

博士学位論文審査要旨

2017年 1月 10日

論文題目： 遮断器用油圧操作装置の動作時間安定化に関する研究

学位申請者： 山下 透

審査委員：

主 査： 同志社大学大学院理工学研究科 教授 辻内 伸好

副 査： 同志社大学名誉教授 小泉 孝之

副 査： 同志社大学大学院理工学研究科 准教授 伊藤 彰人

要 旨：

電力用遮断器は、電力系統における電気回路の開閉に対して確実に動作する必要があり、遮断器を駆動する油圧操作装置は高い動作信頼性が要求されている。個別の油圧操作装置の油圧回路内で発生する空洞や気泡が操作装置の動作時間に影響を与えないことや、一つの制御部で複数の油圧操作装置を駆動する場合においても動作時間への影響を最小限にするなど、油圧操作装置が時間的に確実に動作することが必要となる。本論文は、このような遮断器を駆動する油圧操作装置の動作時間安定化技術の確立を目的としている。

本論文は全8章より構成されている。第1章では、遮断器用油圧操作装置の概要について述べ、本研究の背景と目的を示した。第2章では、油圧操作装置の新しく提案した常時高圧安定回路方式の構成、およびこの回路方式が機能するために必要となる戻り回路とラッチ機構を設計する上での基本的な考え方について述べた。第3章では、油圧回路内の流れおよび油圧回路内外の可動部の動作について、解析方法および油圧回路内の油柱分離や弁同士の衝突などの現象のモデル化について示した。第4章では、油圧操作装置の動作試験および油圧回路解析と可動部の動作解析を行い、常時高圧安定回路方式が有効かつ安定的に機能することを確認するとともに、解析とモデル化の方法が有効であることを示した。第5章では、常時高圧安定回路方式において、弁等の戻り動作時に連続的な開閉動作振動が発生する動作安定性の検証を行い、開閉動作振動が起こるメカニズムや安定動作範囲について考察した。第6章では、本方式の安定動作のために必要なピストンの制動について、ダッシュポット部の環状すき間流れとピストン可動部を2質点系としたモデル化を行ってその有効性を検証し、制動特性について評価を行った。第7章では、本方式の油圧操作装置を2台用いて同期動作あるいは順次動作させる駆動方式について、油圧回路の構成を提示し、それらが時間安定的に動作することの検証や動作特性についての評価を行った。最後に第8章において、これらを総括して全体の結論とした。

本論文は新規の油圧回路方式の提案と検証により、遮断器用油圧操作装置の動作時間を安定化させる技術を確立した先駆的かつ実用的な研究であり、その成果は同分野の発展に多大な貢献をなすものである。よって本論文は、博士（工学）（同志社大学）の学位論文として十分な価値を有するものと認められる。

学力確認結果の要旨

2017年 1月 10日

論文題目： 遮断器用油圧操作装置の動作時間安定化に関する研究

学位申請者： 山下 透

審査委員：

主 査： 同志社大学大学院理工学研究科 教授 辻内 伸好

副 査： 同志社大学名誉教授 小泉 孝之

副 査： 同志社大学大学院理工学研究科 准教授 伊藤 彰人

要 旨：

本論文提出者は、1980年3月に京都大学大学院工学研究科航空工学専攻博士課程（前期課程）を修了後、三菱電機に入社し、電力機器の機械技術とりわけ遮断器の駆動と動作特性に関連する技術開発および研究に従事した。三菱電機では、開発部機械技術部門や開閉機器製造部開発部門など、一貫して技術開発部門に所属し、技術部長を務めた。現在は三菱電機を定年退職し、技術士事務所を開設している。

本論文の主たる内容は、日本機械学会論文集 81 巻, 822 号, DOI:10.1299/transjsme.14-00402, 日本機械学会論文集 81 巻, 827 号, DOI:10.1299/transjsme.15-00078, 日本機械学会論文集 82 巻, 834 号, DOI:10.1299/transjsme.15-00432, 日本機械学会論文集 82 巻, 838 号, DOI:10.1299/transjsme.15-00539, 日本機械学会論文集 82 巻, 838 号, DOI:10.1299/transjsme.16-00050, The 27th International Symposium on Transport Phenomena (ISTP27-134.pdf) (2016), Proceedings of 2nd International Conference on Machining, Materials and Mechanical Technologies (050-Tohru YAMASHITA.pdf) (2016) に掲載され十分な評価を受けている。

2016年12月9日午後1時より約1時間30分にわたり、提出論文に関する博士論文公聴会が開かれ、種々の質疑検討が行われたが、論文提出者の説明により十分な理解が得られた。講演会終了後、審査委員により学位論文に関連した諸問題につき口頭試問を実施した結果、本人の十分な学力を確認することができた。論文提出者は、英語による複数の論文発表を行うとともに、海外国際学会においても口頭発表を行っており、十分な語学能力を有するものと認められる。

以上のことから、本学位申請者の専門分野に関する学力ならびに語学力は十分であることが確認できた。よって、学力確認結果は合格であると認める。

博士學位論文要旨

論文題目： 遮断器用油圧操作装置の動作時間安定化に関する研究

氏名： 山下 透

要旨：

電力機器の保護機器として要となる電力用遮断器は、特に、電力系統内で発生する地絡や短絡などの事故による異常な電流を遮断し、発電機や変圧器などを保護しており、電力系統における電気回路の開閉に対して確実に動作できる高い動作信頼性が要求されている。遮断器の動作は、油圧操作装置などの機械的駆動機構を用いて行われる。本研究において対象とした油圧操作装置は、アキュムレータに蓄圧された高圧油を駆動力の伝達媒体に用いる方式であり、空気圧の場合に比べて高い圧力で駆動するため装置の小形化が図れるとともに、油はほぼ非圧縮性と見なせることから動作の応答性に優れている。このため、大形の遮断器に適用されることが多い。

遮断器用の油圧操作装置は、電磁弁の開放により増幅弁を順次動作させ、最終的にピストンのヘッド側を高圧あるいは低圧に切り替えて、差動式油圧ピストンを駆動する油圧回路の構成となっている。従来の油圧操作装置の油圧回路では、閉路位置においてピストンヘッド側の圧力は高圧に保たれ、開路位置においてはピストンヘッド側の圧力は低圧状態となっている。このような油圧回路では、低圧回路中に気泡が混入すると次の高圧切り替え時にこの空気を圧縮する過程で油圧力の伝達が遅れ、最終的にピストン動作の遅れが顕著になる。また、アキュムレータに用いられている窒素ガスがシールパッキンから高圧油中に溶け込むことがあり、高圧回路が低圧回路に切り替った状態で長期間放置されると、作動油中に溶解している過飽和の窒素ガスが気泡に成長し、気泡の混入時と同様の現象が発生することになる。

電力系統内で用いられる遮断器は、送電線路が三相で構成されており各相の接点をそれぞれ個別の油圧操作装置で駆動する場合は、電気的な制約から各相遅滞なく安定的に動作する必要がある。そのため油圧操作装置の動作が安定しないと、三相の動作時間が不揃いになるという問題が生じることになる。このような従来の油圧回路では動作時間のばらつきの問題を解決することは困難であった。

また、高電圧大容量の電力系統に適用される電力用遮断器では、三相交流の1相において複数の電気接点を複数の操作装置で駆動することがある。2台の操作装置を同時に駆動する場合、各接点における電気的なばらつきを抑えるために、操作装置の駆動を同期させることが必要となる。さらに、接点が並列に接続され、それぞれ2台の操作装置により順次駆動される場合は、各接点を開放する時間差を安定的に確保することが必要である。このように、1相に2台の油圧操作装置を用いる場合は、油圧操作装置の配置構成や部品の加工精度、温度変化による油の特性変化などの影響を受けにくい、時間安定的に動作する油圧回路が要求される。

本研究では、以上の問題の解決のために、遮断器用の油圧操作装置の動作時間安定化技術の開発が主要な目的である。そのために、個別の油圧操作装置として、油圧回路内で発生した空洞や気泡が油圧操作装置としての主要な動作に影響を及ぼすことがなく、遮断器の各相の動作時間を安定化させる油圧回路方式を提案し、その動作が確実に実行されることを検証することである。また、遮断器の1相において、一つの制御部で複数の油圧操作装置を駆動するように構成された場合においても、各油圧操作装置の動作時間を安定化させる油圧回路方式を提案・検証することである。

本論文は全8章より構成されており、各章の概要は以下の通りである。

第1章では、本研究の工業上の背景となる電力用遮断器および遮断器用油圧操作装置の概要に

ついて述べ、従来の油圧操作装置を動作させる上での問題点を指摘し、本研究の目的と構成を示した。

第2章では、遮断器の油圧操作装置において、回路内の油圧の高低圧切り替えを開路・閉路動作の瞬時のみに限定し、動作完了後は全ての回路内の油圧を常に高圧に保つようにした常時高圧安定回路方式の考え方を示した。常時高圧安定回路方式は、ピストンが開路側のストローク端位置に到達したことを簡素な構成の油圧回路で検知して弁の制御に用いる戻り回路と、ピストンの機械的な保持や開放を行うラッチ機構によって、ピストンの動作を制御するようにしたものである。このように常時高圧安定回路方式として機能するための、戻り回路とラッチ機構の寸法諸元を設計する上での考え方を示した。

第3章では、油圧操作装置の油圧回路内の流れおよび油圧回路内外の可動部の動作についての基本的な解析方法を示した。油圧回路の流れ解析は、回路の複雑さから実用性を考慮して一次元の流れとし、管径一定部分の管路を一要素とみなして、要素内の流れの特性値を一定とする集中定数系による手法を用いた。また、弁の動作に伴う弁背部の油柱分離による空洞の発生や弁の衝突などを考慮した。ピストン可動部の動作については、常時高圧安定回路方式の主要な構成要素であるラッチとピストンの係合における拘束条件を導出し、解析ではこの拘束条件の元で運動方程式を解いた。

第4章では、常時高圧安定回路方式の油圧操作装置を試作して動作試験を実施し、油圧回路解析および可動部の動作解析を行った。開路および閉路動作において弁やピストン、ラッチなどが安定して動作し、常時高圧安定回路方式が有効かつ安定的に機能することを確認した。また、常時高圧安定回路方式の開路および閉路動作完了後に油柱分離による空洞が残っていないことから、油柱分離による影響を受けない油圧回路であることを示した。油圧回路のモデル化において、弁背部の油柱分離による空洞の発生や弁の衝突などを考慮したことや、ラッチ機構とピストンの拘束条件を定式化して適用したことにより、弁やピストンの動作、油圧波形など実測とよい一致が見られ、本モデル化による解析方法の妥当性が確認できた。さらに、常時高圧安定回路方式の戻り回路やラッチの動作に及ぼす影響について、解析による評価を行い、戻り回路やラッチの最適な設計のための指針を得ることができた。

第5章では、常時高圧安定回路方式の動作安定性に関して検証した。弁等の戻り動作時における弁変位や油圧の測定および解析を行い、油圧回路定数の条件によって連続的な開閉動作振動が起り得ることを示した。また、開閉動作振動が起こるメカニズムや要因について考察し、安定した動作となる油圧回路定数の範囲について調査した。この中で、排油増幅弁の背部の容積が開閉動作振動の第一の要因であり、排油増幅弁の動作が他の弁やピストンの動作および戻り回路の流体の流れと相互に影響して、連続的な開閉動作振動まで至ることがわかった。また、弁ストロークや弁座径と排油増幅弁背部の容積とが互いに関連して振動的な動作に影響を与えることもわかった。

第6章では、常時高圧安定回路方式のピストンのストローク端位置検出を安定的に行うためには、ピストンが開路側のストローク端で安定的に停止する必要がある、ピストン制動動作特性について調べた。ダッシュポット部の圧力損失を環状すき間流れのレイノルズ数によって評価し、ピストン可動部はリンク機構の弾性を考慮した2質点モデルとした。実機のピストン変位とダッシュポット圧の比較により解析のモデル化の有効性を確認した。また、この解析を用いて、環状すき間やダッシュポット径などダッシュポットを設計する上で寸法諸元が制動特性に及ぼす影響についての評価を行い、最適な制動特性を選択するための指針を得ることができた。

第7章では、常時高圧安定回路方式の油圧操作装置を2台用いて、高速かつ時間安定的に同期動作あるいは順次動作させる駆動方式について、油圧回路の構成を提示し、油圧回路解析および実測による評価を行った。まず、油圧操作装置間を接続する管路について油圧回路解析により、圧力伝達特性や動作時間への影響から、管路径や管路長さなど接続管路の最適な形状を設計する

指針を得た。また、油圧回路解析が実用上問題ないレベルの結果が得られることを示した。さらに、2台の油圧操作装置の同期駆動について、同期ずれに関して接続管路を対称に配置する構成とすることや、非対称配置の場合でも接続管路諸元の選択により、同期制御部と油圧操作装置の油圧伝達の時間差を抑えることができることを示した。また、2台の油圧操作装置を順次駆動する方式について、ダッシュポット圧を用いた遅延制御部の構成により、初期圧力や環境温度が変化しても比較的安定した遅延時間が得られることや、操作装置が順次動作する時間間隔の調整法について示した。

第8章は、本論文の結論である。第2章から第7章で得られた主要な成果についてまとめ、第1章で示した本研究の目的が達成されていることを示した。

本研究の成果により、常時高圧安定回路方式の開発・適用により油圧回路内へ混入した空気の影響を排除できるため、動作時間が安定して動作信頼性を向上させることができた。また、遮断器の1相において一つの制御部で複数の油圧操作装置を駆動する場合においても、常時高圧安定回路方式に加えて、新たな駆動方式により各油圧操作装置の動作時間を安定化させることができた。さらに、本論文で開発した解析技術により、遮断器用油圧操作装置の油圧回路内の流れおよびピストンや弁などの動作解析を精度よく行うことが可能となった。以上のように本研究の成果は、遮断器用油圧操作装置の油圧回路の設計や問題発生時の解析に適用され、製品の信頼性を高め、設計・開発の効率化に貢献している。