

エネルギー情報局の報告書『高圧直流送電の変動電力に対する影響評価』の概要

2018年7月23日
NEDO ワシントン事務所

エネルギー情報局 (Energy Information Administration =EIA) は 2018 年 6 月 27 日、高圧直流 (high-voltage direct current =HVDC) 送電が、太陽光発電や風力発電といった変動電力 (non-dispatchable generation) を電力系統へ統合する際に発生する課題を軽減する役割を調査した報告書『高圧直流送電の変動電力に対する影響評価 (*Assessing HVDC Transmission for Impacts of Non-Dispatchable Generation*)』を発表した。

ICF Incorporated, LLC (ICF) が EIA の委託を受けて作成した同報告書は、主要な研究結果として以下を報告している：

- 変動電源には、電力制御、需給不一致によるシステム安定性の問題、アンシラリーサービスの必要性増大、等の課題がある。
- HVDC 送電を利用する系統連系の増大により、再生可能エネルギー余剰資源を有する地域 (ホスト地域) から電力需要の高い地域 (クライアント地域) への送電をより柔軟に行うことが可能となる。
- HVDC 送電は、長距離送電での損失が小さく、過負荷調整が可能であることから、変動電力に伴う運用面での幾つかの課題に対応することが可能である。
- HVDC プロジェクトのコストは、送られる電力容量、送電手段 (海底または陸上)、環境的考慮、敷設権 (right-of-way)、及び変電所や関連設備のコストといった多くの要素に左右されるが、先頃の提案及び関連規制出願から、1 マイル当たり 1.17 百万ドルから 8.62 百万ドルと推定される。

ICF が採用した調査方法、米国における HVDC 導入状況、HVDC 送電技術の特徴、及び、ICF が分析した 3 つの HVDC 送電網プロジェクト・ケーススタディの調査結果は以下の通り。

1. 調査方法

ICF は、再生可能エネルギーの系統連系に関する問題に答えるため、以下の三段階アプローチで分析調査を実施：

- HVDC 技術利用の適合性を評価している公開情報源を精査
- HVDC 導入の費用対効果をめぐる問題を取り上げている公開情報源を基に、HVDC プロジェクトの最新コスト動向を集約・分析
- 米国内で建設及び検討されている以下の 3 つの HVDC 送電網プロジェクトの詳細なケーススタディを分析

- ワイオミング州とカリフォルニア州を接続する TransWest Express (TWE) プロジェクト
- Southwest Power Pool (SPP) 及び テネシー川流域開発公社 (TVA) のサービス地域における Plains & Eastern's Clean Line プロジェクト
- Midcontinent Independent System Operator (MISO) が検討中の概念的な HVDC 送電網

2. 米国の HVDC 導入状況

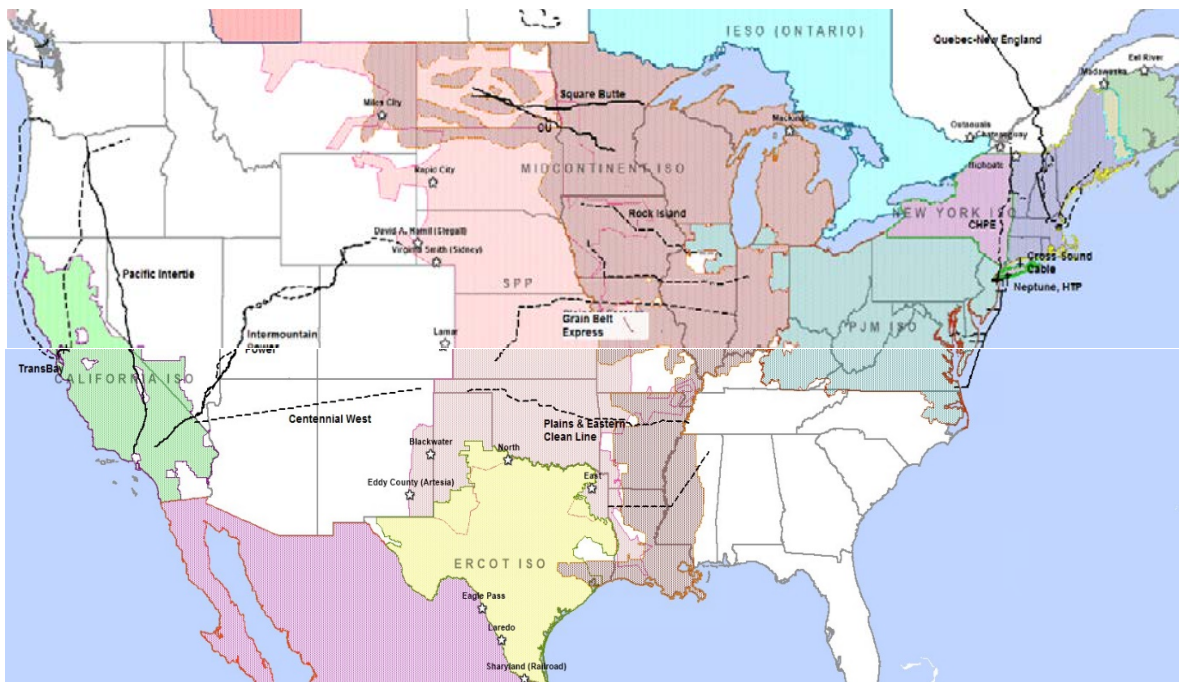
a) 電力会社の既存 HVDC 送電線及び連系線

- Pacific DC Intertie … 1970 年に完成した米国初の実用規模 HVDC 送電システム。安価な水力発電電力をボンズビル電力管理局 (BPA) サービス地域からカリフォルニア州のロサンゼルス市水道電力局 (LADWP) サービス地域へと供給する 500kV、3,800MW 級の HVDC 送電システム
- Intermountain HVDC Transmission Link … LADWP サービス地域の Adlanto 変電所とユタ州デルタの Intermountain 変電所を連結する、±500kV、2,400MW 級のバイポーラ型送電線
- Quebec-New England Transmission … 安価な水力発電電力をケベック州ラジソンからマサチューセッツ州エーアの Sandy Point へ送電する、国内最長の敷設距離 932 マイル、±450kV、2,000MW 級の HVDC 送電システム
- Square Butte … ノースダコタ州の Milton R. Young 発電所とミネソタ州アドルフの Arrowhead 変電所を連結する、敷設距離 449 マイル、250kV、500MW 級の HVDC 送電システム

b) 電力会社が計画中の HVDC プロジェクト

- Plains & Eastern Clean Line … オクラホマ州-テキサス州のパンハンドル地域から風力発電電力をアーカンソー州及びテネシー州の公益電力及び需要家へ送電する、700 マイル、±600kV、4,000MW 級の HVDC 架空線を敷設するプロジェクト
- TWE Transmission Project … ワイオミング州中南部の風力資源を活用するため、ワイオミング州シンクレアからネバダ州ボルダーシティの Marketplace HubpEldorado 変電所まで、725 マイル、3,000MW 級の HVDC 送電線を敷設するプロジェクト
- Champlain Hudson Power Express … 米加国境地帯からクリーン電力をニューヨーク都市圏まで送電する、333 マイル、1,000MW 級の HVDC 地中・海底ケーブルシステムを敷設するプロジェクト
- Quebec-New Hampshire Interconnection Project … カナダのハイドロ・ケベック水力発電所から安価な水力発電電力を米国ニューイングランド地域へ送電する Northern Pass Project (総長 192 マイル) の一部で、ケベック州ヴァル・ジョリの Des Cantons 変電所からニューハンプシャー州南部の Franklin 変電所まで、約 80km、320kV の HVDC 送電線を敷設するプロジェクト

図 1. 北米における既存及び計画中の HVDC 送電線及び連系線



(出典：『高圧直流送電の変動電力に対する影響評価』の図 1)

c) 民間企業の既存の商業 HVDC

- Cross-Sound Cable … ニューイングランド送電系統とニューヨーク州ロングアイランドの送電系統を連結する、敷設距離 24 マイル、±150kV、330MW 級の海底ケーブルシステム
- Neptune Cable … ニュージャージー州の Sayreville 変電所とニューヨーク州の Duffy Avenue 変電所を連結する、550kV、660MW 級の海底ケーブルシステム

d) 民間企業が計画中の商業 HVDC プロジェクト

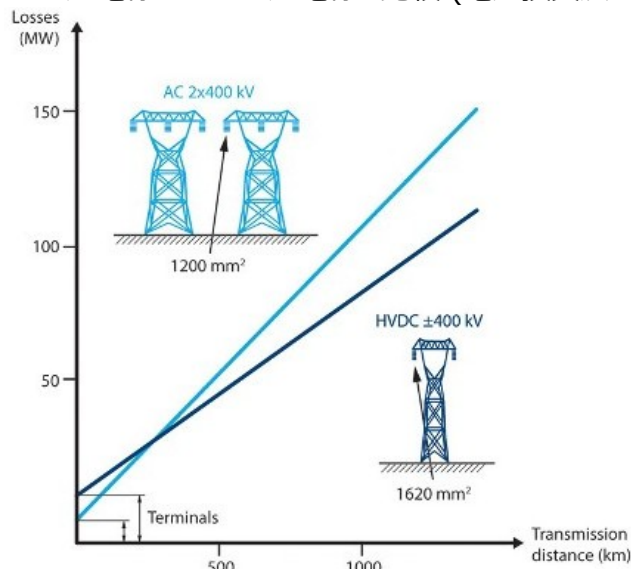
- TransBay Cable … カリフォルニア州ピッツバーグ市の変電所から同州サンフランシスコ市の変電所まで、長さ 53 マイル、±200kV、400MW 級の海底ケーブルシステムを敷設するプロジェクト
- Centennial West … 再生可能エネルギーをニューメキシコ州及びアリゾナ州からカリフォルニア州へ送電するため、約 900 マイル、3,500MW 級の HVDC 架空線を敷設するプロジェクト
- Grain Belt Express … 風力発電電力をカンザス州西部からミズーリ州の変電所、及び、イリノイとインディアナ州境にある変電所へ送電する、約 780 マイル、4,000MW 級の HVDC 送電線を敷設するプロジェクト
- Rock Island … 風力発電電力をアイオワ州北東部からイリノイ州へ送電する、約 500 マイル、3,500MW 級の HVDC 架空線を敷設するプロジェクト

- Atlantic Wind Connection … 大西洋沖の洋上風力発電所を接続し、これをニュージャージー州、デラウェア州、メリーランド州、及びバージニア州の変電所に連結する、7,000MW 級の HVDC 送電システムを敷設するプロジェクト
 - New Jersey Energy Link (第一フェーズ)¹… ニュージャージー沖の洋上風力発電所を HVDC 海底ケーブルによってニュージャージー州の変電所に連結
 - DELMARVA Energy Link (第二フェーズ) … デラウェア州、メリーランド州及びバージニア州沖に洋上風力発電所を建設し、HVDC 海底ケーブルを使って同 3 州に洋上風力発電電力を提供
 - Bay Link (第三フェーズ) … New Jersey Energy Link と DELMARVA Energy Link 間に HVDC 海底ケーブルを敷設

3. HVDC 送電技術の特徴

- a) (表皮効果を生じることがなく、電力損失が小さい) HVDC 送電システムは、遠隔地の大規模発電所から需要地までの長距離送電では、高圧交流 (HVAC) 送電システムに比べて設置コストが安く、高い費用対効果

図 2.HVDC 送電線と HVAC 送電線の比較 (電力損失及び典型的構造)



(出典：『高圧直流送電の変動電力に対する影響評価』の図 3)

- HVDC 送電線の電力損失は平均で 1,000 km あたり約 3.5%であるのに対し、同圧の AC 送電線では 6.7%。HVDC 送電線の変電所における損失 (供給電力の 0.6% ~1%) を考慮しても、HVDC 送電線の長距離送電における総合損失は AC 送電線の

¹ 2018 年 1 月にニュージャージー州知事に就任した Phil Murphy 氏 (民主党) は、Chris Christie 元州知事 (共和党) の下で棚上げになっていた同プロジェクトを含む、再生可能エネルギー法案 (第 3723 号州議会議案) に署名。

損失よりも 30～40%減となる。1200MW 級の HVDC 架空線と HVAC 架空線を比較 (図 2) すると、電力損失は送電距離 186 マイル (300km) でほぼ同率となり、それ以上の距離では一貫して AC 送電線の電力損失が拡大する。

- HVDC 送電塔は、構造が同圧・同許容量の AC 送電塔よりもコンパクトで、設置必要面積が小さく、敷設権が小さい。また、バイポーラーHVDC の場合には、ケーブル 2 条を必要とするだけであり、6 導体の 2 回線 AC 送電線に比べて、長距離になるほど敷設コストが低額となる。

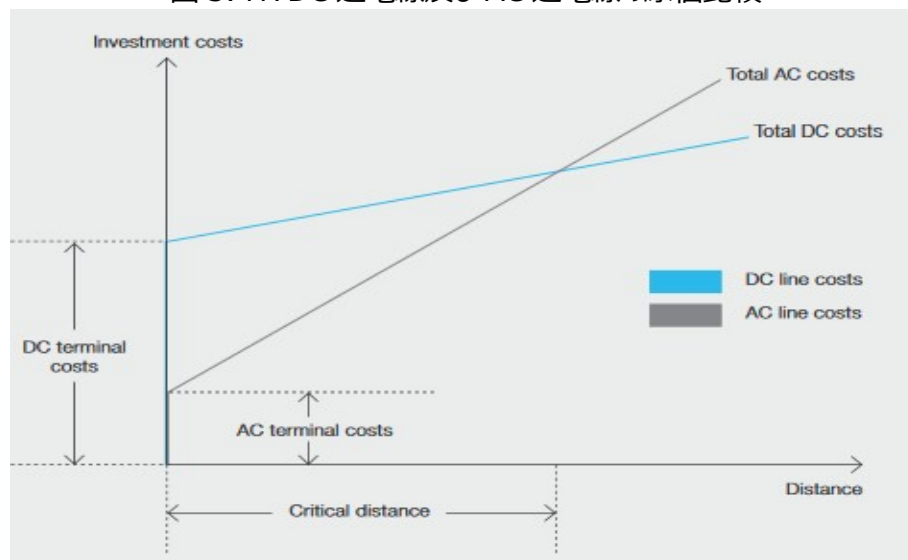
b) HVDC 送電システムは、非同期 (asynchronous) 系統の連系、及び、海底送電ケーブルといったニッチ用途に有効

- HVDC は、非同期で異周波数及び異電圧に適応可能であることから、世界各地で AC 送電網の相互連結線に使用されている。
- 静電容量の影響を受けず損失が少ない HVDC 送電は、世界各地で洋上風力発電を相互連結する海底ケーブルとして利用されている。

c) HVDC 送電線は、許容電流限界での送電、長時間における過負荷稼働への対応、及び、不安定性の制御が可能

- HVDC 送電は常に定格ピーク電圧で運転されるため、実効値 (定格ピーク電圧の約 71%) で作動する AC 送電と比較すると、HVDC の送電能力は AC 送電能力の約 40%増となる。
- HVDC 送電線は、過負荷容量 (定格容量の 10～15%増) で一定時間 (30 分未満) 作動可能であることから、システム運用者による不測の事態への対応を可能にする。
- HVDC 送電線は、非同期作動が可能であることから、連鎖的故障を防ぐことによってシステムの安定性を確保できる。

図 3. HVDC 送電線及び AC 送電線の原価比較



(出典：『高圧直流送電の変動電力に対する影響評価』の図 4)

- d) HVDC 送電は、短距離ではコスト高、ターミナル間の調整が複雑で、コンポーネントも複雑
- HVDC 送電プロジェクトが経済的に意味を成す臨界距離は、HVDC 海底ケーブルの場合で 37 マイル (60km)、架空線の場合は 124 マイル (200km)で、この臨界距離よりも短い場合はコスト高となる。
 - AC 送電システムに比べて、多端子 HVDC システムの実行は複雑で非常に高額となるほか、ターミナル間の電力潮流調整が技術的課題となっている。
 - 電流零点のない HVDC では、零点を作るメカニズムの開発が必要なために、HVDC 用遮断器の建造が困難である。

4. HVDC プロジェクト・ケーススタディの分析・調査結果

- HVDC が変動電力の影響緩和にもたらす便益は、ホスト地域とクライアント地域を HVDC 送電線で結ぶことによって達成され得るが、こうした便益の享受のために変動電力をクライアント地域へ直接連結する必要はない。
- 電力が主に、ホスト地域からクライアント地域へと流れる場合であっても、双方向型/双極方式 (bi-directional/bi-pole) の HVDC 送電が常に望ましい選択肢となる。
- 米国内の HVDC プロジェクトは、地元地域の風力発電電力を送電するために計画・提案されているものが殆どで、大規模太陽光プロジェクトの場合には一般的に AC 送電が提案されている。変動電力技術の種類が HVDC 送電の技術的フェージビリティに影響を与えるわけではないものの、HVDC 送電はこれまでのところ、風力発電及び水力発電用に主として導入されている。
- 変動電力の影響緩和を目的として導入される HVDC 送電の普及率は、各システムの根底にある送電網の健全性、発電資源ミックス、柔軟な資源のアベイラビリティ、及び、近隣システムとの連系特性といった様々な要素によって異なる。
- HVDC 送電のフェージビリティは、①ホスト地域とクライアント地域間の距離、②地元地域の再生可能資源のアベイラビリティ、③二地点間送電かどうか、④特別な長期供給契約が必要かどうか、⑤ホスト地域とクライアント地域が同一の地域または相互連系系統内に立地するかどうか、といった技術的側面に左右される。一般的には、一つの需給調整地域 (balancing area) 内では AC 送電、複数の需給調整地域間または相互連系では HVDC 送電が主体となっている。
- HVDC 送電は、①大容量の長距離送電、②非同期な相互系統間の連系線、③海底ケーブル利用の送電、といった選択的用途に利用されている。

- 米国内における HVDC 送電開発コスト
 - HVDC プロジェクトに関する文献調査によると、HVDC プロジェクトコストは推定で\$1.17 百万～\$8.62 百万/マイル。
 - 国立再生可能エネルギー研究所 (NREL) が想定した 500kV、敷設距離 100 マイルの双極方式 HVDC 送電モデルでは、変電所及び関連設備といった固定費が推定で \$734.4 百万、HVDC 送電線が推定\$144.1 百万。マイルに換算した HVDC 資本コストは、推定\$9.17 百万/マイル (運用・維持費、及び消費税を含む)。
 - HVDC 送電開発コストは、送電距離、送電される電力容量、送電手段 (海底または陸上)、環境面の考慮、敷設路の地形、敷設権へのアクセス、及び変電所や関連設備のコスト等、多くの要素に左右される。一般に、平たん地、及び、居留区や環境/歴史保護指定区の域外の場合は敷設権取得が容易でコスト安であり、海底ケーブルは陸上 HVDC 送電よりもコスト高となる。こうした要素を考慮した、米国内 HVDC プロジェクトの推定コストは\$1.17 百万～\$8.62 百万/マイル。

- HVDC 導入を制約するコスト面の要素
 - FERC Order No.1000 が、プロジェクト費用を受益者間に配分することを義務付けているが、プロジェクト利益は定量化、及び、費用対効果分析への統合が困難なほか、プロジェクトが複数州に影響を及ぼす場合にはプロジェクトの受益者決定も困難。
 - HVDC 技術の急速な進歩にも拘わらず、多端子 HVDC 送電網での電力潮流調整が依然として困難で、非常に高額。
 - 小規模プロジェクトに比べ、許可取得及び資金調達が困難。
 - 規格化されている AC システムとは違い、DC プロジェクト毎に異なってカスタマイズする必要性。