

氏名(本籍地)	田中 晃 (埼玉県)		
学位の種類	博士(理工学)		
報告・学位記番号	甲第421号(甲理工第2号)		
学位記授与の日付	平成29年9月25日		
学位記授与の要件	本学学位規程第3条第1項該当		
学位論文題目	演算子インピーダンスを用いた同期機諸定数および等価回路定数の算出法に関する研究		
論文審査委員	主査 教授	博士(工学)	堺 和人
	副査 教授	工学博士	小室 修二
	副査 教授	工学博士	中野 秀俊
	副査 明治大学教授	工学博士	三木 一郎

【論文審査】

同期機は同期速度で回転して電気エネルギー変換を行う交流機械であり、交流電力の発生や大容量の電気駆動を担う重要な電気機器の一つである。同期電動機は、交流の周波数で決まる一定の回転速度で運転できること、誘導電動機に比べて高効率で電圧変化に対する最大トルクの変化が少ないこと、ギャップが大きく機械的に堅牢であることなどの特長を有していることから、セメント工業のボールミル、炭酸ガスなどの圧縮機・ポンプ、製鉄所の高炉ブローヤや圧延機などの大出力の駆動機として用いられている。同期発電機は、発電機を駆動する原動機の種類によって水力発電に用いる水車発電機、火力や原子力発電に使用されるタービン発電機、風力発電に使用される風力発電機、内燃機関によって運転されるエンジン発電機などがある。これらの電力用発電機は大容量である。

同期電動機や発電機の運転特性は電気学会電気規格調査会標準規格(JEC-2130)や国際電気標準会議国際規格(IEC60034-3)に記載された試験法によって測定される。例えば、基本的な諸定数である直軸の同期リアクタンスの測定では、三相短絡特性曲線を求めるために定格電流を流す試験や無負荷飽和曲線を求めるために定格電圧を発生させる試験が必要である。また、基本的な時定数である直軸開路過渡時定数の測定では、同期機を無負荷および定格回転速度で運転した状態で、界磁巻線を開閉器で突然短絡したときの電機子電圧および界磁電流の変化を測定する試験が必要である。このように中・大容量機における回転試験は、容量に応じた試験設備(電源、負荷)が必要となること、ならびに試験工数が過多となることなどから、製造現場での実施は困難である。このような背景から、回転

試験によらない簡便な等価試験によって演算子インピーダンスを求め、これより回転機の運転特性を算出する方法が産業界で必要とされ、大学等の研究機関や企業で各種の検討が行われている。

本研究の目的は、静止時の直流試験法から得られる演算子インピーダンスの周波数特性を利用し、電力系統内において重要な機器である同期発電機や電気駆動システムの同期電動機の諸定数を簡易的に算出する方法、および得られた諸定数からより簡便に等価回路定数を算出する方法を創出することである。また、前述の成果を利用してブラシレス同期発電機の過渡特性を算出する方法についても検討する。

本論文は7章から構成されており、各章の内容は以下の通りである。

第1章では、本研究に関する背景および本研究の意義を明らかにし、本研究の目的が直流試験法によって得られる演算子インピーダンスの周波数特性を用いて、同期機諸定数および相互漏れリアクタンスを考慮した同期機の等価回路定数を算出する方法を確立することであることを述べている。

第2章では、同期機の直軸および横軸における等価回路を示し、界磁巻線と制動巻線間の相互漏れリアクタンスを考慮した等価回路定数と演算子インピーダンスとの関係、および同期機諸定数と等価回路定数との関係について述べている。また、直流試験法により同期機の演算子インピーダンスを算出する方法を述べている。

第3章では、横軸に滑り周波数、縦軸に演算子インピーダンスの大きさを描いた周波数特性のグラフを用いて、従来法では算出が難しかった開路時定数および過渡リアクタンスが一義的に求められる新たな算出法を提案している。具体的には、各種演算子インピーダンスの虚部の値が極小となる滑り周波数に対応する時定数が、それぞれ同期機の時定数(直軸開路過渡時定数、横軸開路初期過渡時定数、直軸開路制動巻線時定数)に一致することを理論的に証明し、周波数特性のグラフからこれらの時定数が一義的に求められることを示している。また、供試機によっては作図による算出が難しい直軸過渡リアクタンスについては、前述の時定数を利用した漸近線と周波数特性との交点を利用することで近似的に求められることを示している。周波数特性から同期機諸定数を算出する手法の妥当性は、大容量火力発電機(800MVA, 25kV, 2極, 60Hz)に対する数値計算例にもとづいて検証している。また、制動巻線付き積層磁極突極形同期機(10kVA, 200V, 4極, 50Hz)に直流試験法を適用して得られた周波数特性から算出した諸定数値を、JEC-2130に規定された方法により測定した値と比較することで、提案法の妥当性を検証している。これらの成果により、演算子インピーダンスの周波数特性から同期機諸定数を簡便に求められることを明らかにしている。

第4章では、周波数特性から求まる同期機諸定数を用いて、制動巻線と界磁巻線間の相

互漏れリアクタンスを考慮した等価回路定数の算出法を提案している。

具体的には、直軸における界磁巻線短絡時の演算子インピーダンス $X_{ds}(js)$ の周波数特性および界磁巻線開放時の演算子インピーダンス $X_{do}(js)$ の周波数特性から得られる10個の諸定数を用いて、7個の等価回路定数を求める方法を示している。 $X_{ds}(js)$ から求められる直軸同期リアクタンス x_d 、直軸過渡リアクタンス x'_d 、直軸初期過渡リアクタンス x''_d および直軸開路時定数 T'_{do} 、 $X_{do}(js)$ から求められる界磁巻線開放時の初期過渡リアクタンス x''_d および直軸開路制動巻線時定数 T_{ho} の合計6個の諸定数値を用い、等価回路の等価変換により5個の未知リアクタンスのうちのいずれかひとつを仮定して、諸定数と等価回路定数との連立方程式を解くことで、直軸の等価回路定数が求められる。また、横軸の等価回路定数は、横軸の周波数特性 $X_q(js)$ から求められる横軸同期リアクタンス x_q 、横軸初期過渡リアクタンス x''_q および横軸開路初期過渡時定数 T''_{qo} を用い、直軸で求められる x_l を利用して求められる。さらに、従来の解析式がそのまま使用できるように相互漏れリアクタンス $x_{23}=0$ を仮定した場合、および確定した測定法のない電機子漏れリアクタンス x_l を任意の値に仮定した場合について、四則演算と平方根で構成される等価回路定数の算出式を導出している。なお、いずれの算出式を使用して求められた等価回路定数値であっても、等価変換により等価回路における巻線端子間のインピーダンスは等しくなる。また、いずれの等価回路定数値も、相互漏れリアクタンスが考慮された回路定数値となる。本手法の妥当性は、算出した等価回路定数を用いた三相突発短絡試験の計算値と実測値との比較から検証している。この成果により、演算子インピーダンスの周波数特性を用いて、相互漏れリアクタンスを考慮した等価回路定数を簡便な方法で算出できることを明らかにしている。

第5章では、界磁回路に整流器や放電抵抗が接続されたブラシレス同期機に対する直流試験法の適用方法および等価回路定数の算出法について述べている。具体的には以下のとおりである。

- 1) 界磁巻線開放時の直軸演算子インピーダンス $X_{do}(js)$ は、直流試験短絡時の界磁誘導電流が整流器に対して逆バイアスになるように試験電流の向きを選ぶことで界磁巻線を開放状態とし、整流器が界磁回路に存在する状況下において直流試験法の適用が可能であることを明らかにしている。
- 2) 界磁巻線短絡時の直軸演算子インピーダンス $X_{ds}(js)$ は、外部から整流器を通して界磁巻線に電流を流すことで界磁巻線を短絡状態とし、直流試験法が適用できることを明らかにしている。
- 3) 直流試験法で流す試験電流と界磁回路に流す電流の順序の違いによって、磁気ヒステリシスの影響を低減できることを明らかにしている。
- 4) 界磁回路に放電抵抗が接続されたブラシレス同期機に対しては、界磁巻線端子間を

開放できないために相互漏れリアクタンスの考慮に必要な $X_{do}(js)$ が算出できない。このため、界磁回路に放電抵抗が接続された状態での演算子インピーダンス $X_{dk}(js)$ から相互漏れリアクタンスを考慮した等価回路定数を算出する方法について明らかにしている。

ブラシレス同期機に対する直流試験の適用方法および等価回路定数の算出方法の妥当性は、制動巻線付き積層磁極突極形同期機（10kVA, 200V, 4極, 50Hz）の界磁回路に三相ダイオードブリッジおよび放電抵抗を接続することでブラシレス機を模擬した供試機（模擬ブラシレス機）に直流試験法を適用して諸定数および等価回路定数を求め、三相突発短絡試験の計算値と実測値との比較から検証している。この成果により、ブラシレス同期機に対しても直流試験法の適用が可能となり、諸定数および相互漏れリアクタンスを考慮した等価回路定数が算出できることを明らかにしている。

第6章では、非同期投入時においてブラシレス同期発電機の整流回路に生じる界磁異常電圧をシミュレーションによって明らかにすることを目的として、非同期投入時に生じる界磁過渡特性の算出法について検討している。

具体的には、相互漏れリアクタンスを考慮した磁束鎖交方程式にもとづく非同期投入試験モデルに対して、模擬ブラシレス機に直流試験を適用して得られた等価回路定数を代入することで界磁過渡電流を算出し、実測値と比較している。実測は、直流電動機で供試同期機の回転速度を 1500min^{-1} に保ち、供試同期機の界磁電流により発電機電圧を調整した。発電機の電圧と系統側の電圧を確認し、所定の非同期投入条件（電圧差および位相差）の状態になった瞬間に系統側に投入し、投入前後の各部の過渡応答波形をデジタルレコーダで記録した。この結果より、非同期投入試験モデルを用いた計算値は、界磁電流が負になるような非同期投入条件においても実測値とほぼ一致することから、解析モデルおよび等価回路定数の妥当性を検証している。また、界磁電流が負になるような非同期投入条件では、ブラシレス同期発電機の界磁回路に異常電圧が発生すると考えられることから、電圧差と位相差をパラメータとする異常電圧発生領域マップを示している。

第7章では、各章ごとに得られた成果を体系的に総括し、今後の課題について述べている。

本論文の研究成果により、同期機特性を決める機器定数を静止試験と算出法で得ることができるので大規模な試験設備が不要になり、本算出法で得た機器定数を用いて同期機の単体の運転特性の算出、同期発電機を電力発生源とする電力システムの特性解析、電気駆動システムの駆動特性解析が容易になる。

【審査結果】

本研究は、大容量の電力用同期発電機や大出力の産業用同期電動機の特性を決める機器定数を得る新規手法に関する研究である。火力、水力、風力発電等の電気エネルギーを生み出す電力用発電機は社会のエネルギーを支える機器であり、大出力の電動機は鉄鋼や石油など社会で必要な物を作る工場の製造装置、下水道や空調等の都市に必須な装置の動力源である。これらの発電機や電動機の単体の特性や電力システムのシステム特性を解析、算出するためには電気機器の電気的な機器定数が必須であり、重要である。大容量の発電機や電動機の機器定数を得るには、大規模の装置と大電力容量の試験設備が必要となり、大規模な研究機関や特定の大企業以外は実施が困難である。したがって、同期機の機器定数は設計や特性解析で最も重要であるが、限定された大規模試験でしか得ることができなかった。

本研究で創出された特性試験法及び算出方法は、大規模な設備で試験を行うことなく、静止試験と新規提案の算出法を用いて同期機の機器定数を得ることができることによる大きな価値がある。また、同期機の機器定数の新しい試験法及び特性算出方法を提案して実験によって精度を含めて実証していることから、本研究は新規性が高く、電気機器の特性算出や特性解析において学術的に十分な価値がある。本手法で得た機器定数は同期機単体の設計精度の向上、電力システムの電力制御やモータ駆動システムの制御シミュレーションにおける等価回路モデルの精度向上にも寄与できる。さらに電力と産業において本手法が広い分野で活用できるので有用性が高いと考えられる。尚、本学位論文の研究成果である学術論文は学術的な価値が高いことから電気学会産業応用部門の論文賞を受賞している。また、理工学研究科（電気電子情報専攻）の博士学位審査基準に照らしても妥当な研究内容であると認められる。

従って、所定の試験結果と論文評価に基づき、本審査委員会は全員一致を以って田中晃氏の博士学位請求論文は、本学博士学位を授与するに相応しいものと判断する。