

多端子連系をはじめとする直流送電の 最新技術動向

多端子連系をはじめとする直流送電の最新技術動向調査専門委員会編

(発行日 2022年10月3日)

目	次
1. まえがき	3
2. 概論	4
3. 多端子連系をはじめとする直流送電の要素技術	7
3.1 交直変換器・各種変電機器	7
3.1.1 交直変換器	7
3.1.2 ブレーキングチョッパ	8
3.1.3 DC/DC 変換器	9
3.1.4 潮流制御に関する変電機器	11
3.2 直流用開閉器	13
3.2.1 直流遮断器の構成要素と分類	13
3.2.2 直流遮断器の要件	14
3.2.3 機械式直流遮断器の開発例	16
3.2.4 ハイブリッド直流遮断器の開発例	17
3.2.5 海外における直流遮断器開発例	17
3.2.6 その他直流用開閉器開発例 (DC-GIS)	18
3.3 直流ケーブル	19
3.3.1 直流ケーブル技術の概要	19
3.3.2 海底直流送電の計画	19
3.3.3 多端子海底直流送電の研究開発状況	20
3.3.4 海底直流ケーブルの保守管理	21
4. 多端子連系をはじめとする直流送電のシステム技術	22
4.1 直流システムの構成	22
4.1.1 二端子直流送電の基本構成	22
4.1.2 多端子直流送電の基本構成	23
4.1.3 直流システムの事故時の影響	23
4.2 直流システムの保護	25
4.2.1 主な系統故障	25
4.2.2 直流事故除去機器	25
4.2.3 事故時の系統現象と機器応動	25
4.2.4 事故区間の選択遮断と非選択遮断	26
4.2.5 実機における保護の設計例	27
4.3 直流システムの潮流制御	29
4.3.1 多端子直流システムにおける潮流制御の課題	29
4.3.2 電圧マージン制御と電圧ドロップ制御	29
4.3.3 直流電圧と潮流の制御	30
4.3.4 潮流最適化アルゴリズム	33
4.3.5 直流システムにおける潮流制御機器	34
4.4 モデル化および解析技術	35
4.4.1 解析の必要性和特徴	35
4.4.2 解析項目とモデリング	35
4.4.3 MMC のモデリング	36
4.4.4 解析モデルのセキュリティ	37
4.4.5 ブラックボックスモデルの適応例	38
5. 直流送電を含む交流電力システムの制御技術	39
5.1 分散形電源との協調制御	39
5.1.1 洋上風力との協調制御	39
5.1.2 周波数制御	41
5.1.3 過渡安定度向上	44
5.2 系統間連系に関わる直流送電技術	47
5.2.1 周波数制御	47
5.2.2 電圧制御	49
5.2.3 ブラックスタート	50
5.3 鉄道応用	52
5.3.1 鉄道用周波数変換装置の概要	52
5.3.2 網島4号FCの制御技術	52
5.3.3 沼津静止形FCの制御技術	53
5.4 仮想同期発電機制御	55
5.4.1 仮想同期発電機制御について	55
5.4.2 同期発電機の動揺方程式を用いた基本的制御	55
5.4.3 ガバナ機能付き同期化力インバータ制御	55
5.4.4 $V^2-P-\omega$ 特性を用いた多端子直流システムのVSG制御	57
5.4.5 仮想同期機制御による低周波電力振動ダンピング	58
5.4.6 HVDC 用変換器の同期発電機制御 (SGEC) 方式	60
5.4.7 同期変換器の概念に基づいた HVDC 制御方式	61
6. 多端子直流送電に関わるプロジェクト事例	63
6.1 多端子直流連系運用事例	63
6.1.1 他励多端子直流連系事例	63
6.1.2 自励多端子直流連系事例	65
6.2 研究プロジェクト紹介	69
6.2.1 背景	69
6.2.2 次世代洋上直流送電システム開発事業 (NEDO プロジェクト) 概要	69
6.2.3 Best Paths プロジェクト	70
6.2.4 PROMOTioN プロジェクト	72
7. あとがき	73

多端子連系をはじめとする直流送電の最新技術動向調査専門委員会委員

委員長 幹事	北條昌秀（徳島大学）	途中退任 委員	品田浩一郎（東北電力）
	菅野純弥（東京電力ホールディングス）		南亮太郎（東京電力パワーグリッド）
幹事補佐 委員	佐野憲一朗（東京工業大学）		元木啓明（東京電力パワーグリッド）
	福嶋純一（東京電力ホールディングス）		山岸良雄（北陸電力送配電）
	中島達人（東京都市大学）		家田夏衣（関西電力送配電）
	野呂康宏（工学院大学）		宮本光曜（関西電力送配電）
	木村紀之（福井工業大学）		浅野勝則（関西電力）
	伊与田功（系統解析技術研究所）		三川玄洋（中国電力）
	三浦友史（長岡技術科学大学）		中飯尚弘（四国電力送配電）
	加藤修治（東北大学）		中澤雅明（九州電力送配電）
	又吉秀仁（大阪工業大学）	参加者	下形竜也（電源開発）
	小西博雄（産業技術総合研究所）		福井将悟（電力中央研究所）
	中山浩二（産業技術総合研究所）		宮田浩樹（北海道電力ネットワーク）
	久野村健（東海旅客鉄道）		山口哲一（東北電力）
	菊間俊明（電力中央研究所）		太田文彦（東京電力ホールディングス）
	内海貴徳（北海道電力ネットワーク）		加曾利菜穂子（東京電力パワーグリッド）
	赤塚重昭（東北電力）		山田剛史（東京電力パワーグリッド）
	栗原重雄（東京電力パワーグリッド）		
	清水康広（北陸電力送配電）		
	羽尻龍太郎（中部電力パワーグリッド）		
	芝田和浩（関西電力送配電）		
	山田正人（関西電力）		
	神田光章（中国電力）		
	森昌之（四国電力送配電）		
	小杉成史（九州電力送配電）		
	二田丈之（電源開発）		
	井上重徳（日立 HVDC テクノロジーズ）		
	飯尾尚隆（東芝エネルギーシステムズ）		
	天満耕司（三菱電機）		
	臼木一浩（東芝三菱電機産業システム）		
	篠原博（富士電機）		
	渡辺純一（明電舎）		
	黒田和宏（日新電機）		
	齊藤久志（東電設計）		
	真山修二（住友電気工業）		
	太田洋佑（理経）		

1. まえがき

再生可能エネルギー由来の出力不安定な分散形電源の大量導入が進むなか、電気エネルギーの安定供給を維持し続けるため、電力系統の計画・運用・制御についてさらなる技術革新が進められている。我が国において系統間電力融通を考えると、あるいは洋上風力発電の発電電力を陸上に輸送する方法を考えると、いずれの局面においても直流送電は有用な技術のひとつとなっている。

近年、太陽光発電や風力発電といった再生可能エネルギー由来の分散形電源が電力系統へ大量導入されるようになってきている。風力発電については、洋上に大容量設備を導入する検討も行われるようになり、国内外に関わらず、こうした新しい発電システムの急増に対して、電気エネルギーの安定供給を継続するためにも電力系統技術のさらなる発展が求められるようになってきている。特に、洋上風力発電の電力を複数箇所の陸上に送電するような場面において、多端子直流送電に大きな期待が寄せられている。例えば、国内では大規模な洋上風力発電の発電電力を陸上に送電するための技術として多端子直流送電システムの研究開発が推進されているほか、欧州でも、PROgress on Meshed hvdc Offshore Transmission Networks (PROMOTioN) が変換器から保護技術やシステム設計まで積極的な技術開発を展開している。

また、自励交直変換器による直流送電の実用化を受けて、再生可能エネルギーと直流送電を統合したシステムの検討も行われるようになってきている。自励直流送電の制御性の高さを活かした系統制御は、分散形電源の多数台連系に関わる技術課題に対しても有効な対策の一つとして重要な役割を果たすものと考えられる。

また、電力自由化の進展の下、系統間連系に期待が寄せられるわが国においては、直流送電は有用な技術の一つであり、その果たすべき役割は重要になってきていると考えられる。

電気学会においては、MMC 方式を主とした自励交直変換器の回路制御技術をまとめた「電力系統用新方式自励交直変換器の技術動向」が平成 28 年 4 月に発行され、既に技術者・研究者に有益な情報を提供している。また、最近では、「電力系統用パワーエレクトロニクス機器の解析・シミュレータ技術」が令和元年 6 月に出版され、直流送電に関わる変換器制御等の最新の解析技術が総括されている。このように、最新の回路技術や解析技術が整理された一方で、多端子直流送電の国内外プロジェクトの進展や電力系統をとりまく環境変化に対応した直流送電技術の新たな展開に視点を合わせた動向調査の類例はない。

これらの状況を踏まえ、大容量洋上風力発電の柔軟な系統連系を可能にする多端子直流送電や、分散形電源の連系容量増加や電力自由化の進展に伴う直流送電の技術動向か

ら今後適用が期待される役割や新要素技術にいたるまで、最新の直流送電技術の動向調査を行うことを目的として、「多端子連系をはじめとする直流送電の最新技術動向調査専門委員会」が令和 2 年 1 月～令和 4 年 12 月までの 3 年間、設置され、計 12 回の委員会が開催された。本技術報告はこの調査専門委員会での調査結果をまとめたものである。

調査を実施した項目は下記のとおりである。

第 3 章 多端子連系をはじめとする直流送電の要素技術

直流送電の要素技術として、交直変換器・各種変電機器、直流用開閉器、直流ケーブルに関する機器構成、構成要素や分類、技術動向を概説している。それぞれの機器に応じて、構成要素と分類、動作要件、動作原理、分類ごとの特徴等、の概要を述べている。

第 4 章 多端子連系をはじめとする直流送電のシステム技術

直流送電のシステム技術に関する多岐について概説している。直流系統構成では、二端子直流送電の基本構成から多端子直流送電の構成のそれぞれの特徴、事故時の影響について調査結果をまとめた。直流系統の保護では、事故現象から事故時の機器応動、影響範囲の観点からの事故除去方針による事故区間の選択遮断と非選択遮断について調査した。直流系統の潮流制御では、潮流制御の課題からマージン制御とドループ制御などの制御手法について述べている。モデル化および解析技術では、直流送電システムの仕様検討、設計、運開前後の各段階においては、技術検討項目に応じて様々な解析・シミュレータ技術が用いられている。検討対象に応じて手法を使い分ける必要があるため、モデル化および解析技術の概要を述べている。

第 5 章 直流送電を含む交流電力系統の制御技術

直流送電を含む交流電力系統の制御技術では、洋上風力からの直流送電や系統間連系用直流送電における、陸上系統側の周波数制御や過渡安定度向上、系統連系、鉄道用の周波数変換装置制御技術、仮想同期発電機制御技術について概要を調査した。

第 6 章 多端子直流送電に関わるプロジェクト事例

多端子直流連系運用事例として、他励多端子直流連系事例、自励多端子直流連系事例、欧州のプロジェクト事例として、Best Paths プロジェクト、PROMOTioN プロジェクトにおける事例を紹介している。

今後、多端子連系をはじめとする直流送電に関連される読者の方々の参考となれば幸いである。