

Analysis of the Optimal Capacity Ratio of Photovoltaic Projects Based on KWH Cost Analysis Method

Jinyuan Li¹ Shoucheng Wu^{2*}

1. Guodian Electric Power Comprehensive Energy Inner Mongolia Co., Ltd., Ordos, Inner Mongolia, 1017010, China
2. PowerChina Shanghai Electric Power Engineering Co., Ltd., Shanghai, 200025, China

Abstract

Appropriately increasing the ratio of module capacity of photovoltaic power station and inverter capacity has become an effective means to improve the comprehensive utilization rate of photovoltaic system, reduce the system kilowatt-hour cost (LCOE), and improve the revenue. Solar energy resources, power station investment cost, on-grid electricity price, actual attenuation of components, performance difference of inverter, system design and other factors will have a certain impact on the design of the optimal capacity ratio. Based on the principle of optimal KWH cost, this paper determines the optimal capacity ratio of the project, and gives the calculation case of capacity ratio combined with the project practice, which proves that this design method can be used for engineering optimization design. Through the study, it is found that the consistency law between the optimal capacity ratio and the change of the annual utilization hours provides a reference for the preliminary judgment of the optimal capacity ratio interval of other subsequent projects.

Keywords

kilowatt cost (LCOE); capacity ratio; installation capacity; rated capacity

基于度电成本分析方法的光伏项目最优容配比分析

李晋原¹ 吴守城^{2*}

1. 国电电力综合能源内蒙古有限公司, 中国·内蒙古·鄂尔多斯 017010
2. 上海电力设计院有限公司, 中国·上海 200025

摘要

适当提高光伏电站组件容量与逆变器容量比例, 已成为提高光伏系统综合利用率、降低系统度电成本(LCOE)、提升收益的有效手段。太阳能资源、电站投资造价、上网电价、组件实际衰减情况、逆变器的性能差异、系统设计等因素都会对最优容配比设计产生一定的影响。论文基于度电成本最优的原则, 确定项目的最优容配比, 并结合项目实践给出了容配比计算案例, 实践证明该设计方法可用于工程优化设计。通过研究发现, 最优容配比与逐年利用小时数变化的一致性规律, 为后续其他项目初步判断最优容配比区间提供参考依据。

关键词

度电成本(LCOE); 容配比; 安装容量; 额定容量

1 引言

近年来, 随着中国光伏组件和逆变器技术的发展和产业规模的扩大, 光伏电站核心设备的成本不断降低, 中国光伏发电进入了平价时代。为了使光伏电站获得更好的投资收益, 可通过采用高效的双面光伏组件、提高光伏电站的容配比等措施, 减少光伏电站的初始投资或提升其发电量。

根据 NB/T 10394—2020《光伏发电系统效能规范》中

的表述, 光伏组件的安装容量(即光伏组件的标称功率之和) P_{DC} 与逆变器的额定容量 P_{AC} 之比称为容配比 N , 按下式计算:

$$N = \frac{P_{DC}}{P_{AC}}$$

在中国光伏应用早期, 由于光伏组件价格较高, 系统一般按照 1:1 的容配比设计, 这就导致逆变器长期不能满载运行, 造成了逆变器的容量浪费。该设计方案主要存在两点劣势: ①实际运行中受失配、线损、灰污等损耗影响, 直流侧发电功率会有一定折损, 使得实际逆变器额定工作时间缩短; ②以 25 年全生命周期考虑, 后期组件功率衰减, 逆变器利用率进一步下降, 无形中造成逆变器投资的浪费。

因此, 适当提高光伏电站组件容量与逆变器容量比例,

【作者简介】李晋原(1985-), 男, 中国内蒙古鄂尔多斯人, 本科, 工程师, 新能源产业及新能源发电研究。

【通讯作者】吴守城(1990-), 男, 中国江苏盐城人, 硕士, 工程师, 从事新能源发电研究。

即超配设计，已成为提高光伏系统综合利用率、降低系统度电成本（LCOE）、提升收益的有效手段。其中，图 1 为容配比优化模型。

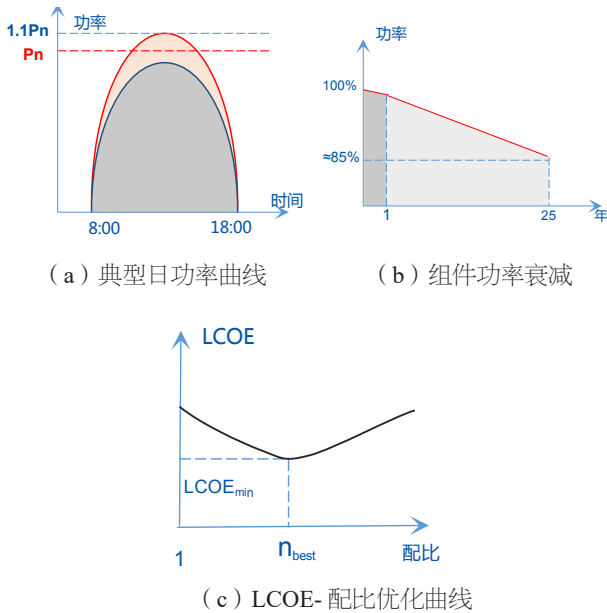


图 1 容配比优化模型

2 项目容配比影响因素

光伏组件的功率均按照标准条件（STC：组件温度 25℃，辐照度 1000W/m²）标定，实际应用中，各地区的光照条件、环境温度、组件安装方式均不同，同时考虑灰尘遮挡、组件失配以及组件输出到逆变器之间直流线缆损耗等因素，逆变器的实际输入功率远小于组件的标称功率。

中国太阳能资源地区区分可分为 4 类，不同区域辐照度

差异较大，实际数据表明，即使在同一资源地区，不同地方的全年辐射量也有较大差异，尤其是海拔、直射比不同，其发电量差异更大，如图 2 所示。

光伏组件输出经过直流电缆、汇流箱等设备到达逆变器，各个环节都有损耗，同时灰尘遮挡等原因会引起组件串并联失配，因此实际传输到逆变器的直流功率将远小于组件额定功率。不同电站实测平均数据表明，电站直流侧的总损耗约为 8%~13%（此处系统损耗不包括逆变器后级的变压器及线路损耗）。

因此，在组件标称功率与逆变器额定功率相等的情况下，由于客观存在的系统损耗，即使在 STC 条件下，逆变器实际输出功率仅为逆变器额定功率的 90% 左右，仍未满载工作，因此降低了逆变器和系统各部件的利用率，同时增加了系统损耗。

除了上述因素外，电站投资造价、上网电价、组件实际衰减情况、逆变器的性能差异、系统设计等因素都会对最优容配比设计产生一定的影响。

3 最优容配比计算方法

按照不同的原则，容配比可分为两类：第一类为补偿超配，以系统不会出现限功率为原则增大系统容配比；第二类为主动超配，以系统 LCOE 最低为原则增大系统容配比，由于会出现逆变器限功率的情况，系统将会损失一部分能量，但是综合投资与产出，系统的度电成本会达到最低。

相较项目内部收益率，LCOE（度电成本）能更直观地反映扩容工程所带来的发电量收益，并排除其他财务指标变化造成的结果扰动。因此，采用 LCOE 作为经济效益的考核指标更佳。

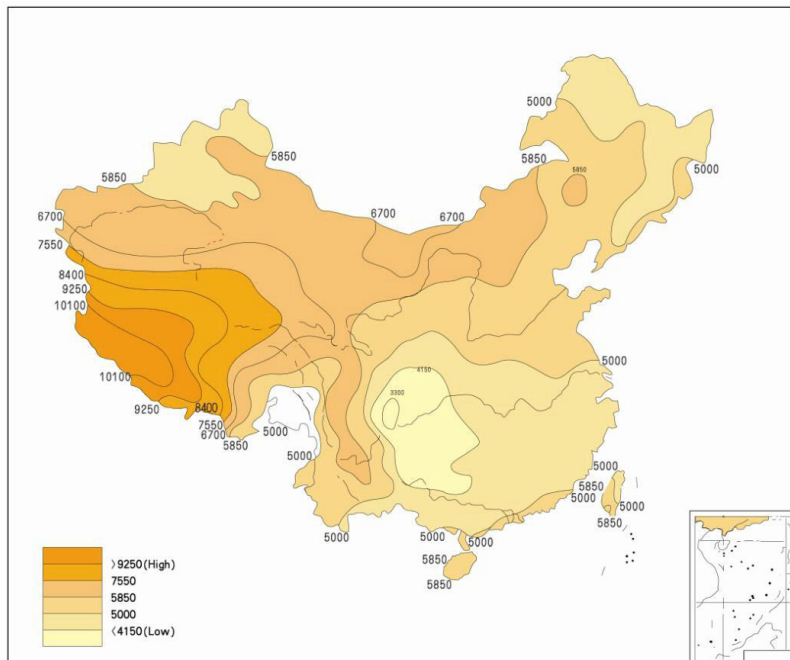


图 2 中国太阳能资源分布图（MJ/m²）

常用 LCOE (Levelized Cost of Electricity, 平准化发电成本) 来衡量光伏电站整个生命周期的单位发电量成本, 并可用来与其他电源发电成本对比。在全投资模型下, LCOE 与初始投资、运维费用、发电小时数有关。

$$LCOE = \frac{\text{初始投资总成本} + \text{运维总成本} - \text{系统残值}}{\text{生命周期的总发电量}}$$

LCOE 亦可表示为:

$$LCOE = \frac{\sum_{i=0}^n C_i(1+DR)^{-i}}{\sum_{i=0}^n E_i(1+DR)^{-i}}$$

式中: C_i ——为光伏电站全寿命周期内第 i 年的成本, 包括光伏电站的初始投资成本、逐年生产总成本等;
 E_i ——光伏电站全寿命周期内第 i 年的发电量;
 N ——光伏电站全寿命周期年限, 此处取 25;
 DR ——折现率, 此处建议取 5%。

4 容配比优化计算案例

案例计算背景: 某 300MW 光伏项目, 系统配置方案中组件选用 540W_p 单晶硅单面组件, 逆变器拟选择 3125kW 箱逆变一体机, 采用 23° 倾角式方案, 项目寿命期为 25 年。运维成本包括材料费 15 元 /kW、其他费用 15 元 /kW、人员工资按 10 人 (每 50MW 增加 2 人), 工资按 8 万 / 年, 福利费及其他 60%, 修理费率为 0.6%、保险费率为 0.25%, 贴现率取 5%。

按以上方案来测算不同容配比对应的度电成本, 分析计算结果见表 1。

由表 1 及图 3 可知, 由于容配比提高, 工程整体造价也必将上升, 但单位造价随着整体容量增加而降低。随着容配比的提升, 直流侧装机提高, 因逆变器功率限制而造成的发电损失、交直流线损亦不断增加, 体现在项目首年利用小时数上会更加显著。据计算结果显示, 本项目最低度电成本对应的容配比为 1.6 : 1。

表 1 容配比分析计算过程表

序号	项目	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	直流 / 交流容配比	1	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8
2	直流侧容量 (MW _p)	300	330	360	390	420	450	480	510	540
3	交流侧容量 (MW)	300	300	300	300	300	300	300	300	300
4	系统总造价 (万元)	126000	136710	147420	158130	168840	179550	190260	200970	211680
5	光伏系统造价 (元 /W _p)	4.200	4.143	4.095	4.055	4.020	3.990	3.964	3.941	3.920
6	首年发电小时数	1226	1225	1225	1224	1223	1218	1210	1198	1183
7	年均发电小时数	1145	1144	1144	1143	1142	1141	1137	1129	1119
8	修理费 (万元 / 年)	688.0	746.4	804.9	863.4	921.9	980.3	1038.8	1097.3	1155.8
9	材料费 (万元 / 年)	450	495	540	585	630	675	720	765	810
10	其它费 (万元 / 年)	450	495	540	585	630	675	720	765	810
11	工资 (万元 / 年)	128	128	153.6	153.6	179.2	179.2	204.8	204.8	230.4
12	保险 (万元 / 年)	172.0	186.6	201.2	215.8	230.5	245.1	259.7	274.3	288.9
13	运维费用 (万元 / 年)	1888.0	2051.0	2239.7	2402.8	2591.5	2754.6	2943.3	3106.4	3295.1
14	运维费用 (万元, 贴现后)	26608.7	28907.3	31566.8	33865.5	36524.9	38823.6	41483.1	43781.7	46441.2
15	增值税抵扣 (万元)	11340	12304	13268	14232	15196	16160	17123	18087	19051
16	项目成本 (亿元)	14.127	15.331	16.572	17.776	19.017	20.221	21.462	22.666	23.907
17	电量 (亿 kWh, 贴现后)	49.108	54.000	58.881	63.753	68.605	73.370	77.939	82.210	86.213
18	度电成本 (元 /kWh)	0.2877	0.2839	0.2814	0.2788	0.2772	0.2756	0.2754	0.2757	0.2773

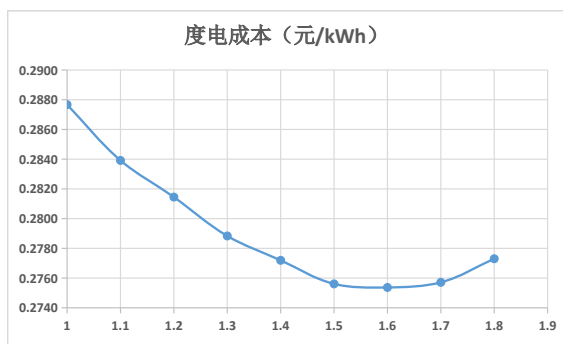


图3 不同容配比下度电成本分析结果

不同容配比取值下,系统发电量的变化见图4,以首年利用小时数变化情况分析,在配比提升的同时系统利用小时数在1~1.4配比间基本无明显降低,配比在1.5以上时,首年发生因超配引起的限电,且随着配比的不断提高,限电损失增加。若以末年利用小时数分析,在1~1.6配比间基本无明显降低,1.7配比时明显降低。若从25年年均值考虑,在1~1.5配比间基本无明显降低,1.6配比时明显降低。该趋势直接印证了提升项目容配比,以此提高整个生命期内设备利用率、提升项目经济性的设计初衷。

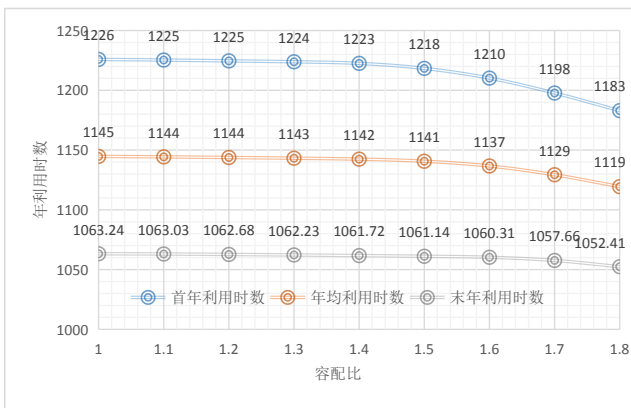


图4 不同容配比下发电利用小时数变化情况

5 项目实际容配比选择受限因素

仍以案例中项目为例,上述模型分析未考虑到本项目用地面积的限制,因此当交流侧项目容量固定后,其容配比

的上限值往往受限于直流侧装机容量的最大值。该总用地面积为8850亩,剔除红线内村庄、工厂、道路等不可利用面积,项目实际可利用面积约7100亩,按当地单位MW净占地面积约20亩,实际最大可开发容量约355MW,因此容配比上限为1.18。

此外,一些发电集团对于容配比的限制仍存在一刀切的现象,如某集团要求光伏项目容配比不超过1.3。该规定在资源条件好的A类及B类地区较为适用,但随着光伏项目成本的降低,在C类资源区的项目也益发增多,因此在资源条件一般的地区建设光伏电站时,需要与建设单位进一步沟通好设计细节。

如追溯到项目立项阶段,项目立项报备容量以交流侧容量为主,但在很多设计院或业主方在前期容量预估时仍以直流侧容量为主,通过单位MW占比指标估算直流侧,并适当保留20%左右的裕量。这一做法往往造成项目土地储备不足以支撑高容配比的设计方案,尤其是资源条件一般的地区。因此我们在项目的前期工作中需要考虑到容配比的因素,为项目进一步提升经济性预留空间。

6 结论

论文基于度电成本最优的原则,确定项目的最优容配比,并结合项目实践给出了容配比计算案例,实践证明该设计方法可用于工程优化设计。

通过研究发现,最优容配比与逐年利用小时数变化的一致性规律,为后续其他项目初步判断最优容配比区间提供参考依据。另外分析了实际工程中容配比取值受限的影响因素,为其他阶段的工作提供指导依据。

参考文献

- [1] 方勇,李光达,李绍震.光伏发电系统的LCOE及最优容配比分析[J].太阳能,2023(4):36-43.
- [2] 陆炜,田介花,潘少峰.双面组件光伏电站最优容配比的研究[J].太阳能,2021(2):44-52.
- [3] 张宇翔,何海艳,黄骏飞,等.基于平准化度电净现值模型的轨道交通光伏发电储能一体化项目的经济效益分析[J].城市轨道交通研究,2023,26(10):103-108+115.