

論文内容の要旨

氏名	谷本 浩一
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	工第196号
学位授与の日付	平成24年3月22日
学位授与の要件	学位規程第5条第2項該当
学位論文題目	鉄道車両用誘導モータの制御と負帰還光増幅効果の応用に関する研究
論文審査委員(主査)	准教授 前田 佳伸
(副主査)	教授 玉田 雅宣
(副主査)	教授 神戸 尚志
(副主査)	教授 中野 人志

パワーエレクトロニクスの発達と計算機能力の向上に伴い、小型で堅牢・高出力かつメンテナンスが容易という特徴を持った三相かご型誘導モータ(以降、誘導モータと記述)が、産業界の動力源として主流になってきた。特に、鉄道分野では新規製作される電気車は誘導モータ搭載車である。その一方、鉄道車両のインテリジェンス化および情報化によって、各センサーや車両制御機器・旅客用サービス用機器はネットワークを介して接続されるようになった。しかし、誘導モータ搭載車両はインバーターも搭載しており、インバーターが発生させる電磁ノイズがそれらの機器やネットワークに悪影響を与えることとなった。本論文では、鉄道車両をキーワードとして、誘導モータのセンサレスベクトル制御に関する1つの提案と、負帰還光増幅効果の応用に関する3つの提案を行う。

本論文の第1章では、「観測波を使った誘導モータのセンサレスベクトル制御について」と題して、誘導モータの回転子抵抗値の変動に伴う回転子回転速度推定誤差を無くすための手法を提案した。

誘導モータのトルク制御にはその回転数の測定が必要である。誘導モータはメンテナンスが容易であるのに対し、回転子回転速度計は精密な装置であるためメンテナンスを必要とする。そのため、回転子回転速度計を取り付けると、システム全体としてメンテナンスが容易とはならなくなる。そこで、センサレス制御という回転子回転速度計を省略した制御手法が提案された。しかし、正確な回転数推定の為には正確なモータ定数が必要である。だが、運転中の回転子は発熱によりその抵抗値が変化してしまうためこれを測定する必要がある。そこで、トルク制御に影響を与えない微弱な信号を観測波と定義して運転中の誘導モータに加えることにより、運転中の回転子抵抗値を測定する手法を提案した。まず、観測波による運転中の回転子抵抗値の測定シミュレーション実験を行った。その結果、測定開始約5秒で、回転子抵抗値が測定できた。観測波1本では、回転子の回転速度上昇とともに誤差は大きくなった。しかし、観測波を2本使用した場合は、回転子の回転速度が上昇しても誤差は変化しなかった。次に、我々は適応型オブザーバーを使って回転子の回転速度推定を行うセンサレス制御系において、誘導モータ運転中に回転子抵抗値が1.5倍に変化する状況を設定したのち、2本の観測波を用いて回転子抵抗値を測定し、適応型オブザーバー中の回転子抵抗値を測定抵抗値で逐次更新するシミュレーション実験を行った。その結果、回転子抵抗値測定を行わなかった場合は、適応型オブザーバーの回転速度推定値に誤差が生じそのまま推移したが、本手法を用いて適応型オブザーバー中の回転子抵抗値を更新した場合には、回転子抵抗値が変化した約3秒後に推定回転子回転速度は通常の誤差に戻った。また、観測波を抽出するために使用したLPFのカットオフ周波数が、回転子抵抗値推定時間に影響を与えていることがわかった。

第2章では、「エルビウム添加ファイバ光増幅器の低周波数帯域特性の改善」と題し、高速光通信網用のエルビウム添加ファイバ光増幅器(EDFA)を、オーディオ帯域と呼ばれる低周波数帯域で使用するための手法を提案した。

強力な電磁ノイズが発生する状況下でセンサーの出力など微弱な信号を扱う場合は、電磁ノイズ対策を施す必要がある。そこで、光ファイバを使ってそれら微弱な信

号を光信号で伝送すれば電磁ノイズ対策は不要となる。その際に光信号を増幅して高感度化を図る必要がある。EDFAはギガビット毎秒 (Gbps) オーダーの高速光通信網用に構築されており、低周波数帯域での使用は一般的に考えられていない。EDFAを低周波数帯域で使用した場合、光サージと呼ばれる光信号が急激に増加して後段の光部品を破壊する現象が生じる。そこで、EDFAの相互利得変調によって得られる強度反転した自然放出光 (ASE) をEDFAに帰還させ、低周波数帯域の特性改善を行った。その結果、0.1 kHzから10kHzの周波数において、最大10%だった歪み率は0.5%に、SN比は30dbから46dB改善された。また、変調度は0.1kHzで24%から80%、10kHzで70%から95%と大きく改善された。さらに、本手法の特徴として、ASE光を用いて特性改善を行っており、従来の電気信号を使って低周波数帯域の特性改善を行う手法に対して優位性がある。

第3章では、「光トライオードを用いた波長変換技術」と題して、光信号のみで波長変換を行う手法を提案した。

大規模な光通信ネットワークに使用される波長分割多重 (WDM) 通信には波長変換デバイスが必要である。そこで、波長変換デバイスとして光トライオードを使用した波長変換実験を行った。光トライオードは3端子光増幅素子であり、ファイバー・ブラッグ・グレーディング (FBG) を取り付けた負帰還型の半導体光増幅器 (SOA) 2個で構成されるデバイスである。そして、入力光波長1550 nmの信号を制御光波長1527.99nm~1572.0nmへの変換実験を行った。その結果、1560nm付近では変調度は20%程度と最低であったが、光トライオードに使用したSOAの中心波長である1530nm付近では70%程度の変調度を得られた。なお、今回の実験での変調度は入力光に対する出力光の信号変換効率に相当する。光トライオードが波長変換デバイスとして有用であることがわかった。また、光トライオードを使用した波長変換は、光信号のみで波長変換を行うため、従来の電気信号を介した波長変換手法よりも全光型のシステムである点で優位性がある。さらに、制御光のパワー変化とそれに伴う出力光のパワー変化の間には線形性が得られた。よって本光トライオードは制御光による波長変換およびスイッチングが可能であることを確認した。

第4章では、「負帰還半導体増幅器 (SOA) を使用したキャビティリングダウン分光法 (CRDS)」と題して、従来のEDFAに代わり負帰還SOAを使用したキャビティリングダウン分光法についての提案を行った。

NO<sub>x</sub>等の有害物質の濃度測定は、大掛かりな装置と複雑な過程を必要とする。一方、高感度な物質の濃度検出法としては、物質が特定の波長の光を吸収する特性を利用したキャビティリングダウン分光法 (CRDS) がある。測定システム内で生じる光減衰を補償するために、光増幅器としてEDFAを用いた場合、その増幅波長帯域 (1490nmから1600nm) の制限を受け、濃度測定可能な物質が限られてしまう。一方、光増幅器の一種である半導体光増幅器 (SOA) は、半導体材料の組織を変更することにより、増幅波長帯域の変更が可能であるという特徴がある。そこで、増幅波長帯

域を、濃度測定対象物質の吸収波長に対応するようなSOAをCRDSに用いた。また、通常のSOAでは雑音が大きいが、負帰還SOAにすることによってCRDS装置の高性能化を図った。濃度測定実験は、SOAの一端に反射多層膜を形成した負帰還型のRSOAを使用したCRDS装置を構築し行った。なお、測定対象物質はシヨ糖で、濃度0.5%、1%、2%、4%、8%、16%の溶液を使用して測定を行った。その結果、検量線に対する決定係数は0.999であり十分信頼できるものであった。また、CRDSは濃度が2倍になると減衰率も2倍になるが、本システムでは濃度が2倍になったときの減衰率は1.82から1.92倍となった。これらの結果から、今回構築したシステムは、濃度0.5%から8%のシヨ糖溶液に対して、CRDS装置として高感度な機能を示した。

第5章では、「結論」と題して、第1章から第4章までの提案手法に対し、まとめと総括を行った。

## 論文審査結果の要旨

本論文の第1章「観測波を使った誘導モータのセンサレスベクトル制御について」について。

小型で高出力・メンテナンスが容易な誘導モータは鉄道車両の主力電動機となっている。制御の際、回転子の回転速度情報が必要だが、回転速度計は一般に精密機械であるため誘導モータに取り付けると、メンテナンスの容易性がなくなる。一方、オブザーバーで速度推定をする手法が考えられるが、モータ定数に誤差があると推定速度には誤差が生じる。特に回転子抵抗値は発熱により抵抗値が大きく変化してしまう。そこで、観測波なる微弱な信号を定義し、回転子抵抗値測定を行う手法を提案し、オブザーバーと組み合わせることで推定速度誤差を無くすことを可能とした。論文提出者である谷本氏は、手法の提案、シミュレータの構築、シミュレーション実験及びデータ解析を担当した。

本論文の第2章「エルビウム添加ファイバ光増幅器の低周波数帯域特性の改善」について。

鉄道車両には多数のセンサーが装備されているが、誘導モータ駆動用インバータが強力な電磁ノイズ源となっている。このような状況下では、センサーによる計測値の伝送及び高感度化はノイズ対策が不要な光ファイバ伝送および光信号での高感度化が有効である。一方、ギガビット毎秒オーダーの高速通信網に使用されるEDFAは、センサー出力信号出力帯域であるオーディオ帯域で使用は不可能である。そこで、負帰還光増幅効果によって低周波帯域での特性を改善する手法が提案された。その結果、0.1 kHzから10 kHzの周波数において、最大15%だった歪み率は0.5%に、SN比は33 dBから46 dBへと改善された。また、変調度は0.1 kHzで26%から80%、10 kHzで70%から95%と大きく改善された。さらに、負帰還光増幅効果の原理から、本来はノイズである光増幅器の自然放光を用いて特性改善を行っている点に特徴がある。論文提出者である谷本氏は、実験データの解析を担当した。

第3章「光トライオードを用いた波長変換技術」について。

鉄道車両内の情報通信網は、ノイズ対策・通信データ増加の点から波長分割通信化されるのが望ましい。しかし、波長分割通信には波長変換器が必要である。だが、既存の方法は光信号-電気信号-光信号という過程を経て変換されるため、波長変換器にはノイズ対策が必要となる。そこで、光トライオードと呼ばれるデバイスを用いて、光信号だけで波長変換する手法が提案された。光トライオードは3端子光増幅素子であり、ファイバー・ブラッグ・グレーディングを取り付けた負帰還型の半導体光増幅器2個で構成される。入力光波長1550 nmの信号を制御光端子に与えた波長1527.99 nm～1572.0 nmへの変換実験が行われた。その結果、1560 nm付近では変調度は20%程度と最低であったが、光トライオードに使用した半導体光増幅器の中心波長である1530 nm付近では70%程度の変調度を得られた。なお、ここでは変調度は波長変換効率に相当する。また、制御光のパワー変化とそれに伴う出力光のパワー変化の間には線形性が得られたことから、光トライオードは制御光のパワー変化と出力光のパワー変化の間には線形性が確認され、光トライオードにスイッチング能力があることが確認された。論文提出者である谷本氏は、波長変換実験、データ解析を担当した。

第4章「負帰還半導体増幅器(SOA)を使用したキャビティリングダウン分光法(CRDS)」について。

NOxの有害物質の濃度測定は、大掛かりな装置と複雑な過程を必要とする。一方、高感度な物質の濃度検出法としては、物質が特定の波長の光を吸収する特性を利用したキャビティリングダウン分光法がある。しかし、キャビティリングダウン分光法は光減衰を補償するためEDFAを用いており、その増幅波長帯域(1490 nmから1600 nm)の制限を受け、NOxのような2000 nm付近に吸収帯域を持つものは測定できない。そこで、材料の組織を変更することにより、増幅波長帯域の変更が可能である半導体光増幅器(SOA)を使用したキャビティリングダウン分光が提案された。濃度測定実験は、SOAの一端に反射多層膜を形成した負帰還型のRSOAを使用したCRDS装置を構築し行った。なお、測定対象物質はショ糖で、濃度0.5%、1%、2%、4%、8%、16%の溶液を使用して測定を行った。その結果、得られた検量線より、本装置はショ糖濃度0.5%から8%において、濃度が2倍になったときの減衰率が平均1.87倍となった。これは理論値の2倍に近く、このことから本装置はCRDS装置として作動したことが確認できた。論文提出者である谷本氏は、実験装置の製作、実験、データ解析を担当した。

以上の通り、これら研究は工学上重要な課題を解決しており、博士(工学)に値するものと認められる。