

論文内容の要旨

氏名	山本 哲也
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	産第27号
学位授与の日付	平成21年3月21日
学位授与の要件	学位規程第4条第1項該当
学位論文題目	変圧器を用いた電圧制御回路の高精度化とその応用に関する研究

論文審査委員 (主査)	教授	園田 敏勝
(副主査)	教授	中野 吉正
(副主査)	教授	江崎 秀

人体の脳や心臓から発生する磁界を計測する生体磁気計測では、 10^{-10} ~ 10^{-14} Tの極めて微弱な磁界を検出する必要がある。しかし、微弱磁界を計測する際、地磁気の時間変動や電気機器などの発生する磁界は、大きな雑音磁界となるため、磁気シールド装置が必要となる。磁気シールド装置の一つに、パーマロイなどの強磁性体で被測定対象を囲う受動的磁気シールド装置がある。ところが、この装置を製作するには、数トンから数十トンの材料が必要となり、極めて高価となる。これに対して、安価で、軽量・可搬な磁気シールド装置の開発が望まれている。

磁気シールド装置を製作する際、装置に用いる強磁性体材料の磁気特性を評価しなければならない。従来これに対して、B-Hループが広く用いられている。ところが、B-Hループを得る際、装置が大型であるため、励磁電源電圧は、数100Vを超える場合がある。さらに、B-Hループの形状は、励磁条件によって大幅に異なるため、励磁電源には、高精度な電圧源、電流源など種々の機能を持ったものが必要となる。

また、今日広く用いられている電子計測機器の等価入力回路面積を推定する際などには、任意周波数の交流磁界が必要となる。例えば、0.1mT, 1kHzの交流磁界を全長1.965m, 半径0.385m, 727巻の空心単層円筒型ソレノイドを用いて発生させると、ソレノイド電圧は、200Vになる。これに対して、日本で市販されている一般的な電力増幅器のダイナミックレンジを考えると、必要とするソレノイド電圧を得ることができない。

交流高電圧を得るもっとも簡単な方法は、昇圧用の変圧器を用いることである。ところが、変圧器には、巻線抵抗と漏れインダクタンス、鉄心の非線形性が存在するため、一次電圧に対して、二次電圧は歪んでしまう問題がある。

本研究では、これら変圧器の有する問題を解決した交流高電圧制御回路の開発を行う。目指す電圧制御回路は、変圧器の二次電圧がその目標値と一致するように一次電流を制御する一種の磁束制御方式である。つまり、電圧制御回路の電圧誤差アンプゲインを極めて大きく設定すれば、変圧器の有する問題を低減でき、併せて外来電磁雑音や磁心雑音の除去にも効果がある。

磁心を用いた電圧・電流・磁界センサなどの最終的な性能は、磁心雑音と電子回路雑音で規定される。たとえば、研究室で検討している直流バイアス差動方式磁界センサの場合は、磁心雑音の方が電子回路雑音の10倍程度大きく、支配的であることを確認している。これに対して、変圧器を用いた交流高電圧制御回路の性能は、磁心雑音や電子回路雑音が問題となる前に、電圧制御回路自身の安定性が問題となる。

交流高電圧制御回路を高精度化するためには、まず制御回路の安定性について解析しなければならない。ところが、解析するためには、少なくとも変圧器の自己インダクタンスの励磁依存性を明らかにし、自己インダクタンスの取り扱いに対する考えを明確にしなければならない。

本研究では、まず変圧器の自己インダクタンスの基本となる強磁性体の磁化特性について検討する。周知のように、強磁性体の性能を評価する際や、磁化特性を知る一方法として、B-Hループが広く用いられている。しかし、B-Hループを得る際の厳密な励磁法は未だ確立しておらず、未解決である。

B-Hループを得る一方法として、被測定磁心に施した巻線から見たB-Hループがある。そこでの励磁磁界は、励磁巻線の励磁電流から知ることができ、磁心の磁束密度は、探りコイルに誘導する電圧を時間積分して得ている。しかし、上記の方法で得たB-Hループの磁界は、励磁電源より被測定磁心に供給する励磁磁界であって、磁心内の磁界ではない。つまり、磁心内には、渦電流に伴う磁界が存在し、B-Hループの形状は、励磁条件によって大幅に異なってくる。

本研究では、従来不明確であった電圧源励磁法(VSEM: Voltage Source Excitation Method)、電流源励磁法(CSEM: Current Source Excitation Method)、磁束制御形励磁法(FCEM: Flux-Controlling type Excitation Method)の物理的意味をB-Hループの形状から明らかにする。

次に、電圧制御回路に用いる変圧器の自己インダクタンスの励磁依存性を明らかにしなければならない。しかし、上で述べたように、強磁性体の磁化特性は、励磁電源の構成法、励磁周波数、励磁振幅の大きさによって大幅に異なるため、自己インダクタンスの詳細について議論するのは簡単でない。

従来我々は、自己インダクタンスを含めた変圧器定数を求める方法として、変圧器の等価回路を用いてきた。具体的には、変圧器の無負荷試験とフェーザ図から求まる自己インダクタンスは、実効値計測に基づいている。

これに対して、電圧制御回路に用いる変圧器の自己インダクタンスは、時々刻々と変化する鉄心の動作磁界レベルにおける微分透磁率に依存して定まる。

本研究では、まず変圧器の簡易等価回路に基づく無負荷試験から求まる自己インダクタンスとB・Hループの形状から求めた自己インダクタンスとの繋がりについて検討する。そして、変圧器を用いた電圧制御回路における、自己インダクタンスの取り扱いに対する一つの指針を得る。

具体的な交流高電圧制御回路の電圧制御性については、無負荷時および負荷時における理論解析と実験を行った。その結果、変圧器の自己インダクタンスとしては、大きい方が電圧制御性に優れることが明らかになった。

さらに、電圧制御回路の動作で問題となるのは、回路で生じる直流ドリフトに伴う変圧器鉄心の直流偏磁である。この直流偏磁は、電圧の制御性を悪化するだけでなく、仮に巻線抵抗が小さい場合には、磁気飽和してしまい変圧器として機能しなくなる。

従来、変圧器の直流偏磁の問題に対しては、真空管を用いた電力増幅器や整流回路の平滑用インダクタンスの例に見られるように、磁路の一部に空隙を設け、磁気抵抗を増やして磁気飽和しないようにしていた。しかし、このようにすると巻線のインダクタンスは、大幅に減少することから、可能であれば空隙を無くしたい。

この問題を解決するためには、電圧制御回路で生じる直流ドリフト成分を低減する直流偏磁防止回路が考えられる。この一例として、励磁電流の直流成分を電圧制御回路の入力側にフィードバックする方法もあるが、制御回路が不安定になる問題を別に解決しなければならない。これに対して、フィードフォワード制御方式である直流偏磁防止回路を提案する。

以上の検討結果から、変圧器を用いた交流高電圧制御回路に対する設計指針を得ることができ、具体的な高精度交流高電圧制御回路を実現した。

論文審査結果の要旨

本研究は、変圧器を用いた交流高電圧制御回路の高精度化とその応用について検討している。

生体磁気計測用能動的磁気シールド装置を構成する場合や電子計測器の等価入力回路面積を推定する際には、交流の高電圧が必要となる。

例えば、0.1mT、1kHzの交流磁界を全長 1.965m、半径 0.385m、727巻の空心単層円筒型のソレノイドを用いて発生させるとソレノイド電圧は、200V(rms)となる。これに対して、日本で市販されている一般的な電力増幅器では、対応できない。交流高電圧を得る最も簡単な方法は、昇圧用の変圧器を用いることである。ところが、変圧器には巻線抵抗と漏れインダクタンス、鉄心の非線形性が存在するため、一次電圧に対して、二次電圧は歪んでしまう問題がある。

そこで、本研究では、変圧器の有する問題を解決するため、変圧器の二次電圧がその目標値と一致するように一次電流を制御する一種の磁束制御方式を採用している。つまり、電圧制御回路の電圧誤差アンプゲインを極めて大きく設定すれば、変圧器の有する問題を低減でき、併せて外来電磁雑音や磁心雑音の除去にも期待できる。

ところが、電圧制御回路に用いる電圧誤差アンプを PI アンプで構成すると、まず電圧制御回路の安定性が問題となる。次に、電圧誤差アンプを構成する OP アンプの開ループゲインの有限性と直流ドリフトも問題になる。

交流高電圧制御回路を高精度化するためには、まず制御回路の安定性について解析しなければならない。ところが、解析するためには、少なくとも変圧器の自己インダクタンスの励磁依存性を明らかにする必要がある。

本研究では、まず変圧器の自己インダクタンスの基礎となる強磁性体の磁化特性について検討している。周知のように、磁性材料を評価する際や、磁化特性を知る一方法として、B・H ループが広く用いられている。しかし、B・H ループを得る際の厳密な励磁法は、世界的にも確立しておらず、未解決である。B・H ループを得る一方法として、被測定磁心に施した巻線から見た B・H ループがある。そこでの励磁磁界は、励磁巻線の励磁電流から知ることができる。また、磁心の平均的な磁束密度は、探りコイルに誘導する電圧を時間積分して得ている。しかし、上記の方法で得た B・H ループの磁界は、励磁電源より被測定磁心に印加する励磁磁界であって、磁心内の磁界ではない。つまり、磁心内には、渦電流に伴う磁界が存在し、B・H ループの形状は、励磁

条件によって大幅に異なってくる。

本研究では、従来不明確であった電圧源励磁法(VSEM: Voltage Source Excitation Method)、電流源励磁法(CSEM: Current Source Excitation Method)、磁束制御形励磁法(FCEM: Flux-Controlling Type Excitation Method)の物理的意味を B・H ループの形状から明らかにしている。

次に、電圧制御回路に用いる変圧器の自己インダクタンスの励磁依存性について検討している。具体的には、変圧器の無負荷試験から求まる自己インダクタンスと B・H ループの平均的な傾きから求まる自己インダクタンスの励磁依存性について検討している。検討の結果、変圧器の自己インダクタンスは、単に無負荷試験では議論できないことを明らかにしている。また、珪素鋼板を用いた変圧器の自己インダクタンスは、励磁磁界レベルによって、数十倍程度変化することを明らかにしている。

具体的な交流高電圧制御回路の電圧制御性については、無負荷時および負荷時における理論解析と実験を行っている。その結果、変圧器の自己インダクタンスとしては、大きい方が電圧制御性に優れることを明らかにしている。

さらに、電圧制御回路の動作で問題となるのは、回路で生じる直流ドリフトに伴う変圧器鉄心の直流偏磁である。この直流偏磁は、電圧の制御性を悪化させるだけでなく、仮に巻線抵抗が小さい場合には、変圧器鉄心は磁気飽和してしまい変圧器として機能しなくなる。

この問題を解決するため、フィードフォワード制御である直流偏磁防止回路を提案している。実験の結果、提案した直流偏磁防止回路は、変圧器の直流偏磁の低減に有効であることを明らかにしている。

また、検討する電圧制御回路を全長 0.6m、半径 0.68m、板厚 1.6mm の両端開口円筒型パーマロイ磁心の磁化特性の評価に適用した結果、電源の有効性を確認している。

以上の検討結果は、変圧器を用いた交流高電圧制御回路の設計指針を与えると同時に、強磁性体の磁化特性の評価法に対する一指針を提示している。

以上のように、本論文の内容は、今日産業界で求められている交流高電圧増幅器の高精度化と磁性材料の新たな評価法に対する明確な方向性を与えており、博士(工学)の学位論文に十分に値すると判断した。