



再生可能エネルギー大量導入に向けた電力ケーブル系統設計技術

Design Methods of Power Cable Transmission Systems for Large-Scale Installation of Renewable Energy

太田 一雄*
Kazuo Ota

真山 修二
Shuji Mayama

田中 未来
Miku Tanaka

脱炭素化のため近年拡大が進む再生可能エネルギーは、ポテンシャルが偏在する需要地に届けるために、再エネ発電所から既存系統に接続する長距離自営送電線はもちろん、基幹系統ネットワークの拡充も必要不可欠である。本論文では、再生可能エネルギーの送電で多用される長距離交流ケーブルに伴う高調波共振をはじめとする固有の課題と解決の系統設計手法を示すとともに、需要地に大電力を届けるため期待される直流海底送電ケーブルの海底ルート選定や異社間接続などのケーブル系統設計技術について報告する。

With the expansion of the use of renewable energy, it is necessary to construct not only AC distribution systems that connect renewable energy power plants to the existing grid but also long-distance large-capacity DC transmission lines. The AC cable systems are prone to various problems such as AC harmonic resonance and current zero missing, which require designs based on power system simulation. The large-scale DC transmission lines are expected to play an important role as multi-terminal transmission systems in the future, and their electrical system design and submarine route design require advanced cable technology. This paper reports on our new cable system design methods for AC distribution lines and DC transmission lines that contribute to the increasing use of renewable energy.

キーワード：再生可能エネルギー、長距離交流ケーブル、高調波共振、系統設計、直流海底送電ケーブル

1. 緒言

近年、脱炭素化のため再生可能エネルギー（以下、再エネ）の急速な拡大が行われている。しかし、偏在する再エネの発電電力を需要地に届けるためには、再エネ発電所から既存系統に接続する自営送電線と、既存系統では足りない送電容量を増強するための基幹送電網の拡充も必要不可欠である。本論文では、風力発電等の再生可能エネルギーの系統連系で多用される長距離交流ケーブル固有の課題と解決方法を示すとともに、需要地に大電力を届けるための直流海底送電ケーブルの系統設計技術について報告する。

2. 風力発電の送電システム

近年、陸上風力発電は風況の良い適地に100MW級の規模で計画し、一般送配電会社との連系点まで長距離化するケースが多くなった。風力発電用の送電線路の多くは、風力発電事業者の自営線として、架空送電に比べ用地制約

が少なく工期短縮が可能な、地中送電・長距離交流ケーブルで連系する事例が一般的な計画となってきた。これに伴い長距離交流ケーブル特有の技術課題が顕在化してきた。この傾向は、今後の拡大が期待されている洋上風力でも同様と想定され、当社では、グループ企業の日新電機㈱と共に、ケーブルの電気特性と変電機器設計を一体的に解決するソリューションを提案している。

2-1 長距離交流ケーブルの技術課題

交流ケーブルはコンデンサのような静電容量を持つため、長距離となると充電電流が大きくなり有効電力の送電容量が減少することは、良く知られている。（「3. 直流海底送電ケーブルによる系統強化」にて後述）近年、交流ケーブルが長距離化することにより、変電機器も含めた電気システムとしての課題が注目されるケースが増加している。ここでは、静電容量に起因して発生する主要な電気現象と対策について報告する。

(1) 地絡事故時の電流増加

地絡事故時の事故遮断動作への影響が懸念される。ケーブルに溜まっていた電気が事故電流と共に流れ込み、事故電流を増加させる現象が発生する。対策として、ケーブルから流れ込む電流を逆方向の電流で打ち消すため、変圧器の中性点に補償リアクトルを設置している。

(2) 高調波共振検討（低次調波共振）

ケーブルの静電容量（C）が大きくなると、電力システムのインダクタンス（L）との共振周波数が低下し、特定の周波数（5次、7次）で共振現象が発生するため、系統の電

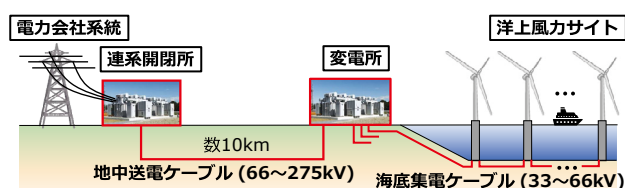


図1 風力発電の送電システム例

圧歪を拡大する可能性がある。高調波共振現象が発生すると、高調波が拡大し、機器等の過熱を発生させる恐れがある。対策としては、高調波フィルタの設置等が考えられる(図2)。

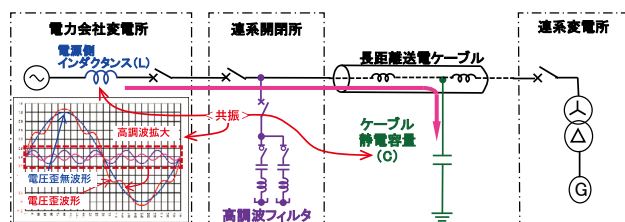


図2 高調波共振のイメージ図

(3) 残留電荷対策

長距離交流ケーブル系統で遮断器を解放すると、ケーブルの静電容量Cにピーク電圧(電荷)が残留する。この状態で遮断器を投入すると、残留電圧に商用電圧が重畳することにより過電圧が発生し、機器やケーブルを損傷する可能性がある。また残留電荷を接地開閉器で放電させると電荷の急激な移動により、ケーブル遮蔽層に電圧を誘起し、絶縁破壊を引き起こす恐れがある。

対策として、接地型機器を配置し、問題なく放電可能であることを確認する。

(4) 電圧変動・電圧上昇

一般送配電会社が遮断器にて再エネ事業者の長距離交流ケーブル系統を充電する際に、ケーブルの充電容量によっては、一般送配電会社が規定する電圧変動範囲を逸脱する場合がある。対策として、長距離ケーブルを分割する区分開閉所を設けるとともに、ケーブルの充電容量を相殺する分路リアクトルを設置する。

また、静電容量によるフェラント効果^{*1}により連系点(電力系統)の電圧よりも発電所側の電圧の方が高くなる現象が発生するため、長距離ケーブル採用時には電圧の検討が必須となる。

(5) 電流零ミス

長距離ケーブルの各種対策のために、中性点補償リアクトルや分路リアクトルを設置すると、電流零ミス現象が発生することがある。これは、電気事故発生時に事故電流が通常の交流波形と異なり直流のようにゼロ点と交差しない状態となる現象で、発生すると事故電流を遮断できず遮断器を損傷させる恐れがある。対策として、中性点補償リアクトルの抵抗分を大きくする、分路リアクトルを先行遮断する等の検討を行う(図3)。

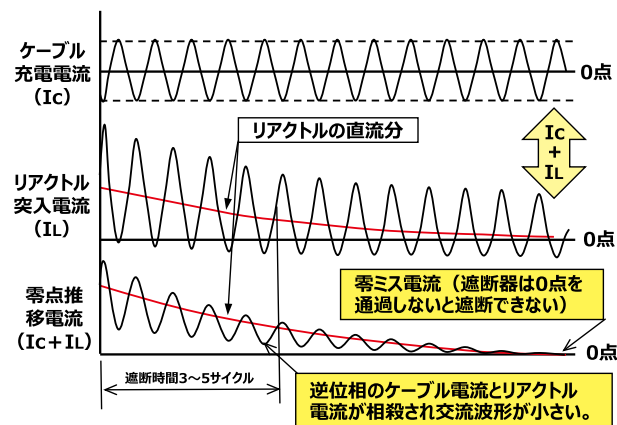


図3 電流零ミス現象のイメージ

2-2 欧州トラブル事例の考察

再エネ普及で先行する欧州では、再エネ導入と並行し既存系統の最適化、増容量、新設などの系統再構築が進められていることは良く知られているが、どのようなトラブルが発生し対策してきたのかについては、あまり報告がない。ここでは、発表されたいくつかの論文から、欧州で発生している送電トラブルについて考察する。

(1) 交流系統におけるトラブル

2013年に運転開始したデンマークのAnholt洋上風力発電所は、集電ケーブル33kV・152kmにて、発生した電力400MWを交流220KVケーブル・85km(海底:25km、陸上:60km)で陸上の変電所に接続し400kVに昇圧後、電力系統と連系する大規模ウィンドファーム(以下、WF)である。Anholt洋上風力を例にして、高調波共振現象をモデル化して検討する方法や、長距離交流ケーブル系統システムの評価研究に関する論文が出されている⁽¹⁾。

欧州の系統増強予算はTSO(基幹系統)よりもDSO(地方系統)が数倍規模となっているとし、ここ10数年間で架空送電系統から地中送電系統にて増強されるケースが多いと報告されている。至近にて欧州で発表された論文の中には零ミス現象等に対するものも多く、交流ケーブルに起因する何らかのトラブルが発生していることが推測される。

なお、昨年7月から2023年6月までの3か年を目途に、「洋上風力発電の現状とその普及の鍵となる電力技術」と題し、電気学会に調査専門委員会が設置された。同委員会では、欧州で基幹電源として位置づけられる洋上風力発電も、20年以上の歴史の中でケーブルの破断や洋上変電所の絶縁破壊事故、高調波フィルタの焼損など、様々なトラブル事例から学んだノウハウの蓄積の賜物であるとし、実態を研究することとしている。研究成果に注目したい。

(2) HVDC送電と洋上風力発電におけるトラブル例

2010年12月に運転開始した、ドイツの洋上風力発電BorWin1では、400MWの洋上風力発電を200kmのDCケーブル(海底:125km、陸上:75km)にて送電し、2レベ

ルPWMコンバーターで陸側の系統と連系した。BorWin1では、高調波共振現象が技術的課題となったことが報告されている⁽²⁾。これは、従来の交流電力系統で課題となる高調波共振現象とは原因が異なり、洋上風力をHVDCシステムで陸上系統と電氣的に切り離しているため、洋上側のコンバーターから154kVケーブル、変圧器、33kVケーブルを介した洋上側のコンバータと風車発電機間の電気特性に起因した現象とされる。

2-3 系統解析技術 (PSCAD/CPAT)

当社では系統解析ツールとして、PSCADとCPATを使用している。以下、概要について記載する。

(1) PSCAD

カナダのマニトバ社製の電力系統シミュレーションソフトウェアで、世界1000社以上の企業・研究所にて採用されているツール。過渡現象の解析に強いビジュアル設計ツールで、各種コンポーネントを標準搭載している。当社では、主に高調波共振検討等を使用している。

(2) CPAT

電力中央研究所が独自開発した「電力系統統合解析ツール CPAT」をベースに、解析機能（解析ツール）と解析可能な系統規模を限定して提供しているCPATFreeを使用し、長距離交流ケーブルによる電圧上昇や系統連系時の無効電力検討等を実施している。

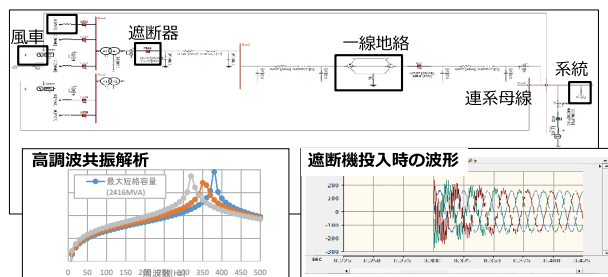


図4 PSCADによる解析事例

2-4 風車集電ケーブルの最適配策設計

周囲を海に囲まれた我が国では、今後、洋上風力発電の導入拡大が想定される。洋上風力では複数の風車を交流海底ケーブルで接続し陸上へ集電する。このケーブル配策は交流ケーブルで発生する無効電流による損失を考慮しつつ経済的な設計とすることが求められるが、風車基数が増大するほど最適な配策設計が困難となる。そこで当社は、定量的にコスト最小となるケーブル集電配策を設計するため、最適化手法を用いた集電配策設計システムを構築した。

本手法では、集電ケーブルとして電圧33kVまたは66kVの3心交流海底ケーブルを用いることとし、導体サイズ80～1000mm²の中から最適なサイズを選択し配策設計する。

各ケーブルは導体サイズに応じてコストが設定され、最適化の目的はWF内集電ケーブルの総コスト最小化である。また、各ケーブルは導体サイズ、ケーブル長に応じた無効電流による送電容量の制約を持つ。

ここで、定格10MWの風車25基から構成されるWFの集電配策設計の例を示す。電圧は66kVとした。この例では導体サイズ80, 150mm²の2種類が選定されている。風車位置、容量は案件ごとに設定可能であり、本手法により極めて短時間で定量的に経済的な集電ケーブル配策を算出することが可能となる（図5）。

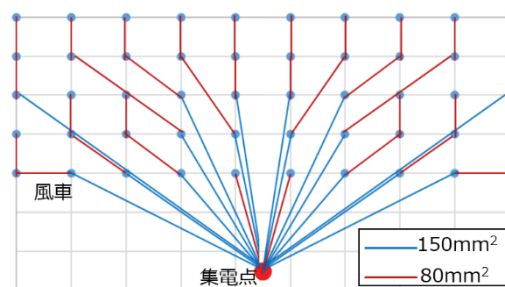


図5 風車集電ケーブル配策設計例

3. 直流海底送電ケーブルによる系統強化

日本の再エネポテンシャルは数10GWと言われるが、全体の8割程度が北海道、東北、九州に偏在し、大消費地と離れ、電力系統が脆弱であることが課題とされてきた。近年、直流海底送電により、再エネ発電地域と大消費地を直接連系する解決案も検討開始され、2050年カーボンニュートラル達成に向けて、様々な政策・検討が加速してきている。それに伴い、当社の直流海底送電システムの各種設計技術に対しても、各方面から大きな期待が寄せられている。

一般に、海底送電プロジェクトは図6に示す着工までの各段階でケーブル技術検討が必要となる。まず、送電容量、送電距離に基づき直流・交流の損益分岐点評価にて概略システムを検討すると同時に海底ケーブルの布設ルート案を策定し、プロジェクトの基本仕様を策定する。基本仕様検討は海底線プロジェクトの事業規模を掴む重要なステップであり、その検討は短期間かつ定量的に評価することが求

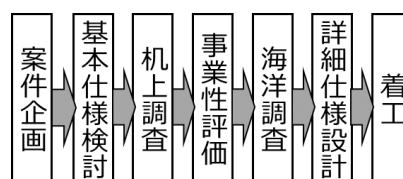


図6 海底線プロジェクト着工までのフロー

められる。当社は全ての段階においてケーブル技術検討を担うが、本章では、基本仕様検討のための損益分岐点評価と海底ルート最適設計を行なうために開発した各手法を紹介する。

3-1 直流システムと交流システムの損益分岐点評価

送電方式には直流送電と交流送電の2つの選択肢が存在し、送電距離、容量等に応じて適切な方式を選択する必要がある。図7に示す通り、直流送電の場合は高コストな交直変換器が必要となるため、送電距離の短い範囲においては交流送電が経済的に優位となる。しかし、交流ケーブルの無効電流による損失は長距離化するほど大きくなり、それに必要となる調相設備が大規模化するため、長距離送電においては無効電流が発生しない直流送電が有利となる。この直流と交流の経済的優位性が逆転する送電距離を交直損益分岐点と称し、最適化手法を用いて定量的に評価する手法を開発した。

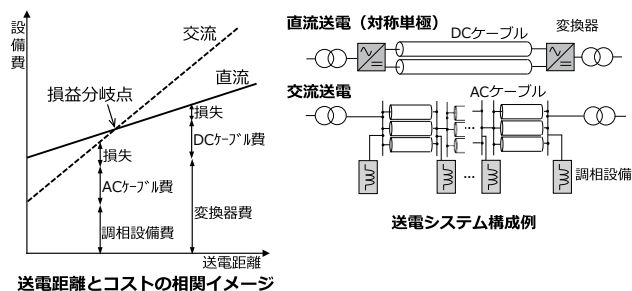


図7 直流送電と交流送電のシステム比較

本検討では、WF電源の送電距離が10/50/100/150kmのそれぞれについて、コスト最小となる送電システムを最適化手法により設計することにより交直損益分岐点を評価した。コストは送電システムの設備導入費の年経費と1年間にケーブルで発生する送電ロスの合計として評価する。設備導入費は表1に示すケーブル、変電機器の組合せから成る資機材コストの合計値とし、送電ロスはWF稼働率を考慮したケーブルで発生するロスを売電損失額（¥9/kWh）に変換し評価した。

表1 各送電方式の設備

送電方式	直流送電	交流送電
送電電圧	DC 525kV, 320kV, 250kV	AC 275kV, 154kV
導体サイズ	800, 1200, 1600, 2000, 2500mm ²	
変電機器	自励式交直変換器	調相設備

ここでWFの定格容量1000MW、年間平均稼働率20%とした場合の損益分岐点評価結果を図8に示す。このときの交直損益分岐点は50kmと評価された。このように本手法を用いることで、自然変動電源特有の稼働率も考慮した送電システムの最適設計を評価することができる⁽³⁾。

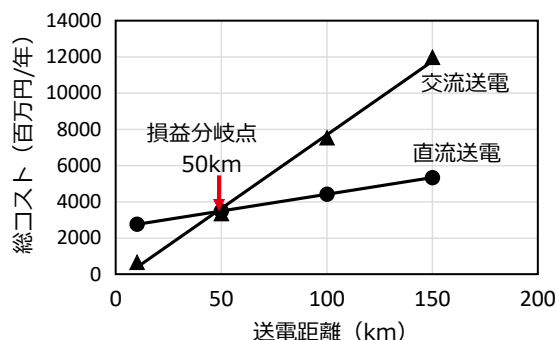


図8 コストと送電距離の関係

3-2 海底ルート最適設計システム

海底送電線の建設コストはルート上の海洋環境条件に大きく影響を受け、その最適設計には高度なノウハウと煩雑かつ長期間の検討が必要となる。当社は、各種海洋条件がルート設計に及ぼす影響を定量的に評価し、コスト最小となる海底送電ルートの設計手法を開発した。

(1) 海洋情報データベースの構築

海底ルート設計に影響を与える主な海洋環境情報をデータベース化した。ケーブル仕様と布設工法に影響を与える技術的条件として水深⁽⁴⁾と海底地質⁽⁵⁾を、制限区域等の情報として、漁業情報⁽⁶⁾、港湾区域⁽⁷⁾、軍事演習区域⁽⁸⁾を選出し、これら5つの海洋情報の日本EEZ内の範囲について5層構造のデータベースとして集約し可視化できる仕様とした。各データは約500m幅の正方形となるように一定の経緯度幅でメッシュ化し、長距離海底送電線プロジェクトの初期計画段階において必要とされるルート設計の精度を保つ仕様とした。

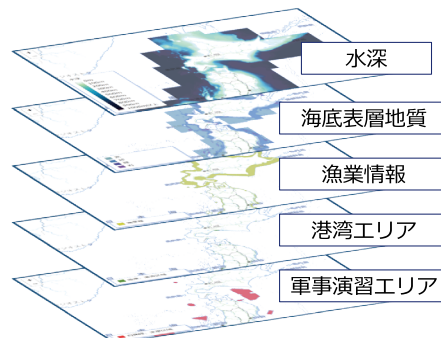


図9 海洋情報データベース

(2) 最適化手法を用いたルート設計手法

海底ルート設計のアルゴリズムには最短経路探索手法を応用した。最短経路探索手法では始点と終点を繋ぐ複数ルートのうち、経路の重みを最小にするルートを選定する。その重みとして海底線コストを設定することにより最小コストの海底ルートを探査する。具体的には、海洋データメッシュに格納された各データに基づきケーブル資材コスト、布設コスト、船の艀装コストを重みづけする。

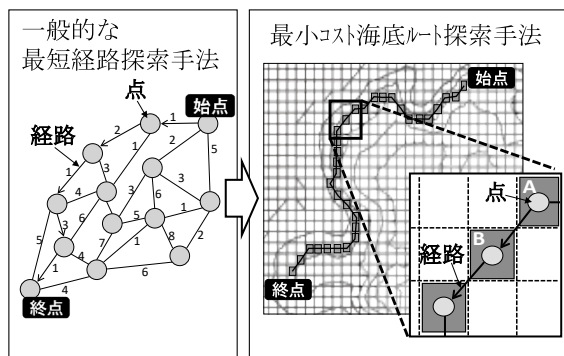


図10 最短経路探索手法を応用したルート設計手法

(3) 海洋環境条件と海底線建設コストの相関

海底線建設コストはケーブル資材、布設、艀装の3つの主要コストの合計コストとして算出する。ケーブル資材は再エネ導入量の最大化を想定し最新技術である直流500kVのケーブル仕様を基本に、水深に応じて発生するケーブル張力に合わせて1重或いは2重の鉄線鎧装仕様の資材単価を設定した。また、浅水域では漁具、投錨による外傷を防ぐためケーブルを防護することとし、海底地質が砂地の場合はケーブル埋設、岩盤の場合は防護管取付の布設単価を設定した。深海域においてはケーブルを防護せず沈設するものとし布設単価を設定した。艀装費用とは深海域で発生するケーブル張力に合わせたケーブル把持用ブレーキ装置費用を意味し、ルート中の最大水深で発生するケーブル張力に応じてその費用を段階的に増加させる。

(4) 海底ルート最適設計システムの構築

上記データベースとルート設計アルゴリズム、コスト指標をクラウド上に組み込み、実用性の高い海底ルート設計システムを構築した。海洋環境のデータベースは、5種データそれぞれの表示にon/off機能や表示透過性の設定機能を持たせることで、必要に応じたルート上の海洋環境を確認することが可能となる。また、地図上で任意の2地点を選択する、或いは経緯度座標を入力することにより、2地点間のコスト最小となる最適ルートを数秒で算出しそのルート

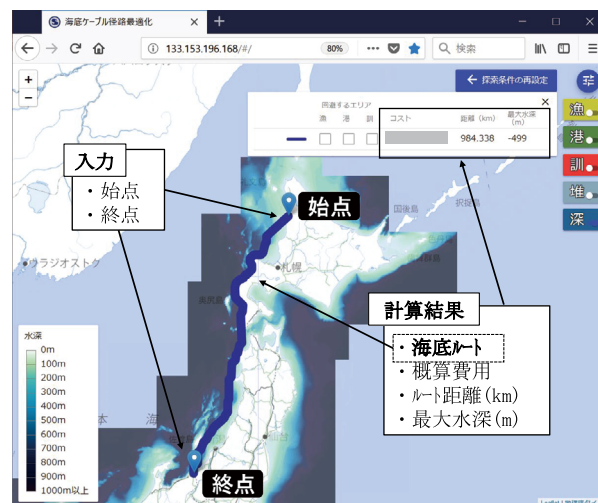


図11 海底ルート最適設計システム

を地図上に表示し、同時に、そのケーブル長、最大水深、コストも算出される。本手法により、極めて短期間かつ低コストで最も経済的な海底ルートを定量的に設計可能となり、初期の事業検討段階における事業性評価時に大きく貢献することができる⁽⁹⁾。また、今後送電ロスを考慮した設計手法への改良も検討している。

3-3 海底送電線のルート調査

最適設計システムにより概略設計したルートを基に実際の布設ルートを決定するため、机上調査および調査船による海洋調査を実施する。机上調査の目的は海洋調査ルートの決定、海底線建設コストの精度向上にあり、いずれも海底ケーブル設計、布設に関する高度なノウハウを必要とする重要なステップである。机上調査では各機関から発行されている詳細な海底地形、水深、漁業活動等の膨大な海洋情報を収集・分析し、実現可能かつ経済性を考慮した海底ルート及びケーブル布設工法、資材仕様を検討する。これにより海底線建設のコスト、工期が具体化され、事業計画・実現性が具体的に把握できるようになる。

海洋調査は着工前の最終調査であり、机上調査結果を基にルート全体を調査船で回航し、実際の細かな海底地質の分布状況、地形の凹凸等を詳細に調査することで、経済性、実現性、リスクを考慮した布設ルートおよび工事・資材仕様を決定する。この調査結果に基づき海底線建設コスト、工期を明確にし、着工へと駒を進めることができるようになる。

これら調査には海底線の設計から製造、布設に至る全工程での高度なノウハウと実績を必要とするものであり、当社はそれら国内外での豊富な実績を持つ世界有数のケーブルメーカーである。

3-4 多端子直流海底送電システム

周囲を深い海に囲まれ細長い島国である日本では、欧州北海の遠浅で広いエリアでのWF群建設とは異なり、沿岸

に数珠繋ぎで多数の大規模洋上WF群が建設される形態が想定される。既設の基幹送電線に受入制約が発生している現在、沿岸のWF群を、複数の変電所で集電・直流変換しつつ海底ケーブルで連系しながら需要地へ送電する形態が合理的と考えられる。このような3地点以上の点を結ぶ直流送電システムを、通常の2点間を結ぶ直流送電システムに対し、多端子洋上直流送電システムと呼ぶ（図12）。

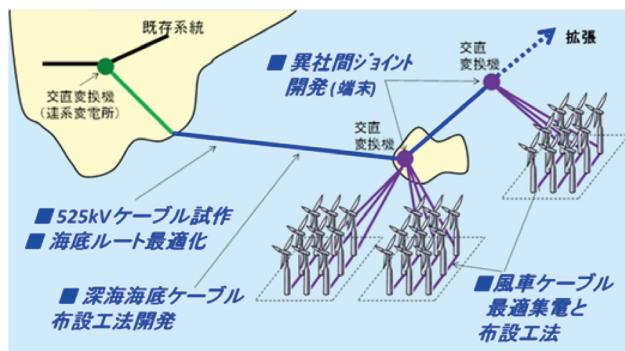


図12 多端子洋上直流送電システムのイメージ

国内では来たるべき洋上風力の大量導入時代に先駆け、国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）にて「次世代洋上直流送電システム開発事業」が2015年から5ヶ年計画で推進された。東京大学と東京電力ホールディングス・東京電力パワーグリッドを中心に、産学連携体制で研究開発が行われた。本開発に当社も参加し、風力に最適化したケーブル設計技術確立と試作評価・異社間ジョイント・ケーブル布設工法などの開発を実施した（写真1、図13）。



写真1 試作DC525kV海底ケーブル

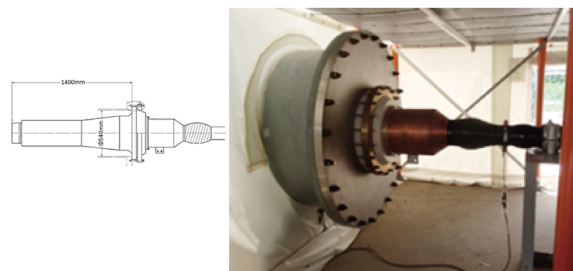


図13 DC525kVケーブルと異社間ジョイント試験

大規模な直流送電線を多端子化する際には変換器および海底ケーブルともに複数メーカーの製品を組み合わせるマルチベンダー対応化が工期・コスト的にも重要であるが、直流ケーブルの絶縁材料はメーカー毎に設計思想が異なるため、一般に異社間ケーブルのジョイントは不可とされており、複数社での送電線建設の制約となっていた。このため本開発を通じ、ガス終端絶縁箱（EB-G）を組み合わせた異社間でのケーブルジョイント技術を開発した^{(10)・(11)}。また本開発で当社は、世界最先端のDC525kV海底ケーブルの試作評価、長距離ケーブル布設のコストダウンに必要な高速ケーブル布設技術開発なども実施しており、近い将来に期待される直流海底送電網の実現に向けた対応を進めている。

4. 結 言

今後、世界的な更なる再エネ拡大が想定される中で送電システムも大きく変わってゆき、個別の再エネサイトの系統接続最適ではなく系統全体での効率的な設計思想の確立と制度化が必要と考えられる。また偏在する再エネポテンシャルを遠方の需要地に届けるため、現在議論が進む系統マスタープランの中で直流海底送電線が今後重要な役割を期待されると考えられる。当社は高い技術と製品を活かし、再生可能エネルギーの普及拡大に貢献をする所存である。

なお2-4章以降の開発成果は主に、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の委託業務により得られたものであり、また東京大学の横山教授・馬場教授には、共同研究を通じてご指導を賜った。この場を借りて関係者の皆様にお礼申し上げたい。

・PSCADはカナダManitoba Hydro International Ltd. の登録商標です。
・CPAT、CPATFree は財団法人電力中央研究所の登録商標です。

用語集

※1 フェランチ効果

長距離の電線路で負荷が非常に小さい場合、特に無負荷の場合は充電電流の影響のほうが大きくなって電流は進み電流となり、受電端電圧が送電端電圧よりも高くなる現象。

【出典】電気学会：電気専門用語集

参考文献

- (1) C. F. Jensen, et al., "Amplification of Harmonic Background Distortion in Wind Power Plants with Long High Voltage Connections," CIGRE C4 session (2016)
- (2) Christoph Buchhagen, et al., "BorWin1-First Experiences with harmonic interactions in converter dominated grids" (International TEG Congress 2015)
- (3) 田中未来、村田義直、太田一雄、真山修二、所健一、荻原義也、横山明彦、「大容量洋上ウインドファームの最適な系統接続方法の定量的評価手法の検討」、電気学会全国大会 (2017)
- (4) 日本水路協会、「海底地形デジタルデータ M7000 シリーズ」
<https://www.jha.or.jp/jp/shop/products/btdd/>
- (5) 産業技術総合研究所、「表層堆積物 (1:20万)」
<https://www.gsj.jp/Map/JP/marine-geology.html>
- (6) 海上保安庁、「海洋状況表示システム」
<https://www.msil.go.jp/msil/htm/topwindow.html>
- (7) 国土交通省、「国土数値情報 (港湾・漁港)」
<http://nlftp.mlit.go.jp/ksj/index.html>
- (8) 防衛省、「海上における射撃訓練等の実施地について」
https://www.mod.go.jp/j/approach/chouwa/firing/JMSDF_shooting_zone.html
- (9) M. TANAKA, S. MAYAMA, Y. OGURA, J. BABA, "Cable Route Optimizing System Based on Marine Environmental Conditions," JICABLE '19 (2019)
- (10) 山口、真山、「次世代直流500kV級海底ケーブル・接続部および送電システムの開発」、電気学会 論文誌、Vol.137 No.11, pp. 761-763 (2017)
- (11) K. KOYAMA, S. MAYAMA, "Total System Development on Innovative and Large Scaled HVDC Cable System towards Expanded Installation of Large Offshore Wind Farms," CIGRE B1 e-Session (2020)

執筆者

太田 一雄*：電線エネルギー事業本部 技師長



真山 修二：電力プロジェクト事業部 技師長



田中 未来：電力プロジェクト事業部



* 主執筆者