

并网型分布式光伏电站待机运行状态下的降损优化策略

胡华友^{*}, 朱高麟, 吴云来

(浙江正泰新能源开发有限公司, 杭州 310053)

摘 要: 光伏发电的输出功率存在明显的间歇性和波动性, 其不参与电力平衡调节, 只提供电量价值, 不提供容量价值。因此针对分布式光伏电站的研究主要集中在提升系统发电量和发电效率等方面, 而对于分布式光伏电站在夜间不发电的待机运行状态, 即处于并网状态但无发电功率输出情况下的电站模型未形成完整的分析论证。选取典型的已并网分布式光伏电站, 对其待机运行状态下各类负荷进行分类, 通过理论建模计算, 并结合电站实际运行数据做对比性验证, 分析其理论损耗电量与实际损耗电量的偏差及损耗电量占总发电量的构成比例, 据此推导出降低损耗的路径。经实测, 在满足分布式光伏电站安全运行的条件下, 通过改变原有系统运行方式、降低设备空载运行时间等策略, 可达到降低待机损耗电量的效果, 电站整体发电量提升约1%, 获得了更好的财务收益率。

关键词: 光伏发电; 分布式光伏电站; 待机运行; 待机损耗; 降损策略; 发电量增益

中图分类号: TK513.5

文献标志码: A

0 引言

分布式光伏电站属于间歇性发电电源, 在一天中, 其功率输出的时间段相对固定: 当光照强度满足电站最低启动条件时, 电站进入并网发电运行状态; 随着时间的推移, 光照强度逐渐降低, 电站进入待机运行状态, 不再向电网提供电量, 电站由发电性质转变为用电负荷用电性质。与传统的燃煤发电、水轮发电机组相比, 光伏发电的输出功率波动明显, 功率幅值变化的预测难度高, 其发电特性决定了电气设备的工作特性, 即电气设备的利用率不高, 运行工况轻载现象严重, 因此, 常采用增大直流侧超配比例或配置一定容量的储能系统等方式来进行改善。

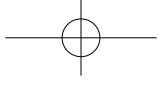
针对分布式光伏电站在并网发电运行状态下如何提升整体发电量已有较多研究, 技术成熟; 而针对分布式光伏电站待机运行状态下产生的待机损耗的分析, 大多仅停留在理论阶段, 未形成

全面的关注度, 忽略了待机损耗电量价值、待机状态用电电价与光伏发电电价的差额。文献[1-2]对传统电力网络的各类损耗单元进行了模型分类及损耗计算, 并根据其在总线损中的构成比例提出了相适应的降损策略。文献[3-4]针对分布式电源接入后对电力网络潮流的影响进行了分析, 对整体损耗产生的影响进行了计算, 并由此推导出最佳分布式电源准入容量。文献[5]提出了变压器在谐波作用中的损耗分析及对绝缘寿命的影响。文献[6]考虑了在电网中通过配置无功补偿装置来降低损耗的分析。文献[7-8]提出了大规模分布式电源接入后对配电网产生的影响。文献[9-10]提出了一种在过电压限制下的最大可接入分布式电源容量。文献[11]提出了一种含光伏发电系统的配电网电压越限的解决方案。

并网型分布式光伏电站在不发电状态下, 光伏升压变处于待机运行状态, 虽然有针对光伏等

收稿日期: 2019-08-27

通信作者: 胡华友(1990—), 男, 本科、中级工程师, 主要从事光伏发电系统设计优化、系统发电量提升策略等方面的研究。hhuayou@163.com



新能源发电的政策支持,光伏电站新增升压变压器的容量费不计入电费,但待机电量损耗是正常存在的。经调研后发现,在大量的已并网高、低压光伏电站中,低压光伏电站的待机年自用电率在 1% 以内,高压光伏电站因存在大量变压器空载运行的情况,其待机年自用电率一般在 2% 以内。目前,暂无专门针对分布式光伏电站如何降低待机损耗的相关策略。本文通过对已并网分布式光伏电站的待机损耗进行分类,分析了各类损耗的比重,并提出了适宜的降损运行策略。

1 待机电量贸易结算

1.1 典型分布式光伏电站的计量点设置

按照上网模式不同,分布式光伏电站主要分为“全额上网”电站和“自发自用,余量上网”电站 2 大类,且 2 类电站接入电网的位置不同。一般分布式光伏电站会设置 2 个计量点,分别为关口计量表、发电计量表。关口计量表为结算返送至上一级电网的上行电量,发电计量表分别结算光伏发电量补贴的上行电量和待机运行损耗的下行电量。

1.2 待机计费原则

光伏电站待机运行是指维持电站并网最小的损耗功率,待机运行损耗电量可能过发电计量表的下行电量读取,电价为实时的公网电价。

2 分布式光伏电站待机损耗模型

2.1 负荷分类

从电网负荷分类角度来看,分布式光伏电站在待机运行状态下为感性负荷,其主要负荷元件包括变压器、逆变器、电缆及暖通照明设备等。由于电站在待机运行状态下的负载电流值很小,变压器的状态接近空载运行,因此,根据变压器的损耗计算公式,在一定的负载电流条件下,总有功损耗 P_L 可表示为:

$$P_L = P_0 + (I^2/I_n^2)P_k \quad (1)$$

式中, P_0 为空载损耗; P_k 为额定负载损耗; I 为变压器的运行电流; I_n 为变压器的额定运行

电流。

待机运行状态时, (I^2/I_n^2) 的比值接近零,因此,总有功损耗可近似认为等于空载损耗。此运行状态下,分布式光伏电站的主要负荷的分类如表 1 所示。

表 1 分布式光伏电站主要负荷的分类

Table 1 Main load classification of distributed PV power station

设备	负荷分类
变压器	空载损耗 /W
逆变器	待机损耗 /W
电缆	充电功率 /W
暖通照明设备	换热功率 /W

2.2 负荷理论计算

以浙江区域的典型并网型分布式光伏电站为例,通过计算其理论的待机损耗值和实际的待机损耗值的偏差来作为制定降损策略的依据。该分布式光伏电站的基本情况为:在框架式混凝土屋顶上采用小倾角安装光伏组件,装机容量为 1.46 MW,采用 1 台标准的 1.26 MW_p 逆变升压单元,“手拉手”环接至原 10 kV 供电开关柜,并网方式采用“自发自用,余量上网”。该分布式光伏电站的主要负荷损耗功率及损耗占比如表 2 所示,主要负荷的损耗功率如图 1 所示。

表 2 主要负荷的损耗功率及损耗占比

Table 2 Main load loss power and loss proportion

设备名称	设备数量	损耗功率 /W	损耗占比 /%
1600 kVA 变压器	1	2450	55.06
630 kW 逆变器	2	200	4.49
电缆	1	300	6.74
其他	1	1500	33.71
合计	5	4450	100.00

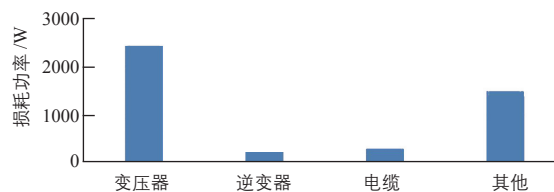


图 1 主要负荷的损耗功率

Fig. 1 Main load loss power

为简化计算，分布式光伏电站在待机运行状态下的损耗模型可简化为一定条件下功率相对恒定的感性负载，夜间用电功率因数 $\cos\phi$ 取 0.8，电站损耗计算的边界条件选取典型日发电输出功率曲线，并网发电日均运行时间 t 按 06:00 ~ 18:00 计算，其余时间为待机运行。因此，分布式光伏电站的理论日均待机损耗电量 W_{day} 为：

$$W_{\text{day}} = \int_{05:00}^{19:00} pt = \int_{05:00}^{19:00} uicos\phi t \quad (2)$$

式中， p 为分布式光伏电站的功率； u 为分布式光伏电站的电压； i 为分布式光伏电站的待机电流； ϕ 为功率因数角。

将相关数据代入式 (2) 可知， W_{day} 为 42.72 kWh。

折算至每月，则理论月均待机损耗电量 W_{month} 为 $W_{\text{day}} \times 30 = 1281.6$ kWh。

2.3 典型分布式光伏电站的待机电量分析

仍以上文所选典型并网型分布式光伏电站为例，从监控后台调取该电站 2018 年实际运行的总发电量、自发自用电量、上网电量、待机损耗电量等数据，具体如表 3 所示。该分布式光伏电站的 2018 年电量结算折线图如图 2 所示。

表 3 分布式光伏电站 2018 年的全年电量数据

Table 3 Annual electricity data of distributed PV power station in 2018

月份	总发电量 /kWh	自发自用电量 /kWh	上网电量 /kWh	待机损耗电量 /kWh	待机损耗率 /%
1	158140	155140	3000	2980	1.88
2	84540	55440	29100	1220	1.44
3	120700	103500	17200	1120	0.93
4	157620	125820	31800	1100	0.70
5	136540	114940	21600	1020	0.75
6	146640	127040	19600	1220	0.83
7	174960	167260	7700	1200	0.69
8	196920	191220	5700	1340	0.68
9	148500	144800	3700	1320	0.89
10	133760	118460	15300	1420	1.06
11	97180	93080	4100	1360	1.40
12	62740	62440	300	1320	2.10
合计	1618240	1459140	159100	16620	1.11

注：待机损耗率 = 待机电量 / 总发电量 × 100%

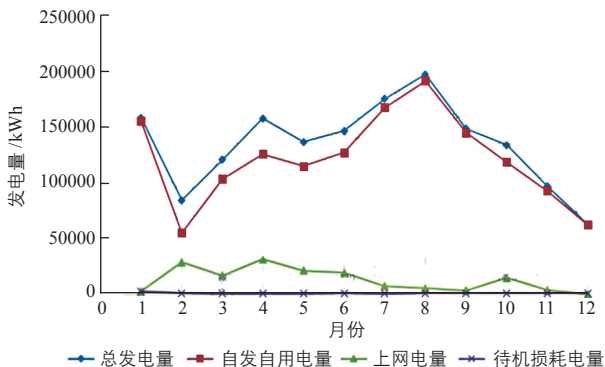


图 2 分布式光伏电站 2018 年的电量结算折线图

Fig. 2 Electricity settlement break-line diagram of distributed PV power station in 2018

由图 2 可得出以下结论：

1) 根据分布式光伏电站的实际月均待机损耗电量值曲线可知，其基本与理论月均待机损耗电量值在同一水平，实际值符合设计预期值。

2) 分布式光伏电站的待机损耗电量与总发电量大小无关，是由分布式光伏电站的系统配置决定的。待机损耗电量全年浮动不大，曲线基本呈水平直线状，保持稳定。

3) 分布式光伏电站的待机损耗率与电站的总发电量呈负相关，即当总发电量越大时，站用电率较小，在总发电量较高的 3 ~ 10 月，待机损耗率在较低范围内波动。

4) 降低分布式光伏电站的待机损耗电量相当于从另一个方面提升了电站的整体发电量，可提高电站的财务收益率，也是电站高水平设计和运维的反映。同时，对待机损耗率占比过高的分布式光伏电站来说，应加强运维管理，与周边地区同类型分布式光伏电站进行多维对比，分析其损耗源头，避免发生类似“夜间窃电”的现象。

3 降低待机损耗的若干策略

3.1 设定定时限投切开关

分布式光伏电站在待机运行状态下，光伏变压器由并网发电时的升压变压器转变为负荷的降压变压器，主要的负荷源点为变压器单元，占电站总损耗的比例为 55.06%。因此，降低变压器的空载损耗，可大幅降低电站的待机损耗，是实

现光伏电站降损的高效路径。

降低变压器待机运行的时间,将变压器高压侧的开关设置为定时限的自动投切的标准单元,使其实现在任意一天的固定时间段开关的运行状态。当分布式光伏电站转变为待机运行状态时,将变压器高压侧开关投退,将变压器从光伏发电系统中隔离切出;当分布式光伏电站转变为发电运行状态时,将变压器投入运行。投切时间段可以根据电站所在地的典型日最大发电时间曲线进行设计。另一种方法是增加检测电流互感器,当电流超过发电电流阈值或小于待机负荷电流值时,通过触发信号,启动或关闭高压侧开关来实现投切时间段的设定。

当存在多级光伏升压变压器“手拉手”运行时,考虑到变压器投切时对电网的冲击,以及变压器的励磁涌流对变压器寿命的影响,可在每一级变压器投切时间上设置级差,分段投切。

对于给定的变压器,其空载损耗和额定负载损耗值是常数。变压器的负载损耗值与负载率呈双曲线关系,随着负载率增大,负载损耗值也随之增大,然后当负载率达到“1”时,此时的负载损耗为额定负载损耗。

以1台10 kV、1250 kVA的干式升压变压器为例,其空载损耗为2.09 kW,按每天空载运行时间12 h估算,年均节省电量9154.2 kWh,25年累计可节省电量228855 kWh,即相当于电站发电量可提升228855 kWh。

3.2 灵活调节变压器的运行方式

分布式光伏电站输出功率随太阳辐照度的变化而波动,其平均系统效率约为80%。而分布式光伏电站中电气设备的设计是按照直流侧额定容量设计的,导致电气设备在多数情况下处于轻载状态,如此造成初始投资增大,运行损耗增加。分布式光伏电站典型日功率曲线如图3所示。

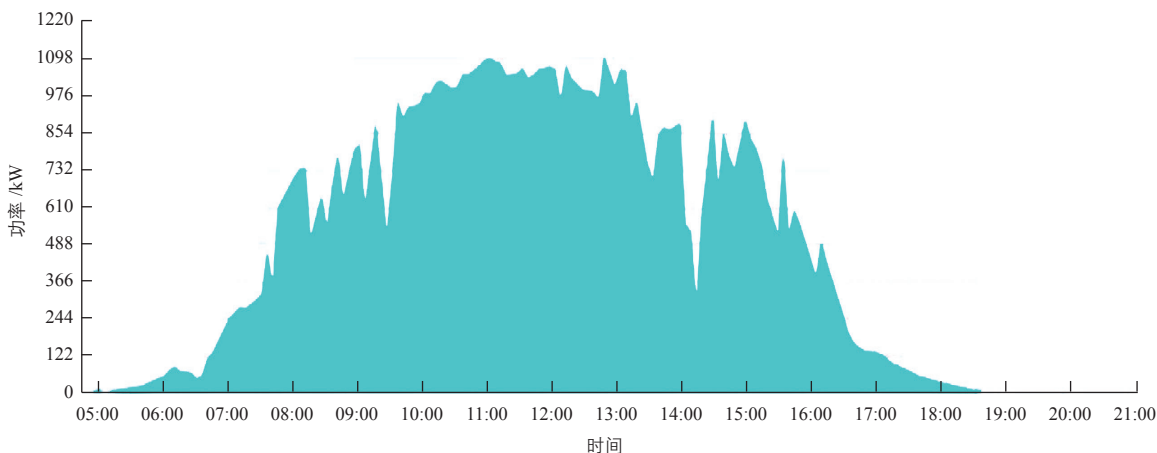


图3 分布式光伏电站的典型日功率曲线

Fig. 3 Typical daily power curve of distributed PV power station

调整变压器的运行方式,改善设备轻载或闲置运行工况,可以降低变压器的负载损耗。当分布式光伏电站处于发电低谷时间段时(满足2台升压变的发电电流之和不大于任意1台的额定电流值),可灵活切换2台变压器的运行模式,通过投入联络开关 QF_3 ,断开 QF_1 、 QF_2 ,将1#变压器下的负荷电流转移至2#变压器。变压器的桥接运行方式如图4所示。

1) 2台变压器并列运行时,变压器的负载损耗为:

$$P_{L1}=2[P_0+(I^2/I_n^2)P_k] \quad (3)$$

2) 2台变压器合并运行时,变压器的负载损耗为:

$$P_{L2}=P_0+(4I^2/I_n^2)P_k \quad (4)$$

当 $P_{L1}=P_{L2}$ 时,并列运行与合并运行的损耗值相等,可求解出此时的临界电流值 I_p 。

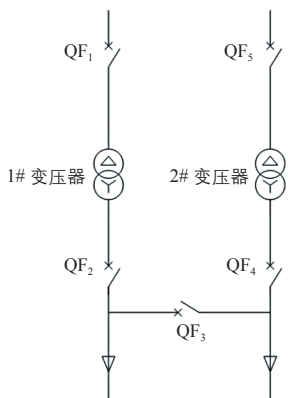
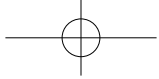


图4 变压器的桥接运行方式

Fig. 4 Bridge operation mode of transformer

当运行电流 I 小于临界电流 I_p 时，合并运行的损耗值小于并列运行时的值；当运行电流 I 大于临界电流 I_p 时，合并运行的损耗值大于并列运行时的值。因此，可根据实时光伏发电输出功率来灵活调节变压器的运行方式，从而降低变压器损耗。

3.3 选用非晶合金型变压器

变压器的空载损耗包含铜损和铁损，夜间当变压器处于空载运行状态时，其空载损耗主要为铁损，铁损和变压器线圈材料的导磁率有关。因此，为了从源头上降低铁损，可以选用空载损耗更低的材料，比如非晶合金型变压器，可使空载损耗值大幅降低。

在相同使用条件下，非晶合金型变压器的空载损耗约为常用的环氧树脂型变压器的 $1/3$ ，大幅降低了变压器的空载损耗。

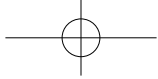
4 结论

并网型分布式光伏电站的待机损耗主要来源于升压变压器的空载损耗，其占总损耗比例较大

且数值相对固定。本文提出了并网型分布式光伏电站待机运行状态下的降损优化策略，通过从控制变压器的空载运行时间来降低损耗、改变现有电网的连接结构、更换空载损耗更低的升压变等策略来实现，并可根据分布式光伏电站的实际情况进行灵活改造。综上所述，待机损耗的降低可以通过多途径降损策略来实现，总的原则是在保证系统安全运行的基础上，充分利用已有设备，改善设备轻载或闲置运行工况，将损耗控制在最优范围内。

【参考文献】

- [1] 余卫国,熊幼京,周新风,等. 电力网技术线损分析及降损对策[J]. 电网技术, 2006, 30(18): 55 - 57.
- [2] 贺先豪,彭建春,龚演平. 配电网降低线损的误区研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(1): 96 - 99.
- [3] 桑静静,赵庆生,何志方. 光伏并网对配电网电压及网的影响[J]. 可再生能源, 2013, 3(4): 11 - 15.
- [4] 张瑜,孟晓丽,方恒福. 分布式电源接入对配电网线损的影响分析[J]. 电力建设, 2011, 32(5): 67 - 69.
- [5] 王释颖,赵莉华,卢孔实. 谐波电流作用下变压器损耗及绝缘寿命的计算[J]. 电力系统及其自动化学报, 2016, 28(7): 79 - 82.
- [6] 刘甲庆,张皓,章健. 中压配电网计及动态无功补偿装置的理论线损计算[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(6): 92 - 95.
- [7] 丁明,王伟胜,王秀丽. 大规模光伏发电对电力系统影响综述[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(1): 1 - 12.
- [8] 黄伟,董旭柱,雷金勇. 大容量分布式光伏并网对配电网综合影响分析[J]. 电力系统及其自动化学报, 2016, 28(11): 44 - 49.
- [9] 范元亮,赵波,江全元. 过电压限制下分布式光伏电源最大允许接入峰值容量的计算[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(17): 40 - 44.
- [10] 刘健,同向前,潘忠美. 考虑过电压因素时分布式光伏电源的准入容量[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(6): 45 - 51.
- [11] 李清然,张建成. 含分布式光伏电源的配电网电压越限解决方案[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(22): 117 - 123.



LOSS REDUCTION STRATEGY FOR STAND BY IN-GRID DISTRIBUTED PV POWER STATIONS

Hu Huayou, Zhu Gaolin, Wu Yunlai

(Zhejiang Zhengtai New Energy Development Co., Ltd., Hangzhou 310053, China)

Abstract: The output of PV power generation has obvious characters of intermittence and fluctuation. It does not participate in the power balance regulation, only provides the power value and does not provide the capacity value. The current researches mainly focus on improving the power generation capacity, power generation efficiency and other aspects. The distributed PV power station model is not completed and the analysis has not been demonstrated when the distributed PV power station works at night, it is connected to the grid but does not generate power. We selected a typical in-grid distributed PV power station, to classify all kinds of loads under the standby operation state of the distributed PV power station and analyzed the deviation between the theoretic loss and actual loss. Through calculating the proportion of the loss to the total generation by theoretical modeling and comparing with the actual operation data of the distributed PV power station, the path of loss reduction is deduced. Under the premise of safe operation of the distributed PV power stations, by changing the original system operation mode and reducing the no-load operation time of the equipment, the standby power consumption has been reduced and the overall power generation has increased by about 1%, resulting in better financial gain.

Keywords: PV power generation; distributed PV power station; standby operation; standby loss; loss reduction strategy; power generation gain