

考虑热载荷能力的风火打捆外送电线路 截面和火电容量联合优化

张梦婕¹, 叶荣², 林章岁², 温步瀛³

(1. 国网福建省电力有限公司三明供电公司, 福建 三明 365000; 2. 国网福建省电力有限公司经济技术研究院, 福建 福州 350012;
3. 福州大学电气工程与自动化学院, 福建 福州 350108)

摘要:风火打捆外送电可以用火电来平抑风电的波动,提高线路的利用率,是大规模消纳风电的重要途径,所以风火打捆外送电线路和配套火电的选择至关重要。而外送电线路可输送的容量又与其截面和环境温度有关。考虑线路热载荷能力即考虑环境温度影响,提出风火打捆外送电线路截面和火电容量联合优化的方法。该方法综合考虑送出风电及火电的收入、火电的总成本、线路投资成本和风电弃风成本对社会效益的影响。算例表明:该法与不考虑热载荷能力的方法相比能充分发挥线路的输电能力,增加社会效益。

关键词:热载荷;风火打捆;线路截面;火电容量

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2020.04.012 中图分类号:TM715 文章编号:1673-9140(2020)04-0091-08

Joint optimization of wind-thermal bundling transmission line cross-section and thermal power capacity considering heat capacity

ZHANG Mengjie¹, YE Rong², LIN Zhangsui², WEN Buying³

(1. Sanming Electric Power Supply Company of State Grid Fujian Electric Power Co., Ltd., Sanming 365000, China;
2. Economic Research Institute of State Grid Fujian Electric Power Co., Ltd., Fuzhou 350012, China;
3. College of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

Abstract: Wind-thermal bundling external power transmission use thermal power to suppress the fluctuation of wind power and improve the utilization rate of the line. It is an important way to absorb wind power on a large scale. Therefore, the choice of wind-thermal bundling external power transmission lines and supporting thermal power is crucial. And the transmission capacity of the external power transmission line is related to its cross section and environmental temperature. Considering the line heat capacity or namely the influence of environmental temperature, this paper proposes a method to optimize transmission line cross-section and thermal power capacity of wind-thermal bundling external power. This method comprehensively considers the impact of wind power and thermal power income, total cost of thermal power, line investment cost, and wind curtailment cost on social benefits. The calculation example shows that this method can give full play to the transmission capacity of the line and increase social benefits com-

pared with the method without considering the thermal load capacity.

Key words: heat capacity; wind power in combination with thermal power; line cross-section; thermal power capacity

中国风能资源和用电负荷地域分布不均匀,且两者呈现逆向分布。大量的风能资源和大规模风电场主要集中在三北(西北、华北、东北)地区和东南沿海地区,而中国的负荷中心远离大规模风电基地,建设远距离的输电线路将大规模的风电送到负荷中心进行消纳是解决这一矛盾的重要举措^[1-2]。

但是,单纯的风电输送受自然条件的影响较大,因此局限性也很明显。一方面,风电出力的波动性很大,为尽可能减少并网时对电网系统的冲击,存在严重的弃风现象;另一方面,在风力较弱时输送的电能较少,外送线路剩余容量浪费严重。而三北地区的火电资源也很丰富,采用风火打捆外送的方式优化电能输送能够突破纯风电输送的局限性,平抑风电波动和充分利用线路输电容量的优势明显^[3-5]。

输电线路的载流量是评估线路电能输送能力的重要指标,其主要受环境温度和线路截面积的共同影响^[6]。对于某个线路截面积,在特定的气象条件(如环境温度40℃等)和线路最高允许温度下计算出的载流量是一个较保守的值,称为该线路截面积的最大允许载流量。然而,实际中气象条件不是一成不变的,对于特定的线路截面积,在线路温度不超过最高允许温度的约束条件下,根据有利的气象条件(如环境温度较低等)适当提高线路的载流量,可以更充分地发挥线路的热载荷能力,对应的动态载流量称为该截面积的动态热定额^[7]。不同截面积线路对应的动态热定额也不一样,通过对比选择出最佳的线路截面积,就能够充分发掘输电线路的热载荷能力。

关于输电容量方面的研究,大部分文献只研究了纯风电外送方式,文献[2]提出了以输电工程综合收益为目标函数的风电外送容量静态优化方法;文献[8]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]提出了评估互联系统输电容量的方法。为提高输电线路的利用率,减少输电容量的空余,文献[5]提出了考虑输电成本的风电打捆外送输电容量的优化方法。

关于风电外送配套火电容量的研究,文献[4]提出了风电外送配套火电容量优化的方法;文献[10]

基于量子粒子群优化算法,提出了风电和火电容量优化的方法;文献[11]构建了风火打捆分段波动功率输送模型,提出了风火打捆发电系统优化规划的方法;文献[12]提出了一种给定风电场的风火打捆发电系统容量和类型规划的优化方法。

在已有的研究中,不是已知火电容量优化线路容量,就是已知线路容量优化火电容量,没有将火电容量和线路容量联合起来优化,而且在确定输电线路容量时,都没有考虑线路的热载荷能力,目前都是以恒温(40℃)来计算载流量的,无法充分发挥线路的输电能力。

该文考虑线路热载荷能力即考虑环境温度影响,提出风火打捆外送电线路截面和火电容量联合优化的方法,根据变化的实际环境温度来选择线路截面和火电容量,充分利用输电线路的热载荷能力。用该方法来优化线路截面和火电容量,可以增加效益。

1 线路截面和环境温度对线路载流量的影响

输电线路上的载流量越大,则线路的温度越高,当温度超过其最大允许温度时,就会威胁输电系统的安全,允许温度对应的载流量就是线路的最大载流量。

线路截面和环境温度对线路最大载流量的影响关系可以用英国的摩尔根公式来表示,简化的摩尔根公式^[13]为

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

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

$$R_{at} = K_1 R_{dt} \quad (3)$$

式(1)~(3)中 θ 为线路载流时温升; V 为风速; D 为线路外径; ϵ 为线路表面辐射系数,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; α_s 为线路吸热系数,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; R_{at} 为线路温度为 $\theta + t_a$ 时的

交流电阻; K_t 为线路温度为 $\theta+t_a$ 时的交直流电阻比; R_{dt} 为线路温度为 $\theta+t_a$ 时的直流电阻。

2 考虑热载能力的风火打捆外送线路截面和火电容量联合优化

2.1 风火打捆送出电量的计算原理

由于风电的功率具有波动性,需要配套火电来平抑风电的波动,使得输送的风火总功率的变化率达到接入电力系统的要求。而减小功率变化率与信号处理中的滤波原理类似,所以可以用低通滤波算法来处理风电的功率^[14],得到平抑后的功率:

$$P_{o(i)} = (1 - \mu)P_{o(i-1)} + \mu P_{w(i)} \quad (4)$$

式中 $P_{o(i)}$ 、 $P_{o(i-1)}$ 分别为 i 、 $i-1$ 时刻平抑后的功率; $P_{w(i)}$ 为 i 时刻风电的功率; μ 为滤波系数。

在风火打捆送出时,要优先考虑风电的送出,为了平抑风电出力的波动,火电在风电出力比较小的时候多发电,在风电出力比较大的时候少发电,因火电启停成本过大,所以火电不停机。《风电场接入电力系统技术规定》对风电场输出功率变化率做出了明确的规定:当风电场装机容量大于 150 MW 时,风电 10 min 最大功率变化率推荐值为 50 MW。以某风电基地某一天的风电功率为例来说明,风电装机容量为 1 000 MW,每 10 min 取一个风电功率值,用低通滤波算法来处理,一年风电功率每 10 min 功率变化率不超过 50 MW 的平抑结果(截取其中一天)如图 1 所示。

由图 1 可以看出,在 t_0 时刻,平抑后的功率减去风电功率达到正的最大值,此时为了达到平抑,要求火电所需的出力是所有时刻中最大的,故设火电容量 P_{th} 为正最大值 $P_o(t_0) - P_w(t_0)$ 。将平抑后

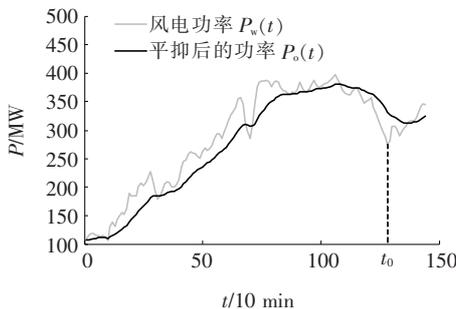


图 1 风电功率平抑结果

Figure 1 Wind power stabilization results

的功率 $P_o(t)$ 作为火电容量为 P_{th} 时的风火等效外送功率 $P_z(t)$ 。而 $P_z(t)$ 可随着火电容量的变化而变化。当火电容量比 P_{th} 大时,则 $P_z(t)$ 为 $P_o(t)$ 向上平移的结果;当火电容量比 P_{th} 小时,则 $P_z(t)$ 为 $P_o(t)$ 向下平移的结果。当配套的火电容量为 P'_{th} 时, $P_z(t) = P'_{th} - P_{th} + P_o(t)$ 。

以某风电基地任意一天的风电出力曲线、线路截面、一定环境温度下对应的线路可输送容量为例,对受输电容量限制与否的风火打捆送出电量的计算原理分别加以说明,如图 2、3 所示。其中, P_{th} 为火电容量, P_{th_min} 为火电最小技术出力, $P_w(t)$ 为风电出力曲线, $P_T(t)$ 为线路可输送的容量, $P_z(t)$ 为火电容量 P_{th} 下满足波动要求的风火等效外送功率曲线, $P_z'(t)$ 为考虑线路可输送容量限制后的风火实际外送功率曲线。

在图 2、3 中,斜线部分表示风电实际送出电量,竖线部分表示火电实际送出电量,阴影部分表示风电弃风电量,斜线和竖线部分之和表示风火实际外

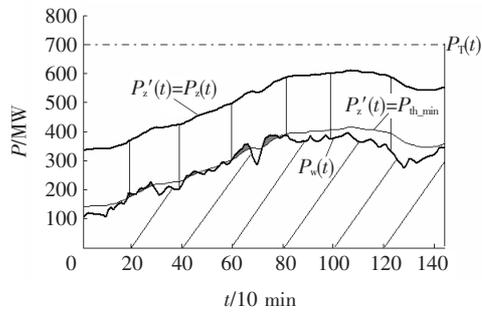


图 2 不受输送容量限制的风火打捆送出电量

Figure 2 Schematic diagram of transmitted electricity of wind-thermal bundling power without transmission capacity limitation

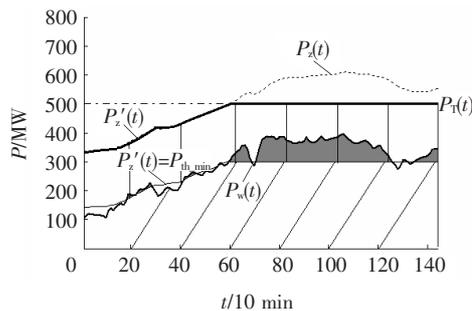


图 3 受到输送容量限制的风火打捆送出电量

Figure 3 Schematic diagram of transmitted electricity of wind-thermal bundling power with transmission capacity limitation

送电量。若所有时刻都满足 $P_z(t) \leq P_T(t)$, 则 $P_z(t)$ 没有受到 $P_T(t)$ 的限制, $P'_z(t) = P_z(t)$, 如图 2 所示; 当存在 $P_z(t) > P_T(t)$ 的情况时, $P_z(t)$ 受到 $P_T(t)$ 的限制, $P_z(t)$ 减去大于线路可输送容量的部分后得到 $P'_z(t)$, 如图 3 所示。当 $P_w(t) \leq P'_z(t) - P_{th_min}$ 时, 不需要弃风; 当 $P_w(t) > P'_z(t) - P_{th_min}$ 时, 需要弃风。

2.2 风火打捆送出电量的计算方法

在一定的线路截面下, 当线路允许温度相同时, 线路的最大载流量随着环境温度变化而变化, 线路可输送的容量也随之变化。线路最大输送功率与最大载流量的关系为

$$P_T(t) = \sqrt{3} \cdot U \cdot I_T(t) \cdot \cos \varphi \cdot m \quad (5)$$

式中 $I_T(t)$ 为 t 时刻环境温度对应的某个线路截面最大载流量; $P_T(t)$ 为 t 时刻线路最大输送功率; U 为线路电压等级; $\cos \varphi$ 为功率因数; m 为线路的回路数。

风火实际外送总功率、风电实际送出功率和火电出力的计算方法分别为

$$P'_z(t) = \begin{cases} P_z(t), & P_z(t) \leq P_T(t) \\ P_T(t), & P_z(t) > P_T(t) \end{cases} \quad (6)$$

$$P'_w(t) = \begin{cases} P_w(t), & P_w(t) \leq P'_z(t) - P_{th_min} \\ P'_z(t) - P_{th_min}, & P_w(t) > P'_z(t) - P_{th_min} \end{cases} \quad (7)$$

$$P_c(t) = P'_z(t) - P'_w(t) \quad (8)$$

式(6)~(8)中 $P_z(t)$ 为 t 时刻满足波动要求的风火等效外送功率; $P'_z(t)$ 为 t 时刻考虑线路可输送功率限制后的风火实际外送总功率; $P_w(t)$ 为风电在 t 时刻的出力; $P'_w(t)$ 为风电在 t 时刻扣除弃风后的实际送出功率; P_{th_min} 为火电最小技术出力; $P_c(t)$ 为火电在 t 时刻的出力。

年风电外送电量、年火电外送电量、年风电弃风电量的计算方法分别为

$$Q_w = \int_0^T P'_w(t) dt \quad (9)$$

$$Q_c = \int_0^T P_c(t) dt \quad (10)$$

$$Q_{loss} = \int_0^T P_w(t) dt - Q_w \quad (11)$$

式(9)~(11)中 T 为年小时数; Q_w 为年风电外送

电量; Q_c 为年火电外送电量; Q_{loss} 为年风电弃风损失电量。

2.3 考虑热载能力的风火打捆外送电线路截面和火电容量联合优化模型

若给风电配套的火电容量过小, 则无法平抑风电的出力, 造成风电弃风量过大; 若火电容量过大, 则火电机组的投资过大, 造成外送项目不经济。而外送电线路截面规划的过小, 则会在风电和火电的出力较大时造成输电阻塞, 部分电量送不出去, 减小了送电收入; 若规划的过大, 则会造成输电容量空余, 浪费了线路的投资。火电容量和线路截面互相影响, 因此, 需将两者联合起来优化。

以年社会效益最大为目标, 考虑年送出风电及火电总收入、火电年总成本、线路投资成本和风电弃风成本, 建立目标函数:

$$\max f = R - C_{th} - C_{line} - C_{loss} \quad (12)$$

式中 f 为年社会效益; R 为年送出风电及火电的总收入; C_{th} 为火电的年总成本; C_{line} 为线路投资成本等年值; C_{loss} 为风电年弃风损失电量对应的弃风成本。

年送出风电及火电总收入的计算方法为

$$R = p_w Q_w + p_c Q_c \quad (13)$$

式中 p_w 为风电外送电价; p_c 为火电外送电价。

考虑到火电的碳排放会对环境造成污染, 所以考虑火电成本时要计及 CO_2 的处理成本。火电的年总成本包括投资成本等年值、年发电煤耗成本和年 CO_2 处理成本, 计算方法分别为

$$C_{th} = C_{th_v} + C_{th_c} + C_{th_e} \quad (14)$$

$$C_{th_v} = P_{th} \cdot J \cdot \frac{r(1+r)^{n_{th}}}{(1+r)^{n_{th}} - 1} \quad (15)$$

$$C_{th_c} = gM \quad (16)$$

$$M = \int_0^T P_c(t) \cdot Q \left(\frac{P_c(t)}{P_{th}} \right) dt \quad (17)$$

$$Q(P) = a + bP + cP^2 \quad (18)$$

$$C_{th_e} = \alpha \cdot k_c \cdot Q_c \quad (19)$$

式(14)~(19)中 C_{th_v} 为火电投资成本等年值; C_{th_c} 为火电年发电煤耗成本; C_{th_e} 为火电年 CO_2 处理成本; P_{th} 为火电容量; J 为火电单位容量的投资; r 为贴现率; n_{th} 为火电的寿命; g 为燃煤价格; M 为火电年煤耗量; Q 为火电机组供电煤耗特性; P 为火电机组出力率; a 、 b 、 c 为火电机组供电煤耗

特性参数; α 为 CO_2 环境损害综合化系数,即单位重量的 CO_2 处理成本; k_c 为火电的 CO_2 排放强度。

线路投资成本等年值和风电年弃风损失电量对应的弃风成本的计算方法分别为

$$C_{\text{line}} = S_{\text{line}} \cdot Y \cdot L \cdot \frac{r(1+r)^{n_t}}{(1+r)^{n_t} - 1} \cdot m \quad (20)$$

$$C_{\text{loss}} = p_w Q_{\text{loss}} \quad (21)$$

式中 S_{line} 为线路截面积; Y 为线路单位面积单位长度的投资; L 为线路的长度; n_t 为线路的投资回收期。

线路截面和火电容量联合优化模型具有 6 个约束条件。

1) 火电机组出力约束条件:

$$P_{\text{th_min}} \leq P_c(t) \leq P_{\text{th}} \quad (22)$$

2) 风电机组出力约束条件:

$$0 \leq P_w(t) \leq P_{\text{wind_m}} \quad (23)$$

式中 $P_{\text{wind_m}}$ 为风电机组出力最大值。

3) 线路截面积约束条件:

$$S_{\text{min}} \leq S_{\text{line}} \leq S_{\text{max}} \quad (24)$$

式中 S_{min} 、 S_{max} 分别为线路截面积的下限、上限。

4) 火电容量约束条件:

$$P_{\text{min}} \leq P_{\text{th}} \leq P_{\text{max}} \quad (25)$$

式中 P_{min} 、 P_{max} 分别为火电拟规划容量的下限、上限。

5) 火电机组每分钟补偿能力约束条件,即火电机组每分钟的调节能力需大于风电出力每分钟变化量,有

$$G_c \geq G_w \quad (26)$$

$$G_c = q_1 P_{\text{th}} \quad (27)$$

$$G_w = q_2 P_{\text{wind}} \quad (28)$$

式(26)~(28)中 G_c 为火电机组每分钟补偿能力; G_w 为风电出力每分钟变化量; q_1 和 q_2 分别为火电机组的补偿率和 99% 概率情况下的风电变化速率; P_{wind} 为风电装机容量。

6) 线路可输送功率下限约束条件,即线路可输送的功率至少为火电最小技术出力,有

$$P_T(t) \geq P_{\text{th_min}} \quad (29)$$

3 算例分析

以某风电基地为例,进行算例分析。

3.1 算例数据

设线路允许温度为 70°C ,1—12 月的月平均环境温度如图 4 所示,线路载流时温升为允许温度与环境温度之差,风速为 0.5 m/s ,线路表面辐射系数为 0.9 ,线路吸热系数为 0.9 ,日照强度为 $1\ 000\text{ W/m}^2$ 。以钢芯铝绞线为例,线路部分截面对应的外径和交流电阻如表 1 所示^[15]。

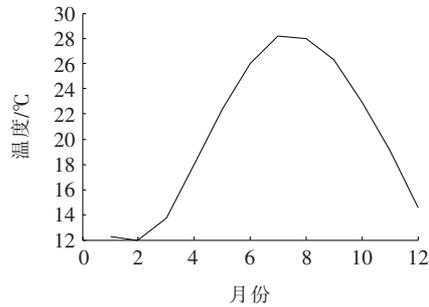


图 4 1—12 月的月平均环境温度

Figure 4 Monthly average environmental temperature from January to December

表 1 钢芯铝绞线部分截面的外径和交流电阻

Table 1 Outer diameter and AC resistance of partial section of ACSR

标称截面/mm ² (铝/钢)	外径/mm	交流电阻 $\Omega/\text{km}(70^\circ\text{C})$
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

以风电基地一年时序出力曲线为例,每 10 min 取一个风电功率值,风火总功率每 10 min 功率变化率不超过 50 MW,风电基地装机总容量为 1 000 MW,用容量为 300 MW 的机组作为配套的火电机组,火电最小技术出力为火电机组容量的 30%,低通滤波算法的滤波系数为 0.106,线路电压等级为 500 kV,功率因数为 0.9,回路数为 4 回,风电外送电价为 600 元/(MW·h),火电外送电价为 350 元/(MW·h),火电单位容量的投资为 4×10^6 元/MW,贴现率为 0.1,火电的寿命为 25 a,燃煤价格为 0.5 元/kg,火

电机组供电煤耗特性 $Q(P)$ 为 $320 \text{ kg}/(\text{MW} \cdot \text{h})$, 单位质量的 CO_2 处理成本为 $0.1445 \text{ 元}/\text{kg}$, 火电的 CO_2 排放强度为 $0.89 \text{ kg}/(\text{kW} \cdot \text{h})^{[16]}$, 线路单位面积单位长度的投资为 $3000 \text{ 元}/(\text{mm}^2 \cdot \text{km})$, 线路的长度为 300 km , 线路的投资回收期为 20 a , 线路截面优化范围的下限和上限分别为 10 和 800 mm^2 , 火电拟规划容量的下限和上限分别为 0 和 3000 MW , 火电机组的补偿率为 $1.1 \text{ \%}/\text{min}^{[17]}$, 99 \% 概率情况下的风电变化速率为 $1.5 \text{ \%}/\text{min}^{[18]}$ 。

3.2 算例结果

考虑热载荷能力的情况下采用变化的实际环境温度来选择线路截面和火电容量, 优化出的线路截面积为 $4 \times 240 \text{ mm}^2$, 火电容量为 2100 MW , 社会效益为 $9.9671 \times 10^8 \text{ 元}$ 。在不考虑热载荷能力的情况下, 根据中国现有标准可设一年环境温度恒为 $40 \text{ }^\circ\text{C}$, 此时优化出的线路截面积为 $4 \times 240 \text{ mm}^2$, 火电容量为 1500 MW , 社会效益为 $9.4367 \times 10^8 \text{ 元}$ 。优化结果及风火送出电量和社会效益的对比如表 2 所示, 可以看出, 考虑热载荷能力的截面优化结果与不考虑的相同, 火电容量优化结果比不考虑的大, 风火送出电量比不考虑的多, 社会效益比不考虑的大, 说明考虑热载荷能力进行优化虽然增加了火电的投资, 但可充分发挥线路的输电能力, 在截面相同时多送电, 增加了社会效益。

表 2 优化结果及风火送出电量和社会效益对比

Table 2 Results of optimization and comparison of transmitted electricity of wind-thermal power and social benefit

考虑热载荷能力	截面优化结果/ mm^2	火电容量优化结果/ MW	风火送出电量/ $(10^7 \text{ MW} \cdot \text{h})$	社会效益/ (10^8 元)
是	4×240	2100	1.6192	9.9671
否	4×240	1500	1.1021	9.4367

3.3 线路截面和火电容量对社会效益的影响

线路截面和火电容量都会影响社会效益, 社会效益与线路截面和火电容量的关系如图 5 所示, 可以看出, 火电容量过大线路截面过小, 会使得社会效益变小, 这是因为火电容量过大会导致火电投资的浪费, 线路截面过小会阻碍电量的送出, 减少送电收入; 还可以看出, 火电容量过小线路截面过大, 也会使得社会效益变小, 这是因为火电容量过小会造成

线路输送容量的过度空余, 线路截面过大会导致线路投资的浪费。

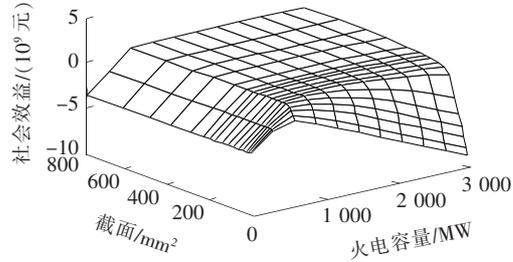


图 5 社会效益与线路截面和火电容量的关系

Figure 5 Relationship of social benefit against cross section and thermal power capacity

3.4 煤价影响分析

煤价的变化会影响线路截面和火电容量联合优化的最优解, 对不同煤价对应的最优线路截面和最优火电容量及社会效益进行计算, 如图 6、7 所示, 可以看出, 随着煤价的增加, 最优的火电容量和最优的线路截面以及社会效益都呈下降趋势, 这是因为随着煤价的增加, 送出相同电量获得的收入不变, 而煤耗成本却增加了, 所以配套的最优火电容量会减少, 线路截面也会减小, 社会效益会降低。从图 6 中可以看出, 煤价在 $0.45 \text{ 元}/\text{kg}$ 及以下时, 火电容量已

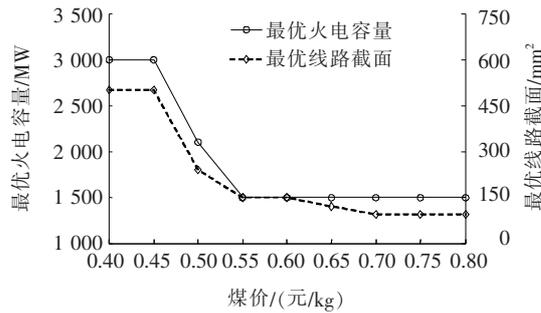


图 6 不同煤价时的优化结果

Figure 6 Optimization results at different coal prices

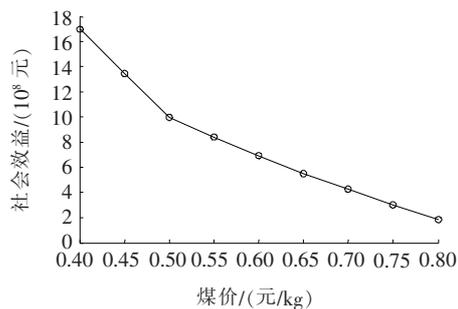


图 7 不同煤价时的优化结果对应的社会效益

Figure 7 Social benefits corresponding to optimization results at different coal prices

到达其规划上限值 3 000 MW,不会再增加;煤价在 0.55 元/kg 及以上时,由于火电机组每分钟补偿能力的约束,火电容量在达到最小值 1 500 MW 后不会再减少。

4 结语

该文采用摩尔根公式分析了环境温度、线路截面与线路载流量之间的关系,提出了一种考虑线路热载能力的风火外送电线路截面和火电容量联合优化的方法。在综合考虑功率波动要求、年送出风电及火电总收入、火电年总成本、线路投资成本和年风电弃风成本的基础上,以社会效益最大化为目标函数对考虑热载能力和不考虑热载能力分别进行了算例求解。对比结果显示,考虑了热载能力的最优解对应的社会效益值更大,充分表明在保障线路安全的情况下,采用考虑线路热载能力的优化方法可以更充分地挖掘线路的输电能力,增加社会效益。

算例中分析了线路截面和火电容量对社会效益的影响,还分析了煤价对优化结果的影响,结果表明,最优火电容量和最优线路截面以及社会效益都随着煤价的增加而减小。

该文所提方法给风火打捆外送线路和火电的规划提供了参考。

参考文献:

- [1] 董存,梁志峰,礼晓飞,等. 跨区特高压直流外送优化提升新能源消纳能力研究[J]. 中国电力,2019,52(4):41-50.
DONG Cun, LIANG Zhifeng, LI Xiaofei, et al. Study on power optimization of the trans-regional UHVDC delivery channels in promoting renewable energy accommodation capacity[J]. Electric Power,2019,52(4):41-50.
- [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,2011,35(1):15-19.
MU Gang, CUI Yang, YAN Gangui. A static optimization method to determine integrated power transmission capacity of clustering wind farms[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 35(1): 15-19.
- [3] 高峰,黄鸣宇,乔颖. 考虑低电压穿越能力的风火联运系统暂态稳定分析[J]. 电力科学与技术学报,2015,30(4):40-47.
GAO Feng, HUANG Mingyu, QIAO Ying. Transient stability of power systems with the wind farm and thermal units considering LVRT behaviors[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2015, 30(4): 40-47.
- [4] 侯婷婷,娄素华,张滋华,等. 协调大规模风电汇聚外送的火电容量优化[J]. 电工技术学报,2012,27(10):255-261.
HOU Tingting, LOU Suhua, ZHANG Zihua, et al. Capacity optimization of corollary thermal sources transmitted with large scale clustering wind power[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(10): 255-261.
- [5] 华文,徐政. 风电火电打捆送出时的输电容量优化方法[J]. 电力系统保护与控制,2012,40(8):121-125.
HUA Wen, XU Zheng. A method to optimize transmission capacity of wind power in combination with thermal power[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(8):121-125.
- [6] 张启平,钱之银. 输电线路实时动态增容的可行性研究[J]. 电网技术,2005,33(7):1-4.
ZHANG Qiping, QIAN Zhiyin. Study on real-time dynamic capacity-increase of transmission line[J]. Power System Technology, 2005, 33(7):1-4.
- [7] 韩芳,徐青松,侯炜,等. 架空导线动态载流量计算方法的应用[J]. 电力建设,2008,29(1):39-43.
HAN Fang, XU Qingsong, HOU Wei, et al. Application of overhead transmission line dynamic ampacity calculation method [J]. Electric Power Construction, 2008, 29(1):39-43.
- [8] Karki R, Patel J. Transmission system adequacy evaluation considering wind power[C]//Electrical and Computer Engineering, Saskatoon, Canada,2005.
- [9] Ault G W, Bell K R W, Galloway S J. Calculation of economic transmission connection capacity for wind power generation[J]. IET Renewable Power Generation, 2007, 1(1):61-69.

- [10] 王智冬, 刘连光, 刘自发, 等. 基于量子粒子群算法的风火打捆容量及直流落点优化配置[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(13):2055-2062.
WANG Zhidong, LIU Lianguang, LIU Zifa, et al. Optimal configuration of wind and coal power capacity and DC placement based on quantum PSO algorithm [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(13):2055-2062.
- [11] 董吉哲, 谢开贵, 马冲, 等. 计及风速和负荷特性的风火打捆发电系统规划[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(15):59-66.
DONG Jizhe, XIE Kaigui, MA Chong, et al. Optimal planning of bundled wind-thermal generation power systems considering wind speed and load characteristics[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(15):59-60.
- [12] Xie K G, Dong J Z, Singh C N, et al. Optimal capacity and type planning of generating units in a bundled wind-thermal generation system[J]. Applied Energy, 2016, 164:200-210.
- [13] 叶鸿声. 高压输电线路导线载流量计算的探讨[J]. 电力建设, 2000, 21(12):23-26.
YE Hongsheng. Inquire into calculation of conductor current carrying ampacity on HV transmission line[J]. Electric Power Construction, 2000, 21(12):23-26.
- [14] 李文斌, 卢继平, 徐兵, 等. 平抑风电场功率波动的储能容量选取方法[J]. 华东电力, 2012, 40(3):439-444.
LI Wenbin, LU Jiping, XU Bing, et al. Selection of energy storage capacity to suppress the wind power fluctuation[J]. East China Electric Power, 2012, 40(3):439-444.
- [15] 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.
WANG Guozhong. Discussion of a simplified calculation method of AC resistance of ACSR[J]. Electric Wire & Cable, 2010(2):10-12.
- [16] 段建民, 王志新, 王承民, 等. 考虑碳减排效益的可再生能源规划[J]. 电网技术, 2015, 39(1):11-15.
DUAN Jianmin, WANG Zhixin, WANG Chengmin, et al. Renewable power planning considering carbon emission reduction benefits[J]. Power System Technology, 2015, 39(1):11-15.
- [17] IEEE Committee Report. A reliability test system[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1979, 98:2047-2054.
- [18] 肖创英, 汪宁渤, 陟晶, 等. 甘肃酒泉风电出力特性分析[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(17):64-67.
XIAO Chuangying, WANG Ningbo, ZHI Jing, et al. Power characteristics of Jiuquan wind power base[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(17):64-67.