

〈論文〉

中国における大規模風力発電所の最適立地

Optimal location for large-scale wind farms in China

王 嘉陽*

WANG Jiayang

Abstract:

Chinese government enacted the Renewable Energy Law and started the full-scale introduction of renewable energy power generation in 2006. The Chinese government has put particular effort into the spread of wind power generation, and the installed capacity of wind power generation in China surpassed that of the United States to become the world's largest in 2011. However, most of China's wind farms were built in the northwest where land prices are cheaper and wind resources are abundant. These areas are far from the eastern coastal areas, which have a high demand for electric power, and a strong power transmission network is required to utilize the electric power in the eastern coastal areas. But the wind power plant output was curtailed since the power transmission network was not sufficiently developed.

It is too costly to transmit the wind power generated in the northwest to the eastern coastal area using the existing 220 kV transmission lines. Therefore, this study examined the economic efficiency of power transmission at an ultra-high voltage of 750 kV. As a result, it was found that the point with the lowest cost became far from the metropolitan area (expanded from about 120km to about 500 km), and it was found that the economic efficiency of power transmission from the northwest to the metropolitan area was secured.

Keywords:

Renewable energy, Wind power, Optimal location, Curtailment, UHV

要旨 中国政府は2006年に「再生可能エネルギー法」を施行し、再生可能エネルギー発電の導入を本格化させた。風力発電の普及には特に力を入れ、2011年には中国の風力発電の設備容量はアメリカを抜いて世界最大となった。ただ、中国の風力発電所の多くは地価が安く、風力資源が豊富な西北部に建設された。しかし、これらの地域は電力需要が多い東部沿海地域から離れているうえに、電力を東部沿海地域で活用するためには強力な送電網を必要とするが、送電網の整備が十分でなかったため、風力発電所の出力は抑制された。

西北部の風力発電電力を東部沿海地域へ送電するのに、既存の220kV送電線での送電ではコストが高すぎる。そこで本研究では、超高圧の750kVで送電した場合の経済性を検討した。その結果、費用が最小になる地点が首都圏から遠くなり（約120kmから約500kmに拡大する）、西北部地域からの首都圏への送電も経済性が確保されることがわかった。

キーワード 再生可能エネルギー、風力発電、最適立地、出力抑制、超高圧送電

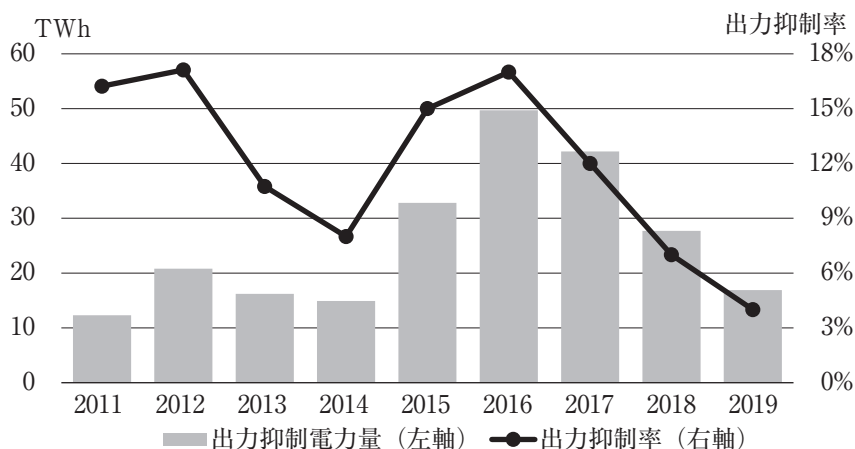
1. はじめに

中国政府は2006年に「再生可能エネルギー法」を施行し、再生可能エネルギー発電の導入を本格化させた。風力発電の普及には特に力を入れており、2006年から2010年までの間に、風力発電設備容量の年間増加率は100%を超えた。その結果2011年には中国の風力発電の設備容量はアメリカを抜いて世界最大となった。

風力発電の設備が急速に普及する一方で、風力発電の出力を抑制するという不可思議な現象が発生した。その理由は以下のとおりである。中国の風力発電所の多くは地価が安く、風力資源が豊富な北部地域と西部地域に建設されてきた。しかし、これらの地域は電力需要が多い東部沿海地域から離れており、電力を東部沿海地域で活用するためには強力な送電網を必要とするが、送電網の整備は風力発電所の急増に比べて遅れていた。そのため、風力発電所は稼働率を落とさざるを得なかったのである。

図1に、2011年以降の抑制電力量とその発電設備の年間発電量に対する比率（出力抑制率）を示した。2011年と2012年当時の風力発電の出力抑制率は16.2%と17.1%とかなりの高率であった。その後、送電網事業者の需給調整の努力により一旦低下したものの、その調整力には限界があるため2016年に再び17%になった。その後の出力抑制率は低下傾向にある。

図1 中国の風力発電の出力抑制



出所：中国国家能源局「風力発電運転状況」（各年版）に基づいて筆者作成

地域で見ると、西北・北部地域で風力発電開発が集中したため、地域内での需給均衡調整が困難になった。表1に示したように、甘粛省、新疆ウイグル自治区、吉林省、黒龍江省、内モンゴル自治区の風力発電の出力抑制率が高率になったのはそのためである。

表1 中国西北地域各省の風力発電の出力抑制率 (%)

省・自治区	2013	2014	2015	2016	2017	2018
甘粛省	31.0	11.0	39.0	43.0	33.0	19.0
新疆ウイグル自治区	4.3	15.0	32.0	38.0	29.0	22.9
吉林省	15.7	15.0	32.0	30.0	21.0	6.8
黒龍江省	11.5	12.0	21.0	19.0	14.0	4.4
内モンゴル自治区	15.2	9.0	18.0	21.0	15.0	10.3

注：2014～2017年のデータは整数値しか得られない。

出所：中国国家能源局「風力発電運転状況」（各年版）に基づいて筆者作成

欧州委員会が行った再生可能エネルギー政策評価（Ragwitz et al. (2007)）は、未熟な促進制度は再生可能エネルギー発電の普及にとって大きな潜在的なリスクだと指摘し、制度全体の安定性や信頼性がより重視すべきだと結論付けた。実際に欧州では固定価格買取制度の導入により、経済活動が低調で地価と人口密度が低い辺境部に風力発電事業が集中し、消費者に余計な費用負担を強いると欧州電事連などが再三批判をした（戒能（2008））。

大規模再生可能エネルギー発電所の電力供給にかかる総費用は発電費用と送電費用の2種類に分けられる（戒能（2009））。発電費用は発電所の建設費用と運転費用であるが、大きな地域差があるのは発電所建設用地の土地収用費用である。発電所の立地が都心から遠くなると土地取得の費用は低下する。一方で、発電所の立地が都心から遠くなると送電距離が長くなり送電

費用がかかる。したがって、総費用が最小になる最適立地点となる都心からの距離が存在する。しかし、発電事業と送電事業が異なるとすれば、発電事業者は発電費用のみを考慮し送電費用を考慮する必要がない。つまり、発電事業者は消費地域での電力供給の総費用とは関係なく地価が安い都心から遠い場所で発電所を建設するようになるのである。

中国では2002年に発電事業と送電事業が分離された。2009年に導入された風力発電の固定価格買取制度は、送電会社に風力発電による電力の買取を義務付けた。そして、送電費用は送電会社に負担させ、その費用を売電利益で回収させるという仕組みであった。発電事業者が地価が安く、風況がよい遠隔地に風力発電所を大量に建設する一方、中国の電気料金は政府による規制料金であるため、送電コストの変化を電力料金に十分反映できない。したがって、送電事業者は再生可能エネルギー発電を買取ると事業が成り立たないという事態が発生した。このように、費用負担主体の違いによって、風力発電所が遠隔地に建設されたということが、風力発電の出力抑制の一因である。

ところで、かつての中国の送電網は表1に示すような地域電網レベルで運営され、電力需給はその地域電網の域内で調整されていた。そのため、地域間の電力融通はあまりなく、高圧送電線は、300km未滿程度の短いものが中心であった。しかし、上述のように風力発電所は風力資源が豊富な西部と北部地域に集中したため、地域内での電力需給調整が困難になった。その結果、西北部と北部地域の風力発電は出力を抑制するという事になった。

出力抑制問題の解決には、西北部と北部地域の風力発電電力を電力需要が多い東部沿海地域へ送電することがもっとも有効である。しかし、この場合、送電距離は500kmを超えるため、従来型の送電方式では送電費用が高くなり、より高圧で送電しなければ送電事業の利益が確保できない。そのため、中国政府は超高圧の長距離送電線を整備して、西北部と北部地域の風力発電電力を東部地域に送る計画を実施した。

以上のことを踏まえて、本研究では、電圧の異なる送電線を用いることによって、風力発電の最適立地点がどのように変化するかを考えた。結論を述べるとすると、超高圧での送電網の建設によって、西部と北部地域の風力発電電力の都市部での供給価格が相当程度下がることがわかった。言い換えれば西北部と北部地域の風力発電電力の収益性が改善したことになる。

2. 中国の電力供給システム

2002年に中国政府は発電と送電を分離するという電力供給システムの改革を行った。この発電の分離が、西北部地域の北部地域の風力発電の出力抑制の一因であることはすでに述べたとおりである。

表2 中国の地域電網の区分と対象地域

地域電網	対象地域
東北電網	黒龍江省, 吉林省, 遼寧省, 内モンゴル自治区東部地域
華北電網	北京市, 天津市, 山東省, 河北省, 山西省
西北電網	陝西省, 寧夏自治区, 甘肅省, 青海省, 新疆自治区, チベット自治区
内モンゴル電網	内モンゴル自治区西部地域
華東電網	上海市, 江蘇省, 浙江省, 安徽省, 福建省
華中電網	重慶市, 江西省, 河南省, 湖北省, 湖南省, 四川省
南方電網	広東省, 広西自治区, 海南省, 貴州省, 雲南省

出所：国家電網会社の地域区分に基づいて筆者作成

中国の送電網の地域区分は表2に示すように、大きく東北、華北、西北、内モンゴル、華東、華中、南方の6つの地域に分けられており、電力需給は当該域内で調整されていた。前述のように、西北・北部地域で風力発電開発が集中したため、地域内での需給均衡調整が困難になった。

これらの地域の出力抑制を解決するために、中国政府は内モンゴル電網や西北電網、東北電網の風力発電を電力需要が多い東部沿海地域に送電する計画を立てた。しかし、東部地域への送電距離は500kmを超えるため、超高圧送電線路が必要となる。超高圧送電では電流を圧縮でき長距離を送電しても電力損失を抑制できる。逆に言うと、通常高圧の220kV送電線で500kmを超える長距離で送電すれば、電力損失が大きくなり送電コストは非常に高くなる。

既存の高圧送電線と新たな超高圧送電線を利用して、風力発電電力を送電する際の最適立地がどのように変化するかを検討するために、本研究は、220kVと750kVの2つの送電線を比較の対象とした。

3. 発電所の立地費用最小化モデル

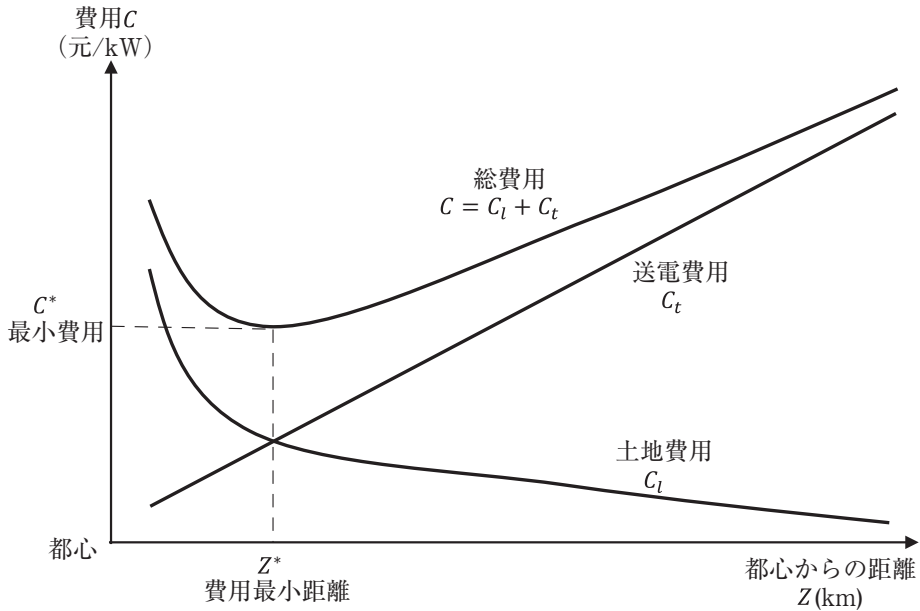
3.1 戒能モデル

本研究では再生可能エネルギー発電所の立地費用最小化モデルを用いる(戒能(2009))。図2は戒能モデルを図示したものである。

風力発電では、風力のエネルギー密度が非常に低いことに加えて、風車間の間隔をあける必要があるなどの技術的制約があるため、同じ設備容量の火力発電所と比較すると、必要な用地面積が圧倒的に大きい。そのため、風力発電の立地を決定するには、風況に加えて、用地の地価が決定的に重要である。

本研究では、北京市中心とする首都圏(京津地域)が電力の需要地であると想定した。首都圏は、長江デルタ、珠江デルタ地域と並んで、中国で最も人口と産業の集積が進んでいる地域である。

図2 立地費用最小化モデルの図解



出所：戒能(2009)に基づいて筆者作成

発電所の総費用は、発電所建設の土地の取用のための費用（土地費用）、発電機の本体費用と設置費用、および送電設備の費用（送電費用）から構成される。ただし、このうち発電機の本体および設置費用は発電所の立地には依存しないと考えられるので、本節の発電所の立地モデルでは考慮すべき費用から除外する。

一般的に都心部（電力の需要地）からの距離（ Z ）が遠くなると、土地利用の競合が減少するため地価が安くなるので、土地費用（ C_l ）は右下がりになる。もっとも、その傾きは当初は急であるが距離が遠くなると徐々に緩やかになると考えられる。次に送電費用（ C_t ）は、送電線の延長距離の増加とともに比例的に増加すると考えられる。したがって、送電費用（ C_t ）は定数項のある直線であると想定される。そのため、発電所建設の総費用（ $C = C_t + C_l$ ）は図3に示すようなU字型になり、最小費用（ C^* ）を実現する都心からの距離（ Z^* ）が存在する。

3.2 土地費用の推計

土地費用は、土地面積と地価の積であらわされるが、地価は上述のように都心からの距離に依存すると考えられる。地価は、やや古いデータではあるが、中国土地市場網（2010）から首都圏周辺の工業用地のデータ210件を使用した。ただこのデータには工業団地も含まれている。工業団地は道路や電力のインフラが整備されているので周辺地域に比べて地価が高い。そのため発電所建設の対象とはならない。そこで本研究では、工業団地を標本から除外して、残りの154件のデータを用いて地価と距離の関係を推計した。推計結果を（1）式に示す、ただし、 P

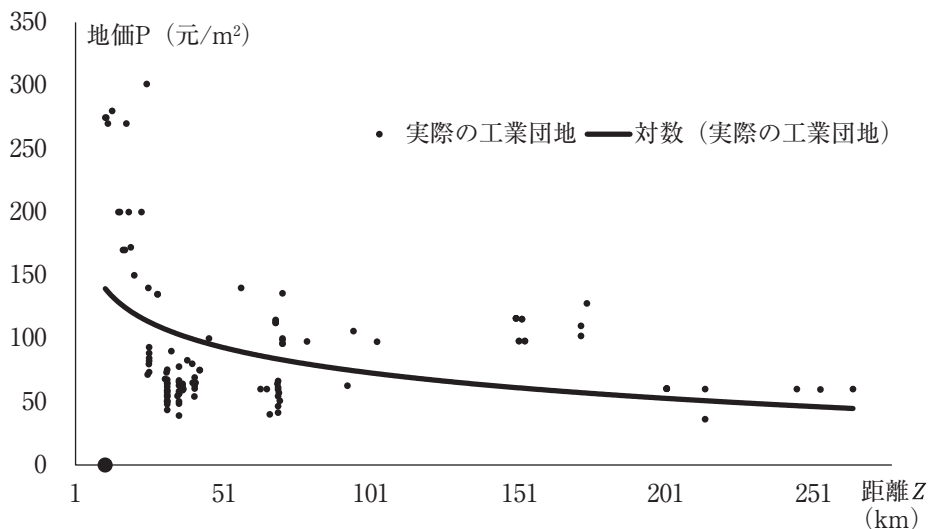
はの地価（1平方メートルあたり人民元）である、 Z は土地の都心からの距離である。

$$\ln P = \underset{(26.23)}{5.1644} - \underset{(-3.91)}{0.1941} \ln Z \quad (1)$$

距離の係数は有意水準95%で有意であった。自由度修正済みの決定計数も0.801であり、まずまずの推定式を得ることができた。この推計によると、土地の都心からの距離が1キロメートル遠ざかると、その地価は約0.19%低下すると推定された。土地費用を式であらすと次のようになる。ただし、 A は発電所に必要は土地の面積（定数）であり、本研究では戒能（2009）を参考にして、 $49.6\text{m}^2/\text{kW}$ とした。

$$C_t = P(Z) \cdot 49.6 = \exp(5.1644 - 0.1941 \cdot \ln Z) \cdot 49.6 \quad (2)$$

図3 首都圏工業用地の地価と都心からの距離



出所：中国土地市場網(2010)の地価データに基づいて筆者推計

3.3 送電費用の推計

送電費用 (C_t) は送電設備・建設・維持費用 (C_{tn}) と変電設備・建設・維持費用 (C_{ts}) によって構成される。前者は送電距離（都心からの距離 Z ）増加と比例して増加すると想定し、後者は定額であると想定した。モデルで用いたパラメータを表3に示す。

表3 送電費用のパラメータ設定

費用	送電線の電圧	220kV	750kV
送電設備・建設・維持費用 (人民元 /kW/km)		5.7	1.1
変電設備・建設・維持費用 (人民元 /kW)		135.3	149.7

出所：国家電力公司(2001)と国家電網公司人力资源部(2008)をもとに筆者推計

送電費用を式で表すと、送電線が220kVの場合は、次のようになり、

$$C_t = 135.3 + 5.7 Z \quad (2a)$$

送電線が750kVの場合は次のようになる。

$$C_t = 149.7 + 1.1 Z \quad (2b)$$

したがって、発電所の費用が最小となる立地（都心からの距離）を求めるためには、次の最小化問題を解くことになる。

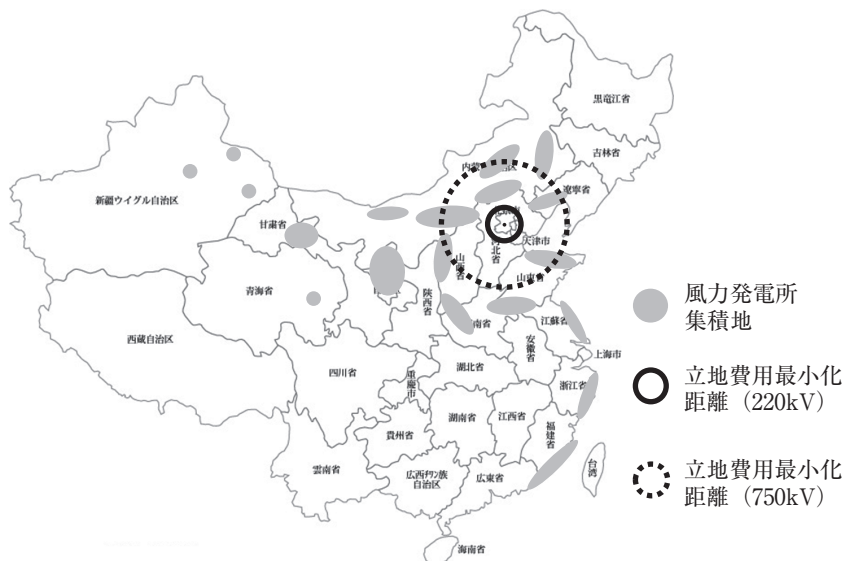
$$\text{Min}_{0 \leq Z} C(Z) = \text{Min}_{0 \leq Z} (C_l(Z) + C_t(Z)) \quad (3)$$

4. 推計結果

送電線が220kVの場合は、大規模風力発電所の立地費用が最小になるのは都心から118kmの地点であった。図4に風力発電所の集積地と最適立地地域を示した。図に示されるように、この地域の風力発電所のほとんどが最適立地地域からより遠くに離れている。中国の制度では、風力発電事業者は送電費用を負担しないため、その関心事は風況と地価のみとなる。そのため、風力発電所は都心から離れた場所に建設されることになった。次に、送電線が750kVの場合の、費用最小立地を推計した。750kV送電の送電費用は、220kV送電に比べて20%程度になるので、送電費用を表した図2の直線の傾きはかなり緩やかにある。ただし、地価は2010年のものを使っているため、図2の土地費用の曲線は不変である。したがって、750kV送電の費用最小点は、220kV送電に比べて首都圏から遠くに離れることになる。

750kV送電線を用いた場合、総発電費用が最小となる距離は471kmの地点となった（図4）。750kV送電線路を利用すれば、内モンゴル電網、東北電網、西北電網の風力発電開発における費用面の足枷がなくなり、首都圏への送電事業の経済性を確保できる。

図4 送電における風力発電の最適立地と現状



出所：風力発電所の場所は人民網(2021)に。最小費用距離は筆者の計算結果に基づいて作成

5. 長距離送電線路の整備状況と課題

中国では、送電能力不足を解消するために、長距離送電のための超高压送電線路を急ピッチで建設している。中国電力企業連合会¹⁾によると、2010年に中国の750kV以上の送電線路の総距離は約10,657kmだが、2020年には66,682kmと6倍になった。一方、750kV以下の送電線路の総距離は、1.5倍程度にしか増えておらず、相対的に超高压の送電線に置き換わっている。それで、2016年以降、風力発電の出力抑制が改善されつつある。

超高压送電線によって、長距離送電の経済性が確保される傾向にあるが、その一方で、超高压送電線の運用には課題も存在する。まず、超高压送電線の送電容量が大きいいため安定的に送電するためには大量の電力が必要である。一方で再生可能エネルギー電力は1つの発電所の出力が大きくなり、天候依存であるため出力が安定しない。そこで、超高压送電線を運用する際には、いくつかの再生可能エネルギー発電所の電力をまとめて大容量にし、さらに火力や水力などの調整電源²⁾を加えて送電することで安定性を確保している。

2014年に、風力発電と火力発電を統合して送電する「哈密南-鄭州」送電線の運営が開始された。その後建設された超高压線路の多くは火力や水力などの調整電源を併設しているが、調整電源の運用ルールや調整費用の負担方法など未解決の問題もある。2020～25年の第14次五か

1) 中国電力企業連合会「2011電力基本統計データ一覧表」と「2020電力基本統計データ一覧表」

2) 負荷変動や発電所の予期せぬトラブル等に起因する電力需給のインバランスを調整し、需給バランスを維持するために必要な電源のこと

年計画では、再生可能エネルギー発電を水力と火力発電とセットで開発する計画が盛り込まれた。これは超高压送電網を安定的に運用するためには必要な措置である。

6. まとめ

本研究では、大規模風力発電所の立地の費用最小化モデルを紹介した。そして、そのモデルを用いて、中国の首都圏（京津地域）を例にとって、送電の電圧の高圧化（電力産業での技術進歩と解釈できる）による風力発電の最適立地の変化について検討した。

発電事業と送電事業を分離している中国では、風力発電促進政策により発電事業者は発電所を建設するものの、送電費用を負担しないため、発電所の立地は土地収用費用の低い辺境部分に偏ることになる。しかし、電力需要の多い都市部に送電している事業者にとっては、送電線が長く伸びると費用の増大になる。他方送配電事業者は、再生可能エネルギー発電電力の購入を義務付けられているが、電力供給価格を規制されているので、送電費用の増大をそのまま供給価格に乗せるわけにはいかない。そこで、送配電事業者は、再生可能エネルギー発電電力の系統連結を拒否するという事態になったのである。そのままの状態を放置すれば、再生可能エネルギー発電の普及のブレーキをかける恐れがあった。

中国の西北部および北部に建設された風力発電電力は、電力需要の大きい東部沿海地域へ送電するのが有効な解決策だが、既存の220kV送電線での送電ではコストが高すぎる。そこで、本研究では、超高压の750kVで送電した場合の経済性を検討した。その結果、費用が最小になる地点が首都圏から遠くなり（約120kmから約500kmに拡大し）、内モンゴルや東北地方からの首都圏への送電も経済性が確保されることがわかった。

2020年現在、中国の750kV以上の超高压送電線路の総距離は2010年と比べて約6倍になった。超高压での送電網の整備によって、西北地域の風力発電電力の出力抑制問題は緩和されつつある。ただし、風力発電電力の利用は別の問題を引き起こすことも忘れてはならない。風力発電は天候などに左右される不安定な電源である。そのため、風力発電を超高压で送電するために、火力や水力発電による調整電源の整備が必要となる。中国政府は、再生可能エネルギーのさらなる普及のためには、安定的に再生可能エネルギー電力を超高压で送電できる電力供給システムを構築しなければならない。

参考文献

- 戒能一成（2008）「欧州共通エネルギー政策の実情と問題点」, 『RIETI Policy Discussion Paper Series 08-J-001』
戒能一成（2009）「再生可能電力の送配電・蓄電費用措置制度に関する経済的考察」, 『RIETI Discussion Paper Series 09-J-001』
人民網（2021）「我国风电机组分布概覽（わが国風力発電設備の分布概要）」 <<https://baijiahao.baidu.com/s?id=1706083211378947959&wfr=spider&for=pc>>（最終閲覧：2022/10/31）

- 中国電力企業連合会「電力統計基本データ一覧表（電力基本統計データ一覧表）」（各年版）
- 中国電力企業連合会（2020）『中国電力行业年底发展报告2020（中国電力業界年度發展報告2020）』，中国建材工業出版社
- 中国電力中国電力監視管理委員会（2011）「风能光伏发电情况监管报告2011（風力と太陽光発電状況管理報告2011）」
- 中国国家電力公司（2001）「国家电力公司跨区电网运行维护费用测算暂行办法（国家電網公司地域間電網運轉保守費用の算定方法）」
- 中国国家電網公司人力資源部（2008）『国家电网公司供电企业劳动定员基准（国家電網公司電力供給労働者定員基準）』，中国国家電網公司
- 中国国家電網公司人力資源部「组织机构（組織と機構構成）」<http://www.sgcc.com.cn/html/sgcc_main/col2017012538/column_2017012538_1.shtml?childColumnId=2017012538>（最終閲覧：2022/10/31）
- 中国国家發展改革委員会（2009）「关于完善风力发电上网电价政策的通知（風力発電買取価格に関する通知）」
- 中国国家能源局「风力发电并网运行情况（風力発電運轉狀況）」（各年版）
- 中国土地市場網（2011）「2010年北京市土地出让公告（2010年北京市土地販売情報）」
- Ragwitz M, Held A, Resch G., Faber T., Haas R., Huber C., Coenraads R., Voogt M., Reece G., Morthorst E. P., Jensen G. S., Konstantinavičiute I., and Heyder B. (2007), "OPTRES: Assessment and optimization of renewable support schemes in the European electricity market, final report ", European Commission <https://energy.ec.europa.eu/assessment-and-optimisation-renewable-energy-support-schemes-european-electricity-market-optres-0_en>（最終閲覧：2022/10/31）