

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 20 日現在

機関番号：32663

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560347

研究課題名(和文) 時間領域法によるコイル浮遊容量問題へのアプローチ

研究課題名(英文) Study of Winding Stray Capacitance in Time Domain

研究代表者

加藤 正平 (KATO, SHOHEI)

東洋大学・理工学部・教授

研究者番号：80103571

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：抵抗とインダクタンスによってゆっくり増加する電流に加え、コイルのステップ応答の初期段階にスパイク上の電流が現れる。これは、巻線間で浮遊静電容量コンデンサーが形成され、これに充電電流が流れるとして、広く知られている電流である。しかしながら、本研究では、コイルのステップ応答において、階段状にこの電流が変化することを明らかにした。

実験に加えて、モーメント法とFDTD法を使用した数値電磁界解析法で応答をシミュレーションした。解析と実験結果は良い一致が得られた。巻線間の静電容量や電磁誘導、伝送線路理論によって階段状電流を考えた。

研究成果の概要(英文)： Spike-like current appears at the early stage of the step response of coils in addition to the current which increases slowly depending on the resistance and the inductance. It is widely noted the spike-like current to be a charging current that flows to the capacitor between windings, so-called stray capacitor until now. However, in this study, we clear the spike-like current that appears to the step response of the coil and decreases stepwise. The enlarged initial stage of the current peak shows stepwise current decay.

In addition to the experiment, we simulated the response by numerical methods, which are based on method of moment and finite difference time domain method to obtain the current, electric field and magnetic field distributions of the coil. The calculated and measured responses were in good agreement. We try to explain the current in electrostatic, electromagnetic induction and transmission line theory.

研究分野：電力工学

キーワード：サージ コイル 変圧器 数値電磁界解析 FDTD法 モーメント法

1. 研究開始当初の背景

(1) 電気電子機器において巻線構造のリアクトルや変圧器は広範囲に使用され、その電気特性は詳細に明らかにされていると考えられてきた。最近、電力用スイッチング回路のように高周波で使用することが増加し、その高周波特性を決める静電容量の発生機構については複数の考えがある。

(2) 巻線間には時間的に変化する過電圧やサージ電流が現れるが、その空間的、時間的変化について明らかにされていない。信頼性を高めるために過電圧の発生状況を明らかにする必要性が生じている。

巻線構造の使用には長い歴史があるにもかかわらず、名部の電圧や電流変化についての研究は少なく、特に静電容量の発生機構については不明であった。

2. 研究の目的

インダクタンス素子の高周波特性を決める静電容量の発生メカニズムを実験的、数値電磁界解析から明らかにし、巻線の過電圧対策、サージ対策に必要な等価回路を求める。

3. 研究の方法

インダクタンス素子はインピーダンス計やネットワークアナライザ等で周波数特性を求めることが多い。しかし、本研究では、サージ特性を主体とする時間応答を扱う。時間応答は時間領域反射法 (TDR 法) で求める。ところが TDR 法は高い時間分解能の測定を必要とする問題がある。そこで、以下の手順で研究を行った。

(1) 測定を容易にするため、大型の巻線構造のリアクトルを作成する。

(2) 立ち上がりが 1ns 以下の高速パルスをコイルに印加して電流の反射特性を求める。また同時に巻き線間の電圧も測定する。電流測定は電流プローブを使用し、コイル間の電圧測定には従来の電圧プローブに加えて、ポッケル効果を利用した電界測定素子も使用する。

(3) コンピュータ解析のためのモデルをモーメント法と FDTD 法に対して作成する。

(4) コンピュータ解析と実験結果との比較から、コンピュータ解析の精度を検証する。

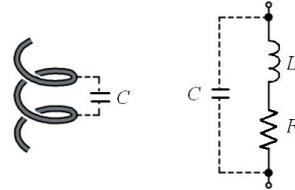
(5) 解析結果と測定結果から巻線構造の等価回路表現を求める。

4. 研究成果

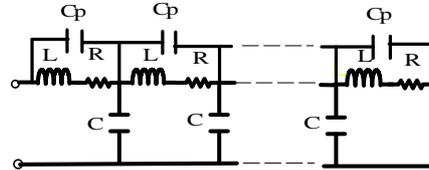
(1) コイルの等価回路 コイルの等価回路として、図 1 に示す静電容量と抵抗、インダクタンスからなる回路がこれまで使用されている。インダクタンスはインダクターとしての本来の機能であるが、抵抗は導線の抵抗分を表す。静電容量は高周波におけるコイルの共振を表す浮遊容量である。この容量には端子間の静電容量やコイル間の静電容量が含まれる。端子間容量は静電気学における離れた 2 つの金属片の静電容量である。一方コイル間の静電容量は、コイルが導体であり直流レベルでは短絡されるため、理解し

難い。これについては、コイルの静電容量は高周波において波長が短くなれば巻線間の電位分布が場所によって異なるようになり、導体で接続されていても電位が異なるために静電容量が表れると説明する。また、スパイラル導体のインピーダンスに負の成分が表れることから静電容量を使用する。

各ターンの等価回路を直列に接続した図 1(c) のはしご形等価回路では、ターンの LR 素子に並列に静電容量を追加してコイル間の静電容量を表す。



(a)巻線間の静電容量 (b)集中定数等価回路



(c) はしご形等価回路

図 1 . コイルの等価回路

線路の伝搬を考える場合には、等価回路として分布定数回路を使用するが、コイルの場合、図 1 (c) のような C_p を使用して巻線間の静電容量を表すことが行われる。すなわち、抵抗とインダクタンスに静電容量を並列にした単位長さ当たりのインピーダンスと対地静電容量からなる伝送線路の等価回路である。

図 1 (b) の回路を、電源抵抗 R_s を有するステップ電圧源 E に接続すると、非振動解をもつ場合には図 2 のような電流が流れる。初期のパルスは主に静電容量に流れる電流であり、定常値に漸近する部分はインダクタンスに流れる電流である。分布定数回路でも、終端が短絡による振動が、往復反射があるにしても、 C_p のために図 2 に類似した電流になる。一般に、図 2 のような応答から図 1 の等価

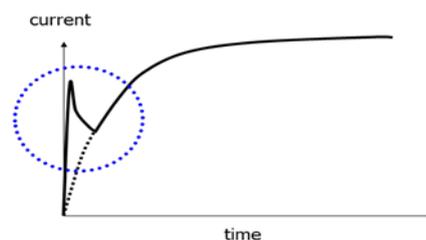


図 2 コイルのステップ電流応答

回路を作成する。本研究では数値電磁界解析から変圧器モデルの浮遊容量も検討した。解析でも浮遊容量によると考えられるスパイク状の減衰電流が現れた。さらに、その立ち上り部分を詳細に調べてみた。

コイルのサージ特性を評価する方法として、ステップ電圧を印加して、電流の時間変化から等価回路定数を求めるステップ法がある。ステップ法では電流の大きさや時間変化から抵抗、インダクタンス、静電容量を求めることができる。しかし、図2に示すように、インダクタンスとしての電流特性に加え、電流の立ち上り部分にスパイク状の電流が流れる。これを巻線間の静電容量、いわゆる浮遊容量に流れる充電電流と考えられてきた。



(a) 測定用モデル



(b) 解析モデル

図3 モデルの概観

(2) コイルモデル 実験、および解析に使用するコイルは、コイルを伝搬する電流や電圧の時間分解能を高くするために、通常より大型なものを作成した。実験モデルコイルは、直径1mmの銅線を、直径1mの紙製のポビンに巻き数40回、巻幅4.5cmである。数値電磁界解析法のモーメント法では誘電体の近似が困難なため、完全導体の細線でコイルをモデル化し、FDTD法では完全導体と、絶縁被覆を考慮したモデルを作成した。

各モデルコイルの概観を図3に示す。

(3) ステップ応答結果 実験モデルのステップ応答を測定するために、電流プローブでコイルに流入する電流を測定した。また、巻き線間の電圧は、メタルシースの電圧プローブを使用する方法と、ポッケルス素子を使用し光ケーブルで絶縁を確保しながら電圧信号を得る方法を検討した。

実験的に測定した電流のステップ応答を図4に示す。これまでのRL直列回路の一次遅れ系の特性であったが、静電容量を充電するとされる電流スパイクが初期に現れた。このスパイク部分を高速のオシロスコープで調べたところ、図4のように階段状に減衰することが明らかになった。これは、測定のみならず、数値電磁界解析法のモーメント法や、導線の絶縁被覆も考慮したFDTD法による数値シミュレーションでも階段状に変化する

電流を確認することができた。図5、6にモーメント法で求めた電流応答を示す。初期の変化は、図4の測定結果より明らかに階段状であり、シミュレーションにおける数値的な振動ではない。

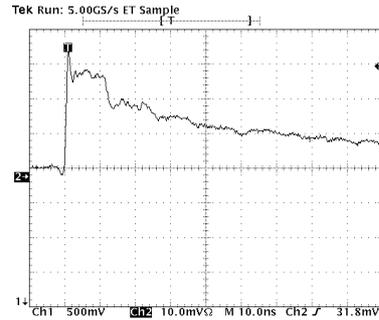


図4 ステップ応答初期の実験結果

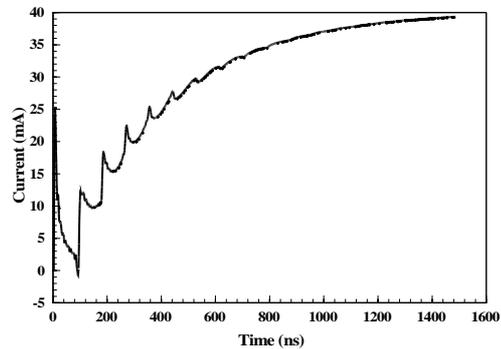


図5 モーメント法によるコイルの応答

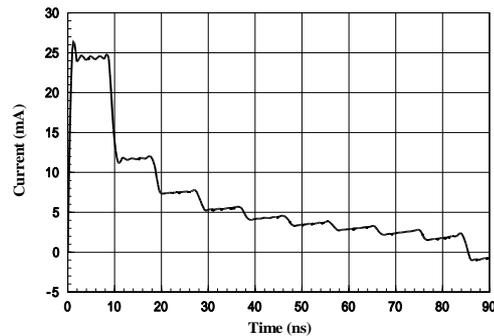


図6 モーメント法によるステップ応答初期

(4) 巻線内のサージ現象 以上の結果は、コイルの入力端子から見た応答のため、電圧や電流の反射応答になる。この方法ではコイル内の電圧電流の様子が不明であるので、巻線内に電流プローブを挿入する、あるいは巻線間に電圧プローブを設置して測定した。

図7に巻線の入力端から5ターン毎に、巻き線中央部まで各部の電流の測定結果を、また図8に同じ構造のコイルのモーメント法による解析結果を示す。

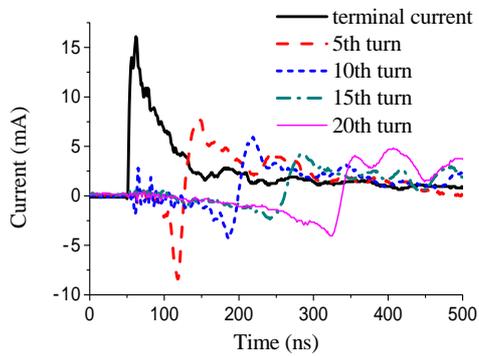


図 7. 巻線電流 (実験)

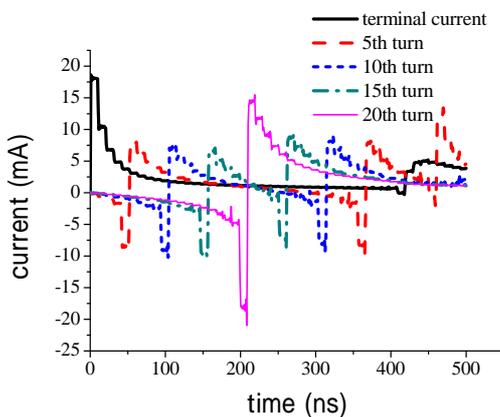


図 8 巻線電流 (モーメント法解析)

巻線内の電流は、端子からコイル内に流入すると、流入電流は正であるにもかかわらず、負極性の電流が正極性電流以前に流れ、双極性の電流が流れていることが明らかである。これは実験的にも、解析的にも見られる現象であり、これまでの入力から一方向に、すなわち一定極性のサージ電流が流れるとする伝送線路回路モデルが成立しないことが示された。

巻線間電圧は図 9 に示すように入力端近傍で高い値になるが、コイル内は変化が小さい。時間変化の特徴として、内部では入力からのサージ電圧が到達する以前にも、低い電圧が発生していることがある。

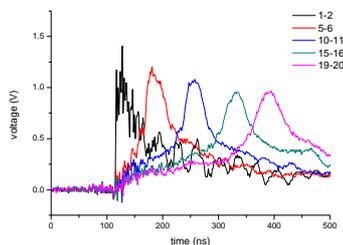


図 9 電界センサによる巻線間電圧分布

(5) ターン内のサージ解析 巻線の電流や電圧分布は入力端からのターン数で調べ、電流が双極性になる現象を得たが、その発生メカニズムを明らかにするため、隣り合う導体の電流分布をシミュレーションで調べた。

シミュレーションでは 1 ターンを 100 個の細線で近似し、全体で約 4000 の未知数を使用し、またフーリエ解析をするために計算周波数の総数は 8096 を採用した。2.6GHz の Xeon システムで約 9 時間の計算時間であった。

図 10、11 に巻線の 1 ターンの各位置における電流波形を示す。電流の向きは入力端から 2 番目の巻線に向かう向きを正とする。また図 10 内のパラメータは 1 ターンを 3.6 度毎に分割して作成した細線の番号を表す。# 1 が図 12 の入力端 T1 であり、# 50 が 1 ターンの中央 (図 12 の点 M)、# 101 が次のターンの端子 T2 になる。

電流変化は 3 つのグループに分けられる。第一は T1 から M までに流れる電流でステップ状に増加した後、一定値を保つが T2 からのサージが到達することでステップ状に減少する。第二のグループは T2 から T1 に向かうサージであり、第一グループの電流波を減少させる。第三は、T2 から 2 番目のターンを進行するサージであり、負極性の電流となっている。

図 10 では空間的に分布する電流の変化が理解しにくいので 3Dwall 表示で図 11 に示す。水平軸は時間と図 10 のパラメータと同じコイルの位置を表す。コイルの誘導された T2 から T1 に向かう電流は、基準とする電流方向とは逆であり、また負電流であるため正電流の表記になる。これが T1 から流入する電流と重畳すれば、電流の減少が発生する。

モーメント法では電圧を直接未知数とはしないため、線間電圧は、電流による電磁界を求め、線間の電界を積分して求める、あるいは配線も含めて実際の測定器をモデル化して求めることになる。今回の解析では線間中央の電界に線間距離を乗じて求めることにした。平行 2 線間の電界は線間中央部で最低になるので、今回の解析の電圧は測定値よりも低くなる。

図 13 に各巻線間の電圧を示す。静電界解析では一般に、コイルの入力端付近の電圧が高く、中央部ほど電圧が低下する。サージでも実験によれば入力端付近の電圧が高くなる。時間が十分経過すればコイルであるから端子電圧は 0 に収束することになるが、初期に現れるサージ電圧は、図 13 に示すようにコイル端子印加電圧 12V の巻線均等分担電圧よりも高いサージ電圧が現れている。しかし、FDTD 法を使用したシミュレーションでは、コイル内部ほどサージ電圧が高くなる結果が得られた。

時間変化は測定結果と類似するが、巻線中央ほど振動が発生し、負の電圧が現れている。波高値の分布は図 14 に示すようにコイル入

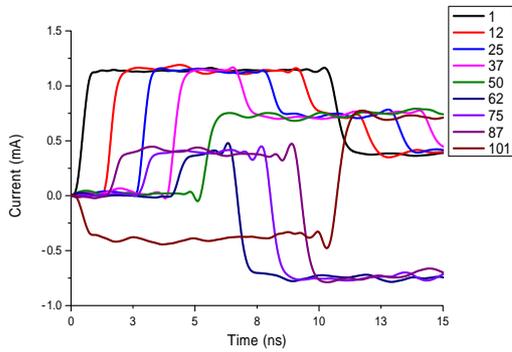


図 10 1 ターン内の電流変化

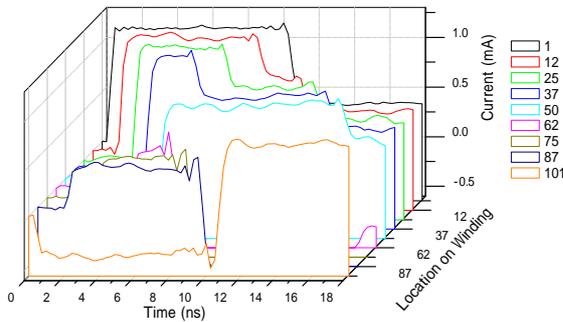


図 11 電流の空間分布

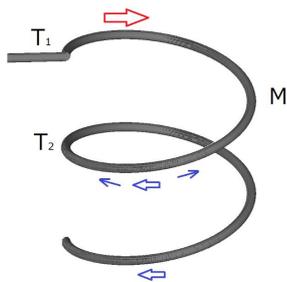


図 12 電流の向き

力端で高くなり、測定と同様な分布である。ただし、電圧値は実測値の 1/4 と低い。

研究対象の巻線には空芯を採り上げた。誘電体や磁性体による影響を避け、導体を伝搬する現象のみを考えるためであった。しかし、変圧器のように磁性体を使用するものが多いため、磁性体が存在する場合の解析も試みたが、十分な成果は得られなかった。今後、鉄心を含む解析への研究展開が必要である。また得られた電磁現象の基礎的な知見を、電力機器設計へ生かすことが期待できる。

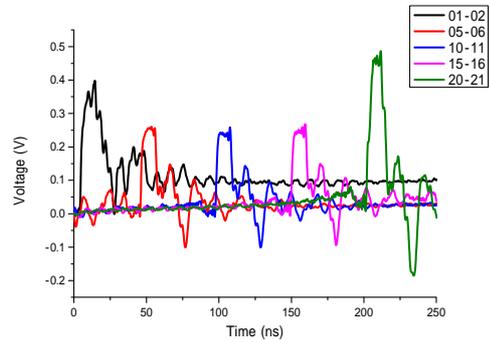


図 13 近傍巻線間の電圧

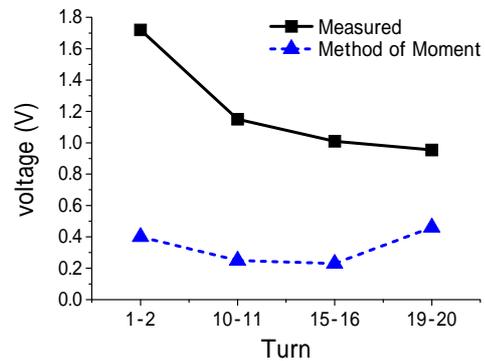


図 14 実験と解析のピーク電圧分布

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 0 件)

〔学会発表〕(計 6 件)

加藤正平、数値電磁界解析法による変圧器モデルのサージ解析、電気学会高電圧研究会資料 HV-15-051、2015 年 02 月 19 日、島根県立産業交流会館(島根県・松江市)

加藤正平、巻線内の電圧電流サージ現象、電気学会エネルギー部門大会、2014 年 09 月 09 日、同志社大学(京都府・京田辺市)

加藤正平、生方智、巻線サージの研究、電界センサによる巻線間電圧の測定、電気学会全国大会 7-071、2014 年 03 月 18 日、愛媛大学(愛媛県・松山市)

加藤正平、生方智、鉄心入りコイルのサージ解析、電気学会全国大会 7-086、2013 年 03 月 20 日、名古屋大学(愛知県・名古屋市)

生方智、加藤正平、ソレノイドのサージ解析、電気学会電磁環境研究会 電気学会研究会資料 EMC-13-012, p1-6, 2013 年 3 月 12 日、あわら温泉「灰屋」(福井県・あわら市)

生方智、加藤正平、ソレノイドのサージ解析、電気学会エネルギー部門大会、2012 年 09 月 12 日、北海道大学(北海道・札

幌市)

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0件)

取得状況(計 0件)

〔その他〕

ホームページ

<http://133.79.29.30/coil>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

加藤 正平 (KATO, Shohei)

東洋大学・理工学部・教授

研究者番号: 80103571