

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.191543

一种直流配电网中换流站的选址定容方法

李 猛¹, 王利利¹, 陈鹏浩², 胡扬宇², 尹 杰³, 李雪松³, 吕盈睿³, 张天东³, 胡 钊³

(1. 国网河南省电力公司经济技术研究院, 河南 郑州 450052; 2. 国网河南省电力公司, 河南 郑州 450000;
3. 武汉大学电气与自动化学院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 为了更精确地确定换流站的站址和配置换流站的容量, 对直流配电网换流站选址定容进行了研究。利用数理统计方法分析光伏电池与风力发电机的实测功率数据, 得出光伏电池和风力发电机的四季出力时序曲线, 以分布式电源接入造价和负荷距最小为目标函数确定规划区分布式电源的位置。对传统负荷距模型进行改进, 计及规划区内负荷大小、负荷性质、负荷同时使用率、地理环境等影响因素。同时考虑分布式电源的季节波动性, 提出了一种改进的负荷距模型。利用遗传算法对该模型进行寻优, 进而确定换流站的站址与容量。该方法可供相关工程技术人员参考。

关键词: 直流配电网; 分布式电源; 选址定容; 改进负荷距模型; 季节波动性

Method for selecting and setting the capacity of a converter station in a DC distribution network

LI Meng¹, WANG Lili¹, CHEN Penghao², HU Yangyu², YIN Jie³, LI Xuesong³, LÜ Yingrui³, ZHANG Tiandong³, HU Po³

(1. State Grid Henan Economic Research Institute, Zhengzhou 450052, China; 2. State Grid Henan Electric Power Company, Zhengzhou 450000, China; 3. School of Electrical and Automation, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: In order to more accurately determine the site of a converter station and configure its capacity, the location and capacity selection of the station in a DC distribution network is studied. Using mathematical statistical methods to analyze the measured power data of photovoltaic cells and wind turbines, four-year output time-series curves of photovoltaic cells and wind turbines are obtained, and the distributed power source in the planning area is determined with the minimum distributed power access cost and load moment as the objective function's position. The traditional load moment model is improved, taking into account factors such as the size of the load in the planning area, the nature of the load, the simultaneous use of the load, and the geographical environment. At the same time, considering the seasonal fluctuation of distributed power sources, an improved load moment model is proposed. A genetic algorithm is used to optimize the model to determine the site and capacity of the converter station. This paper can be used as a reference for related engineering and technical research.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51777142) and Science and Technology Project of State Grid Henan Electric Power Company (No. 5217L018000N).

Key words: DC distribution network; distributed power; site selection and capacity; improved load moment model; seasonal fluctuation

0 引言

随着经济的飞速发展, 供电负荷不断增大, 分布式电源接入增加, 传统的交流配电网难以满足供电需求, 直流配电网具有线损小、可靠性高等优势,

从交流到交直流混联^[1-2]的过渡势在必行。然而, 目前直流电网存在直流配电网网络拓扑、直流电网电压序列选取^[3]、换流站选址定容等诸多技术性问题需要解决, 以保证直流配电网经济、可靠与环保运行。换流站的选址定容是直流配电网规划的一个基础而重要的环节, 直接影响着直流配电网的网络结构和经济效益。

文献[4]提出了一种变电站两阶段优化规划方

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51777142); 国网河南省电力公司科技项目资助(5217L018000N)

法,采用层次分析法将变电站规划问题分为选址与定容两个阶段。文献[5]在换流站建址时考虑了噪声、水源等因素,但并未计及用户负荷以及线路损耗对选址带来的偏差。我国三峡工程直流换流站规划选址^[6]仅在已有待选站址中择优,并无备选站址,因而站址选取的局限性很大。文献[7]应用传统负荷距^[8]最小的方法,尽管可以得到相对准确的负荷中心,但是由于用户负荷同时使用率以及曲折系数的关系,仍然与实际负荷中心存在一定的偏差。为此,本文考虑分布式电源并网^[9-14]以及分布式电源的季节波动性,并考虑地理环境以及负荷同时使用率的影响,提出了一种适用于直流配电网中换流站的改进负荷距模型。对负荷进行聚类^[15-17],通过遗传算法^[18]寻优首先得出四季的换流站站址,然后取其算术平均值为最优站址,最后计算换流站的全寿命周期成本^[19-21]验证经济性^[22-25]。

1 改进的负荷距模型

负荷距是指电压损耗一定时,用户负荷 P 与输电线路的长度 l 之积 Pl 。传统负荷距法利用式(1)、式(2)求负荷中心 (u, v) , 即

$$\left(\sum_{i=1}^n P_i \right) u = \sum_{i=1}^n (P_i x_i) \tag{1}$$

$$\left(\sum_{i=1}^n P_i \right) v = \sum_{i=1}^n (P_i y_i) \tag{2}$$

式中: (x_i, y_i) 为负荷坐标; (u, v) 为负荷距中心坐标; P_i 为负荷中心; n 为负荷个数。

传统负荷距法由于没有考虑负荷性质的不同以及同一时间负荷使用率的差异,故而将其应用于实际工程时会导致所计算出的负荷中心与实际的负荷中心之间出现偏差,因此为了减小这种偏差对换流站选址定容产生的不利影响,有必要对传统负荷距模型加以改进。

本文通过引入下列参数,将分布式电源接入、地形因素和负荷同时使用率综合考量进换流站规划问题中,提出一种改进负荷距模型。

(1) 曲折系数

输电线路的曲折系数 k_l 是线路的实际长度 l' 与起止点直线距离 l 的比值,通常采用经验数值或者直接计算得出,一般不超过 1.4。

(2) 负荷同时使用率

一个电网按照不同的要求可以将其划分为若干小的子网,负荷同时使用率 k_c 就是在同一时刻,若干子网的最大负荷之和与整个电网的最大负荷之比,其数值小于 1。同一时间因负荷使用率不同导

致区域配电往往高于实际用电,造成不必要的经济损失。

(3) 标志参数

通常任意时刻每个负荷点只允许由一个换流站进行供电。 $\delta_{ji} = 1$ 表示换流站 j 向负荷点 i 提供电能, $\delta_{ji} = 0$ 表示换流站 j 不向负荷点 i 供电。

(4) 分布式电源接入

由于分布式电源发电功率相较于区域内负荷占比甚小,因此可近似将分布式电源看作直接对用户负荷供电。考虑到分布式电源发电具有波动性和间歇性,受光照、风力等环境影响,在春、夏、秋、冬四季表现出一定程度上的一致性。光伏电池和风力发电机随季节变化的出力时序曲线分别如图 1 和图 2 所示,可以看到两种分布式电源出力随季节变化明显,同时也具有很强的互补性,这种互补性有利于配电网供电。因此本文重点讨论这两种分布式电源。

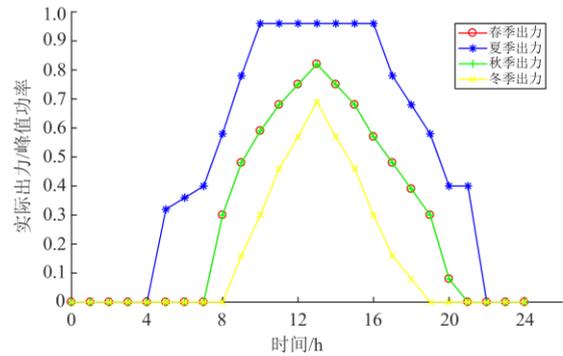


图 1 光伏电池出力时序曲线

Fig. 1 Timing curve of photovoltaic cell output

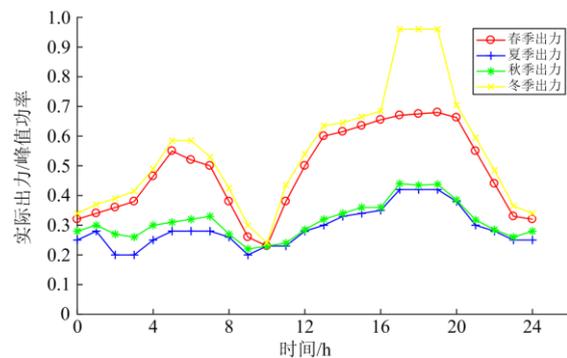


图 2 风力发电机出力时序曲线

Fig. 2 Wind power generator output timing curve

通过处理光伏电池与风力发电机每一季的出力时序曲线,即将每一季的平均出力作为该季的实际出力,得到如表 1 所示的四季实际出力/峰值功率。

表 1 光伏电池与风力发电机四季实际出力/峰值功率
Table 1 Actual output/peak power of photovoltaic cells
and wind turbines in four seasons

	春季	夏季	秋季	冬季
光伏电池	0.286 2	0.500 0	0.282 6	0.156 3
风力发电机	0.167 4	0.042 1	0.034 8	0.212 7

分布式电源接入的目标函数为

$$\min C_{\text{tol}} = C_{\text{om}} + C_i + C_p \quad (3)$$

式中: C_{tol} 为分布式电源总投资费用; C_{om} 为分布式电源运行维护费用; C_i 为分布式电源年等效投资费用; C_p 为环保补贴费用。

运行维护费用的计算式为

$$C_{\text{om}} = \chi \sum_{t=1}^{8760} \sum_{i \in N_{\text{DG}}} E_i(t) \quad (4)$$

式中: χ 为 DG 单位发电量的运行维护费用(万元/MWh); $E_i(t)$ 是第 i 个节点所接 DG 在 t 时段的发电量(MWh); N_{DG} 为 DG 安装节点集合。

分布式电源年等效投资费用的计算式为

$$C_i = \frac{r(1+r)^{n_y}}{(1+r)^{n_y} - 1} \sum_{i \in N_{\text{DG}}} (c_i H(i)) \quad (5)$$

式中: r 为贴现率; n_y 为 DG 回收期; r 为第 i 个节点处安装 DG 的投资费用(万元); $H(i)$ 为第 i 个待选节点处 DG 的安装数量。

环保补贴费用的计算式为

$$C_p = \sum_{t=1}^{8760} \left[\sum_{i \in N_{\text{pv}}} c_{\text{pv}} E_{\text{pv},i}(t) + \sum_{i \in N_{\text{wg}}} c_{\text{wg}} E_{\text{wg},i}(t) \right] \quad (6)$$

式中: c_{pv} 和 c_{wg} 分别为光伏电池和风力发电机单位发电量的环保补贴费用(万元/MWh); $E_{\text{pv},i}(t)$ 和 $E_{\text{wg},i}(t)$ 分别为 t 时段第 i 个光伏发电、风力发电待选节点处的出力(MW); N_{pv} 、 N_{wg} 分别为光伏电池和风力发电安装节点集合。

基于负荷点 (x_i, y_i) , $i=1,2,3,L,n$, 可以推导出改进负荷距的数学表达式。由图 3 中传统负荷距中心 (u, v) 和负荷点 (x_i, y_i) 两者之间的实际距离 l'_i 与直线距离 l_i 之比计算出该负荷点的曲折系数 k_i , 即

$$k_i = \frac{l'_i}{l_i} = \left[\sum_{z=2}^n \sqrt{(x_{iz} - x_{i(z-1)})^2 + (y_{iz} - y_{i(z-1)})^2} + \sqrt{(u - x_m)^2 + (v - y_m)^2} \right] / \sqrt{(u - x_i)^2 + (v - y_i)^2} \quad (7)$$

式中: x_{iz} 、 x_{in} 为实际线路的转折点横坐标; y_{iz} 、 y_{in} 为实际线路的转折点纵坐标。

利用式(3)计算得出该负荷点处分布式电源的容量 P_{DG_i} (若无分布式电源则 $P_{DG_i} = 0$)。结合负荷同时使用率 k_{c_i} 与 P_{DG_i} 得出该负荷点的等效负荷容量, 即

$$P_{eq_i} = k_{c_i} (P_i - P_{DG_i}) \quad (8)$$

综合考虑式(7)和式(8)得出计及分布式电源接入的改进负荷距的目标函数, 即

$$\min f = \min \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n k_{c_i} k_i \delta_{ji} (P_i - P_{DG_i}) \times \left[(u_j - x_i)^2 + (v_j - y_i)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

式中: (x_i, y_i) 为负荷坐标; (u_j, v_j) 为改进负荷距中心坐标; m 为改进负荷距中心个数; n 为负荷个数。

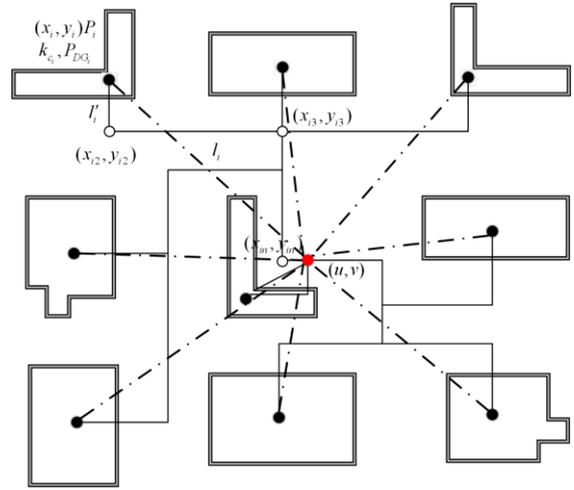


图 3 改进负荷距法图示

Fig. 3 Illustration of improved load distance method

传统负荷距模型与改进负荷距模型对比如图 4 所示。其中 (u, v) 为传统负荷距中心坐标, (u', v') 为改进负荷距中心坐标, 由于引入 k_{c_i} 、 k_i 以及 P_{DG_i} , 使得后者更接近实际负荷中心 (m, n) 。

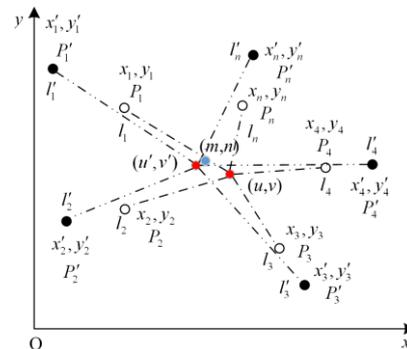


图 4 传统负荷距与改进负荷距对比

Fig. 4 Comparison of traditional load moment and improved load moment

由于分布式电源的实际出力随季节更替而变化,因此负荷点实际负荷存在波动性,故而造成改进负荷距中心出现偏移,为此需要确定四个季节下分布式电源的改进负荷距中心,从而得出换流站站址的大致区域,计算流程如图5所示。实际工程中在利用改进负荷距模型寻优的同时,还可以结合具体情况,绕过现有建筑设施,例如医院、学校、商场等地,在所圈定区域对换流站站址进行人工微调。

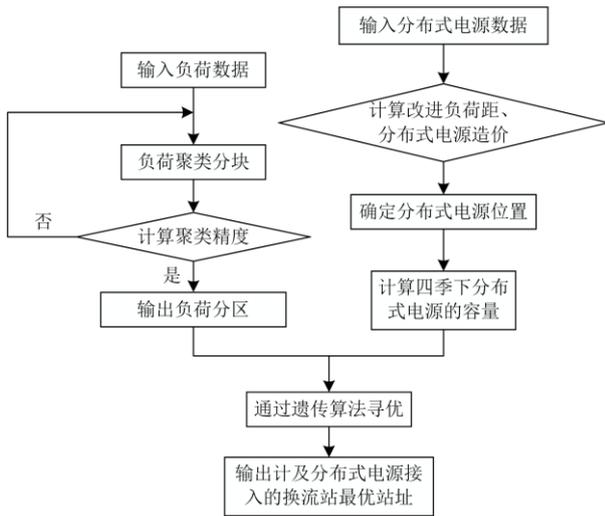


图5 确定换流站最优站址流程图

Fig. 5 Flow chart for determining the optimal site of a converter station

2 全寿命周期模型

$$LCC = C_1 + C_0 + C_M + C_F + C_D \quad (10)$$

2.1 前期投入建设成本 C_1

换流站的前期投入建设成本 C_1 可以分成两部分:换流站站内设施成本投资与线路前期投资。包含设计规划阶段的设计人员的设计成本支出,工程建设阶段的购买设施支出、土地征收成本支出、技术改进等支出。

$$C_1 = \sum_{i=1}^n \sum_{j \in J} \lambda k_i l_{ji} + \sum_{i=1}^n g(S_i) \quad (11)$$

式中: l_{ji} 为负荷点 j 到换流站 i 的直线距离; k_i 为曲折系数; λ 为换流站低压侧每公里投资费用; $g(S_i)$ 为换流站站内所有设备在确定容量为 S_i 时所对应的前期投资费用。

2.2 运行成本 C_0

直流配电网运行成本 C_0 为直流配电网换流站选址定容优化筹划工程在运行期间所需总支出,包

含设施耗能支出、运行人员薪资、技术人员骨干培养支出等。本文忽略占比较少部分,仅保留主要的两部分,即线路运行时的网络电能损耗和运转时的电气设备损耗,因此 C_0 的计算式为

$$C_0 = \sum_{i=1}^n \sum_{j \in J} \eta k_i P_j^2 l_{ji} + \sum_{i=1}^n f(S_i) \quad (12)$$

式中: $\eta = (\eta_1 \eta_2 \eta_3) / U^2$ 为线路的网损折算系数,其中 η_1 为当前电力电价, η_2 为 10 kV 线路每公里的电阻, η_3 为年损耗小时数; U 为直流电压; P_j 为负荷 j 所对应的有功功率损耗; $f(S_i)$ 为换流站运行过程中用电设备折旧、值班人员的技术培训、运行人员支付工资等费用,一般取设备投资的 10%,即 $0.1g(S_i)$ 。

2.3 维护成本 C_M

换流站维护费用 C_M 主要由两部分组成,即站内绿化管理和设备日常检修。由于 C_M 在换流站建设的全寿命周期费用中占比很小,故采用一个折算系数 τ 乘上换流站初始投资 C_1 进行简化计算,即

$$C_M = \tau \times C_1 \quad (13)$$

式中, τ 为维护折算系数,一般取 0.013。

2.4 故障成本 C_F

一般情况下用社会停电损失来衡量换流站建设的故障成本 C_F ,该损失分为供电部门直接经济损失、故障造成供电部门维修损失和用户因停电造成的产业损失三部分,即

$$C_F = (\sigma \times E_c + E_c \times B_{\text{pow}}) + h \times \mu \times C_r \times ART + SES \times \frac{GDP}{ES} \quad (14)$$

式中: σ 是赔偿协议中电网公司每单位售电量应向用户赔偿的费用; E_c 是规划区域内电力企业的缺售电量; B_{pow} 是单位售电量的平均利率; h 是停电间隔数; μ 是设备故障率; C_r 是平均停电修复成本; ART 是平均设备修复时间; SES 是因停电故障,各个产业由此产生的社会缺电量; GDP 是供电区域内 GDP 总和; ES 是区域内各个行业的供电量。

2.5 报废成本 C_D

报废成本 C_D 是指直流配电网中选用的电气设备达到寿命期,更新换代过程中由于处理销毁工作而耗费的成本支出。电气设备报废时,会遗留少量的残值,因此应综合考虑设备残值与报废成本之间的联系,为简化计算可认为报废成本 C_D 为设备原值 C_1 的 5% 左右,即

$$C_D = 5\% C_1 \quad (15)$$

3 算例分析

本文选取某市规划区作为算例。如图 6 所示, 其南北宽度为 6 km, 东西长度为 8 km, 总面积为 28.87 km²。规划区依照负荷性质分为六类区域, 依次为工业区、住宅区、商业区、教育文化区、行政区和生态绿化区。以负荷的几何中心点的坐标近似代替负荷, 得出该地区的各负荷点数据如表 2—表 8 所示。规划区内计划新建 5 座换流站, 换流站设备造价如表 9 所示; 接入 5 台 1.8 MW 风力发电机和 10 块 0.162 MW 光伏电池, 相关参数如表 10 所示。

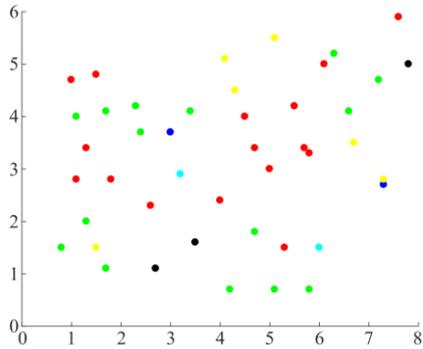


图 6 某市规划区负荷分布图

Fig. 6 Load distribution of a city planning area

表 2 六类区域负荷数据

Table 2 Six types of regional load data

六类区域	工业 区	住宅 区	商业区	文化 教育区	行政 区	生态 绿化区	合计
负荷	282.6	151.76	138.72	31.08	55.02	0	659.18
同时率	67%	78%	87%	92%	89%	—	—

表 3 工业区负荷

Table 3 Industrial zone load

编号	坐标	负荷/MW	曲折系数
1	(1.0,4.7)	13.6	1.24
2	(1.5,4.8)	15.3	1.16
3	(1.3,3.4)	14.6	1.18
4	(1.1,2.8)	23.1	1.31
5	(1.8,2.8)	16.9	1.33
6	(2.6,2.3)	17.8	1.14
7	(4.0,2.4)	15.2	1.19
8	(4.5,4.0)	14.9	1.26
9	(4.7,3.4)	28.6	1.27
10	(5.0,3.0)	25.3	1.12
11	(5.3,1.5)	20.7	1.33
12	(5.5,4.2)	18.3	1.22
13	(5.7,3.4)	12.7	1.25
14	(5.8,3.3)	17.3	1.20
15	(6.1,5.0)	13.6	1.17
16	(7.6,5.9)	14.7	1.13

表 4 商业区负荷

Table 4 Business district load

编号	坐标	负荷/MW	曲折系数
17	(3.0,3.7)	75.27	1.10
18	(7.3,2.7)	63.45	1.20

表 5 住宅区负荷

Table 5 Residential area load

编号	坐标	负荷/MW	曲折系数
19	(1.1,4.0)	8.2	1.23
20	(1.7,4.1)	7.6	1.26
21	(1.3,2.0)	11.5	1.35
22	(0.8,1.5)	16.4	1.34
23	(6.3,5.2)	5.8	1.25
24	(1.7,1.1)	12.9	1.16
25	(2.3,4.2)	11.1	1.14
26	(6.6,4.1)	6.1	1.27
27	(2.4,3.7)	10.4	1.30
28	(3.4,4.1)	13.7	1.14
29	(7.2,4.7)	11.6	1.26
30	(4.7,1.8)	14.1	1.34
31	(4.2,0.7)	8.0	1.25
32	(5.1,0.7)	6.06	1.08
33	(5.8,0.8)	8.3	1.09

表 6 行政区负荷

Table 6 Administrative district load

编号	坐标	负荷/MW	曲折系数
34	(7.8,5.0)	17.58	1.21
35	(2.7,1.1)	16.39	1.18
36	(3.5,1.6)	21.05	1.26

表 7 生态绿化区负荷

Table 7 Loads of ecological green areas

编号	坐标	负荷/MW	曲折系数
37	(6.0,1.5)	0	1
38	(3.2,2.9)	0	1

表 8 文化教育区负荷

Table 8 Load of cultural education area

编号	坐标	负荷/MW	曲折系数
39	(1.5,1.5)	6.02	1.25
40	(4.1,5.1)	4.17	1.17
41	(5.1,5.5)	5.33	1.13
42	(4.3,4.5)	3.86	1.05
43	(6.7,3.5)	5.69	1.16
44	(7.3,2.8)	6.01	1.33

表 9 换流站选型投资造价表

Table 9 Loads of ecological green areas

编号	容量/ MVA	换流站 造价/万元	编号	容量/ MVA	换流站 造价/万元
1	3×50	7 000	5	5×50	9 000
2	3×63	7 500	6	5×63	9 500
3	4×50	8 000	7	6×50	10 000
4	4×63	8 500	8	6×63	10 500

表 10 分布式电源数据

Table 10 Distributed power data

DG 类型	峰值功率/ MW	运维费用/ (万元/MWh)	投资费用/ (万元/MWh)	补贴费用/ (万元/MWh)
光伏电池	0.162	0.02	100	0.036
风力发电机	1.8	0.03	63	0.010

由于预期新建五座换流站，因此将规划区内的负荷分成五个区块，用不同颜色标识。运用遗传算法寻优得出四季下计及分布式电源接入的改进负荷距中心区域，如图 7 所示。‘*’表示考虑季节波动性的换流站站址，‘+’表示最优站址，其坐标为四季下换流站站址的平均值。因 17、18 号负荷较大，造成 2、5 号换流站站址向其偏移。表 11 为应用改进负荷距模型得出的分布式电源接入、负荷分区结果以及换流站最优站址坐标。

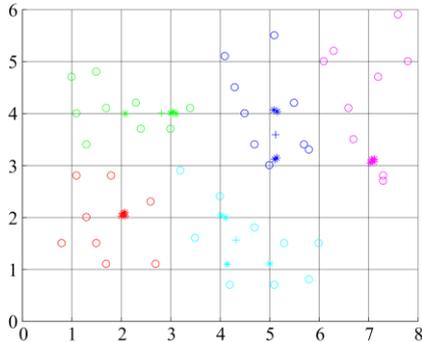


图 7 计及分布式电源四季波动的换流站选址区域

Fig. 7 Site selection area of converter station taking into account the seasonal fluctuation of distributed power

结合全寿命周期模型，相关数据如表 12 所示，可得全寿命周期成本计算公式为

$$LCC = \sum_{i=1}^n \sum_{j \in J} \lambda k_i l_{ji} + \sum_{i=1}^n \sum_{j \in J} \eta k_i P_j^2 l_{ji} + 1.163 \sum_{i=1}^n g(S_i) + C_F \quad (16)$$

式中，前两项为运行费用，第三项为换流站设备造价。由于改进负荷距模型主要影响了边界负荷的分

块，换流站的供电负荷存在差异导致换流站费用和运行费用不同，但同一规划区故障成本 C_F 相同不影响两种模型的全寿命周期成本大小关系。因此通过比较传统负荷距模型与计及四季下分布式电源接入的改进负荷距模型的全寿命周期下换流站设备造价和运行费用来进行经济性评价，如表 13 所示，换流站容载比取 1.8。

表 11 分布式电源接入、负荷分区及换流站最优站址

Table 11 Optimal site for distributed power access, load zoning and converter stations

分区 编号	各分区内负荷编号 及分布式电源接入 情况	分区内 总负荷/ MW	四季下换流 站站址区域	换流站 最优站址
1	4(光),5,6,21,22, 24(风),35,39	121.01	春(2.08,2.03) 夏(2.07,2.10) 秋(2.00,2.03) 冬(2.03,2.08)	(2.0450,2.0600)
2	1,2,3(风),17,19(风), 20,25,27,28	169.77	春(3.00,4.01) 夏(3.11,4.00) 秋(2.08,4.00) 冬(3.04,4.03)	(2.0875,4.0100)
3	8,9(光),10,12,13(光), 14,40,41(风),42(光)	130.46	春(5.08,4.07) 夏(5.14,3.15) 秋(5.10,3.12) 冬(5.15,4.04)	(5.1175,3.5950)
4	7,11(风),30,31, 32,33,36,37,38	93.41	春(4.01,2.04) 夏(4.14,1.1) 秋(4.11,2.00) 冬(5.15,4.04)	(4.3150,2.2950)
5	15(光),16,18,23, 26,29,34(光),43,44	144.53	春(7.11,3.07) 夏(7.03,3.05) 秋(7.06,3.12) 冬(7.12,3.13)	(7.0800,3.0925)

表 12 LCC 模型参数表

Table 12 LCC model parameter table

参数	名称	取值	参数	名称	取值
λ	配电线路单位长度 造价/(万元/km)	42	η_1	当前电价/ (元/kWh)	0.5
η_2	线路每公里 电阻/(Ω /km)	0.05	η_3	线路年损耗 小时数	3 950
$C_r(l)$	线路平均修复 成本/万元	230	$C_r(s)$	变压器平均 修复成本/ 万元	150
ART	设备平均修 复时间/h	15	$EENS$	单位时间 社会缺电 量/MW	528.88
GDP	规划地区 全年值 GDP/元	59.8×10^9	E_s	规划地区全 年用电量/ kWh	4.6×10^9

表 13 全寿命周期费用

Table 13 Life cycle costs

	换流站容量配置方案	运行费用/万元	换流站设备造价/万元	故障费用/万元	全寿命周期费用/万元
传统负荷距模型	一座 3×63 MVA	2 335.5	1.163×45500	1 000	56 252
	两座 4×63 MVA				
	两座 6×63 MVA				
改进的负荷距模型	一座 3×63 MVA	2 306	1.163×44500	1 000	55 059.5
	两座 4×63 MVA				
	一座 5×63 MVA				
	一座 6×63 MVA				

利用改进负荷距模型所得的运行费用以及换流站设备费用均有所减少, 全寿命周期总费用减少 2%, 经济性得到明显改善。

5 结语

本文考虑负荷同时使用率、线路曲折系数以及分布式电源的季节波动性, 对传统负荷距法进行改进, 提出了一种改进负荷距模型。利用遗传算法对其寻优得出最优站址, 与由传统负荷距得出的站址进行比较可知最优站址更接近负荷中心; 对两种模型的全寿命周期成本的比较表明, 本文换流站容量配置的经济性更高。

参考文献

- [1] 邓卫, 吴争, 孔力, 等. 交直流混联系统协调控制技术[J]. 高电压技术, 2019, 45(10): 3025-3038.
DENG Wei, WU Zheng, KONG Li, et al. Coordinated control technology for AC/DC hybrid system[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(10): 3025-3038.
- [2] 马光, 张伊宁, 陈哲, 等. 含大规模风电的交直流混联系统风险评估方法[J]. 电网技术, 2019, 43(9): 3241-3252.
MA Guang, ZHANG Yining, CHEN Zhe, et al. Risk assessment method for hybrid AC/DC system with large-scale wind power integration[J]. Power System Technology, 2019, 43(9): 3241-3252.
- [3] 盛万兴, 李蕊, 李跃, 等. 直流配电电压等级序列与典型网络架构初探[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(13): 3391-3403, 3358.
SHENG Wanxing, LI Rui, LI Yue, et al. A preliminary study on voltage level sequence and typical network architecture of direct current distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(13): 3391-3403, 3358.
- [4] 王成山, 魏海洋, 肖峻, 等. 变电站选址定容两阶段优化规划方法[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(4): 62-66.
WANG Chengshan, WEI Haiyang, XIAO Jun, et al. Two-stage optimization planning method for substation location and capacity[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(4): 62-66.
- [5] 胡劲松. 高压直流换流站的关键建站条件[J]. 中国电力, 2006, 39(12): 20-23.
HU Jinsong. Key construction conditions for HVDC converter stations[J]. Electric Power, 2006, 39(12): 20-23.
- [6] 陈万钧, 孔静云, 陈哲民. 三峡工程直流换流站规划选站的补充研究[J]. 中国电力, 1995(10): 11-16, 30.
CHEN Wanjun, KONG Jingyun, CHEN Zhemin. Supplementary research on the planning and selection of DC converter stations in the Three Gorges Project[J]. Electric Power, 1995(10): 11-16, 30.
- [7] 冯超, 钱璟, 黄宏盛, 等. 基于负荷距理论的配电线路规划与变压器选址优化[J]. 浙江电力, 2015, 34(2): 5-8.
FENG Chao, QIAN Jing, HUANG Hongsheng, et al. Distribution line planning and distribution transformer location optimization based on load moment[J]. Zhejiang Electric Power, 2015, 34(2): 5-8.
- [8] 米东星. 基于负荷距分析的台区低电压治理研究[J]. 中国电业(技术版), 2016(2): 16-18.
MI Dongxing. Research on the low voltage control based on the analysis of the distribute-electricity transformer district load moment[J]. China Power: Technology, 2016(2): 16-18.
- [9] 马麟, 刘建鹏. 考虑时序特性和环境效益的多目标多类型分布式电源规划[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(19): 32-40.
MA Lin, LIU Jianpeng. Multi-objective planning of multi-type distributed generation considering timing characteristics and environmental benefits[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(19): 32-40.
- [10] 王波, 虞殷树, 贺旭, 等. 计及分布式电源并网安全约束的配电网改接优化模型[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(22): 67-77.
WANG Bo, YU Yinshu, HE Xu, et al. An optimization model for restructuring distribution network considering grid-connected security constraints of DGs[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(22): 67-77.

- [11] 康慨, 邓少平, 张超, 等. 含直流馈线分区优化的交直流混合微电网规划[J]. 智慧电力, 2019, 47(10): 22-30.
KANG Kai, DENG Shaoping, ZHANG Chao, et al. AC/DC hybrid microgrid planning with optimal placement of DC feeders[J]. Smart Power, 2019, 47(10): 22-30.
- [12] 沈鑫, 曹敏. 分布式电源并网对于配电网的影响研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(增刊 1): 346-351.
SHEN Xin, CAO Min. Research on the influence of distributed power grid for distribution network[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(S1): 346-351.
- [13] 王艳松, 刘珊, 衣京波, 等. 基于状态估计的含分布式电源树状配电网故障测距算法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(23): 60-67.
WANG Yansong, LIU Shan, YI Jingbo, et al. Fault location algorithm based on state estimation in tree distribution network with distributed generation[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(23): 60-67.
- [14] ZHAO Qianyu, WANG Shouxiang, WANG Kai, et al. Multi-objective optimal allocation of distributed generations under uncertainty based on D-S evidence theory and affine arithmetic[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2019, 112: 70-82.
- [15] 肖白, 郭蓓, 姜卓, 等. 基于负荷点聚类分区的配电网网架规划方法[J]. 电力建设, 2018, 39(11): 85-95.
XIAO Bai, GUO Bei, JIANG Zhuo, et al. Distribution network planning method based on clustering blocks of load nodes[J]. Electric Power Construction, 2018, 39(11): 85-95.
- [16] 李培强, 李欣然, 陈辉华, 等. 基于模糊聚类的电力负荷特性的分类与综合[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(24): 73-78.
LI Peiqiang, LI Xinran, CHEN Huihua, et al. The characteristics classification and synthesis of power load based on fuzzy clustering[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(24): 73-78.
- [17] QIAO Ju, CAI Xuezhu, XIAO Qian, et al. Data on MRI brain lesion segmentation using K-means and Gaussian mixture model-expectation maximization[J]. Data in Brief, 2019, 27.
- [18] 贺北方, 周丽, 马细霞, 等. 基于遗传算法的区域水资源优化配置模型[J]. 水电能源科学, 2002(3): 10-12, 71.
HE Beifang, ZHOU Li, MA Xixia, et al. Optimal allocation model of regional water resources based on genetic algorithm[J]. Hydroelectric Energy, 2002(3): 10-12, 71.
- [19] 李涛, 马薇, 黄晓蓓. 基于全寿命周期成本理论的变电设备管理[J]. 电网技术, 2008, 32(11): 50-53.
LI Tao, MA Wei, HUANG Xiaobei. Power transformation equipment management based on life cycle cost theory[J]. Power System Technology, 2008, 32(11): 50-53.
- [20] 辛建波, 康琛, 陈田, 等. 基于动态数据的输变电设备全寿命周期成本分析[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(7): 181-187.
XIN Jianbo, KANG Chen, CHEN Tian, et al. Life cycle cost analysis of power transmission and transformation equipment based on dynamic data[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(7): 181-187.
- [21] 李泓泽, 郎斌. 全寿命周期造价管理在电力工程造价管理中的应用研究[J]. 华北电力大学学报: 社会科学版, 2008(1): 7-11.
LI Hongze, LANG Bin. The application of the whole life cycle engineering cost management on the electricity engineering field[J]. Journal of North China Electric Power University: Social Sciences, 2008(1): 7-11.
- [22] 姚元玺. 计及调度经济性的光热电站储热容量配置方法[J]. 太阳能学报, 2019, 40(11): 3039-3045.
YAO Yuanxi. Thermal storage capacity allocation method of CSP station considering dispatching economy[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2019, 40(11): 3039-3045.
- [23] 赵会茹, 赵浩然, 陈国平, 等. 新电改背景下电力用户资产综合价值评估模型和差异化接收策略研究[J]. 智慧电力, 2019, 47(8): 105-111.
ZHAO Huiru, ZHAO Haoran, CHEN Guoping, et al. Comprehensive values evaluation model & differentiated reception strategy of electric power users' assets under new power reform[J]. Smart Power, 2019, 47(8): 105-111.
- [24] 李彦哲, 郭小嘉, 董海鹰, 等. 风/光/储微电网混合储能系统容量优化配置[J]. 电力系统及其自动化学报, 2020, 32(6): 123-128.
LI Yanzhe, GUO Xiaojia, DONG Haiying, et al. Optimization of hybrid energy storage system capacity in microgrid of wind/PV/storage[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2020, 32(6): 123-128.
- [25] 唐忠, 田晨, 资容涛. 多微电网互联系统的储能容量配置[J]. 电测与仪表, 2019, 56(4): 95-100.
TANG Zhong, TIAN Chen, ZI Rongtao. Energy storage capacity configuration of interconnected multi- microgrids[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(4): 95-100.

收稿日期: 2019-12-14; 修回日期: 2020-01-14

作者简介:

李 钰(1986—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为配电网规划技术; E-mail: hnlimn@163.com

王利利(1984—), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为电网规划、能源互联网技术。E-mail: wanglili037@sina.com

(编辑 魏小丽)