

令和 4 年 5 月 31 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2021

課題番号：18K04097

研究課題名（和文）多端子直流送電システムによる基幹送電システムの構築に関する研究

研究課題名（英文）Study of a bulk power system based on multi-terminal HVDC transmission systems

研究代表者

佐野 憲一郎（Sano, Kenichiro）

東京工業大学・工学院・助教

研究者番号：60589307

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、多端子直流送電システムによる基幹送電システムの構築技術の確立を目的として実施した。まず、拡張性と事故の選択遮断を両立できる直流システムの構成として、ダイオードを用いた多回線直流送電方式を考案した。そして、電力変換器と断路器による低コストな直流システムの保護技術を開発した。これらは、スケールダウン構成の直流システムを構築し、実験により有効性を検証した。本研究で開発した技術は、将来的に多端子HVDCによる基幹送電システム（直流システム）を構成して広域連系を行う際に有効と考えられる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で扱う直流システムは、洋上風力発電をはじめとする再生可能エネルギー電源の大規模導入段階において、発電した電力を需要地近郊まで送電することで陸上の交流システムの混雑を回避するとともに、非同期交流システムの間で電力を融通して、広域連系を実現する役割を持つ。本研究成果は、この直流システムを、長期に亘って段階的に拡張可能とするとともに、システム事故の広域的な波及を回避し高い信頼度の実現に貢献する。

研究成果の概要（英文）：This study aims to establish a technology for constructing a bulk power transmission system using a multi-terminal HVDC transmission system. Our group has developed a multi-circuit HVDC transmission system using diodes as a configuration for achieving expandability and selective fault clearing of HVDC grids. Then, we have developed a low-cost protection method using a power converter and a fast disconnector for the HVDC grid. We have built a scale-down HVDC system, and the proposed methods were verified by experiments. The technology developed in this research will be effective for promoting grid interconnection by a bulk power transmission system using HVDC grids.

研究分野：パワーエレクトロニクス

キーワード：直流送電システム 直流システム 信頼度 直流遮断器 運転継続

1. 研究開始当初の背景

日本は豊富な排他的経済水域を有しており、洋上風力発電の大規模開発に向けた技術開発が進められている。この電力の集約および送電を目的とした、海底ケーブルによる多端子直流送電システム(多端子 HVDC)の概念が提示され、研究開発が行われている。多端子 HVDC が各地の沿岸部に普及すれば、長期的にはこれらを拡張および相互接続し、多端子 HVDC による基幹送電系統(直流系統)の構築に至ることも考えられる。この直流系統は、洋上風力発電の大規模導入段階において、発電した電力を需要地近郊まで送電することで陸上の交流系統の混雑を回避するとともに、非同期交流系統の間で電力を融通して、広域連系を実現する役割も併せ持つ。しかし現状では、この直流系統が、基幹送電系統としての基本的要件を備えたものが明確になっていない。基幹送電系統を成すためには、長期に亘る段階的な拡張が可能であり、また別々に構築された直流系統を、ある時点で相互に接続して広域的に運用できる必要がある。そして、大規模かつ複雑な直流系統において、系統事故の広域的な波及を回避できる必要がある。これらを実現するための技術開発が求められる。

2. 研究の目的

本研究の目的は「多端子直流送電システムによる基幹送電系統の構築技術」を確立することにある。先行技術である多端子 HVDC は、例えば海洋上の特定区域に設置した風力発電電源の電力を集約し、特定地点まで送電するための、1 つの独立した送電システムである。本研究では、この多端子 HVDC の拡張および相互接続を可能とし、将来的に、多端子 HVDC による基幹送電系統(直流系統)を構成して広域連系を行うための検討を行う。検討においては、コストの増加を招くことなく系統事故の広域的な波及を回避する方法を明らかにする。

3. 研究の方法

(1) 拡張性と事故波及回避を両立できる直流系統の構成法の考案

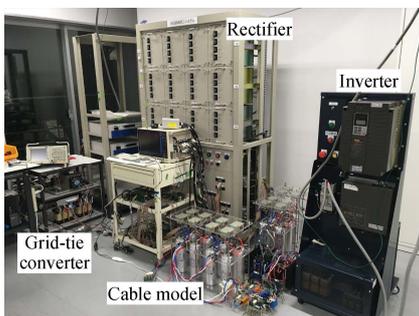
複数の発電地点から電力を集約し、需要地へ長距離送電する用途を想定し、多端子直流送電システム(直流系統)の構成法を検討した。検討においては、段階的に系統規模を拡張しながら構築できる点、直流系統に発生した事故の広域的な波及を回避できる点、動作機構が複雑で高価な機器である直流遮断器を用いない点、を要件として与えた。

(2) 電力変換器と断路器による低コストな直流系統の保護技術の開発

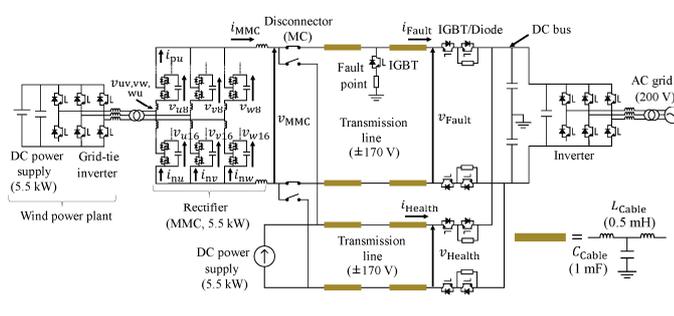
項目(1)で考案した直流系統構成において、直流線路に事故が発生した際の制御・保護方式を検討した。具体的には、直流送電に用いられるモジュラーマルチレベル変換器と、直流系統内に配置した高速断路器を協調動作させることにより、事故電流の遮断と事故区間の切り離しを行う方法を開発した。さらに、一度事故区間から切り離した変換器と発電設備を、高速断路器により別の回線に切り替えることにより、発電設備の脱落を回避することを目指した。以上の手段によって、直流遮断器を用いない低コストな保護の実現を目指す。

(3) スケールダウン構成の直流系統の構築と実験的検証の実施

スケールダウン構成の直流系統および変換器を構築し、実験による原理検証を実施した。図 1 に示す実験設備は、項目(1)で考案した直流系統構成の一部を抜き出した構成となっており、定格 5.5 kW の発電設備 2 地点、送電用の交直変換器(モジュラーマルチレベル変換器)、直流電圧 ± 170 V の直流送電線 2 回線、ダイオードを備えた直流母線、および受電用の交直変換器からなる。この直流送電線に地絡事故を発生させ、項目(2)で開発した保護方式を適用した場合の動作を検証した。



(a) 外観



(b) 回路構成

図 1 スケールダウン構成の実験検証設備 [3][5]

4. 研究成果

(1) 拡張性と事故波及回避を両立できる直流系統の構成法の考案

要件を満足する系統構成として、ダイオードを用いた多回線直流送電方式を考案した[1]。図2に6地点の風力発電設備から同一の交流系統に対して送電する場合の構成例を示す。この構成の特徴は、各々の順変換器は、断路器により2回線以上の直流線路のうち1回線を選択して接続する点、各回線はダイオードを介して逆変換器側の直流母線に接続される点にある。直流線路事故の際は、事故回線に接続された順変換器が保護操作を行い事故回線を停止する。また、直流母線部のダイオードが健全回線への事故の波及を阻止する。事故回線の停止後、断路器を切り替えて順変換器を健全回線に接続し、再起動して送電を再開することができる。また、1回線ごとに段階的に拡張しながら構築することも可能な構成となっている。

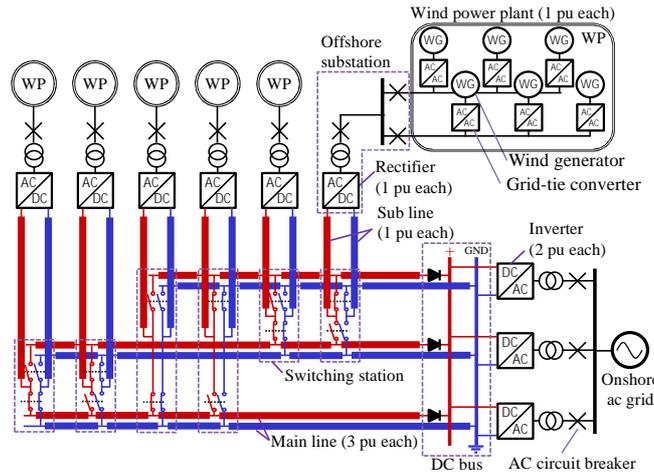


図2 ダイオードを用いた多回線直流送電方式 [1]

また、本研究で考案したダイオードを用いた多回線直流送電方式を、従来のマルチインフィード構成、および直流遮断器を用いた構成と費用面で比較した。同様の信頼度基準となる条件下で比較したところ、提案法を用いた場合にケーブルの敷設距離が短くなり、費用面のメリットが得られることを確認した。

(2) 電力変換器と断路器による低コストな直流系統の保護技術の開発

交直変換器として用いられるモジュラマルチレベル変換器に、「下アーム短絡保護」という新たな動作モードを適用することによって、直流系統内の事故電流を遮断できることを明らかにした[2][3]。

図3に本研究で開発した直流系統の保護技術を示す。(a)は事故回線 Line 1 と健全回線 Line 2 を抜き出して示している。Line 1 における地絡事故の発生後、交直変換器 Rec 1 で下アーム短絡保護を行う。(b)に下アーム短絡保護を行った際の変換器 Rec 1 の電流経路を示す。この時の Rec 1 は、直流線路側から見ればダイオードとして動作し、対地静電容量 C_{cable} の残留電圧によって事故電流は零に至るとダイオードが逆バイアスされオフに保持される。これにより直流端子電流が遮断された後、事故回線側の断路器 S_{L1} を開放することにより、事故回線を切り離す。その後、健全回線側の断路器を投入すると、健全回線を介して送電を再開できる。この間、Rec 1 に隣接する交流遮断器 ACCB を閉路したままにすれば、発電設備 WPP 1 は運転を継続できる。

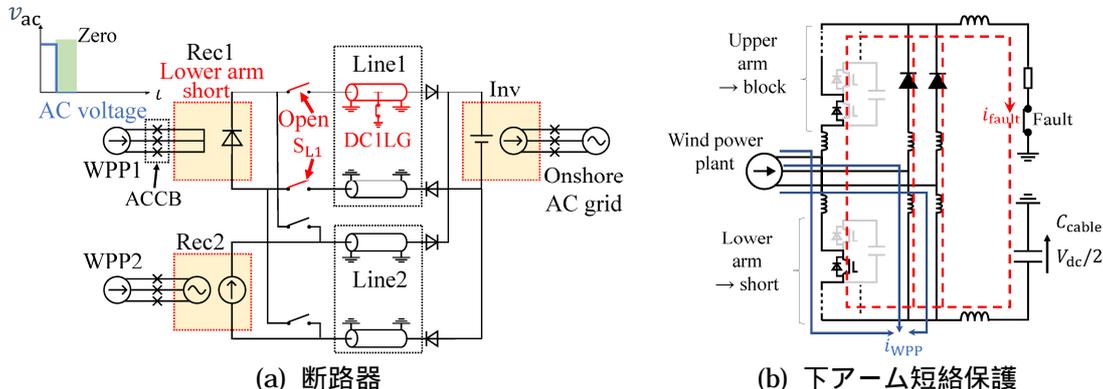


図3 直流系統の保護技術

(3) スケールダウン構成の直流系統の構築と実験的検証の実施

図 4 (a)にミニモデル実験検証結果を示す [4][5]。2 回線の送電線路それぞれで定格電力 5.5 kW を送電しているときに、片方の回線に地絡事故を発生させた。

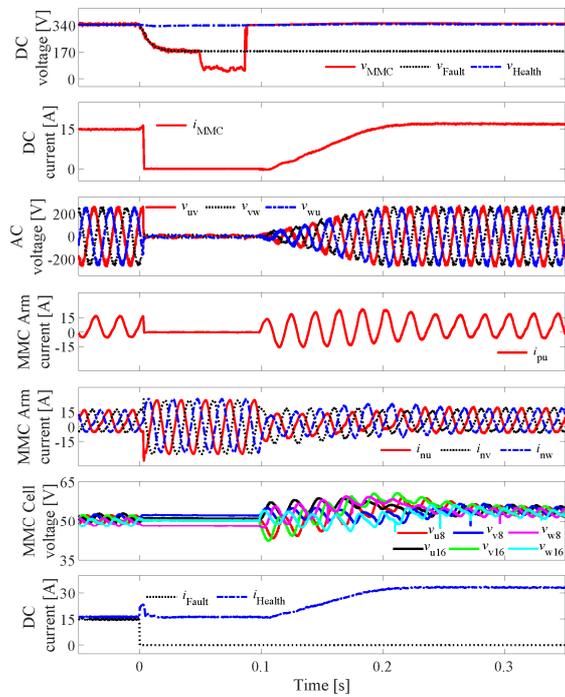
事故電流の遮断 時刻 0 s に片極地絡事故が発生すると、事故回線側の電圧 v_{fault} が定格値の半分まで低下する。事故電流 i_{Fault} の波形から、受電端母線から事故点方向への事故電流の流入が阻止されていることを確認できる。一方、送電端においては、モジュラマルチレベル変換器が下アーム短絡保護を行い、変換器の直流端子電流 i_{MMC} は零まで減少することを確認できる。以上により、事故電流が遮断されたことを確認できた。

断路器による系統切替 断路器により順変換器の接続先を健全回線側へと切り替える。断路器は時刻 50 ms に開放、90 ms に投入した。断路器の開閉の間も、直流端子電流 i_{MMC} は零に保持されていることから、電流遮断能力を持たない断路器で系統切替を行うことができることを確認できた。

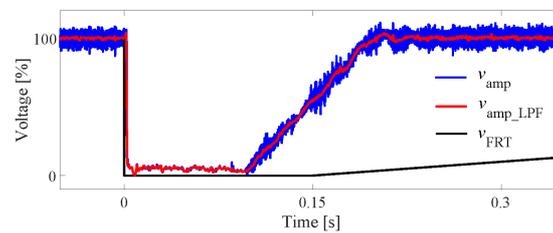
送電の再開 順変換器は下アーム短絡保護を解除して動作を開始する。事故回線側の電流 i_{Fault} が低下し健全回線側の電流 i_{Health} が増加した様相から、当初事故回線に流れていた潮流は、健全回線を経由して流れていることを確認できた。

発電設備の運転継続の判定 以上の操作に伴い、発電設備側には瞬時電圧低下が発生する。図 4 (b)の $v_{\text{amp_LPF}}$ は発電設備に印可される電圧の振幅を示す。これを、系統連系規程の定める風力発電設備の事故時運転継続 (FRT) 要件と比較した。提案法を用いた際の系統切替に伴う瞬時電圧低下は FRT 要件の定める運転継続範囲内に収まっており、本手法を適用した際に発電設備は運転継続することを確認できた。

以上 ~ の結果から、提案法の有効性が確認された。



(a) 実験波形



(b) FRT 要件との対比

図 4 ミニモデル実験検証結果 [5]

< 文献 >

- [1] K. Sano, "A concept of multi-circuit HVDC transmission system for selective fault clearing without DC circuit breakers," Proc. of International Conference on Smart Grids and Energy Systems (SGES), pp.431-436, Nov. 2020.
- [2] 中山比呂, 佐野憲一郎:「洋上風力発電向け多回線直流送電の基本構成と直流線路事故時の保護方式」, 電気学会論文誌 B, vol. 140, no. 11, pp. 795-802, Nov. 2020.
- [3] K. Sano, H. Nakayama, "A fault protection method for avoiding overvoltage in symmetrical monopole HVDC systems by half-bridge MMC," in IEEE Access, vol. 9, pp. 165219-165226, Dec. 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3134248.
- [4] 榎本光芳, 佐野憲一郎, 菅野純弥, 福嶋純一:「多回線直流送電の系統切替時における発電設備の運転継続法」, 電気学会論文誌 B, vol. 142, no. 1, pp.41-50, Jan. 2022.
- [5] 榎本光芳, 佐野憲一郎, 菅野純弥, 福嶋純一:「多回線直流送電における系統切替手法の実験検証」, 令和 4 年電気学会全国大会, vol. 6, no. 196, pp. 331-332, Mar. 2022.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Sano Kenichiro, Nakayama Hiro	4. 巻 9
2. 論文標題 A Fault Protection Method for Avoiding Overvoltage in Symmetrical Monopole HVDC Systems by Half-Bridge MMC	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Access	6. 最初と最後の頁 165219 ~ 165226
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ACCESS.2021.3134248	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Enomoto Mitsuyoshi, Sano Kenichiro, Kanno Junya, Fukushima Junichi	4. 巻 142
2. 論文標題 Continuous Operation of Power Plants under DC Line Switching Operation in Multi-Circuit HVDC Transmission System	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEJ Transactions on Power and Energy	6. 最初と最後の頁 41 ~ 50
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1541/ieejpes.142.41	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 中山比呂, 佐野憲一朗	4. 巻 140
2. 論文標題 洋上風力発電向け多回線直流送電の基本構成と直流線路事故時の保護方式	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 電気学会論文誌B	6. 最初と最後の頁 795-802
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1541/ieejpes.140.795	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Nakayama Hiro, Sano Kenichiro	4. 巻 214
2. 論文標題 A configuration of multi circuit HVDC transmission system for offshore wind power plants and its protection scheme for DC line faults	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Electrical Engineering in Japan	6. 最初と最後の頁 1-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/eej.23318	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Sano Kenichiro	4. 巻 139
2. 論文標題 Requirements and Comparisons of DC Circuit Breakers for HVDC Grids	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEJ Transactions on Industry Applications	6. 最初と最後の頁 348 ~ 359
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1541/ieejias.139.348	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計10件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 4件)

1. 発表者名 Enomoto Mitsuyoshi, Sano Kenichiro, Kanno Junya, Fukushima Junichi
2. 発表標題 Continuous Operation of Wind Power Plants under DC Line Faults in Multi-Circuit HVDC Transmission System
3. 学会等名 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Shao Shuai, 佐野 憲一朗
2. 発表標題 多端子直流送電システムに対する二重母線方式の適用
3. 学会等名 令和3年電気学会電力・エネルギー部門大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 千葉 惇史, 佐野 憲一朗, 児山 裕史, 関口 慧, 金子 恭大, 石黒 崇裕
2. 発表標題 ハイブリッド直流遮断器を用いた直流送電の運転継続制御法
3. 学会等名 令和3年電気学会電力・エネルギー部門大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 榎本 光芳, 佐野 憲一朗, 菅野 純弥, 福嶋 純一
2. 発表標題 多回線直流送電における系統切替手法の実験検証
3. 学会等名 令和4年電気学会全国大会
4. 発表年 2021年～2022年

1. 発表者名 Shuai Shao, Kenichiro Sano
2. 発表標題 A double bus configuration with multi-port DC circuit breakers for DC switching stations
3. 学会等名 IET International Conference on AC and DC Power Transmission (ACDC) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 K. Sano, H. Nakayama
2. 発表標題 An Overvoltage-Less Protection Method for Pole-to-Ground Faults in Symmetrical Monopole HVDC Systems by Half-Bridge MMC
3. 学会等名 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 K. Sano
2. 発表標題 A concept of multi-circuit HVDC transmission system for selective fault clearing without DC circuit breakers
3. 学会等名 International Conference on Smart Grids and Energy Systems (SGES) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 榎本光芳, 佐野憲一朗, 菅野純弥, 福嶋純一
2. 発表標題 多回線直流送電の直流線路事故時における発電設備の運転継続法
3. 学会等名 令和2年電気学会電力・エネルギー部門大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中山 比呂, 佐野 憲一朗
2. 発表標題 洋上風力発電向け多回線直流送電の基本構成と直流線路事故時の保護方式
3. 学会等名 電気学会 電力技術/電力系統技術合同研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中山 比呂, 佐野 憲一朗
2. 発表標題 洋上風力発電向けバックボーン形多端子直流送電の直流線路地絡事故のシミュレーション
3. 学会等名 平成31年電気学会全国大会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 直流送電システム	発明者 佐野 憲一朗, 中山 比呂	権利者 東京工業大学
産業財産権の種類、番号 特許、2019-111416	出願年 2019年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

-

6. 研究組織	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------