

# 激励可再生能源消纳的特高压输电电价形成方法

陶宇轩 胥威汀 李婷 叶希 沈力 朱觅 刘莹  
(国网四川省电力公司经济技术研究院 四川成都 610041)

**摘要:** 中国特高压技术世界领先,其工程建设及运行安全高效,以特高压电网为骨干网架的大范围能源优化配置平台已逐步形成。为有效利用该平台实现可再生能源的高比例消纳,尚需要进一步构建并完善基于特高压的跨区域省间交易市场,其中特高压输电电价形成机制是关键点之一。提出了激励可再生能源消纳的特高压输电电价形成方法。首先对可再生能源的消纳目标进行了解析;然后基于其规模及布局,开展模拟交易;在完全消纳可再生能源的基础上,用交易价差倒逼形成了特高压输电电价;最后通过计算该电价与成本定价的差额,得到了输电电价补贴水平。案例分析证明了所提方法的有效性。所提方法充分考虑了可再生能源的跨区交易问题,对基于特高压的跨区交易市场构建有一定参考价值。

**关键词:** 特高压; 可再生能源; 跨区交易; 输电电价

**Abstract:** China has a world-leading level in UHV technology, especially in construction and safe operation. An optimal energy configuration platform in a wide range based on UHV network has been formed gradually. In order to achieve a high portion of renewable energy to the overall electricity consumption by utilizing this platform effectively, the cross-area electricity trading market based on UHV network still requires a constant improvement, in which the key point is UHV transmission price forming mechanism. An UHV transmission price forming mechanism is suggested to stimulate the renewable energy consumption. Firstly, the consumption target of renewable energy is analyzed. Secondly, the trading simulation is carried out based on the scale and distribution of renewable energy, and then the UHV transmission price is forced through the price difference. Finally, the transmission price subsidy is obtained by calculating the gap between this price and cost pricing. A case analysis proves the effectiveness of this mechanism. As the cross-area trading of renewable energy has been given adequate considerations in the proposed method, it has a certain reference value for the construction of UHV cross-area trading market.

**Key words:** UHV; renewable energy; cross-area trading; transmission price

中图分类号: TM73 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2017)01-0019-04

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2017.01.004

## 0 引言

目前国家电网公司已建成“三交四直”七项特高压工程,并将淮南—上海“北半环”等“四交四直”特高压工程纳入国家《大气污染防治行动计划》特高压迈入高速发展期。

随着新一轮电力体制改革的推进,可再生能源基于特高压电网实现跨区输送及消纳是必然的趋势。据国能综监管[2016]637号文件《跨区域省间可再生能源增量现货交易规则(征求意见稿)》(下称《规则》),为有效促进可再生能源消纳,缓解弃水、弃风、弃光问题,规范开展跨区域省间可再生能源增量现货交易,可再生能源将基于特高压电网实现跨区交易。因此,可再生能源跨区交易的输电

电价问题将成为特高压发展的关键问题之一。

从目前中国特高压电网已批复的输配电价来看,大多采用两部制电价法,部分采用单一制电价法<sup>[1]</sup>。文献[2-3]分析了中国输配电价形成及存在的问题,评述了国内外输配电价定制的主要方法。文献[4]围绕中国跨区跨省输电工程电价政策、定价方法等内容开展综合分析,并针对特高压输电工程提出输电价格制定需考虑的因素。然而目前特高压跨区输电电价形成机制并没有考虑对可再生能源发展的激励。电改“9号文件”明确表示,电力体制改革的重要任务之一,是解决可再生能源全额保障性收购的问题。在新一轮电力体制改革背景和中国大力发展可再生能源的目标下,需从多方面综合考虑特高压跨区输电定价方法。

首先提出解析可再生能源消纳目标的方法,并

通过模拟可再生能源的跨区省间交易,提出了激励实现可再生能源消纳目标的特高压输电电价形成方法,力求在基于特高压跨区电力市场交易模式下,有效激励可再生能源的消纳,促进可再生能源发展。

## 1 基于成本的特高压跨区输电电价

目前特高压电网的两部制输电价由容量电价和电量电价两部分组成<sup>[3]</sup>。其中,容量电价为输电业务所形成的固定成本部分,按照预计的输电工程利用比例进行分摊,容量电价一般与使用量无关,仅用于回收大部分固定成本;电量电价为输电业务所形成的可变成本部分,与实际输电量相关,用于回收全部可变成本和部分固定成本。

特高压跨区送电的计算模型如式(1)~式(3)所示。

$$P_{n1,l}^c = [C_l \times \frac{i_0(1+i_0)^{N_l}}{(1+i_0)^{N_l}-1}] \times \frac{\eta_{n1,l}}{L_l^c} \quad (1)$$

$$P_{n2,l}^c = [C_l \times \frac{i_0(1+i_0)^{N_l}}{(1+i_0)^{N_l}-1}] \times \frac{\eta_{n2,l}}{L_l^c} \quad (2)$$

$$P_l^q = \frac{Q_l}{\sum Q_l^q} \quad (3)$$

式中: $P_{n1,l}^c$ 和 $P_{n2,l}^c$ 分别为特高压输变电工程 $l$ 分摊到送端电网 $n_1$ 和受端电网 $n_2$ 的容量电价,单位为元/ $\text{kW} \cdot \text{a}$ ;  $P_l^q$ 为特高压输变电工程的电量电价,单位为元/ $\text{kW} \cdot \text{h}$ ;  $C_l$ 为特高压输变电工程 $l$ 的总投资;  $i_0$ 为基准折现率;  $N_l$ 为经营年限;  $\eta_l$ 为特高压总费用分摊到送受端电网比例;  $L_l^c$ 为特高压 $l$ 的输送容量;  $Q_l$ 为特高压每年的运行费用;  $\sum Q_l^q$ 为电网的年输送电量。

特高压输电的容量费用由联网双方支付,电量费用由受端支付。特高压工程的费用将分摊到发电商和用户的输配电价中。

然而,基于成本的定价方法并没有考虑对可再生能源消纳的激励。若能控制跨区输电电价水平,同时补贴与成本定价的差额,既能刺激可再生能源的消纳,又能保障电网企业的利益,相对于直接补偿可再生能源,更能体现可再生能源的商品属性<sup>[5]</sup>,更有利于电力市场可持续发展。

## 2 激励可再生能源消纳的特高压输电电价

### 2.1 可再生能源规划目标解析方法

为了清洁和可持续发展,有必要切实达成可再生能源的建设和消纳目标,而目标的实现则需要对其进行分解,包括规模和布局。例如,要达成2020年全国非化石能源占一次能源消费比例达15%的目标<sup>[6]</sup>,需控制一次能源消费总量在52亿吨标煤。同时,其中的6.5亿吨标煤需要转换为2.1万亿千瓦时电能<sup>[7]</sup>,并且把有待消纳的各类型电源和分区目标进行分解,如图1所示。

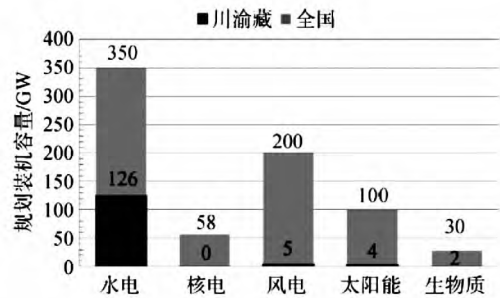


图1 可再生能源发展目标分解示意图

为合理地分解以上可再生能源消纳需求,制定的可再生能源规划方案需要满足以下边界条件:

#### 1) 满足用电需求

电力规划方案需要满足全国和各地区(省或直辖市)的用电需求。综合考虑经济、社会、电气化水平等因素,结合各地区经济发展和负荷增长情况,分别预测得出各地区的用电需求。

#### 2) 不超过资源潜力

可再生能源具有显著的区域分布特性,其开发规模很大程度上受到资源条件的限制。其中,水电主要集中在西南地区;风电主要集中在三北地区;太阳能发电主要集中在西部地区;核电主要集中在沿海地区等;因此,可再生能源位于某个地区装机规模不得超过其技术可开发量。

#### 3) 不低于开发利用现状

规划方案基于可再生能源的开发利用现状。由于可再生能源具有循环可再生性质,因此仅考虑发电设备的更新,不考虑机组的退出。

#### 4) 符合政策的引导和约束

对于各类可再生能源发电,国家相关机构公布了发展政策或开发规划。结合现状、趋势和目标三方面,可以分析得到各类可再生能源的开发目标区间。

#### 5) 考虑各地区环境容量

用电需求中,可再生能源不足以承担的部分将由化石能源弥补。因此需要计算燃煤发电厂的污染物排放、CO<sub>2</sub>排放规模及布局,保证各地区化石能源开发不得超过环境容量。根据国务院2013年《大气污染防治行动计划》,京津冀、长三角、珠三角等区域,除热电联产外,禁止审批新建燃煤发电项目。

在以上边界条件的约束下,以全社会电力供应总成本最低为优化目标,以各类能源发电区域布局为变量,展开优化计算。构建目标函数如下<sup>[8]</sup>:

$$\min \sum_{z \in Z} \sum_{i=1}^R [ \sum_{t \in Type} (C_{old\ i\ j\ z} - C_{out\ i\ j\ z} + C_{new\ i\ j\ z}) \cdot H_{i\ j\ z} \cdot P_{i\ j\ z} \cdot (1+\gamma)^{-y_i} + \sum_{k \in T_{i\ z}} C_{k\ i\ z} \cdot H_{k\ i\ z} \cdot P_{k\ i\ z} \cdot (1+\gamma)^{-y_i} + \Phi_{i\ z} \cdot (1+\gamma)^{-y_i} ] \quad (4)$$

式中:Type表示电源类型,如水电、核电、风电等可再生能源发电等;Z表示研究的区域,如风电基地、受电地区;R表示规划周期总数;C<sub>old</sub>为实际投产的电源装机容量;C<sub>out</sub>为退役的电源总装机;C<sub>new</sub>为已规划但在规划期初尚未实际投产电源总装机;H为利用小时数;γ为折现率;y<sub>i</sub>表示第i个周期的第一年与规划期初之间的时间距离;T表示与区外互联线路的集合;C为规划年上的最大传输容量;P为上网电价(送出端)或落地电价(接受端);Φ表示系统不供电量损失。

优化方案生成后,通过电力电量平衡计算,对方案进行调峰调频校核,计算弃水、弃风、弃光量。若无法满足各地区弃水、弃风、弃光要求,重新调整各类能源布局,直到通过校核,输出结果。输出方案包括各类可再生能源装机的总规模和布局。

## 2.2 特高压输电电价倒逼方法

为了实现以上可再生能源消纳目标,需要保证可再生能源在受端市场的竞争力。除了政府的可再生能源专项补贴外,还可以通过控制输电电价来激励可再生能源的消纳。

按照《规则》跨区交易模式采用集中撮合交易<sup>[9]</sup>,最后一笔达成交易的购售报价平均值为统一出清电价。其中,出清电价高低决定了可再生能源的消纳规模。出清电价越高,可再生能源发电商的报价空间就越大,就能够使更多的可再生能源参与到交易中来并消纳可再生能源。系统的出清电价P<sub>c</sub>如式(5)所示。

$$P_c = \frac{(P_L - P_T) + P_S}{2}$$

$$st. P_L - P_T \geq P_S \quad (5)$$

式中:P<sub>L</sub>和P<sub>S</sub>分别为达成最后一笔交易的买方和卖方的报价;P<sub>T</sub>为输电电价。可见,如果买卖双方都按照边际成本电价来申报的话,输电电价P<sub>T</sub>的高低决定了入围交易的P<sub>S</sub>,即可再生能源发电商的报价。因此,可根据需要消纳的可再生能源规模及其边际电价倒算特高压输电电价P<sub>T</sub>。

可参与跨区消纳的可再生能源规模由最后一笔交易决定,交易的出清结果通过模拟交易生成。按照《规则》中所采用的撮合交易机制,以“高低匹配”为原则,首先撮合优先级最高的买家和卖家的交易,然后撮合优先级次高的市场成员的交易,以此类推,构成的全局最优的交易方案计算方法如式(6)所示。

$$E = \max \sum_{j=1}^n \int_0^{d_j} r_j(d_j) dd_j - \sum_{i=1}^m \int_0^{s_i} \pi_i(s_i) ds_i - \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \int_0^{Q_{ij}} c_{ij}(Q_{ij}) dQ_{ij}$$

$$s. t. \quad 0 \leq s_i \leq \bar{s}_i, \forall i$$

$$0 \leq d_j \leq \bar{d}_j, \forall j$$

$$\sum_{i=1}^m s_i = \sum_{j=1}^n d_j$$

$$s_i = \sum_{j=1}^n Q_{ij}, \forall i$$

$$d_j = \sum_{i=1}^m Q_{ij}, \forall j$$

$$Q_{ij} \geq 0, \forall i, j \quad (6)$$

式中:r和d分别为用户的出价及其交易电量需求;π为可再生能源发电厂商的出价;s为可再生能源的消纳需求,即代表了规划的可再生能源的规模及其布局,以电量计;c为边际传输耗费Q的累加值,即为可再生能源消纳目标总量。

式(6)为交易中心求利润极大的优化模型<sup>[10]</sup>,目标是使得社会总福利E最大化。求解该模型即可得到全局最优下的用户和可再生能源发电商的交易方案。其中,最后一笔交易的r和π的差值即为满足可再生能源消纳目标的特高压输电电价P<sub>T</sub>。

## 2.3 可再生能源消纳的输电电价响应分析

激励形式下的特高压输电电价一方面容纳了市场中更大量级的可再生能源,另一方面还会因为与成本电价形成了差额,进而刺激受端的用电行为,从而进一步扩大可再生能源消纳的体量。

利用弹性系数法可以获取特高压受端用电规模(包括电力和电量)对电价变化的响应模式<sup>[11]</sup>。其

采用的电价响应模型如下:

$$\begin{cases} \varepsilon_{Q,k} = \frac{\partial Q_k/Q_k}{\partial P_k/P_k} \\ \varepsilon_{L,k} = \frac{\partial L_k/L_k}{\partial P_k/P_k} \end{cases} \quad (12)$$

式中:  $Q$ 、 $L$  和  $P$  分别为目标地区的电量、电力和电价;弹性系数  $\varepsilon_{Q,k}$  表示节点  $k$  的电量对预测电价响应;弹性系数  $\varepsilon_{L,k}$  表示节点  $k$  的电力对预测电价的响应。弹性系数  $\varepsilon$  本身可以通过对历年电价调整前后的数据进行统计分析来获取。

### 3 案例分析

以国内某供需呈逆向分布的地区电力市场试点为例,模拟全国基于特高压的跨区省间可再生能源交易,并利用所提的方法,获取输电电价,并对结果作比较分析。计算水平年为2020年。

按照2020年全国非化石能源“15%目标”,分解至该地区的水电、风电及太阳能发电总量约92 000 MW。按《规定》的增量可再生能源计,参与区内交易并消纳的可再生能源电力电量需求分别为10 530 MW和 $6.25 \times 10^{10}$  kW·h。

为了分解可再生能源规划目标,运用2.1节方法解析得到各子区域的水电、风电、太阳能发电装机规模,如表1所示。

表1 规划可再生能源规模及分布

序号	地区缩写	可再生能源装机/MW	可再生能源年发电量/ $10^8$ kW·h
1	AB	1 310	78
2	GZ	3 090	183
3	XC	1 970	117
4	YA	1 810	107
5	LS	1 350	80
6	CD	190	11
7	CXB	240	14
8	CDB	580	34

利用电价预测方法<sup>[12]</sup>得到各地区的节点边际电价作为交易报价,运用2.2节方法开展模拟交易;以上地区的可再生能源发电商与系统中的所有用户(以下网节点为例)开展集中撮合交易,直到所有可再生能源都被消纳,得到交易方案及出清电价0.49元/kW·h,结果如表2所示。

表2 可再生能源完全消纳的交易方案

序号	地区缩写	交易报价 (元/kW·h)	买方报价 (元/kW·h)	成交价差 (元/kW·h)
1	AB	0.38	0.59	0.21
2	GZ	0.41	0.57	0.16
3	XC	0.38	0.63	0.25
4	YA	0.37	0.66	0.29
5	LS	0.36	0.68	0.32
6	CD	0.35	0.71	0.36
7	CXB	0.38	0.62	0.24
8	CDB	0.39	0.57	0.18

由于表2中GZ地区可再生能源发电报价较高,若要全部消纳,按照“高地匹配”原则,它将作为最后一笔交易,与报价较低(0.57元/kW·h)的用户达成交易,它们的价差为0.16元/kW·h。该值即为满足可再生能源消纳的输电电价。

另据第1节基于成本的输电电价计算方法,可计算得到基于成本的输电电价约为0.2元/kW·h。这表明执行可再生能源完全消纳的输电电价,需有0.04元/kW·h的专项补贴来保障输变电工程的成本回收。

算例中的输电电价偏高,是因为包含了各电压等级输电成本,若运用到跨区省间交易,需要扣除特高压以下电压等级的输电成本,或以特高压工程上、下网端的产权点来计价。

### 4 结 语

在跨区域省间可再生能源交易的背景下,为有效促进可再生能源消纳,有必要提高可再生能源在受端市场的竞争力。激励可再生能源消纳的特高压输电电价是有效的途径之一。

所提方法重点提出了激励可再生能源的特高压输电电价计算方法。该方法首先对可再生能源的消纳目标进行解析;然后基于其规模及布局,开展模拟交易;在完全消纳可再生能源的基础上,用交易价差倒逼得到特高压输电电价;同时,提供了因输电电价调节而进一步释放的用电需求计算方法;最后,计算该电价与成本定价的差额,得到输电电价补贴水平。案例分析证明了该方法的有效性。

(下转第94页)

2) 单极大地回线运行方式下发生接地极引线断线或断线接地短路故障,因其是永久性故障,建议将动作策略由“告警”改为“极闭锁”。在双极大地回线运行方式下发生断线或断线接地短路故障,建议将动作策略由“告警”改为“平衡双极电流”。

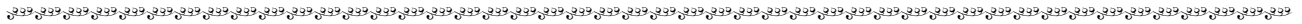
3) 单极大地回线运行方式下发生接地极引线接地故障,建议将动作策略由“告警”改为“极重启,重启不成功极闭锁”。双极大地回线运行方式下发生接地故障,建议将动作策略由“告警”改为“平衡双极电流”。

4) 针对单极大地回线运行方式下,在接地极过负荷保护中,建议减小启动功率回降的时间。

5) 建议加大接地极线路设计裕度,在一侧引线出现接地故障后,另一侧引线应能完全满足系统大负荷运行要求。

参考文献

[1] 赵晓君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京: 中国电



(上接第22页)

所提方法力求为基于特高压的跨区交易市场建设提供一定参考。下一步工作将进一步验证该方法的有效性,并加以完善。

参考文献

[1] 刘兴胜. 两部制电价方案研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2015.

[2] 张森林, 孙延明. 关于南方电网西电东送输电电价形成机制的思考[J]. 广东电力, 2014, 27(4): 7-12.

[3] 王绵斌, 谭忠富, 乞建勋, 等. 我国电力市场环境两部制输配电价传递模型[J]. 电网技术, 2008, 32(5): 77-83.

[4] 张文月, 张立岩. 入津特高压跨区跨省输电价定价方法分析[J]. 天津经济, 2016(3): 55-57.

[5] 庄莹华. 我国销售电价交叉补贴研究[J]. 华东电力, 2014, 42(9): 1940-1943.

[6] 国家能源局. 可再生能源发展“十二五”规划[R]. 北京: 国家能源局, 2012.

[7] 胥威汀, 唐权, 王云玲, 等. 电力规划执行偏差对非化石能源发展目标的影响[J]. 电力建设, 2015, 36(8): 61-65.

[8] 赵庆波, 张正陵, 白建华, 等. 基于特高压输电技术的

力出版社, 2014.

[2] 郭琦, 韩伟强. 高压直流接地极过压保护反事故措施的仿真研究[C]. 南方电网技术论坛, 2009.

[3] 余江, 周红阳, 黄佳胤, 等. 接地极线路不平衡保护的相关问题研究[J]. 南方电网技术, 2008, 2(3): 26-29.

[4] G20121130, 溪洛渡左岸-浙江金华±800 kV特高压直流输电工程直流控制保护系统[B].

[5] 于歆杰, 朱桂萍, 陆文娟. 电路原理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007.

[6] 王颖, 王玉东. 超高压线路纵联保护配置方案[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(22): 62-65.

作者简介:

刘俊杰(1989), 助理工程师, 研究方向为特高压直流输电;

李 琨(1985), 助理工程师, 研究方向为特高压直流输电;

陈沧杨(1988), 工程师, 研究方向为特高压直流输电控制保护。

(收稿日期: 2016-09-02)

电力规划理论创新及实践[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(16): 2523-2531.

[9] 刘福斌, 杨立兵, 吴敏. 基于灵活输电电价的跨地区电能撮合交易模型[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(15): 88-92.

[10] 李沛盈. 电力市场撮合交易模型的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2008.

[11] 姚珺玉, 刘俊勇, 刘友波, 等. 计及时滞指标综合灵敏度的用户电价响应模式划分方法[J]. 电网技术, 2010, 34(4): 30-36.

[12] E. Foruzan, S. D. Scott and J. Lin. A Comparative Study of Different Machine Learning Methods for Electricity Prices Forecasting of an Electricity Market [C]// North American Power Symposium (NAPS), Charlotte, NC, IEEE 2015: 1-6.

作者简介:

陶宇轩(1989), 工学硕士、工程师, 主要从事电网规划方面的工作和研究;

胥威汀(1985), 工学博士、工程师, 主要从事能源电力规划与电力市场方面的工作和研究;

李 婷(1979), 硕士、高级工程师, 主要从事电网规划、智能配电网方面的研究工作。

(收稿日期: 2016-11-07)