

DOI:10.3969/j.issn.1674-1951.2019.03.004

分布式电站光伏汇流箱布置优化策略

Optimization strategy for locating of combiner box for distributed photovoltaic power station

陈建国,张国民

CHEN Jianguo, ZHANG Guomin

(苏州中康电力开发有限公司,江苏 苏州 215600)

(Sino-Akcome Renewable Energy Development(Suzhou) Company Limited, Suzhou 215600, China)

摘要:针对曼哈顿算法在解决汇流箱选址问题时的局限性,提出了综合线损和财务净现值经济性比选方法,兼顾考虑电缆用量及成本、直流线损、20年发电量和发电收益等因素,对具体案例进行了计算,将不同方案的结果进行了比较分析。结果表明,该方法可有效降低电缆用量、减少线损,提高系统效率,达到发电收益的最大化,弥补了单一算法的不足,可为汇流箱的优化布置提供参考。

关键词:分布式光伏电站;曼哈顿算法;汇流箱;差额净现值

中图分类号:TM 615;TK 51 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-1951(2019)03-0018-05

Abstract: In view of the limitation of Manhattan algorithm in solving the problem of locating the combiner box, a comprehensive method for cable loss and net present value is proposed. Taking into account the factors such as cable consumption, cost, DC cable loss, power generation in 20 years and revenue, specific cases are calculated and the results of different schemes are compared and analyzed. The results show that this method can effectively reduce the cable consumption, cut DC cable loss, improve system efficiency, maximize the generation benefits and make up for the shortcomings of the single algorithm. It can provide a reference for the optimal layout of the combiner box.

Keywords: distributed photovoltaic power station; Manhattan algorithm; combiner box; net present value of differences

0 引言

选址问题是运筹学中的经典问题之一,在生产生活、物流、甚至军事中都有着非常广泛的应用,在光伏发电领域,如何使得光伏发电系统设计进一步优化、系统发电效率提高、建设成本降低,一直以来都是光伏系统工程师及研究人员关注的核心。太阳能光伏发电系统中,电缆是配套电气系统设备的基础,也是关系到整个发电系统发电效率及经济效益的重要因素之一。对于光伏阵列而言,汇流箱的位置影响到组件串至汇流箱部分以及汇流箱到逆变器的直流电缆用量。研究汇流箱最佳经济性位置,降低电缆用量和电缆压降损失,对于提高系统发电效率和系统经济效益有着实际应用价值。文献[1]利用曼哈顿算法和坐标解析法研究了光伏组件串至汇流箱的电缆用量优化模型,得到了光伏阵列内的汇流箱最佳经济点位置,对于大型的地面电站有一定

的参考价值。而分布式电站一般安装在屋顶,由于屋顶条件的复杂性,如彩钢瓦屋面,汇流箱可能无法安装在光伏方阵内。另外,对于使用集中逆变器的光伏电站,文献[1]未考虑到汇流箱至逆变器的直流电缆用量,汇流箱的最佳位置应使得组件串至逆变器直流侧的综合线损为最低,其系统效率最大化,因此文献[1]的方法存在一定的局限性。所以,本文结合屋顶分布式电站的特殊性,以实际案例为分析依据,运用综合线损计算法和财务净现值法对汇流箱位置进行了进一步的优化。

1 直流线缆压降计算

电力电缆在传输电能的过程中,会产生电压降,而且随着距离的增大而增大,直流电缆压降计算公式如下^[2-3]

$$\Delta U = IR = I\rho L/S, \quad (1)$$

式中: ΔU 为线缆电压降,V; I 为电流,A; R 为导线电阻, Ω ; ρ 为导体电阻率, $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$,20℃时铜芯电缆取常数0.0184; S 为导体截面积, mm^2 ; L 为导体

长度, m。对于两芯电缆, 导体长度为线缆长度的 2 倍。通常组件到汇流箱之间的电缆一般均选用 YJV22-1kV 1×4 mm² 规格。当汇流箱位置和组串接线方式确定时, 由于组件到汇流箱之间的电缆规格已经确定, 各个太阳能电池组串至汇流箱以及汇流箱至逆变器的线缆长度也已确定, 因此这一段的直流线缆压降应是一个确定值。汇流箱的位置非常关键, 根据工程经验, 光伏电池组件—汇流箱—直流柜的直流线缆最远环路压降百分比不宜超过 2.5%, 如果选择位置不恰当, 为了达到设计的压降要求, 则会增加电缆用量或电缆线径, 因此在光伏电站设计时, 电缆的用量有必要从实际角度进行优化^[3]。

2 曼哈顿算法及其局限性

太阳能光伏组件通过串并联构成光伏阵列, 光伏阵列可按系统汇流箱个数划分为若干个阵列单元, 每个单元包含若干个组件串, 每串由若干个组件串联起来, 串两端分别为正极端和负极端。每一串组件的两端通过光伏电缆分别连接至汇流箱的接线端子, 通常 2~16 个组件串接入 1 个汇流箱。假设有一个光伏阵列单元, 该阵列单元的组件排布已确定, 共有 n 串组件接入汇流箱。建立如图 1 所示坐标系, 使得该单元内的所有组件均位于以原点 O 和点 (X_m, Y_m) 为边界的矩形区域内, 并且组件串至汇流箱的电缆走线平行或垂直于坐标轴, 其中横坐标和纵坐标表示组串正负极端点的具体位置坐标, 单位均为 m。

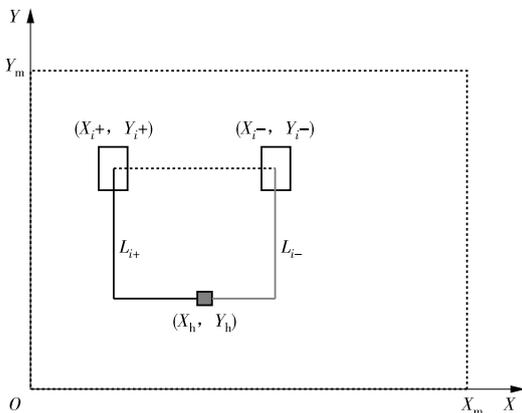


图 1 组件的正负极与汇流箱位置坐标

Fig. 1 Position of positive/negative poles of the component and combiner box

设汇流箱位置坐标为 (X_h, Y_h) , 第 i 串组件的正极端和负极端对应坐标点分别为 (X_{i+}, Y_{i+}) 和 (X_{i-}, Y_{i-}) , 则正、负极端点到汇流箱的电缆长度分别为

$$L_{i+} = |X_h - X_{i+}| + |Y_h - Y_{i+}|, \quad (2)$$

$$L_{i-} = |X_h - X_{i-}| + |Y_h - Y_{i-}|。 \quad (3)$$

根据文献[1], 通过解析, $L(X_h, Y_h)$ 有最小值为

$$\{(X, Y) | X = [X_n, X_{n+1}], Y = [Y_n, Y_{n+1}]\}, \quad (4)$$

式中: n 为组串的编号, 如 1 表示第 1 串。

当 n 取不同的整数时, 对应的每个区间 $[X_n, X_{n+1}]$ 或 $[Y_n, Y_{n+1}]$ 都是一个线性分段函数, 且函数的最小值与坐标系原点位置的选择无关。

通过上述算法, 可初步确定汇流箱的位置, 而实际项目中存在特殊情况, 如汇流箱不便于安装在光伏方阵内部, 或可能会对组件产生阴影遮挡, 需要安装在方阵区域之外, 如挂在女儿墙上。如图 2 所示, 其中, A, B, C, D 为汇流箱的可放位置。假设以女儿墙的西南墙角为坐标原点建立坐标系, 基于曼哈顿算法, 该方阵内汇流箱的最优解位置的坐标为 (X_n, Y_n) , 在 X 轴上的垂足为 A 点, 其坐标为 $(X_n, 0)$, 在 Y 轴上的垂足为 B 点, 坐标为 $(0, Y_n)$, 由于是规则方阵, 另外两个点 C 和 D 是 B 和 A 的对称点, 如果不对称, 只需保证点在两条垂线上即可。这几个点是需要特别关注的, 因在 X 和 Y 轴上, 汇流箱若选在 A 点和 B 点外的其他任意点, 各组串到汇流箱的线缆总距离都要增加。

A 点、D 点、B 点或 C 点各位置需要进行计算比较, 例如 A 点和 B 点。

根据公式(2)、(3)可得到各个组串输出端到 A 点和 B 点的距离之和 L_A 及 L_B

$$L_A = (X_{n+1} + \dots + X_{2n}) - (X_1 + \dots + X_n) + (Y_1 + \dots + Y_{2n}), \quad (5)$$

$$L_B = (Y_{n+1} + \dots + Y_{2n}) - (Y_1 + \dots + Y_n) + (X_1 + \dots + X_{2n}), \quad (6)$$

$$L_A - L_B = 2(Y_1 + \dots + Y_n) - 2(X_1 + \dots + X_n), \quad (7)$$

从(7)式可知, 需要确定各输出端点的 Y 坐标和与 X 坐标总和的大小关系, 对于图 2 所示情况, 显然各点 X 坐标之和要大于 Y 坐标之和, 因此 $L_A < L_B$, 也就是说汇流箱选择在 A 点时 $1 \times 4 \text{ mm}^2$ 电缆的使用量比 B 点更少。

上述汇流箱的初步选址可以使得组串至汇流箱的电缆使用量最少, 当然, 这种算法未考虑配电房直流柜和逆变器位置, 也就是汇流箱输出端至配电房集中逆变器的线缆用量。对于已经确定布置方案和接线方式的方阵来说, 通过曼哈顿距离算法得到的最优位置, 汇流箱布置在方阵内部, 虽然此处比其他位置减少了 $1 \times 4 \text{ mm}^2$ 光伏电缆的使用量, 但对于分布式电站来说, 逆变器一般不会安装在方阵内部, 那么汇流箱到直流柜的出线长度必然有所增加, 而汇流箱若布置靠近逆变器的位置, 那么 $1 \times 4 \text{ mm}^2$ 光伏

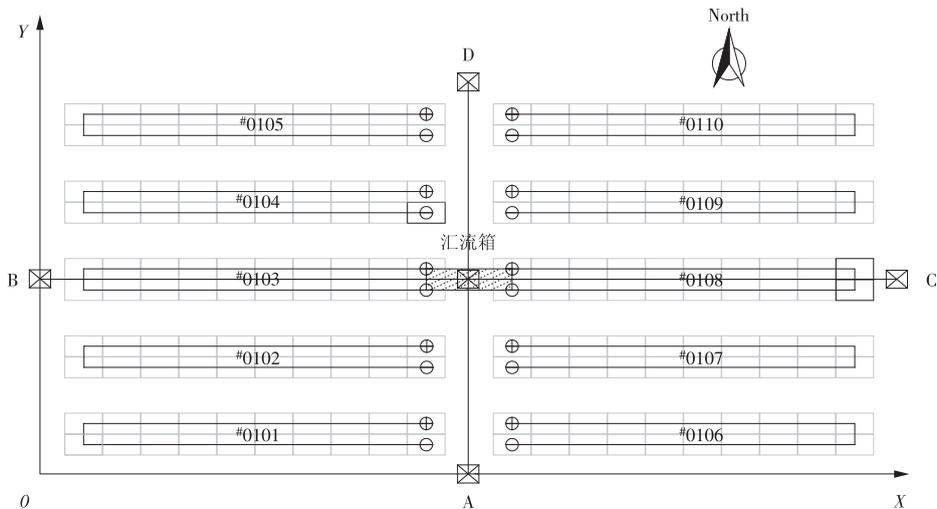


图 2 特殊情况下的汇流箱选址分析

Fig. 2 Analysis on the location of the combiner box under special circumstances

电缆的使用量会大大增加。不同选址主要会影响直流线缆的投资和发电损耗,最终影响发电量和投资回报,所以还需要通过经济比选来确定最佳方案,文献[4]提出了差额投资净现值法、差额投资内部收益率法等,其中差额净现值法是按净现值大小来评价方案优劣的一种方法,即被比较的甲乙两个方案净现金流量差额的现值之和,如果净现值大于零,则甲方案可行,且净现值越大,方案越优,投资效益越好,故本文使用该方法对分布式电站的汇流箱选址进行了研究。

3 实例分析

3.1 项目案例介绍

某屋顶 1 MW 工程项目实景如图 3 所示,光伏组件顺着屋面布置,组件的安装倾角为 10°,使用 270 W(p) 多晶硅组件,最大功率点的组件电压为 30.9 V,峰值电流为 8.74 A,20 块组件为 1 串,共 16 个组串,经过 16 进 1 的汇流箱汇流后,再和其他汇流箱汇入集中逆变器的直流侧,单个汇流箱对应方阵的额定功率为 86.4 kW。



图 3 屋顶电站实景

Fig. 3 Real scene of roof power station

如图 4 所示, A, B, C, D 为汇流箱的候选放置点,由于该项目的配电房位于厂房的一楼南侧,西面女儿墙较矮,东面为其他方阵,不适合安装,初步可以判定汇流箱可放置于屋顶的南边,这样做既相对可靠,又便于安装,同时省去了制作汇流箱支架的成本。

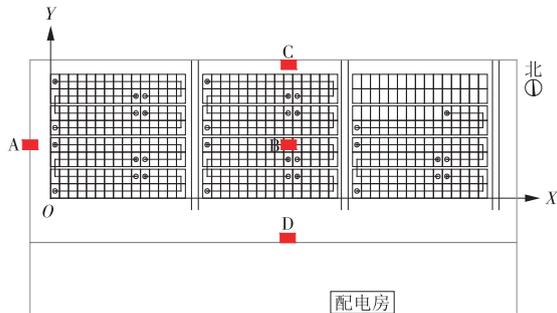


图 4 方阵排布和汇流箱候选位置

Fig. 4 Candidate position for square array arrangement and combiner box

3.2 汇流箱最佳位置坐标确定

利用计算机辅助设计(CAD)软件可确定图 4 中 16 个组串输出端的坐标值,共有 32 个坐标,数据参考表 1,对 32 个 X 坐标及 32 个 Y 坐标进行排序,其中, $X_1 = 0.82, X_{16} = 6.08, X_{17} = 6.08, Y_1 = 0.50, Y_{16} = 17.61, Y_{17} = 26.72$,所以当汇流箱可以放置在方阵内部时,根据曼哈顿算法,汇流箱的最佳 X 坐标为 6.08,最佳 Y 坐标为 [17.61, 26.72] 区间内。则汇流箱位置大致在方阵内部的 B 点,方阵内部 B 点是 $1 \times 4 \text{ mm}^2$ 电缆使用量最优化点,但放置在 B 点,会对北边的组件产生阴影影响。

3.3 汇流箱位置选取的不同方案对比

若汇流箱在图 4 中 A, C, D 点,此时汇流箱的位置在方阵以外,将汇流箱分别在 A, B, C, D 处 4 种方案的直流光伏电缆的用量、电缆总投资、线损及发

电量会有一些的差异,需要进行财务分析比较,文中使用差额净现值法(NPV)确定最佳经济位置^[4]。

3.3.1 电缆使用量和成本对比

不同的方案其电缆使用量存在较大的偏差,见表1, $1 \times 4 \text{ mm}^2$ 电缆在 B 处使用量最少,在 A 处使用量最多,但 B 处 70 mm^2 电缆使用量就不一定最少,D 方案由于靠近配电房, 70 mm^2 电缆的使用量最少,故比 A 方案铜使用量减少达 55%,电缆用量 B 处 < D 处 < C 处 < A 处。型号为 PV1F $1 \times 4 \text{ mm}^2$ 的光伏直流电缆费用(包含施工费和材料费)为 4.90 元/m,型号为 ZC - YJV - 0.6/1 kV - 2×70

表 1 几种布置方案电缆长度及用铜量、成本比较

Tab. 1 Comparison of cable length, copper content and cost for different arrangements

汇流箱位置	X 坐标值	Y 坐标值	组串至汇流箱 ($1 \times 4 \text{ mm}^2$)/m	汇流箱至直流柜 ($2 \times 70 \text{ mm}^2$)/m	总铜用量/kg	电缆投资费用/元
A	-2.30	6.08	876.19	50.85	94.55	9124.00
B	26.72	6.08	496.00	24.13	47.72	4722.85
C	26.72	15.191	666.79	32.48	64.21	6352.69
D	26.72	-5.00	755.88	12.90	42.98	4928.93

在 A, B, C, D 4 种汇流箱布置方案中,表 3 给出了在 STC 条件下支线(组串至汇流箱)、干线(汇流箱至逆变器直流侧)的功率损耗。

表 2 STC 条件下支线和干线压降

Tab. 2 Branch line and trunk line pressure drop table under STC conditions V

压降	方案 A	方案 B	方案 C	方案 D
支线最大压降	4.45	2.86	3.41	3.71
支线最小压降	1.42	0.96	1.10	1.40
支线平均压降	2.85	1.94	2.35	2.56
干线上压降	3.81	1.81	2.43	0.97

计算线损时组件自身的电缆长度以 0.90 m 计入, 4 mm^2 的直流电缆的电阻为 $4.375 \Omega/\text{km}$, 70 mm^2 的直流电缆的电阻 $0.268 \Omega/\text{km}$,经计算可知 D 方案功率损耗最小,仅为 0.591%^[5]。

3.3.3 经济性比较

汇流箱对应方阵总容量 76.8 kW,组件 10° 倾角正南朝向安装,斜面辐照 $1335 \text{ W}/\text{m}^2$,使用 PV_{syst}

表 4 不同布置方案实际线损、发电量和收益

Tab. 4 Actual cable loss, power generation and revenue of different layout schemes

项目	方案 A	方案 B	方案 C	方案 D
全年直流线损模拟值/%	0.70	0.40	0.52	0.41
平均系统效率/%	78.90	79.05	78.98	79.09
发电量/(kW·h)	95110	95291	95207	95339
电缆费用/元	9124.00	4722.85	6352.69	4928.93
第 1 年收益/元	114132.27	114349.25	114247.99	114407.11

mm^2 电缆费用(包含施工费和材料费)为 95.00 元/m,那么方案 A 的电缆费用最高,为 9124.00 元,方案 B 的电缆费用最低,约为 4722.85 元。

3.3.2 压降和功率损耗对比

在标准测试(STC)条件下,组串电压 V_m 为 618 V($20 \times 30.9 \text{ V}$),对应的电流为 8.74 A,最大功率约为 5.4 kW。由表 2 可见,方案 B 的汇流箱位于方阵内部,支线平均压降最小,但是干线压降不一定最低,方案 D 的支线平均压降排在第 2,但靠近配电房,干线压降最低,因此总体上方案 D 的平均压降最小。

表 3 STC 条件下支线和干线功率损耗

Tab. 3 Branch line and trunk line power loss under STC conditions %

项目	方案 A	方案 B	方案 C	方案 D
支线最大功率损耗	0.72	0.46	0.55	0.60
支线平均功率损耗	0.46	0.31	0.38	0.41
干线功率损耗	0.69	0.33	0.44	0.18
合计平均功率损耗	1.155	0.644	0.824	0.591

软件可模拟得到 4 种方案的系统效率、直流线损和全年发电量。一般各方案比选时考虑相同的寿命期,例如采用年限为 20 年。

不同互斥投资方案的比选需要考虑初始投资额、年收益额和折现率,假设折现率 8%,以 20 年发电收益考虑,按每发 $1 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 电收益 1.2 元(用电企业结算电价、脱硫煤上网电价、补贴之和)计算,以上方案的年发电量和收益见表 4。

以方案 D 为基准,分别计算(方案 A - 方案 D)、(方案 B - 方案 D)、(方案 C - 方案 D)的差额

净现值,从表 5 可知,与方案 D 相比,其他方案的 NPV 均为负值,因此可以得出结论:方案 D 最优,其次是方案 B、方案 C 和方案 A。

表 5 不同方案的差额净现值计算结果
Tab.5 Various calculation results of the net present value of differences

指标	成本差 额/元	收益差额/ (元·a ⁻¹)	差额净 现值/元
方案 A - 方案 D	4 195.00	-274.84	-6 893.52
方案 B - 方案 D	-206.00	-57.86	-362.01
方案 C - 方案 D	1 424.00	-159.12	-2 986.02

4 结束语

本文对汇流箱位置及光伏电缆用量优化问题进行了深入研究,由于基于曼哈顿算法和函数解析初步选址在屋顶分布式光伏项目中存在局限性,所以以分布式电站实际项目中某一阵列单元排布为例,总结出了汇流箱选址的优化策略,从光伏线缆及汇流箱与逆变器之间的直直流线缆用量和成本、直流线损、发电量及收益等方面,使用差额净现值法进行了投入和产出的经济性评估,通过比选,得到了最佳布置位置,文中提到的优化方法可为今后屋顶分布式

(上接第 17 页)

参考文献:

[1] 庄家汉. 我国天然气分布式能源发展现状探析[J]. 科技经济导刊,2017(12):115.

[2] 陈志锋. 燃气内燃机三联供系统烟气脱硝技术分析[J]. 华电技术,2017,39(1):71-72.

[3] 何息忠. 氮氧化物危害及其防治措施初探[J]. 环境科学导刊,1996(2):38-40.

[4] 固定式内燃机大气污染物排放标准:DB 11/1056—2013[S].

[5] 曹艳芳. 瓦斯发电站燃气内燃机烟气脱硝方案研究[J]. 环境科学与管理,2017,42(2):125-129.

[6] 汪家铭. 尿素法 SCR 烟气脱硝技术及其应用前景[J]. 合成技术及应用,2013,28(1):28-32.

[7] 火电厂烟气脱硝工程技术规范选择性非催化还原法:HJ 563—2010[S].

[8] 柏源,李忠华,薛建明,等. 尿素为还原剂燃煤烟气脱硝技术的研究与应用[J]. 电力科技与环保,2011,27(1):19-22.

[9] 贾莉伟,张云,岳军,等. 分布式能源站 SCR 脱硝催化剂

光伏项目汇流箱的选址提供设计依据和参考。

参考文献:

[1] 陈建国,张金剑. 光伏方阵内汇流箱初步选址方法[J]. 华电技术,2016,38(6):73-76.

[2] 陈祥,汪玉华. 光伏电站阵列内电缆损耗分析[J]. 云南电力技术,2015,43(5):27-28.

[3] 周治. 并网光伏电站子方阵最佳配置选择[J]. 西北水电,2012(3):81-87.

[4] 蒋华庆. 光伏电站设计技术[M]. 北京:中国电力出版社,2014.

[5] 陈建国,张金剑,虞立涛. 基于温度修正的光伏电站发电性能评价指标对比分析[J]. 华电技术,2016,38(5):73-76.

(本文责编:齐琳)

作者简介:

陈建国(1983—),男,浙江台州人,工程师,工学硕士,从事光伏电站设计、施工及电站运维等方面的工作(E-mail:jianguo1217@163.com)。

张国民(1984—),男,辽宁大连人,高级工程师,从事光伏电站运营管理方面的工作(E-mail:zhangguomin@akcome.com)。

选型[J]. 工业催化,2017,25(12):77-80.

[10] 王正林,唐巍. 尿素制氨技术在电厂脱硝应用的对比研究[J]. 湖北电力,2017,41(7):31-34.

[11] 夏家喜. 关于锅炉 SCR 烟气脱硝反应器整流装置和烟道导流板采用流场模拟优化设计的探讨[J]. 能源与环境,2016(3):81-82.

[12] 吴剑恒,何宏舟,俞金树. SNCR 在中温分离 CFB 锅炉上的 CFD 研究应用[J]. 电力学报,2016,31(1):69-71.

[13] 朱晨曦,李苇林,郑迎九,等. 燃煤电厂联合脱硝 SCR 系统流场模拟研究和实践[J]. 华电技术,2015,37(6):2-4.

[14] 张国立. 基于模拟的火电厂 SCR 法烟气脱硝流场系统设计研究[D]. 天津:天津大学,2015.

[15] 王福军. 计算流体动力学分析 CFD 软件原理与应用[M]. 北京:清华大学出版社,2004.

(本文责编:齐琳)

作者简介:

刘晓立(1982—),男,河北唐山山人,工程师,从事燃煤及燃气机组的烟气脱硝技术研发及工程实施方面的工作(E-mail:liuxiaoli@chec.com.cn)。