

考虑热载能力的风火打捆外送线路 导线截面优化

风火打捆外送能平抑风电的波动，提高线路的利用率，是大规模消纳风电的重要途径，所以风火打捆外送线路的选择至关重要，而外送线路可输送的容量又与其截面积和环境温度有关。考虑线路热载能力（即环境温度）影响，提出了风火打捆外送线路截面积优化的方法，该方法综合考虑了风电及火电外送的收入、外送线路的投资和火电煤耗成本对外送电收益的影响。算例表明该方法与不考虑热载能力的方法相比，能节约外送线路的投资，增加收益。

林章岁¹ 张梦婕² 叶 荣¹ 温步瀛²/1. 国网福建省电力有限公司经济技术研究院 2. 福州大学电气工程与自动化学院

0 引言

我国的风能资源丰富，但风能分布不均，风能资源主要集中在三北地区及东南沿海地区，所以这些地区适合开发大规模的风电基地。但是风电基地所在地用电需求小，负荷较低，无法消纳大规模的风电，需要高压线路输送到负荷中心进行消纳^[1-2]。三北地区除了风电，还具有丰富的火电资源，所以大多采用风火打捆外送的方式来输电^[3]。而东南沿海地区经济发达，土地资源十分紧张，为了节约线路走廊，风电通常也需要与火电“捆绑”外送。

由于风电的出力具有波动性，导致风电的弃风现象很严重，利用小时数很低，从而造成资源的浪费。风火打捆外送不仅可以平抑风电的波动，提高电网的可靠性，还可以充分利用外送线路的剩余容量，降低输电成本^[4-5]。

导线的输送容量与其载流量有关，而导线的载流量又与其环境温度和截面积有关^[6]。输电导线截面积的选择一般要

考虑载流量、机械强度、电压损失以及经济电流密度等因素，其中载流量是主要因素。而载流量一般是在特定的气象条件（如环境温度40℃，风速0.5 m/s，日照强度1 000 W/m²等）和导线最高允许温度下计算的，这是一个较保守的值，无法充分利用导线的热载能力。而实际中气象条件会变化，不是一个固定的值，可以根据有利的气象条件（如环境温度较低等），在不超过导线最高允许温度的情况下，适当提高导线的载流量，这时的动态载流量称为动态热定额^[7]。在导线最高允许温度不变时，动态热定额主要受环境温度的影响。根据导线的动态热定额来选择导线截面积，就可以充分发挥导线的热载能力。

对于输电容量的研究，文献[2]提出了一种考虑输电经济性的风电场群功率外送输电容量的优化方法；文献[8]研究了输电容量对系统可靠性的影响，提出了考虑经济性和可靠性的评估风电外送容量的方法；文献[9]基于历史时序风电出力 and 负荷，提出了评估互联系统输电容量的方法。但这些文献只研究了纯风电外送，会造成输电线路容量的大量空余。而文献[5]提出了考虑输电成本的风火打捆送出输电容量的优化方法，能提高输电线路的利用率。文献[2,5,8-9]在确定输电容量时，都没有考虑线路的热载能力，也没有充分利用线路的输电能力。

由于考虑了热载能力之后，线路的输送容量是一个会随时间变化的量，



林章岁/高级工程师

关键词/Keywords

热载荷·
风火打捆·
线路截面积·

不再是一个固定值,故选择截面积这个不随时间变化的量作为优化变量。本文提出了一种考虑线路热载荷能力的风火打捆外送线路截面积优化的方法,根据变化的实际环境温度来选择风火打捆外送线路的截面积,可以充分利用导线的热载荷能力,节省导线投资,增加外送电收益。

1 导线载流量与截面积和环境温度的关系

输电导线上的载流量越大,其温度越高,当温度超过其允许温度时,则会影响安全性,允许温度对应的载流量为导线的最大载流量。

导线的最大载流量与其截面积和环境温度有关,用英国的摩尔根公式来计算导线的载流量,摩尔根简化公式如下^[10]

$$I_t = \sqrt{\frac{9.92\theta(VD)^{0.485} + A - \alpha_s I_s D}{R_{at}}} \quad (1)$$

$$A = \pi \varepsilon S D [(\theta + t_a + 273)^4 - (t_a + 273)^4] \quad (2)$$

$$R_{at} = K_t R_{dt} \quad (3)$$

式中, θ 为导线载流时温升, $^{\circ}\text{C}$; V 为风速, m/s ; D 为导线外径, m ; ε 为导线表面辐射系数,光亮新线为0.23~0.46,发黑旧线为0.90~0.95; S 为常数, $S = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2$; t_a 为环境温度, $^{\circ}\text{C}$; α_s 为导线吸热系数,光亮新线为0.23~0.46,发黑旧线为0.90~0.95; I_s 为日照强度, W/m^2 ; R_{at} 为导线温度为 $(\theta + t_a)$ 时的交流电阻, Ω/m ; K_t 为导线温度为 $(\theta + t_a)$ 时的交直流电阻比; R_{dt} 为导线温度为 $(\theta + t_a)$ 时的直流电阻, Ω/m 。

2 考虑热载荷能力的风火打捆外送线路截面积优化

2.1 风火打捆送出电量的计算原理

以全年风电出力的某一天为例来说明风火打捆送出电量的计算原理,如图1所示。设 $P_w(t)$ 为风电的时序出力曲线, P_{th_min} 为火电最小技术出力,在某个截面积某个环境温度下对应一个最大载流量,这时的最大载流量对应一个线路可输送的容量为 P_t 。若风电出力大于线路可输送的容量减去火电最小技术出力,则需要弃风。阴影部分面积

为风电弃风电量,斜线部分面积为风电送出的电量,竖线部分面积为火电可送出的电量。在风电的时序出力曲线和火电最小技术出力已知的情况下,当线路可输送的容量确定后,就可计算出风火打捆的送出电量。

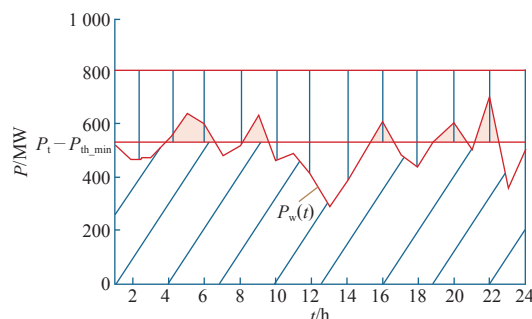


图1 风火打捆送出电量计算原理示意图

2.2 考虑热载荷能力的风火打捆外送线路截面积优化模型

若风火打捆外送导线的截面积选择过小,会导致输电容量过小,虽然节省了导线的投资,但制约了风电和火电的送出,减少了输电收入;若导线截面积选择过大,会导致输电容量过大,虽然有利于风电和火电的送出,但会增加导线的投资,造成输电容量空余,影响输电的经济性。所以存在一个最优的导线截面积。

考虑年送出风电及火电的收入、输电线路的投资和火电煤耗成本,以外送电收益最大为目标,函数表达式为

$$\max f = P_w Q_w + P_c Q_c - C_t - C_{th,c} \quad (4)$$

式中, P_w 为风电上网电价, $\text{元}/(\text{MW} \cdot \text{h})$; P_c 为火电上网电价, $\text{元}/(\text{MW} \cdot \text{h})$; Q_w 为年风电外送电量, $\text{MW} \cdot \text{h}$; Q_c 为年火电外送电量, $\text{MW} \cdot \text{h}$; C_t 为输电线路投资等年值, 元 ; $C_{th,c}$ 为火电年发电煤耗成本, 元 。

导线允许温度相同时,在一定的导线截面积下,不同的环境温度对应的最大载流量不同,导线可输送的容量不同。导线最大输送功率与最大载流量的关系表达式为

$$P_t(k) = \sqrt{3} U I_t(k) \cos \varphi \quad (5)$$

式中, $I_t(k)$ 为 k 时段环境温度对应的导线最大载流

量, A ; $P_t(k)$ 为 k 时段导线最大输送功率, kW; U 为线路电压等级, kV; $\cos \varphi$ 为功率因数。

年风电外送电量与年火电外送电量的计算方法分别为

$$Q_w = \sum_{k=1}^T P'_w(k) \Delta t \quad (6)$$

$$Q_c = \sum_{k=1}^T P_c(k) \Delta t \quad (7)$$

其中, 风电扣除弃风后的实际送出功率和火电出力的计算方法分别为

$$P'_w(k) = \begin{cases} P_t(k) - P_{th_min} & P_w(k) > P_t(k) - P_{th_min} \\ P_w(k) & P_w(k) \leq P_t(k) - P_{th_min} \end{cases} \quad (8)$$

$$P_c(k) = \begin{cases} P_t(k) - P'_w(k) & P_t(k) - P'_w(k) \leq P_{th} \\ P_{th} & P_t(k) - P'_w(k) > P_{th} \end{cases} \quad (9)$$

式中, T 为全年划分的时段数, 个; $P_w(k)$ 为风电在 k 时段的出力, MW; $P'_w(k)$ 为风电在 k 时段扣除弃风后的实际送出功率, MW; Δt 为每个时段的步长, h; P_{th_min} 为火电最小技术出力, MW; $P_c(k)$ 为火电在 k 时段的出力, MW; P_{th} 为火电装机容量, MW。

为了最大限度地使用输电线路, 提高其容量的利用率, 在风火总出力不超过输电线路容量的情况下, 火电应尽可能地多发电, 但火电出力不能大于其装机容量。

输电线路投资等年值与导线截面积的关系表达式为

$$C_t = S_{line} YL \times \frac{r(1+r)^{n_t}}{(1+r)^{n_t} - 1} \quad (10)$$

式中, S_{line} 为导线截面积, mm^2 ; Y 为输电线路单位面积单位长度的投资, 元/ $(\text{mm}^2 \cdot \text{km})$; L 为输电线路的长度, km; r 为贴现率; n_t 为输电线路的投资回收期, 年。

火电年发电煤耗成本的计算方法为

$$C_{th,c} = \sum_{k=1}^T \sum_{i=1}^n \{a_i [P_{ci}(k)]^2 + b_i P_{ci}(k) + c_i\} \times \Delta t g \quad (11)$$

k 时段每台火电机组出力的总和等于 k 时段火电的总出力, 即

$$P_c(k) = \sum_{i=1}^n P_{ci}(k) \quad (12)$$

式中, n 为火电机组总数, 台; a_i 、 b_i 和 c_i 为火电机组 i 的煤耗特性曲线的系数; $P_{ci}(k)$ 为火电机组 i 在 k 时段的出力, MW; g 为燃煤价格, 元/t。

考虑热载荷能力的风火打捆外送线路截面优化模型的约束条件包括火电机组出力约束、风电机组出力约束和导线截面积约束三部分。

1) 火电机组出力约束

$$P_{th_min} \leq P_c(k) \leq P_{th} \quad (13)$$

2) 风电机组出力约束

$$0 \leq P_w(k) \leq P_{w_max} \quad (14)$$

式中, P_{w_max} 为风电机组出力上限, MW。

3) 导线截面积约束

$$S_{line_min} \leq S_{line} \leq S_{line_max} \quad (15)$$

式中, S_{line_min} 和 S_{line_max} 分别为导线截面积的下限和上限, mm^2 。

模型中外送电收益的计算步骤如下:

1) 根据全年的环境温度计算导线截面积为 S_{line} 时的最大载流量, 进而可计算出线路全年可输送的容量。

2) 根据风电和火电的数据以及线路输送容量计算年风电和火电的外送电量, 进而计算出年送出风电及火电的收入。

3) 根据线路的数据计算输电线路投资等年值。

4) 根据火电煤耗数据计算火电年发电煤耗成本。

5) 将年送出风电及火电的收入减去输电线路投资等年值再减去火电年发电煤耗成本即可得到导线截面积为 S_{line} 时的外送电收益。

3 算例分析

3.1 算例数据

设导线允许温度为 70°C , 12个月平均环境温度分别为 12.3°C 、 12.0°C 、 13.8°C 、 18.0°C 、 22.4°C 、 26.0°C 、 28.2°C 、 28.0°C 、 26.3°C 、 22.9°C 、 19.1°C 和 14.6°C , 如图2所示, 导线载流时温升为允许温度减去环境温度, 风速为 0.5 m/s , 导线表面辐射系数为 0.9 , 导线吸热系数为 0.9 , 日照强度为 $1\,000\text{ W/m}^2$ 。

以钢芯铝绞线为例,导线截面积对应的外径和交流电阻如表1所示^[11]。

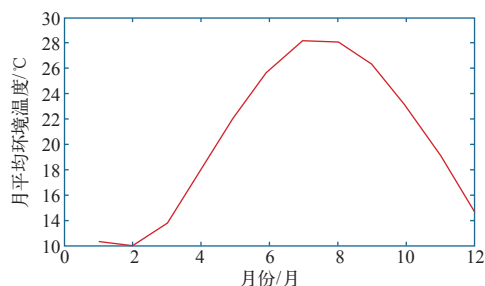


图2 12个月平均环境温度

表1 几种钢芯铝绞线的外径和交流电阻

标称截面积/mm ² (铝/钢)	外径/mm	交流电阻/(Ω/km) (70 ℃)
10/2	4.50	3.901 8
70/10	11.40	0.608 0
120/7	14.50	0.292 5
150/8	16.00	0.240 2
185/10	18.00	0.189 8
210/10	19.00	0.170 4
240/30	21.60	0.142 6
300/15	23.01	0.120 4
400/20	26.91	0.088 0
800/55	38.40	0.043 9

设风电场群总装机容量为200 MW,火电机组容量为200 MW,火电最小技术出力为火电机组容量的30%,风电上网电价为500元/(MW·h),火电上网电价为350元/(MW·h),线路电压等级为220 kV,功率因数为0.9,输电线路单位面积单位长度的投资为5 000元/(mm²·km),输电线路的长度为250 km,贴现率为0.1,输电线路的投资回收期为20年,风电出力的最大值为155.84 MW,可选截面积的最小、最大值分别为10 mm²和800 mm²。为简化计算,设火电机组每台型号完全相同,共有2台,每台容量为100 MW,所以每台火电机组的出力相同,机组煤耗特性曲线的系数 a_i 、 b_i 和 c_i 分别为 0.808×10^{-5} 、0.282和9.79,燃煤价格为650元/t。

3.2 算例结果

以风电场群一年时序出力曲线为例来计算,划分时段数为8 760个,每个时段的步长为1 h,优化出的输电导线截面积为185 mm²,外送电收益为 $1.488 4 \times 10^8$ 元。若按照我国现有的标准,设一年

环境温度恒为40 ℃,其他条件不变,优化出的输电导线截面积为240 mm²,外送电收益为 $9.162 5 \times 10^6$ 元,小于输电导线截面积为185 mm²时的外送电收益 $1.488 4 \times 10^8$ 元,如表2所示,说明考虑了环境温度变化的热载荷能力约束的优化结果可减小导线的截面积,节省导线投资,增加外送电收益。

表2 截面积优化结果及外送电收益对比

环境温度	导线截面积优化结果/mm ²	外送电收益/元
12个月不同	185	$1.488 4 \times 10^8$
12个月相同为40 ℃	240	$9.162 5 \times 10^6$

3.3 环境温度对收益和弃风率的影响

图3和图4分别给出了在210 mm²、240 mm²和300 mm²三种导线截面积下,收益和弃风率与环境温度的关系。由图3和图4可以看出,在同一个截面积下,收益随着环境温度的增加而减少,弃风率随着环境温度的增加而增加,这是因为环境温度的增加会导致导线最大载流量的减少,进而导致导线输送容量减小,同时减小了收益,增加了弃风。由图3可以看出,当环境温度较低时,导线截面积为210 mm²的收益大于其余两个,这是因为此时其余两个截面积的导线投资过大。而当环境温度较高时,导线截面积为240 mm²的收益大于其余两个,这是因为此时截面积为210 mm²的送电收入过小,截面积为300 mm²的导线投资过大。由图4可以看出同一环境温度下,弃风率随着导线截面积的增大而减小,这是因为导线截面积增大,导线最大载流量和输送容量会随之增大,同时减小了弃风。

3.4 全年平均温度不变时环境温度年较差的影响

温度年较差是最高月平均温度与最低月平均

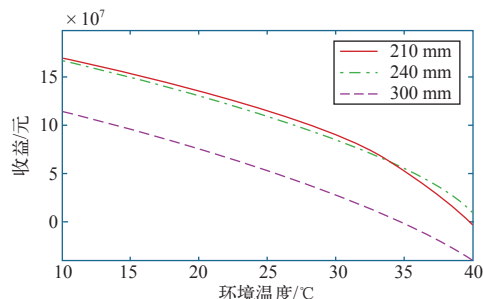


图3 收益与环境温度的关系

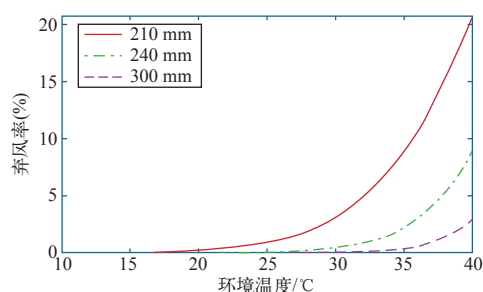


图4 弃风率与环境温度的关系

温度之差^[12]。在全年平均温度不变的情况下, 改变图2所示的温度年较差, 可以得到在 150 mm^2 、 185 mm^2 和 210 mm^2 三种导线截面积下, 收益和弃风率与环境温度年较差的关系, 如图5、图6所示。

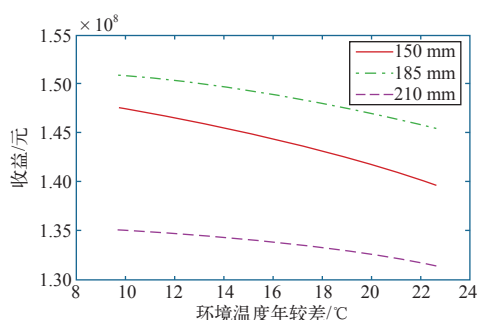


图5 平均温度不变时收益与环境温度年较差的关系

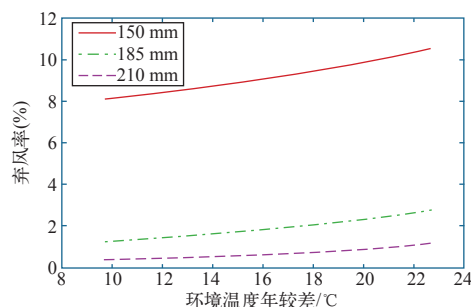


图6 平均温度不变时弃风率与环境温度年较差的关系

由图5和图6可以看出全年平均温度不变时, 在同一个截面积下, 收益随着环境温度年较差的增加而减少, 弃风率随着环境温度年较差的增加而增加, 说明此时环境温度年较差的增大会导致收益的减小和弃风的增大。由图5可以看出同一环境温度年较差下, 导线截面积为 185 mm^2 时的收益大于其余两个, 因为此时截面积为 150 mm^2 的送电收入过小, 截面积为 210 mm^2 的导线投资过大。由图6可以看出同一环境温度年较差下, 弃风率随

着导线截面积的增大而减小, 这是因为导线截面积增大, 导线最大载流量和输送容量也会随之增大, 同时减小了弃风。

3.5 最高月平均温度不变时环境温度年较差的影响

在最高月平均温度不变的情况下, 改变图2所示的温度年较差, 同样可以得到在这三种导线截面积下, 收益和弃风率与环境温度年较差的关系, 如图7、图8所示。

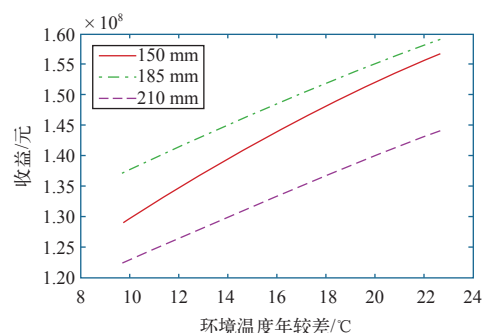


图7 最高温度不变时收益与环境温度年较差的关系

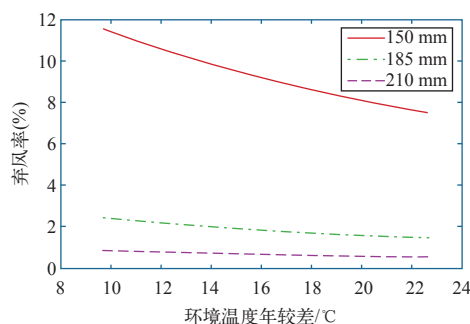


图8 最高温度不变时弃风率与环境温度年较差的关系

由图7和图8可以看出最高月平均温度不变时, 在同一个截面积下, 收益随着环境温度年较差的增加而增加, 弃风率随着环境温度年较差的增加而减少, 这是因为环境温度年较差增加, 即最低月平均温度降低, 可在低温时多送电, 增加送电收入, 减小弃风。

4 结束语

本文考虑了线路的热载荷能力, 利用摩尔根公式将环境温度、线路截面积和载流量联系起来, 在综合考虑了送出风电火电收入、线路投资和火电煤耗成本的基础上, 以外送电收益最大化

为目标函数来优化风火打捆外送线路的截面积。从优化结果可以看出,考虑了热载荷能力的线路截面积优化结果小于没有考虑热载荷能力的优化结果,而考虑了热载荷能力的最优截面积对应的外送电收益大于没有考虑热载荷能力的外送电收益,说明采用考虑线路热载荷能力的线路截面积优化方法可以节省线路的投资,提高线路的利用率,在不影响线路安全性的情况下,更充分地挖掘线路的输电能力,提高输电的收益。从算例分析可知环境温度和环境温度年较差会影响收益和弃风。

在风电外送时,配套火电一起外送,可以平抑风电的波动,充分利用线路剩余容量。在规划风火打捆外送线路时,采用本文所提的方法来选择导线截面积,会比用现有方法选择得更小,可以节省投资,充分利用线路的热载能力。在线路运行时,根据实测的气象数据来计算导线最大允许载流量,可以最大限度地提高输电线路的输送能力,特别是环境温度较低的冬季,对线路输送容量的提升较大。本文所提的方法给风火打捆外送线路的规划提供了参考。

参考文献

- [1] 华文, 徐政, 李慧杰, 等. 大容量风电远距离送出的经济性研究[J]. 电气技术, 2010(8): 33-37.
 - [2] 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[J]. 中国电机工程学报, 2011(1): 15-19.
 - [3] 高峰, 黄鸣宇, 乔颖. 考虑低电压穿越能力的风
 - [11] 王国忠. 钢芯铝绞线交流电阻简化计算的探讨[J]. 电线电缆, 2010(2): 10-12.
 - [12] 华丽娟, 马柱国, 罗德海. 1961~2000年中国区域气温较差分析[J]. 地理学报, 2004, 59(5): 680-688.

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告