

2023 年度 永守財団 研究助成 研究報告書

所属機関	千葉大学 大学院工学研究院
職位または役職	准教授
氏名	小岩 健太

1. 研究題目

Z ソースフルコンバータを用いた可変速風力発電システムの開発

2. 研究目的

地球温暖化などの環境問題の高まりから、風力発電の導入拡大に期待が集まっている。可変速風力発電機はフルコンバータを用いて電力系統に連系される。しかしながら、このフルコンバータに使用される電解コンデンサは、電力変換器における故障原因の 30%を占め、風力発電機の保守・運用コストを増加させる。また、発電効率の向上は風力発電導入拡大の根底にある課題であるものの、依然として決定的な解がない。本研究ではこれらの問題を解決することを目的とし、図 1 に示す Z ソースフルコンバータ (ZSFC: Z-Source Full Converter)を用いた可変速風力発電システムを開発する。本システムは DC リンクにインピーダンスソースを持つため、下記が実現できる。

1. 系統側インバータの高速スイッチング
2. 発電機および ZSFC の損失最小化運転

特徴 1 により本システムは小容量のコンデンサ、すなわち高寿命なフィルムコンデンサを使用できる。加えて、高速スイッチングは系統連系のためのフィルタの小型化・低損失化にも寄与できる。

ZSFC は通常のフルコンバータとは異なり発電機側および系統側の DC リンク電圧 V_{dc1} および V_{dc2} を独立に制御できる。これにより、状況に応じて、リンク電圧を下げることで発電機の鉄損および電力変換器のスイッチング損失を最小化することが可能となる。本研究ではこれらの特性を実現するシステムおよび制御系を創成し、上記の課題の抜本的な解決を目指す。

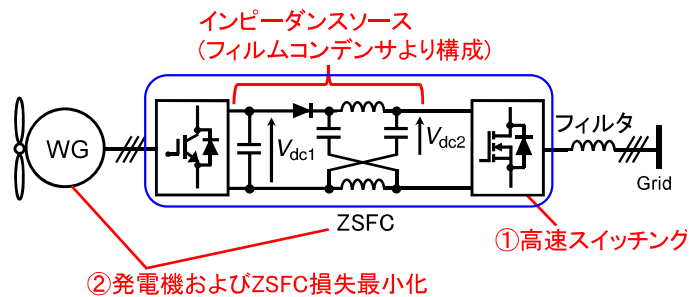


図 1 ZSFC を用いた可変速風力発電システム

3. 研究内容及び成果

本研究では可変速風力発電機のための新しい電力変換器構造として、Zソースフルコンバータを提案した。今年度の研究では主にシミュレーションを用いたZSFCのシステムの構造・動作検証、損失低減のための制御方法の開発、損失の評価を行った。図2に制御器を含む本提案システムの全体像を示す。これまで、Zソースインバータを活用した風力発電システムは検討されているが、発電機側の電力変換器がダイオード整流器から構成されており、最大トルク・電流制御(MTPA)を行うことができなかった。そのため、風力発電機が風から得られるエネルギーを最大限活用することができず、著しい効率の低下を招いていた。そこで、本研究では、図2の通り、発電機側の電力変換器にはSiを用いた半導体素子からなる自励式のコンバータを採用することで、MTPA制御を実現し、効率上昇を達成した。また、系統側インバータにはSiC半導体素子を用いることで、高速スイッチングを達成した。特に、発電機側のコンバータは不必要にスイッチング周波数を増加させる必要がないことに着目し、Si半導体素子で構成することでシステム全体のコスト低減を達成できることを明らかにした。また、システムの回路パラメータ設計のために、状態方程式を算出した。この状態方程式を利用することで、電力変換器のスイッチング周波数を踏まえた回路パラメータの設計方法を確立した。研究計画当初においては、回路パラメータは試行錯誤的に設計するしかないと考えていたため、本成果は実際に研究を通して得られた新たな知見である。加えて、決定した回路パラメータを含む状態方程式をZSFCの制御器設計にも活用し、システム全体を体系的に設計する方法論を確立することに成功した。設計した制御器をインナーループ補償器とし、アウトーループにZSFCのDCリンク電圧 V_{dc} および V_c をオンラインで可変とする制御器を実装した。これにより、安定性を担保したまま、ZSFCの損失を最小化する運転が可能となった。このとき、これら電圧指令値の最適値を解析的に求めることは困難であり、現状は事前にシミュレーションにより数値的に求める必要がある。これは今後の課題である。

実際に設計したシステムの有効性をシミュレーションにより検証した。図3に発電機電流、図4に2つのDCリンク電圧、図5に効率を示す。図3からMTPAより得られた指令値に適切に追従できていることがわかる。このとき、図4より、変化するDCリンク電圧の指令値に対し、2つのDCリンク電圧も追従していることがわかる。これらの制御方法により、図5に示すとおり、ZSFCの効率は従来用いられているフルコンバータに対し、最大で4.56%の効率改善を達成した。これらの結果より提案するZSFCは電解コンデンサを用いることなく、高効率運転が可能であることが明らかとなった。

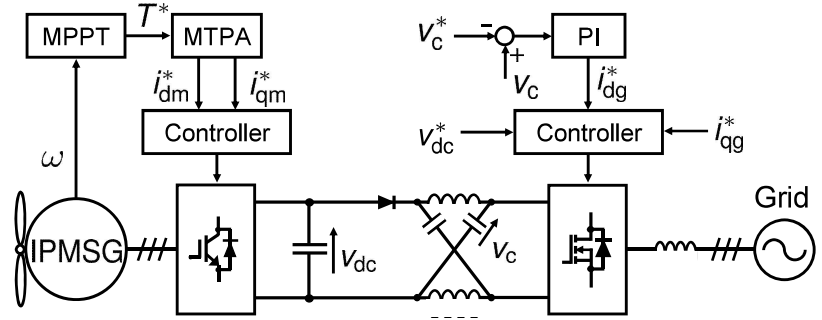


図2 ZSFCを用いた可変速風力発電システム

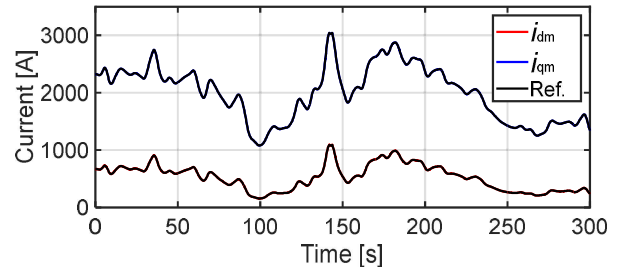


図3 発電機出力電流

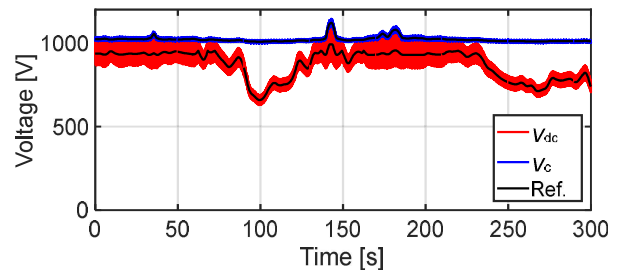


図4 DCリンク電圧

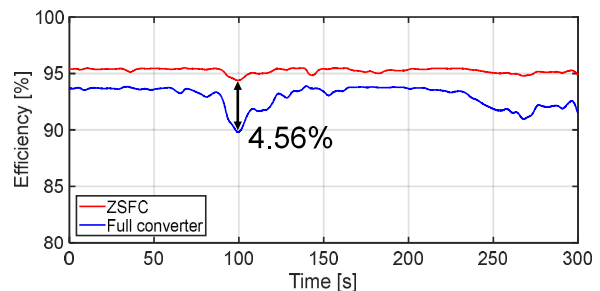


図5 効率

4. 今後の研究の見通し

今年度で実機検証まで含め検討を行う予定であったが、システムの実機作成に時間がかかり、まだ検証が不十分である。実応用までを踏まえ、この点を行う予定である。また、今回検討したシステムは数 MW レベルの風力発電機を対象としている。現在、洋上風力発電機の容量は 10～15 MW クラスが主流となりつつある。したがって、継続研究ではこれまで得られた研究結果を拡張し、ZSFC の大容量化を目指す。具体的には ZSFC の 2 つの特徴を損なうことなく、電力変換器をマルチレベル化することで、本問題に対応する予定である。

5. 助成研究による主な発表論文, 著書名

・国際・国内会議(査読無)

1. Yuta Matsushima, Kenta Koiwa, Tadanao Zanma, Kang-Zhi Liu: “A Novel Structure of Full Converter for Variable Speed Wind Turbine”, 2023 International Conference on Green Energy and Power Engineering (GEPE 2023), Nov. 2023.

2. 松島勇太, 小岩健太, 残間忠直, 劉康志: 「可変速風力発電機における Z ソースフルコンバータの開発: ミニモデルによる実機検証」, 第 11 回制御部門マルチシンポジウム(2024.3).

・特許

松島勇太, 小岩健太, 残間忠直, 劉康志: 特願 2024-023413