

博士学位論文

(内容の要旨及び論文審査の結果の要旨)

	GOTO Takuya
氏名	後藤 卓弥
学位の種類	博士（工学）
学位記番号	博 乙 第 35 号
学位授与	令和 7 年 3 月 23 日
学位授与条件	学位規程第 3 条第 4 項該当
論文題目	次世代電力システムに向けた特殊巻線構造変圧器とデュアル・アクティブ・ブリッジコンバータに関する研究
論文審査委員	(主査) 教授 雪田 和人 ¹ (審査委員) 教授 鈴置 保雄 ¹ 教授 七原 俊也 ¹ 教授 竹下 隆晴 ² 特任教授 天雨 徹 ³

論文内容の要旨

次世代電力システムに向けた特殊巻線構造変圧器とデュアル・アクティブ・ブリッジコンバータに関する研究

本論文は、次世代電力システムの一つとして期待されている直流給配電のための電力変換方式について、電力変換効率と電力品質の維持向上を図るため、交流-直流変換方式ために特殊巻線変圧器を開発し、その有効性を図るとともに直流-直流変換装置 (DC/DC コンバータ) に用いる変圧器の設計時の課題やコンバータにおける電力不平衡問題、脈動 (リップル) 抑制についての解決手法を提案している。

2021 年 10 月に「第 6 次エネルギー基本計画」が閣議決定された以降、我が国におけるエネルギー情勢は大きく変化しつつある。特に世界では、ロシアによるウクライナ侵略や中東情勢の緊迫化などにより、エネルギー安全保障への対応を強化している。「地球沸騰化」の時代において、日本は 2020 年 10 月に「2050 年カーボンニュートラル」を宣言し、2021 年 4 月には 2030 年度までに温室効果ガス排出を 2013 年度比で 46%削減する目標を設定した。これにより、日本は脱炭素化を推進し、国際的な気候変動対策に貢献し、カーボンニュートラルに向けて引き続き野心的な目標を維持しながら、多様かつ現実的なアプローチを重

視しつつ、エネルギー安定供給や脱炭素化に向けたエネルギーの構造転換を経済成長につなげる政策の強化などの動きが顕著になっている。さらに生成 AI などによるグリーン・トランスフォーメーション (GX) の進展に伴う電力需要増加の可能性も指摘されており、エネルギーに関する不確実性が高まっている。

現在、我が国は、第 6 次エネルギー基本計画の策定以降、徹底した省エネルギーの推進、再生可能エネルギーの最大限の導入、エネルギー供給の安全性確保を大前提として、2024 年 2 月「GX 実現に向けた基本方針」に基づく「GX 推進法」と「GX 脱炭素電源法」を成立させ、エネルギーの安定供給、脱炭素社会と経済成長の同時実現に取り組んでいる。エネルギー政策の現状は、上述した第 6 次エネルギー基本計画を元 to 実施されている。そして、この基本計画に基づいた「2050 年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」においては、成長が期待される 14 分野が報告されている。この 14 分野のうちエネルギー関連に関して注目すると、再生可能エネルギーとして洋上風力、太陽光、地熱、蓄電池、住宅、建築物、次世代電力マネジメント産業など、多岐にわたって様々な技術が期待されているとの報告である。この期待されている技術には、エネルギーマネジメントシステム、地域の再生可能エネルギー、電気自動車 (EV) / 燃料電池車 (FCV) などと組み合わせ、

¹ 愛知工業大学 工学部 電気学科 (豊田市)

² 名古屋工業大学 (名古屋市)

³ 東京都市大学 (東京都)

再生可能エネルギー主力化と統合した柔軟性の確保、電気、熱、モビリティのセクタカップリングが重要とされ、代表的な実証や社会実装が実施されている。

しかしながら、この代表的な実証試験結果からは、地域の再生可能エネルギーや EV/FCV などとを組み合わせ最適化するための多種多様な機器などの自立制御や情報通信技術（ICT）等による遠隔制御技術の他に、さらなる地球温暖化ガスの削減にむけて、直流給電などによる住宅・建築物間のネットワークを図る必要があるとの報告がある。

このようにエネルギーにおける電気エネルギーである電力について注目すると、多くの機器が 2050 年には電力を使用しており、その使われ方も多様化するものと思われる。

本論文は、再生可能エネルギーが主力電力となった 2050 年の社会を目指し、地球温暖化ガスを削減するため直流給配電の普及を目指し、交流－直流、直流－直流の電力変換技術、変換装置の開発を実施している。本論文は全 8 章構成であり、まず第 1 章では、電力変換技術の必要性和社会的背景および目的について述べている。

第 2 章では、特殊巻線構造変圧器を用いたバイポーラ形交流－直流電力変換装置である AC/DC コンバータについて提案し、その有効性をシミュレーションにて示している。このシミュレーションでは、負荷が平衡状態、不平衡状態、片側負荷開放状態の場合について実施している。その結果、提案するバイポーラ形コンバータは、負荷が平衡状態、不平衡状態と片側負荷開放状態のいずれの条件においても負荷への電力を供給可能であることを明らかにしている。

第 3 章では、特殊巻線構造を用いた変圧器を直流と交流からなるハイブリッド形給配電システムへの応用について検討している。従来の特殊巻線構造を用いた変圧器は、一次側から二次側の交流－直流変換が主であった。しかし、その構造から二次側端子を用いた交流－交流変換について検討し、交流－直流、交流－交流変換のハイブリッド変換あるいは、交流－交流変換についても検討し、その有効性を示している。また、提案するコンバータの二次側に電源を接続することで直流出力の脈動（リップル）電圧が増加することを確認した。さらに、このリップル電圧が増加しても電力供給には影響がないことを示している。

第 4 章では、三相デュアル・アクティブ・ブリッジ(DAB) DC/DC コンバータの磁束推定技術を提案している。まず

変圧器の磁束は、負荷と電圧利得の条件に依存することがわかった。そして、従来の入力電圧、スイッチング周波数、コア面積および巻数に基づく方法では、この依存性を反映することができず、負荷や出力電圧に関係なく一定の磁束値を示すことを明らかにした。この結果、コンバータにおいては、様々な課題が発生する。そこで本章では新しい磁束推定式を提案し、これらの問題の一解決手法を示している。さらに、有限要素解析によると提案した式は鉄心内での磁束振幅を予測することが可能であり、その誤差は、FEA 結果と比較しても 4%未満であった。そして提案方式により、変圧器の温度プロファイルもより正確に予測することができる。この提案式は、変圧器の設計や、パルス負荷、始動プロセスなどの厳しい条件下でのコンバータの挙動を調べる際に利用できるものと期待される。

第 5 章では、直流母線電圧の変動から生じる低周波出力電流リップルを軽減する新しい手法を提案した。この手法は、従来の比例積分 (PI) 制御器と複数の共振制御器を統合することで、主要な高調波リップルを効果的に抑制することが可能である。提案手法の有効性を検証するため、低出力と高出力の 2 つの異なる条件でシミュレーション解析を実施した。さらに、100V/15A の条件で DC/DC コンバータを用いて検証実験を行った。実験結果は、出力電流リップルが 8.66%から 2.67%へと大幅に減少し、シミュレーション結果と良く一致したことを確認した。

第 6 章では、漏れインダクタンス L_k の推定誤差が DAB コンバータの性能に与える影響について検討した。この検討では、電力伝送、ソフトスイッチングの範囲、相電流（瞬時値）、および変圧器の相間の最大温度上昇など、いくつかの重要な項目について検討した。そして、実験結果とシミュレーション結果の両方により、電力伝送および銅損は L_k の設計値との誤差に対して比較的影響を受けにくいことを示した。しかし、相電流は L_k の変動に強く依存し、 L_k の誤差が大きいほど、相間の実効値電流の差が大きくなり、変圧器の相間での熱分布が不均衡になること示した。さらに、 L_k の変動に関する統計的確率に基づき、誤差の閾値は設計値の 10%から 15%程度の範囲であることを明らかにした。

第 7 章では、各伝送経路で異なるインダクタンスを持つ三相 DAB コンバータのための、電力伝送の基本高調波近似に基づく電力平衡手法を提案した。この提案手法は、パラ

メータの不一致を補正するために、各相の位相シフト角に適切な偏差角を追加した。補正角度の計算は、容易であるためマイクロプロセッサにて処理することが可能である。このときの有効性を示すシミュレーション結果は、提案手法が不均衡を 1/3 に軽減させる効果を示しており、その結果、各相間の電力分配が改善され、システム全体の性能が向上することを示した。

最後に、第 8 章では本論文の総論を記した。

論文審査の結果の要旨

本論文は、次世代電力システムの一つとして期待されている直流給配電のための電力変換方式について、電力変換効率と電力品質の維持向上を図るため、交流-直流変換方式のために特殊巻線変圧器を開発し、その有効性を図るとともに直流-直流変換装置(DC/DC コンバータ)に用いる変圧器の設計時の課題やコンバータにおける電力不平衡問題、脈動(リップル)抑制についての解決手法を提案したものである。

我が国は、第6次エネルギー基本計画の策定以降、徹底した省エネルギーの推進、再生可能エネルギーの最大限の導入、エネルギー供給の安全性確保を大前提として、2024 年 2 月「GX実現に向けた基本方針」に基づく「GX推進法」と「GX脱炭素電源法」を成立させ、エネルギーの安定供給、脱炭素社会と経済成長の同時実現に取り組んでいる。エネルギー政策の現状は、上述した第6次エネルギー基本計画を元を実施されている。そして、この基本計画に基づいた「2050 年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」においては、成長が期待される 14 分野が報告されている。この 14 分野のうちエネルギー関連に関して注目すると、再生可能エネルギーとして洋上風力、太陽光、地熱、蓄電池、住宅、建築物、次世代電力マネジメント産業など、多岐にわたって様々な技術が期待されているとの報告である。この期待されている技術には、エネルギーマネジメントシステム、地域の再生可能エネルギー、電気自動車(EV)／燃料電池車(FCV)などと組み合わせ、再生可能エネルギー主力化と統合した柔軟性の確保、電気、熱、モビリティのセクタカップリングが重要とされ、代表的な実証や社会実装が実施されている。

しかしながら、この代表的な実証試験結果からは、地域の再生可能エネルギーや EV/FCV などを組み合わせ最適化するための多種多様な機器などの自立制御や情報通信技術

(ICT)等による遠隔制御技術の他に、さらなる地球温暖化ガスの削減にむけて、直流給電などによる住宅・建築物間のネットワークを図る必要があるとの報告がある。

このようにエネルギーにおける電気エネルギーである電力について注目すると、多くの機器が 2050 年には電力を使用しており、その使われ方も多様化するものと思われる。

本論文は、再生可能エネルギーが主力電力となった 2050 年の社会を目指し、地球温暖化ガスを削減するため直流給配電の普及を目指し、交流-直流、直流-直流の電力変換技術の開発を実施している。本論文は全 8 章構成であり、まず第 1 章では、電力変換技術の必要性和社会的背景および目的について述べている。

第 2 章では、特殊巻線構造変圧器を用いたバイポーラ形交流-直流電力変換装置である AC-DC コンバータについて提案し、その有効性をシミュレーションにて示されている。このシミュレーションは、負荷が平衡状態、不平衡状態、片側負荷開放状態の場合について実施している。その結果、提案するバイポーラ形コンバータは、負荷が平衡状態、不平衡状態と片側負荷開放状態のいずれの条件においても負荷への電力を供給可能であることを明らかにしている。

第 3 章では、特殊巻線構造を用いた変圧器を直流と交流からなるハイブリッド形給配電システムへの応用について検討されている。従来の特殊巻線構造を用いた変圧器は、一次側から二次側の交流-直流変換が主であった。しかし、その構造から二次側端子を用いた交流-交流変換について検討し、交流-直流、交流-交流変換のハイブリッド変換あるいは交流-交流変換についても検討し、その有効性について示している。また、提案するコンバータの二次側に電源を接続することで直流出力の脈動(リップル)電圧が増加することを確認している。さらに、このリップル電圧が増加しても電力供給には影響がないことを示している。

第 4 章では、三相デュアル・アクティブ・ブリッジ(DAB) DC/DC コンバータの磁束推定技術を提案している。まず変圧器の磁束は、負荷と電圧利得の条件に依存することを示している。そして、従来の入力電圧、スイッチング周波数、コア面積および巻数に基づく方法では、この依存性を反映することができず、負荷や出力電圧に関係なく一定の磁束値を示すことを明らかにしている。この結果、コンバ

ータにおいては、様々な課題が発生することを示している。本章では、新しい磁束密度推定式を提案し、これらの問題の一解決手法を示している。さらに、有限要素解析による提案した式は鉄心内での磁束振幅を推定することが可能であり、その誤差は、FEA 結果と比較しても 4%未満であることを示している。そして提案方式により、変圧器の温度プロフィールもより正確に予測することを示している。

第 5 章では、直流母線電圧の変動から生じる低周波出力電流リップルを軽減する新しい手法を提案している。この手法は、従来の比例積分 (PI) 制御器と複数の共振制御器を統合することで、主要な高調波リップルを効果的に抑制することが可能であることを明らかにしている。この提案手法の有効性を検証するため、低出力と高出力の 2 つの異なる条件でシミュレーション解析を実施している。さらに、100V/15A の条件で DC/DC コンバータを用いて検証実験を行った。これらの実験結果は、出力電流リップルが 8.66% から 2.67%へと大幅に減少し、シミュレーション結果と良く一致したことを確認している。

第 6 章では、漏れインダクタンスの不一致が三相 DAB コンバータの性能に与える影響について検討した。この検討では、電力伝送、ソフトスイッチングの範囲、実効値相電流、および変圧器の最大温度上昇など、いくつかの重要な項目について検討している。そして、実験結果とシミュレーション結果の両方により、電力伝送および銅損は漏れインダクタンスの設計値との誤差に対して比較的影響を受けにくいことを示した。

しかし、電流は漏れインダクタンスの変動に強く依存し、漏れインダクタンスの誤差が大きいほど、相間の実効値電流の差が大きくなり、変圧器の相間での熱分布が不均衡になること示した。さらに、漏れインダクタンスの変動に関する統計的確率分析に基づき、誤差の閾値は設計値の 10-15%程度の範囲であることを明らかにしている。

第 7 章では、各伝送経路で異なるインダクタンスを持つ三相 DAB コンバータのための、電力伝送の基本高調波近似に基づく電力平衡手法を提案している。この提案手法は、パラメータの不一致を補正するために、各相の位相シフトに適切な偏差角を追加している。この補正角度の計算は、単純であるためマイクロプロセッサに導入するのに適する特徴を有している。そして、シミュレーション結果は、

提案手法が不均衡を 1/3 に軽減させる効果を示しており、その結果、各相間の電力分配が改善され、システム全体の性能が向上することを示している。

最後に、第 8 章では本論文の総論を記している。

以上、本論文は、学術的にも、工学的にも高い価値を有し、電気工学分野の発展に寄与すること多大であり、博士 (工学) の学位論文として、十分価値があるものと認められる。