

风电功率外送输电容量规划的经济性研究

于志勇 宋新甫 张增强 辛超山 李海峰

(国网新疆电力有限公司经济技术研究院 新疆 乌鲁木齐 830000)

摘要: 随着风电规模的不断增加,受既有电网传输容量的限制,将导致大面积弃风,解决这一问题的有效途径是建设风电功率外送通道。因此,对于风电功率外送输电容量的规划是一项重要的研究课题。通过构建输电工程的经济效益评估模型,提出了基于风电功率分布特性与输电工程经济性的风电功率外送输电容量的规划方法。最后,以某区域实际电网系统为例,对所提出的方法进行验证,在减少输电工程投资成本的同时可以有效地增加输电工程的经济收益。

关键词: 风力发电; 经济效益; 风电外送; 输电容量

中图分类号: TM614 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2020)04-0056-05

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2020.04.013

Economic Research on Transmission Capacity Planning of Wind Power Delivery

Yu Zhiyong, Song Xinfu, Zhang Zengqiang, Xin Chaoshan, Li Haifeng

(State Grid Xinjiang Economic Research Institute, Urumqi 830000, Xinjiang, China)

Abstract: With the increasing scale of wind power, the transmission capacity limits of the existing power grid will result in a large area of wind curtailment, and the effective way to solve this problem is to build wind power delivery channel. So the transmission capacity planning of wind power delivery is an important research topic. Through constructing the economic evaluation model of transmission projects, the planning method for transmission capacity of wind power delivery is proposed based on wind power distribution characteristics and the economy of transmission projects. Finally, taking an actual power grid system for example, the proposed method is verified, which can reduce the investment cost of transmission projects and can effectively increase the economic benefits of transmission projects.

Key words: wind power generation; economic benefits; wind power delivery; transmission capacity

0 引言

由于煤炭、石油、天然气等矿物质燃料在利用过程中会排放出大量的 CO_2 、 SO_2 等影响环境的气体,加之矿物燃料的日益短缺,使得能源供应与经济发展的矛盾变得越来越突出^[1]。调整能源结构,提高能源效率,是一项亟需解决的问题。开发和利用可再生能源为解决能源短缺与环境问题开辟了新的途径,对改善能源结构、实现可持续发展具有重要的战略意义。中国已将“可再生能源低成本的规模化开发利用”列入《国家中长期科技发展规划》能源领域5个优先主题之一。风力发电是一种受风能驱动的电

源,风速的随机变化性与不确定性导致了风电的随机性与不可预测性。风电接入系统之前,电力系统通过可实时控制的发电追踪、可准确预测的负荷实现功率供需平衡,从而保障系统的安全稳定运行^[2-4]。风电接入电力系统后,风电功率的波动性和不可控性会不同程度地影响既有电网的功率平衡,影响电力系统的安全运行。当接入的风电规模较小时,风电功率的波动性对电网的影响较小,容易治理。随着风电规模的增加,风电与电网之间的矛盾越来越突出,导致弃风较为严重。风电与电网之间的矛盾严重地影响了风电的大规模开发。如何协调风电与电网之间的矛盾,提高风电的并网规模是一项亟需解决的问题^[5-8]。

针对中国风电并网规模受限,弃风现象严重这一问题,结合中国风电“大规模集中开发,远距离输

送”发展模式,确定建设风电功率外送通道,实现风电的跨区域消纳是缓解风电并网规模受限、提高风电利用率的有效途径。下面建立了综合考虑输电效益、弃风损耗以及输电成本的输电工程经济效益评估模型,在此基础上,结合风电功率的分布特征,提出了一种以输电工程经济效益最优的风电功率外送输电容量的规划方法,结合某省实际电网系统与实测风电功率数据对所提出的方法进行验证^[9-10]。

1 常规电源的外送输电容量规划方法

风力发电是受风能的驱动而发电,导致风力发电的不可控性,与常规机组不同,其出力完全可以根据负荷的变化加以调控。以装机容量为 $C_{install}$ 的火电厂为例,在负荷较高的情况下,调度人员可以根据需要使火电厂以额定装机容量运行,并且火电厂工作人员也完全有能力控制火电厂以额定装机容量运行。对于风电场而言,当负荷较高时,调度部门期望风电场能够以额定装机容量运行以满足负荷的需要;然而,风电场工作人员因为无法控制风速而不能满足调度部门的需要。因此,决定了风电与常规电源的功率外送输电容量规划方法不同。

对于常规机组,以火电厂为例,图1给出了某区域电网系统结构示意图。假设该地区共有 m 个火电厂,功率经过汇聚后集中送入电网,对于汇聚后的输电容量计算公式为

$$P_{line \cdot th} = \sum_{i=1}^m C_{install \cdot i} \quad (1)$$

式中: $P_{line \cdot th}$ 为火电功率外送输电容量; $C_{install \cdot i}$ 为第 i 个火电厂的装机容量。

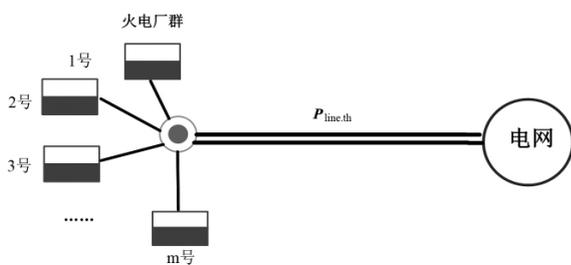


图1 某区域电网系统结构

由于风电场的实际输出功率在大部分时间达不到风电场的额定装机容量,如果对于功率汇聚外送输电容量的规划按照风电场的额定装机容量进行规划,势必会造成输电通道的严重浪费,因此,对于风电功率汇聚外送的输电容量规划必须异于常规电源。

2 风电功率外送输电容量规划方法

2.1 年持续功率曲线

风电输电容量的规划问题不需要过度地关注时序曲线,更多关注的是风电功率整体分布情况以及一段时间内的最大出力值。因此联想到在电力系统分析中提出的年持续负荷曲线这一概念,将风电场群一年中采集到的风电功率数据按照从大到小的顺序依次进行排列,不考虑风电功率的时序性,从而得到风电场群的年持续功率曲线,借助该曲线来进行风电功率汇聚外送的输电容量规划。

图2给出了风电场个数增加时,年持续功率曲线的对比。从图中可以直观地看出随着风电场个数的增加,风电功率的最大值递减,风电功率为0的时间越来越少,曲线变得越来越平滑。借助于年持续功率曲线,可以有效地观察风电功率的整体出力水平以及外送输电容量的变化对输送电量的影响程度;但是借助年持续功率曲线只能从宏观上把握外送输电容量的规划区间,无法定量地给出一个具体的最优容量值。因此将从经济性的角度出发,结合外送输电容量规划的经济性评估模型确定外送输电容量的最优值。

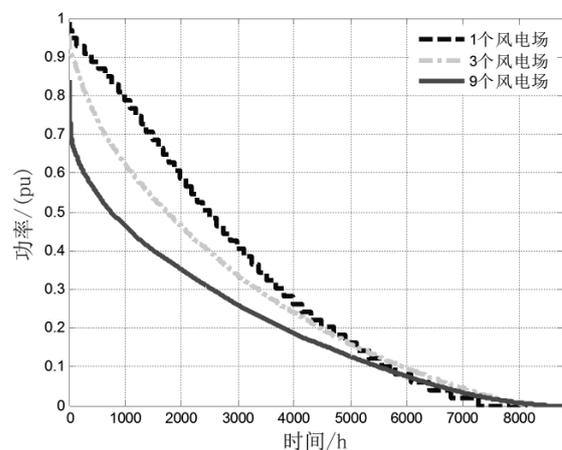


图2 风电场个数增加时年持续功率曲线对比

2.2 外送输电容量的经济性评估模型

1) 输电效益

借助于风电功率外送输电通道,可以将风电功率传输到负荷中心从而得到及时消纳。这个过程中输电通道带来的电量收益将其称为输电效益,具体的计算公式为

$$R(L) = C_p E_{wind} \quad (2)$$

式中: $R(L)$ 为输电效益; C_p 为输送单位风电电量的电价; E_{wind} 为寿命周期内输送的总电量, 具体的计算公式为

$$E_{wind} = \sum_{i=1}^{8760n \times \frac{60}{\Delta T}} P_{wind} \times \Delta T \quad (3)$$

式中: n 为输电系统的运行寿命; $P_{wind}(t)$ 为 t 时刻输送的风电功率; ΔT 为风电机组利用时间, 其计算公式为

$$P_{wind}(t) = \begin{cases} P_{actual}(t) & P_{actual}(t) \leq P_{line} \\ P_{line} & P_{actual}(t) > P_{line} \end{cases} \quad (4)$$

式中: P_{line} 为风电外送输电容量; $P_{actual}(t)$ 为 t 时刻风电场实测风电功率数据。

2) 弃风损耗

由上面分析可知, 为了更加经济合理地规划风电功率的外送输电容量, 在规划时并不是简单地根据各风电场的装机容量总和来确定外送输电容量, 因此, 必然会存在当风电功率超过外送输电容量时可能由于阻塞带来的弃风电量。定义由于外送输电通道的阻塞造成的弃风电量为弃风损耗。以图 2 中包含 9 个风电场的风电场群的年持续功率曲线为例, 假设外送输电容量为 0.5 pu, 则年持续功率曲线中纵坐标表示 0.5 pu 的直线上方与年持续出力曲线所围成的面积即为所提的弃风损耗。具体计算公式为:

$$E_{loss}(L) = K_q \sum_{i=1}^{8760n \times \frac{60}{\Delta T}} P_{loss}(t) \times \Delta T \quad (5)$$

$$P_{loss}(t) = \begin{cases} 0 & P_{line} \geq P_{actual}(t) \\ P_{actual}(t) - P_{line}(t) & P_{line} < P_{actual}(t) \end{cases} \quad (6)$$

式中: $E_{loss}(L)$ 为弃风损耗; K_q 为单位弃风电量的电价(按风电发电电价计算); $P_{loss}(t)$ 为 t 时刻的弃风功率; ΔT 为风电机组利用时间。

3) 输电成本

建设输电线路时, 需要投资者投入大量的资金购买建设材料、支付人工费用等建设费用, 将其定义为输电成本, 具体的计算公式为

$$C(L) = K_l P_{line} L \quad (7)$$

式中: $C(L)$ 为输电成本; K_l 为建设单位长度、单位容量的输电线路的工程造价; L 为输电线路的长度。

4) 综合效益

综合考虑输电线路带来的输电效益, 弃风损耗

以及输电成本等因素对输电容量规划的影响, 将其定义为输电工程的综合收益, 计算公式为

$$S(L) = R(L) - E_{loss}(L) - C(L) \quad (8)$$

式中: $S(L)$ 为输电工程的综合收益。

图 3 为基于风电场群年持续功率曲线的风电功率外送输电容量规划示意图。从图中可以看出, 结合风电场实测风电功率数据可得到风电场群的年持续功率曲线。当风电外送输电容量 P_{line} 确定时, 输电线路的建设成本即可求出, 对应的输电收益与弃风损耗可以计算; 当 P_{line} 增加时, 弃风电量减少, 输送电量增加, 但输电成本同样增加; 当 P_{line} 减少时, 弃风电量增加, 输送电量减少, 但相应的输电成本下降; 因此, 必然会存在一个 P_{line} 使输电工程的综合收益最优。

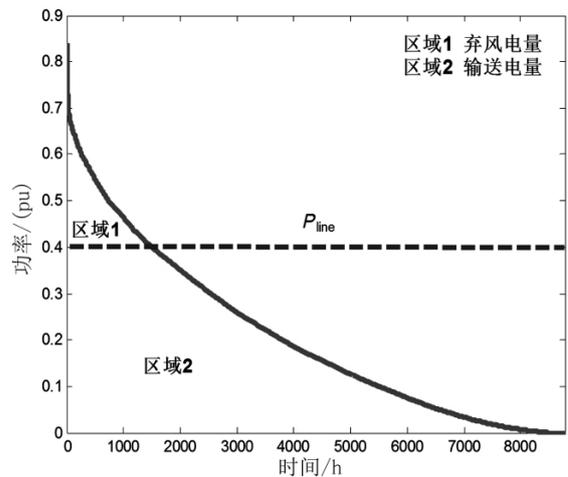


图 3 基于风电场群年持续功率曲线的风电外送输电容量规划

假定 P_{line} 从 0 开始到风电场群的装机容量 S_n 之间变化时, 势必会得到一条如图 4 所示的曲线, 使综合收益最大的外送输电容量 P_{line} 即为最终确定的规划容量。

3 算例分析

3.1 算例条件

图 5 为某区域电网的网架结构示意图。该电网中包含 9 个风电场, 风电场群的总装机容量为 1 493.8 MW, 实测风电功率数据的长度为 1 年, 数据的采样间隔为 5 min。图 6 为该风电场群 1 年中实测输出功率的原始曲线。表 1 为输电工程经济效益评估的相关参数参考值。

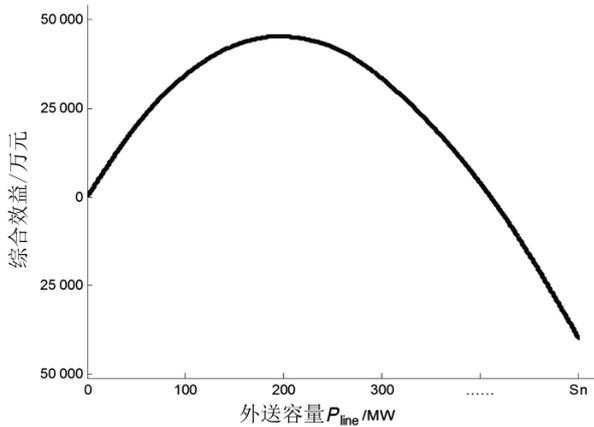


图4 基于风电场群年持续功率曲线的风电外送输电容量规划

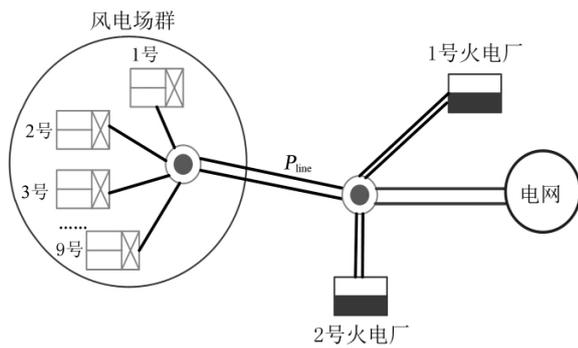


图5 某区域电网网架结构

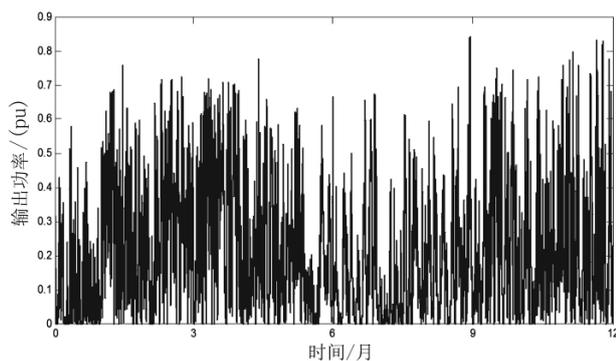


图6 风电场群实测风电功率曲线

表1 算例参考数据

参数	参考值
$C_p / (\text{元} \cdot \text{MWh}^{-1})$	60
n/a	20
$K_q / (\text{元} \cdot \text{MWh}^{-1})$	500
$K_l / (\text{万元} \cdot \text{MW} \cdot 100 \text{ km}^{-1})$	100
L/km	200

3.2 算例结果分析

当风电功率外送输电容量 P_{line} 从 0 开始逐渐增加到 1 493.8 MW (风电场群的装机容量) 时,输电

工程的综合收益变化曲线如图 7 所示。

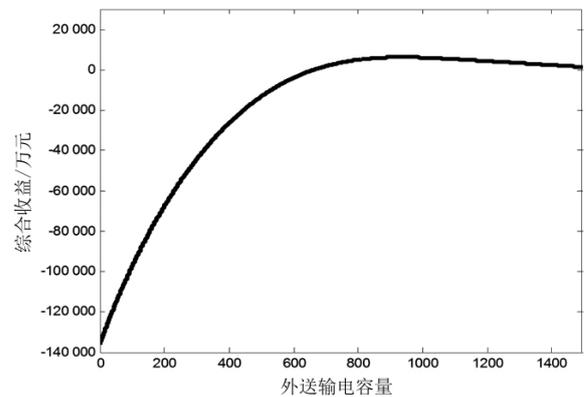


图7 风电功率外送输电工程综合收益曲线

从图中可以看出,风电功率的最优外送输电容量为 935.1 MW 相应的该输电工程在一年中带来的综合收益为 6274 万元,当输电容量取最优值时,相应的输电效益、弃风损耗以及输电成本如表 2 所示。

表2 输电容量最优时的输电效益、弃风损耗以及输电成本

参数	数值
输电效益/万元	16 266.25
弃风损耗/万元	642.28
输电成本 / (万元 · a ⁻¹)	9350

如果按照常规电源的外送输电容量规划方法进行规划时,即外送输电容量按风电场群的额定装机容量规划,此时,输电工程带来的输电效益为 16 343.32 万元,弃风损耗为 0 元,年输电成本为 14 938 万元,年综合收益为 1 405.3 万元,仅占所提方法收益的 23.12%,从而验证所提方法的有效性。

4 结 语

针对中国风电并网规模受限且电网的风电传输空间有限,在确定中国风电大规模开发、远距离输送的发展模式下,提出了一种经济性的风功率外送输电容量的规划方法。构建了综合考虑输电工程经济效益的风电外送输电容量规划模型,对于输电工程的经济效益分析考虑了输电工程的输电效益、弃风损耗以及输电成本。结合实际的电力系统以及风电场的实测风电功率数据,通过算例分析表明,所建模型在降低输电成本的同时能够给电网带来更大的经济收益。

参考文献

[1] 朱凌志,陈宁,韩华玲.风电消纳关键问题及应对措施分析.电力系统自动化,2011,35(22):29-34.

[2] 贾文昭,康重庆,李丹,等.基于日前风功率预测的风电消纳能力评估方法.电网技术,2012,36(8):69-75.

[3] 刘德伟,黄越辉,王伟胜,等.考虑调峰和电网输送约束的省级系统风电消纳能力分析.电力系统自动化,2011,35(22):77-81.

[4] 穆钢,崔杨,严干贵.确定风电场群功率汇聚外送输电容量的静态综合优化方法.中国电机工程学报,2011,31(1):15-19.

[5] 严干贵,刘嘉,崔杨,等.利用储能提高风电调度入网规模的经济性评价.中国电机工程学报,2013(22):45-52.

[6] 袁铁江,陈洁,刘沛汉,等.储能系统改善大规模风电场出力波动的策略.电力系统保护与控制,2014,4

(42):47-53.

[7] 娄素华,吴耀武,崔艳昭,等.电池储能平抑短期风电功率波动运行策略.电力系统自动化,2014,38(2):17-22.

[8] Zhao Haoran, Wu Qiuwei, Hu Shuju, et al. Review of Energy Storage System for Wind Power Integration Support [J]. Applied Energy, 2015, 137(1):545-553.

[9] 魏琛琛,蒋传文.基于风电场出力波动全概率模型的风电波动经济性评估[J].水电能源科学,2014,32(7):205-208.

[10] 张择策,沈天时.基于广义等效法的含大规模风电接入的发电系统可靠性评估[J].四川电力技术,2015,38(3):73-77.

作者简介:

于志勇(1988),硕士,从事电网规划研究。

(收稿日期:2020-04-09)

(上接第41页)

25号至42号区间为无故障,对应故障时间段为2019年9月20日至2019年10月12日,避雷器故障发现时间为2019年10月2日,在此时间段内;C相阻性电流数据从1至20号区间判断为无故障,21号至26号区间判断为故障,27号至42号区间判断为无故障,故障时间段对应为2019年9月20日至2019年10月24日,避雷器故障发现时间为2019年10月2日,在此时间段内。

A相和B相避雷器经过返厂解体后各自发现不同程度的阀片劣化和均压电容损坏。由于三相避雷器属于同一批次产品,结合C相故障时间可以判断三相避雷器大致在2019年9月就开始出现不同程度的失效,但没有达到故障程度,对应的全电流和阻性电流的统计特征数据开始出现波动。

4 结 语

所提出的基于小波分析和支持向量机的避雷器在线监测数据故障模型能够有效将在线监测数据的噪声进行滤除。首先,对去噪信号使用统计计算得到从一阶至三阶的7种统计参数;然后进行正常和故障的特征提取;最后,使用支持向量机对故障进行分类判断,能够在避雷器失效前提出故障判断和报警,有效避免因意外停电造成线路负荷丢失,提高了线路运行的安全。

参考文献

[1] 韩晗,潘学萍.氧化锌避雷器在线监测方法的现状与发展[J].河海大学学报(自然科学版),2017,45(3):277-282.

[2] 余亚东,陈富国,寇新民,等.±500 kV高压换流站直流侧避雷器在线监测装置的研制[J].电瓷避雷器,2018,286(6):105-109.

[3] 周文俊,喻剑辉,陈荣,等.雷电流全参数及避雷器状态在线监测研究[J].高电压技术,2008,34(10):2054-2058.

[4] 郭贝贝,齐山成,赵斌.融合小波和形态学的避雷器在线监测方法研究[J].电瓷避雷器,2019(6):43-54.

[5] 孙波,李海涛,赵哲源,等.广义S变换在金属氧化物避雷器在线监测中的应用研究[J].电瓷避雷器,2019(6):85-90.

[6] 张昊,王睿,于灏,等.基于多层支持向量机的金属氧化物避雷器在线监测系统[J].电瓷避雷器,2020(1):59-65.

[7] 魏东亮,蒋逸雯,张孝波,等.基于信息融合的氧化锌避雷器运行状态综合评价方法[J].电瓷避雷器,2019(4):68-74.

[8] 陈洁,詹仲强.高阶统计量与小波包分解在风氢混合储能系统中的应用[J].太阳能学报,2018,39(11):3286-3294.

作者简介:

詹仲强(1987),硕士研究生,主要从事变电设备带电检测和诊断技术研究。
(收稿日期:2020-03-27)