

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	洋上風力発電用直流送電における直流事故時の供給信頼度向上に関する研究
Title(English)	
著者(和文)	榎本光芳
Author(English)	Mitsuyoshi Enomoto
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京科学大学, 報告番号:甲第275号, 授与年月日:2025年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:佐野 憲一郎,藤田 英明,浦壁 隆浩,萩原 誠,河邊 賢一,中島 達人
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Institute of Science Tokyo, Report number:甲第275号, Conferred date:2025/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	論文要旨
Type(English)	Summary

論文要旨

THESIS SUMMARY

系・コース： Department of, Graduate major in	電気電子 電気電子	系 コース	申請学位 (専攻分野)： Academic Degree Requested	博士 Doctor of	(工学)
学生氏名： Student's Name	榎本光芳		審査員主査： Chief Examiner	佐野 憲一朗 助教	

要旨 (和文 2000 字程度)

Thesis Summary (approx.2000 Japanese Characters)

脱炭素社会の実現のため、再生可能エネルギーの導入が世界的に行われている。その中でも洋上風力発電は、風況が安定した洋上で発電することによる発電電力の向上や広大な土地の確保が見込めるため、再生可能エネルギーの主軸として特に注目されている。日本においても、周囲を海洋に囲まれている島国の特徴を活かし、今後大規模に風力発電を導入する計画がある。洋上風力発電を大規模に導入する場合、洋上で発電した電力を集約し、その発電電力を陸上の需要地に送る大容量、長距離、海底ケーブルを含む送電システムが必要になる。このような送電システムとして、直流送電が注目されている。この大きな理由として、直流送電は交流送電と比較すると無効電力が発生せず、対地静電容量が大きいケーブル送電においても、無効電力による過負荷や損失が発生しない点がある。

一方、直流送電では電流の遮断が難しい欠点がある。これは、交流の電流では周期的に電流が零になる点 (零点) があり、その零点をもって電流を遮断できるのに対し、直流の電流では零点が無いからである。特に送電線路の電圧低下を伴う直流事故時には、交流系統から交流 - 直流変換器 (以下変換器) を介して直流側の事故点に向けて大きな事故電流が流れる。既存の直流送電では、直流の事故電流を遮断することは難しいため、直流側で事故電流を遮断するのではなく、交流系統と変換器の間に挿入した交流遮断器を動作させる。この結果、交流系統と直流送電が切り離されるため、交流系統から直流側へ流入する事故電流を抑制できる。しかし、洋上風力発電設備を連系する直流送電の場合、交流遮断器の動作とともに洋上の風力発電設備が直流送電から切り離されて単独系統となる。ここで、定常時に洋上風力発電設備は直流送電に連系することで動作しているため、事故時に直流送電から切り離されると運転継続が困難になる。一度風力発電設備が停止すると、その再起動には発電機の機械的な動作も含むため時間を要し、大規模な風力発電設備を導入した場合には、陸上交流系統に悪影響を与える。交流遮断器に代わる方法として、直流の事故電流遮断が可能なハイブリッド式直流遮断器や耐事故変換器の研究が盛んに行われているが、これらは多数の半導体デバイスを追加で必要とし、複雑な設備になるため、システムコストが増加する懸念がある。

本論文では、直流送電における事故時の供給信頼度向上のため、洋上風力発電設備の運転継続を目的とし、再構成手法を提案する。先述したように、既存技術である交流遮断器を用いた場合には、風力発電設備が停止する課題がある。再構成手法では、従来用いられている変換器である、ハーフブリッジ型 MMC に短絡動作を適用することで事故電流を遮断し、その接続先を高速断路器によって事故回線から健全回線に切り替えて送電を再開する。ここで、ハーフブリッジ型 MMC の短絡動作に伴い、洋上の交流系統では瞬時電圧低下が発生する。そこで提案

法では、送電再開までに洋上の交流系統で発生する電圧低下が、既存の系統連系規程で定められた、風力発電設備が運転継続可能な電圧低下耐量に収まるように設計する。このように風力発電設備の特徴を踏まえた再構成を行うことで、風力発電設備を直流送電に連系したまま送電を再開し、運転継続を実現できる。そして再構成では、コスト増加につながるハイブリッド式直流遮断器や耐事故変換器を用いることなく風力発電設備の運転継続を実現できるため、システムコストの増加を回避しつつ供給信頼度を向上できる可能性がある。

本論文では、まず対称単極構成であるダイオードを用いた多回線直流送電に着目し、陸上側はダイオードを用いて事故電流を遮断しつつ、洋上端子に再構成を適用することで風力発電設備の運転継続を実現する。ここでは、実規模シミュレーションと縮小モデルを用いた実験の双方で検証し、再構成の基本的な動作とその妥当性を確認する。

次に、機械式直流遮断器を適用した多端子直流送電を対象とする。本構成では、潮流方向を制限していたダイオードを機械式直流遮断器に置き換えることで、双方向の潮流を可能とし、より柔軟な電力融通を実現する。機械式直流遮断器はハイブリッド式直流遮断器と比較して低コストに導入できる見込みがあるが、事故電流の遮断に時間を要する欠点がある。そこで陸上側変換器には、一時的にスイッチング動作を停止し、事故除去後ただちに再起動する短時間ブロック動作を適用する。これと洋上側の再構成を組み合わせることで、機械式直流遮断器の適用と風力発電設備の運転継続を両立する。提案法の妥当性については縮小モデルを用いた実験により検証する。

そして、対称単極構成と比較してより事故時の電圧低下幅が大きく、事故電流の遮断が難しい双極構成を対象とする。ここでは、再構成手法と低耐圧直流遮断器や接地抵抗を協調させることで事故電流の高速な遮断を可能とし、これらを風力発電設備が有する、系統連系規程で定められた運転継続機能に基づいて設計することで、風力発電設備の運転継続を実現する。2端子および3端子の双極直流送電において、実規模シミュレーションにより検証を行い、提案手法の適用により、条件がより厳しい双極構成でも風力発電設備が運転継続可能であることを確認する。

備考：論文要旨は、和文 2000 字と英文 300 語を 1 部ずつ提出するか、もしくは英文 800 語を 1 部提出してください。

Note : Thesis Summary should be submitted in either a copy of 2000 Japanese Characters and 300 Words (English) or 1copy of 800 Words (English).

注意：論文要旨は、東京科学大学リサーチリポジトリ(T2R2)にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。

Attention: Thesis Summary will be published on Science Tokyo Research Repository Website (T2R2).

論文要旨

THESIS SUMMARY

系・コース： Department of, Graduate major in	電気電子 電気電子	系 コース	申請学位（専攻分野）： Academic Degree Requested	博士 Doctor of	(工学)
学生氏名： Student's Name	榎本光芳		審査員主査： Chief Examiner	佐野 憲一朗 助教	

要旨（英文 300 語程度）

Thesis Summary (approx.300 English Words)

In order to introduce large-scale offshore wind power plants (WPPs), high voltage DC (HVDC) transmission, which connects offshore WPPs and onshore systems, has attracted attention. Compared to AC transmission, DC transmission does not generate reactive power, making it more suitable for cable transmission. On the other hand, there are issues in the event of a DC fault. If AC circuit breakers are used for the protection as in the existing HVDC systems, offshore WPPs are isolated from HVDC and it causes the shut-down of them. Once offshore WPPs are shut down, they take time to restart, and this could have a negative impact on the onshore system if large-scale offshore WPPs are introduced.

Therefore, this article proposes a reconfiguration method to realize the continuous operation of offshore WPPs against a dc fault, which contributes to improving the supply reliability. The proposed reconfiguration method focuses on the half-bridge based MMC, which is a conventionally used converter, and applies a protection method that makes a short circuit in the half-bridge based MMC to interrupt the fault current. Then, the connection of the MMC is switched from the faulted line to the healthy line by high-speed disconnecting switches to resume power transmission. At this time, a voltage sag occurs in the offshore AC system due to the short circuit operation of the MMC. Therefore, the reconfiguration is designed so that the voltage sag in the offshore AC system does not exceed the fault ride-through capability of WPPs, which is specified by the existing grid code. As a result, the power transmission can be resumed while offshore WPPs are connected to HVDC and continue operation. This reconfiguration does not require hybrid DC circuit breakers or fault-tolerant converters, which would increase costs. Therefore, there is the potential to improve supply reliability while avoiding increases in system costs.

備考：論文要旨は、和文 2000 字と英文 300 語を 1 部ずつ提出するか、もしくは英文 800 語を 1 部提出してください。

Note：Thesis Summary should be submitted in either a copy of 2000 Japanese Characters and 300 Words (English) or 1copy of 800 Words (English).

注意：論文要旨は、東京科学大学リサーチリポジトリ(T2R2)にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。

Attention: Thesis Summary will be published on Science Tokyo Research Repository Website (T2R2).