

学 位 論 文 内 容 の 要 旨

学位論文題目	大容量かご形誘導機式風力発電システムにおける突入電流抑制装置
氏 名	柴田 翔
<p>近年、環境問題やエネルギー資源枯渇の問題などから再生可能エネルギーが世界的に注目を浴びている。風力発電は夜間にも発電できる、陸上・洋上で設置可能などの利点から世界で最も導入量が多く、2016年時点の世界の累積導入量は432,656 MWである。また、2015年に経済産業省が発表した長期エネルギー需給見通しによれば、2030年の日本の電源構成に占める再生可能エネルギーの割合として22~24%を目標としている。したがって、日本でも風力発電の導入は今後さらに進み、再生可能エネルギーを普及させることは世界のエネルギー問題を解決する上で重要である。</p> <p>大容量の風力発電では、発電機としてかご形誘導機が多く用いられる。かご形誘導機にはコストが低い、メンテナンスが容易などの利点がある。しかしながら、かご形誘導機は励磁源を持たないため、系統並列時に定格の約6倍の大きな突入電流が流れる。また、この突入電流により受電端電圧に瞬時電圧低下が生じる。瞬時電圧低下により、同系統に接続されている機器の誤動作や故障を引き起こす。このため、資源エネルギー庁が示している電力品質に係るガイドラインにおいても瞬時電圧低下は10%以内と規定されている。本学位論文では、かご形誘導機系統並列時の電力系統の瞬時電圧低下を低減可能な突入電流抑制装置を扱う。</p> <p>第1章および第2章では、はじめに100 kWと400 kWのかご形誘導機を系統並列した場合の突入電流および受電端電圧の瞬時電圧低下を電力系統過渡解析シミュレータPSCAD/EMTDC (Power System Computer Aided Design/Electromagnetic Transients including DC) にて明らかにした。誘導機系統並列時には定格の約6倍の突入電流が生じ、受電端電圧の瞬時電圧低下は最大で20.5%であった。また、一般的にかご形誘導機が発生する遅れ無効電力の補償に力率改善用進相キャパシタを接続する。この進相キャパシタ投入時にも突入電流が生じることを明らかにしている。</p> <p>次に、従来の突入電流抑制法の分類と研究動向について詳細に論じている。従来法ではいずれも突入電流の抑制が可能であるが、以下の課題がある。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・高調波電流の発生によるTHD(Total Harmonic Distortion)の悪化 ・突入電流抑制時の電力損失 <p>第3章では、上記の課題を解決することを目的として交流から交流へ直接変換可能なマトリックスコンバータを用いた突入電流抑制装置を提案している。マトリックスコンバータは入力側を系統と並列に、出力側を誘導機と直列に接続する。マトリックスコンバータの出力制御に与える出力電圧指令値として誘導機電流に制御ゲインを乗算した値を用いることで、マトリックスコンバータ出力電圧と誘導機電流は同位相となる。したがって、突入電流抑制時にはマトリックスコンバータの出力側は誘導機電流に対して等価抵抗として動作する。提案手法では、以下のような特長がある。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・突入電流抑制時にマトリックスコンバータに流入した電力を系統側に電力回生するため、突入電流抑制時に伴う電力損失が小さい ・誘導機と直列に接続して等価抵抗として動作するため突入電流が小さく変換器容量が小さい 	

シミュレーションにより、マトリックスコンバータを用いた突入電流抑制装置のかご形誘導機系統並列時の抑制効果を確認し、電源電流の THD は最大で 23.9%、受電端電圧の瞬時電圧低下が 10%以内となることを明らかにした。マトリックスコンバータを用いた突入電流抑制装置の変換器容量は最大で 119 kVA であり、小容量の変換器で突入電流を抑制できることを示した。

第 4 章では、交流出力電圧実効値を制御可能な交流チョッパを用いた突入電流抑制装置を提案している。マトリックスコンバータを用いた突入電流抑制装置は制御が複雑であるが、本章で提案する交流チョッパ方式の場合、簡易な制御で突入電流を抑制できる。交流チョッパはマトリックスコンバータ方式と同様に AC/AC 直接変換が可能であり、入力側を系統と並列に、出力側を誘導機と直列に接続する。交流チョッパの出力電圧を可変値とし、交流チョッパ出力電圧を徐々に変化させて、誘導機の印加電圧を徐々に増加させることで突入電流を抑制する。計算機シミュレーションにより、交流チョッパを用いた突入電流抑制装置の突入電流抑制効果を確認した。交流チョッパを用いた突入電流抑制装置の変換器容量は最大で 416 kVA であり、電源電流の THD は最大で 2.5%、受電端電圧の瞬時電圧低下が 10%以内となることを明らかにした。

第 5 章では、進相キャパシタ投入時の突入電流抑制法を検討している。かご形誘導機発電時に遅れ無効電力が発生するため一般的に進相キャパシタを接続するが、進相キャパシタ投入時にも突入電流が発生する。この突入電流を第 3 章で提案したマトリックスコンバータを用いた突入電流抑制装置により抑制するための最適な等価抵抗値を検討している。計算機シミュレーションにより、進相キャパシタ投入時の突入電流に対して十分な抑制が可能であることを確認した。

以上より、本学位論文で提案した突入電流抑制装置は、突入電流の抑制に有効であり、受電端電圧の瞬時電圧低下に対するガイドラインの規定を満たすことができることを確認した。よって、本学位論文で提案した突入電流抑制装置により電力系統に悪影響を与えることなくかご形誘導機式風力発電システムを始動でき、風力発電の普及による世界のエネルギー問題解決に貢献できると考える。

(様式 17 号)

学位論文審査の結果及び最終試験の結果報告書

(博士後期課程博士用)

山口大学大学院創成科学研究科

報告番号	創科博甲 第 2 号	氏名	柴田 翔
最終試験担当者	主査委員	田中 俊彦	
	審査委員	山口 真悟	
	審査委員	久保 洋	
	審査委員	藤井 文武	
	審査委員	山田 洋明	
	審査委員	岡本 昌幸	
【論文題目】 大容量かご形誘導機式風力発電システムにおける突入電流抑制装置 (Inrush Current Suppressor for Large-Capacity Wind Power Generation System With Squirrel-Cage Induction Machines)			
【論文審査の結果及び最終試験の結果】 <p>近年、環境問題やエネルギー資源枯渇の問題などから再生可能エネルギーが世界的に注目を浴びている。再生可能エネルギーの中でも、風力発電は夜間にも発電できる、陸上・洋上で設置可能などの利点があり、世界でもっとも導入量が多く、2014年時点の世界の累積導入量が369,597 MWである。2015年に経済産業省が発表した長期エネルギー需給見通しによれば、2030年の日本の電源構成に占める再生可能エネルギーの割合として22~24%を目標としている。したがって、日本でも風力発電の導入は今後さらに進み、再生可能エネルギーを普及させることは世界のエネルギー問題を解決する上で重要である。また、2050年の世界の電源構成に対する風力発電の割合は40%に達することが見込まれており、再生可能エネルギーの重要性が高まることを示唆している。</p> <p>大容量の風力発電では、発電機としてコストが低い、メンテナンスが容易などの利点があるかご形誘導機が広く用いられている。かご形誘導機は励磁源を持たないため、発電開始前の系統並列時に定格の約6倍の大きな突入電流が流れる。また、この突入電流により受電端電圧に瞬時電圧低下が生じる。瞬時電圧低下により、同系統に接続されている機器の誤動作や故障を引き起こす。このため、資源エネルギー庁が示している電力品質に係るガイドラインにおいても瞬時電圧低下は10%以内と規定されている。そこで、本学位論文では上記の課題を解決することを目的とした新しい突入電流抑制装置を提案し、その有効性を明らかにしている。</p> <p>第1章では研究目的と背景について論じている。第2章では、世界の再生可能エネルギーの動向や送配電線路について述べ、100 kW と 400 kW のかご形誘導機を系統並列した場合の突入電流および受電端電圧の瞬時電圧低下を電力系統過渡解析シミュレータ PSCAD/EMTDC (Power System Computer Aided Design / Electromagnetic Transients including DC) にて明らかにしている。次に、従来の突入電流抑制法の分類と研究動向について詳細に論じている。従来法ではいずれも突入電流の抑制が可能であるが、高調波電流の発生、抑制動作時の電力損失、抑制を行うための変換器容量の課題があることを述べている。</p> <p>第3章では、交流から交流へ直接変換可能なマトリックスコンバータを用いた突入電流抑制装置を提案している。マトリックスコンバータは入力側を系統と並列に、出力側を誘導機と直列に接続する。マトリックスコンバータの出力制御に与える出力電圧指令値を誘導機電流に制御ゲインを乗算した値を用いることで、マトリックスコンバータ出力電圧と誘導機電流は同位相となり、突入電流抑制時にはマトリックスコンバータは等価抵抗として動作する。シミュレーションにより、マトリックスコンバータを用いた突入電流抑制装置のかご形誘導機系統並列時および進相キャパシタ投入時の突入電流抑制効果を確認し、電源電流の Total Harmonic Distortion(THD)は最大で23.9%、受電端電圧の瞬時電圧低下が10%以内となることを明らかにした。マトリックスコンバータを用いた突入電流抑制装置の変換器容量は、最大で119 kVA とな</p>			

り、小容量の変換器で突入電流の抑制を実現できることを明らかにしている。

前述したマトリックスコンバータは、制御が複雑であるという欠点がある。第4章では、交流出力電圧実効値を制御可能な交流チョッパを用いた突入電流抑制装置を提案している。交流チョッパはマトリックスコンバータ方式と同様にAC/AC直接変換が可能であり、入力側を系統と並列に、出力側を誘導機と直列に接続する。交流チョッパの出力電圧を可変値とし、交流チョッパ出力電圧を徐々に変化させて、誘導機の印加電圧を徐々に増加させることで突入電流を抑制する。計算機シミュレーションにより、交流チョッパを用いた突入電流抑制装置の突入電流抑制効果を確認し、電源電流のTHDは最大で2.5%、受電端電圧の瞬時電圧低下が10%以内となることを明らかにした。また、第3章と第4章の結果から、変換器容量とTHDの優位性について論じている。

第5章では、かご形誘導機が発生する基本波無効電力を補償する進相キャパシタを系統に接続する際の突入電流抑制法について論じている。第3章で提案したマトリックスコンバータ方式突入電流抑制装置を用いるが、抑制時の等価抵抗値をRLC回路の過渡現象から決定できることを明らかにしている。シミュレーション結果から、かご形誘導機および進相キャパシタの両突入電流を抑制できることを明らかにしている。

第6章では本学位論文の結論と今後の検討課題を述べている。

【本審査及び公聴会における主な質問内容】

本審査において、①風速が弱まる時についても検討を行っていることを説明したほうがよい、②電圧低下について基準を満たしていることを強調すべきである、③再生可能エネルギーの世界的な潮流について述べた方がよいとの意見があった。また、公聴会において、①瞬時電圧低下は時間的な評価も必要ではないか、②突入電流抑制効果についてマトリックスコンバータ方式で数値が異なる理由は何か、③変換器の効率についてよく検討したほうがよい、④マトリックスコンバータ方式の制御ゲインに最適値があるのか、また、ゲインの時間的な変化として適切なのか、などの質問があった。いずれの質問に対しても発表者からの的確な回答がなされた。

以上より、本研究は実用性、創造性、有効性、信頼性ともに優れ、博士(工学)の学位論文に十分値するものと判断した。

論文内容及び審査会、公聴会での質問に対する応答などから、最終試験は合格と判定した。

【関連論文の発表状況】

学術論文(査読付き)は3編、国際会議論文(査読付き)は3編であり、このうち主な論文は以下の通りである。

- (1) 柴田翔, 山田洋明, 田中俊彦, 岡本昌幸: 「マトリックスコンバータを用いたかご形誘導機式風力発電システムの突入電流抑制装置」, パワーエレクトロニクス学会誌, Vol.41, pp.72-76, 2016 (本論文との関連: 第3章)
- (2) Sho Shibata, Hiroaki Yamada, Toshihiko Tanaka, and Masayuki Okamoto, "Reduced-Capacity Inrush Current Suppressor Using a Matrix Converter in a Wind Power Generation System with Squirrel-Cage Induction Machines", Energies 2016, Vol.19, No.3, 17pages, 2016 (本論文との関連: 第3章)
- (3) Sho Shibata, Hiroaki Yamada, Toshihiko Tanaka, and Masayuki Okamoto, "AC-Chopper-Based Inrush Current Suppressor in a Wind Power Generation System with Squirrel-Cage Induction Machines", Energies 2018, Vol.11, No.2, 14pages, 2018 (本論文との関連: 第4章)
- (4) Sho Shibata, Hiroaki Yamada, Toshihiko Tanaka, and Masayuki Okamoto, "An Inrush Current Suppressor for Squirrel-Cage Induction Machines with Phase-Leading Capacitors Using a Matrix Converter in a Large-Capacity Wind Power Generation System", in Proceedings of the 19th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS2016), DS6G-4-10, 6pages, 2016 (本論文との関連: 第5章)