法などに比較して一般的には要素分割を細かくする必要がないという特徴もある。今回、精度的な面も考慮し、さまざまな形状に柔軟に対応するため積分要素法による電磁界解析汎用プログラム ELF/MAGIC を適用した。積分要素法は積分方程式法をベースとし各種の手法（磁気モーメント法、表面磁荷法など）をハイブリッドした解析手法である。

④ 解析結果と検証

3 極の ZCT を用いて、通电の有無による地絡特性、平衡特性について検証を行った。図 3 a) に 3 極品全体のメッシュモデルを、図 3 b) に ZCT のメッシュモデルをそれぞれ示す。

4.1 通电時の地絡特性解析

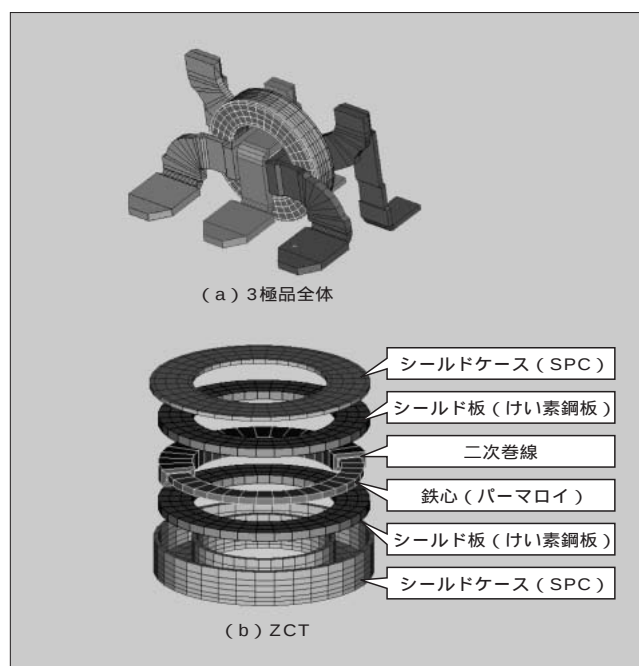
ZCT の負荷側に地絡事故が生じた場合、地絡電流に比例した磁束が ZCT の鉄心に発生し、その磁束により二次巻線に電流が誘導され、これにより地絡を検出する。本解析にて二次巻線に誘導される起電力値の検証を行った。

解析条件は、R-T 相に 50 Hz、225 A を通电し、地絡電流は R 相に 30 mA を流している。

図 4 に地絡の有無による鉄心の磁束密度の比較を示す。

注 ELF/MAGIC : (株) エルフの登録商標

図 3 メッシュモデル



地絡がない場合（上図）は、すべての位相において、磁束密度が小さく（0.01 T）、ほぼ一様であるのに対して、地絡のある場合（下図）は、地絡相の近傍に磁束が発生しているのが分かる。図 5 に一次側電流 225 A で地絡電流 30 mA における二次側誘導電流波形について実測値と解析結果を示す。解析値と実測値との最大誤差は 3 % 以内に収まっている。

4.2 無通电時の地絡特性解析

無通电時も地絡電流に比例した磁束が鉄心に発生するので、早期に鉄心が飽和する。飽和が進んで比透磁率が低下すると最終的には空心状態（比透磁率が 1）となる。本解析により鉄心の飽和特性を検証した。

一次側電流値が低い場合は ZCT の二次側電流値は正弦波となっているが、高い場合は正弦波形がひずむ。ZCT

図 4 鉄心内の磁束密度分布

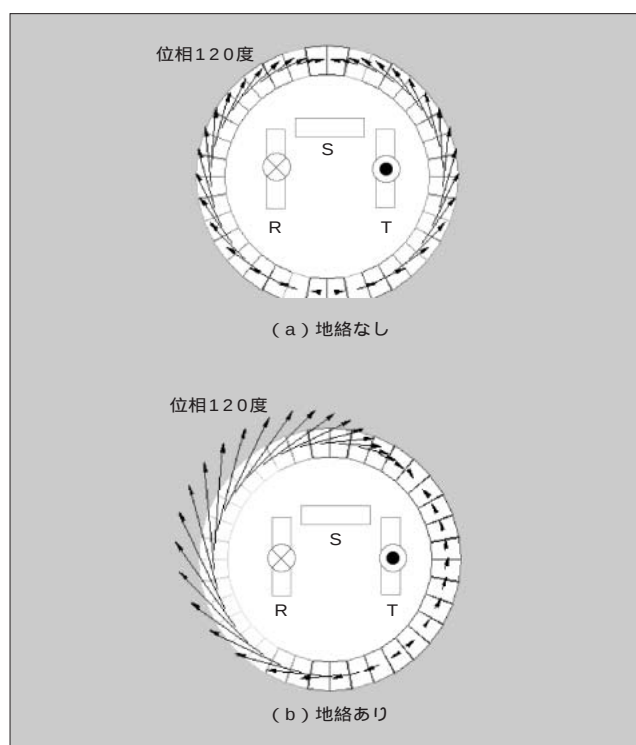
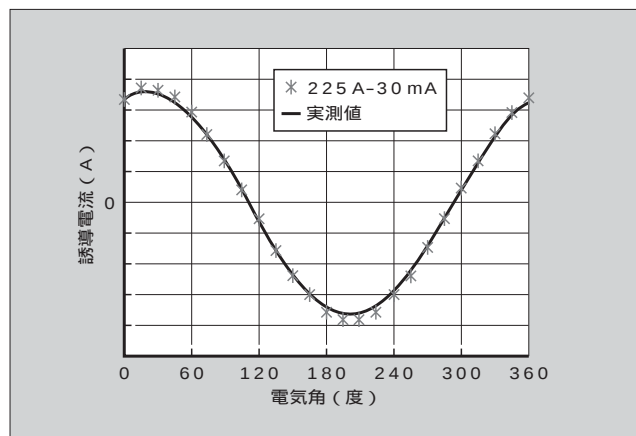


図 5 30 mA 地絡時の誘導電流波形



の負荷抵抗が大きくなると正弦波形がひずむ電流値が小さくなっていく。正弦波形をなしている一次側電流値の範囲は実測と一致している。

図6に、ZCTの一次側電流に対するZCTの二次側出力の関係を示す。ZCTの二次側出力は二次側電圧があるしきい値を超えた時間で表している。一次側電流が一定値を超えると鉄心の磁気飽和が発生し、比透磁率の低下に合わせて二次側出力も低下する。鉄心の比透磁率が1、すなわち二次コイルが空心状態になったところで最も出力が低下し、その後、一次側電流の増加とともに二次側出力が増加する。図6における実測値と解析値の最大誤差は10%以下である。図7、図8に1Aと10Aにおける二次側電圧

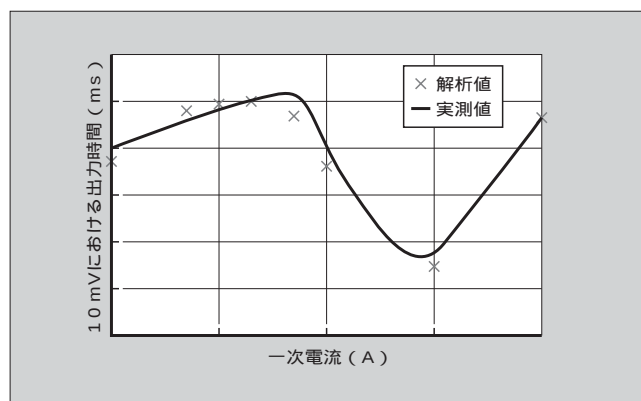
図6 I - V 特性

図7 1A 通電時の出力波形

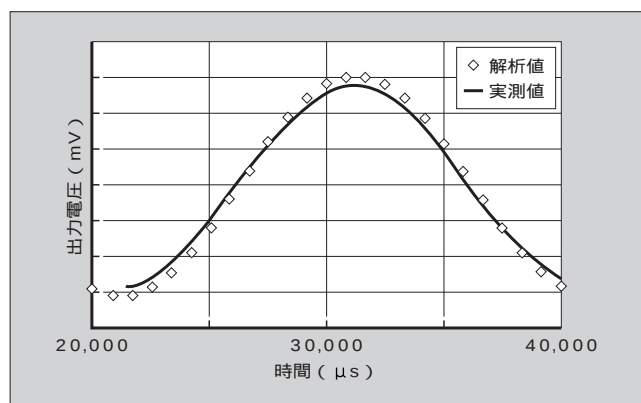
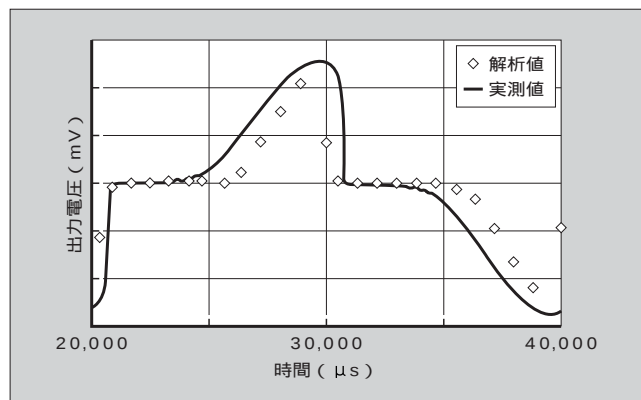


図8 10A 通電時の出力波形



波形の実測値と解析値を示す。一次側電流が10Aともなると鉄心の飽和により正弦波形がひずんでいる部分で、ピーク値の解析値と実測値の誤差が大きいが、ピーク値の近傍の解析時間刻みを細かくすることで誤差は小さくすることができる。

4.3 平衡特性解析

一次電流が平衡している場合、各電流により発生した磁束を鉄心と二次巻線で周回積分することにより、二次側への誘導起電力を零にしているが、ZCTを本体に組み込む場合、収納スペースの制約からZCTと貫通導体が密接しており、導体からの磁束の回り込みによる影響を受けやすい。一次電流の増加に伴い、回り込み磁束が増加し、鉄心やシールドが飽和することにより、磁束のアンバランスによる誘導起電力がZCTの二次側に出力されると考えられる。本解析により、鉄心、シールドの飽和特性の検証を行った。

図9に、一次側のR-S相に450A、1,800A、3,111Aの平衡電流を通電した場合の図中の矢印の方向から鉄心を見た鉄心の磁束密度分布を示す。図9から、一次電流の増加により導体近傍の鉄心の磁束密度が高くなっていることが確認できる。この磁束密度が高い状態では鉄心は飽和して

図9 鉄心の磁束密度分布

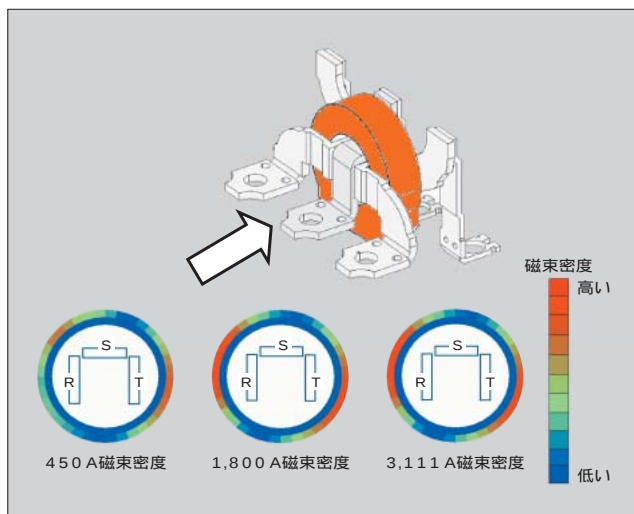


図10 1,800A 通電時のZCTの二次出力電圧波形

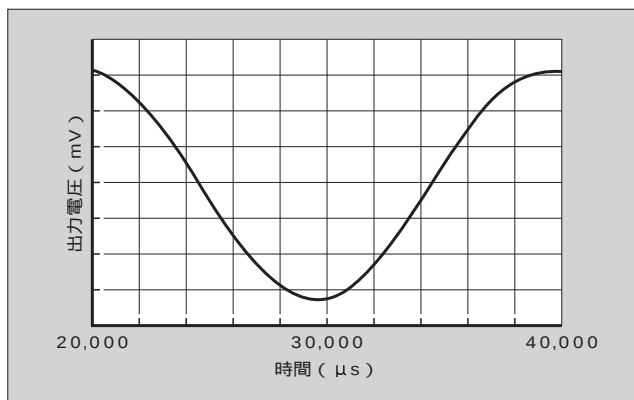


図 11 3,111 A 通電時の ZCT の二次出力電圧波形

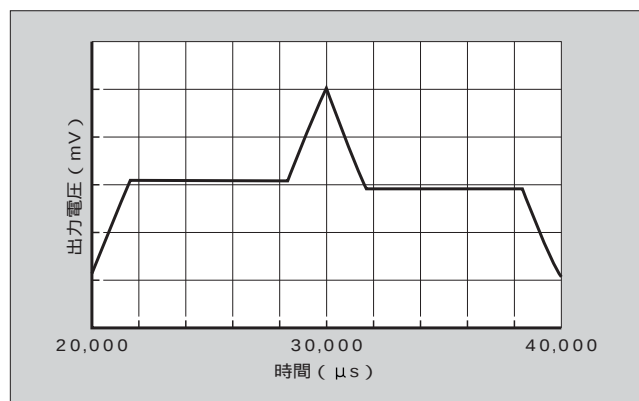
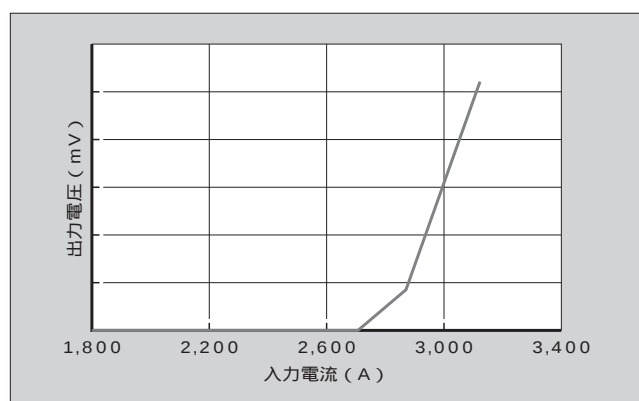


図 12 一次電流に対する二次側出力電圧の解析結果



おり、一次電流の増加による磁気飽和により、ZCT の二次側電圧波形が飽和することも確認できた。

なお、図10に 1,800 A、図11に 3,111 A の平衡電流を通電した場合の ZCT の二次出力電圧波形を示す。図12には

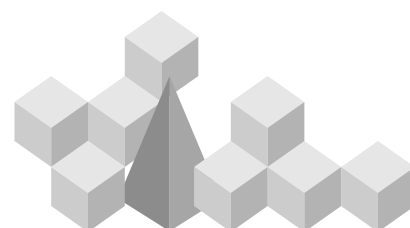
一次電流に対する二次側出力電圧の解析結果を示す。一次側電流を増加させていくと、ZCT の二次出力電圧は急激に増加することが確認できる。

5 あとがき

ZCT に三次元電磁界動的な非線形解析を適用した例として、3 極品の解析結果と実測による検証について紹介した。電磁界解析は解析手法の進展とコンピュータの性能向上と相まって実用的になってきている。解析により形状、配置などの変更などに柔軟に対応できるとともに、さまざまな現象を詳細に把握でき改良などに対して有用な情報を得られる。電磁界解析をはじめとする解析の適用範囲をさらに他製品の開発にも広げていく予定である。

参考文献

- 1] ADVENTURE Project Home Page. <http://adventure.q.t.u-tokyo.ac.jp>
- 2] 金山寛ほか．大規模磁場解析モジュール ADVENTURE_Magnetic．日本計算学会論文集．vol.7, no.2, 2002, p.719-720.
- 3] 松本悟史，藤井清．並列計算による変圧器の三次元電磁界解析技術．富士時報，vol.76, no.4, 2003, p.212-216.
- 4] 松本廣太，浅川修二．技術計算サーバとその解析事例．富士時報，vol.74, no.6, 2001, p.335-339.
- 5] 回転機技術委員会．回転機の三次元 CAE のための電磁界解析技術．電気学会技術報告，第 855 号，2001.
- 6] 金山寛．計算電磁気学．岩波講座 現代工学の基礎 空間系．岩波書店，2000.
- 7] (株)エルフ ELF/MAGIC リファレンス．2003.





＊本誌に記載されている会社名および製品名は，それぞれの会社が所有する
商標または登録商標である場合があります。