

分布式光伏系统最优运维周期确定方法

尹德扬¹,梅飞²,郑建勇¹,赫卫国^{3,4},祁晓婧¹

(1. 东南大学 电气工程学院,江苏 南京 210096;2. 河海大学 能源与电气学院,江苏 南京 211100;
3. 东南大学 自动化学院,江苏 南京 210096;4. 中国电力科学研究院有限公司,江苏 南京 210003)

摘要:目前光伏运维周期主要由人工经验确定,成本过高,不利于光伏产业的发展,为此,提出一种考虑分布式光伏系统典型场景的最优运维周期确定方法。建立分布式光伏2种典型应用场景数学模型;以光伏可靠性模型以及光伏组件积灰模型为基础,建立运维周期模型;利用蒙特卡洛法计算不同运维周期下由发电损失成本及运维成本组成的运维总成本的概率分布。通过不同算例的模拟结果平均值确定最优运维周期,验证了所提方法的有效性和合理性。

关键词:分布式光伏;运维周期;经济效益;可靠性;组件积灰

中图分类号:TM 721;TM 615

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202202020

0 引言

随着国际社会对生态环境、气候变化、可持续发展等问题的日益重视,加快开发利用可再生能源已成为世界各国发展的重中之重。在各种可再生能源中,光伏(PV)具有清洁、高效、可循环发展等优势,应用尤为广泛。我国光伏发电装机容量增长迅速,据国家能源局统计,2015年我国已成为世界光伏装机容量第一大国。截至2020年2月底,我国分布式光伏新增装机容量 1.220×10^7 kW,同比增长41.3%,光伏发电累计装机容量达到 2.043×10^8 kW,同比增长17.3%,其中分布式光伏累计装机容量为 6.263×10^7 kW,同比增长24.2%^[1]。未来光伏发电尤其是分布式光伏发电将在我国能源供给结构中占据重要地位。如果按照光伏发电平均成本5元/W、运维占1%的成本进行计算,则分布式光伏运维市场规模将突破30亿元^[2]。目前,分布式光伏运维已逐渐向智慧化、平台化发展,对运维的经济性提出了更高的要求。合理安排光伏运维任务、确定最优运维周期可以有效降低运维成本,提高光伏收益,具有重要的现实意义。

分布式光伏系统故障设备维修是光伏运维的一项重要内容,这对于确定运维周期以及分析光伏系统的可靠性至关重要。目前,关于光伏系统可靠性的研究模型主要分为2类:一类是基于元件故障的可靠性模型,另一类是基于资源限制的可靠性模型。研究方法主要包括可靠性框图、故障树分析和马尔科夫法。文献[3]利用指数概率分布的故障树法分

析光伏系统可靠性。文献[4]建立光伏系统主要组成部分的可靠性评估模型,并利用马尔科夫链蒙特卡洛方法评估光伏系统可靠性。

光伏组件的清洗工作是光伏运维的另一项重要内容。光伏系统长期工作在暴露环境中,空气中的微小颗粒易在组件面板上积累形成积灰。积灰会降低光伏透光率,减少光伏发电量,同时还会导致面板局部过热,引起热斑效应。文献[5]通过对光伏系统积灰情况进行跟踪发现,在1个月内积灰密度增加了 5.44 g/m^2 ,发电量减少了12.7%。文献[6]研究不同灰尘粒径下积灰密度与发电量损失间的关系。众多研究结果均表明,随着时间推移,光伏积灰密度会增加,并会进一步减少发电量。

目前,国内外已有一些学者对光伏运维问题进行了研究。文献[7]详细调研目前美国大部分光伏电站的运维方式及价格,结果表明,光伏运维的预算费用差异较大,依然缺乏成熟的光伏运维体系。文献[8]从严重程度、发生频率、检测精度3个方面评估光伏系统不同故障风险,并提出通过加装过载测量设备和热成像仪等设备减小光伏系统故障风险。文献[9]根据监控数据及环境条件的变化,提出一种基于人工神经网络的光伏可靠性分析工具,基于该工具,提出一种改进的光伏状态维修方案,从而减少直接和间接费用。文献[10]以准备时间和维修时间作为参数,以运维成本最低作为目标函数建立光伏智能运维模型,并利用粒子群优化算法进行求解。文献[11]针对不同的分布式光伏补贴政策,以净现值、内部收益率和动态投资回收期作为指标,计算光伏系统在不同运维模式下的经济效益。文献[12]建立分布式光伏运维模型,在综合考虑运维公司位置、运维人员数量的情况下,使运维总成本达到最优。文献[13]分析温度与暴露时间对光伏组件积灰率的影响,分别建立多元线性回归模型和神经网络模型

收稿日期:2021-05-22;修回日期:2021-12-21

在线出版日期:2022-02-27

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFB1500800)

Project supported by the National Key Research and Development Program of China(2018YFB1500800)

评估每日积灰速率,并利用约旦的数据分析模型的有效性,基于积灰速率模型给出光伏清洗建议。文献[14]构建积灰时间变化渐近模型,并建立电池板积灰费用评估模型来确定最佳清洗周期。然而,目前针对分布式光伏运维的研究大多没有考虑分布式光伏系统结构的影响,也没有综合考虑系统的故障状态及积灰状态。此外,目前缺乏对光伏系统最优运维周期的研究,运维周期主要通过运维人员的经验确定,不利于光伏运维经济效益。

针对以上问题,本文在考虑分布式光伏典型应用场景的基础上,建立运维周期模型,综合分析部件失效损失、组件积灰损失、运维固定成本、运维时间成本等因素,提出一种以经济效益最优为目标的分布式光伏最优运维周期确定方法,并通过不同算例验证了该方法的有效性和合理性。

1 分布式光伏运维周期模型

1.1 分布式光伏最优运维周期确定总体思路

本文的目标是通过建立以经济效益最优为目标的分布式光伏运维周期模型,确定不同场景下的最优运维周期。每次运维需要维修故障部件并清洗光伏组件,所建立模型的输入参数为运维周期候选解,输出参数为最优运维周期和运维总成本。分布式光伏运维总成本主要由两部分构成:一部分是由光伏系统部件失效或光伏组件积灰导致的发电量损失成本;另一部分是每次的运维成本。运维周期越长,则失效的部件越多,累计失效时间越长,同时组件积灰越严重,这会使光伏的发电量低于预期,减少光伏发电经济效益。反之,运维周期越短,则会导致累计的运维成本越高,甚至超过发电量损失成本。因此,本文通过建立分布式光伏运维周期模型寻求发电量损失成本和运维成本间的平衡,达到运维经济效益最优。由于分布式光伏部件的失效是随机发生的,在每个运维周期内的发电量损失成本和运维成本都不尽相同,因此本文建立部件可靠性模型,并采用蒙特卡洛法得到模型结果的概率分布。由于光伏组件积灰会随着运行时间的增加而增加,因此本文建立光伏组件积灰模型以计算当天由积灰造成的发电量损失。

1.2 分布式光伏典型应用场景

对于不同场景下的分布式光伏系统,由于其所处地理环境及连接结构的差异性,最优运维周期也会不同。本文针对2种典型的分布式光伏应用场景分别构建运维周期模型^[15]:第1种场景为家用屋顶式分布式光伏,该场景的典型特征是每户都有包括逆变器、断路器在内的整套设备,单个用户功率较小,一般小于10 kW,由所有用户各自独立的成套设备组成整个住宅小区的光伏发电系统;第2种场景

为分布式光伏电站,该场景的典型特征是系统功率较大,整个系统采用集中连接的方式,共用汇流箱、逆变器、交流配电柜等设备。

本文参考江苏省的分布式光伏案例,着重选取其中关键部件,建立典型分布式光伏系统数学模型。第1种场景共有50个家庭分布式光伏用户,每户装机容量为8 kW,共0.4 MW。每户光伏均由32块250 W的光伏组件、1台直流断路器、1台10 kW逆变器以及1台交流断路器组成。第2种场景总装机容量为1 MW,分布式光伏电站由4000块250 W光伏组件、16个直流汇流箱、2台500 kW逆变器以及1个交流配电柜组成。2种典型应用场景的分布式光伏系统结构见附录A图A1。

1.3 光伏部件可靠性模型

可靠性的定义是,一个部件在特定的环境及操作条件下,在规定的时间内不失效地完成其规定任务的能力^[16]。在可靠性建模中,部件的失效时间是一个随机变量,可以用不同的概率函数来描述。概率密度函数 $f(t)$ 指一个随机变量取一个特定值的相对可能性。部件在某一特定时间 t 之前失效的概率可以用累积密度函数 $F(t)$ 来表示。累计密度函数与概率密度函数的关系为:

$$F(t) = \int_0^t f(\tau) d\tau \quad (1)$$

可靠性函数 $R(t)$ 表示系统在 $(0, t]$ 时间内不失效的概率:

$$R(t) = 1 - F(t) = \int_t^{\infty} f(\tau) d\tau \quad (2)$$

分布式光伏系统部件失效的概率密度函数一般采用指数型分布:

$$f(t) = \lambda \exp(-\lambda t) \quad (3)$$

$$F(t) = 1 - \exp(-\lambda t) \quad (4)$$

$$R(t) = \exp(-\lambda t) \quad (5)$$

式中: λ 为部件失效率,用单位时间内的故障次数来表示,其反比值表示一个元件的平均故障时间间隔。

1.4 光伏组件积灰模型

光伏系统运行在暴露的环境中,会有灰尘覆盖在其面板表面形成积灰,降低面板透光率,从而导致发电效率下降,使同等气象条件下的光伏发电量减少。因此,光伏组件积灰也是导致光伏系统发电量损失的重要诱因,有必要在运维时清洗光伏组件。

目前对光伏组件积灰的研究主要关注于积灰密度和发电量损失的关系,而较少关注积灰速率。本文参考文献[17]的积灰时变模型,模型如式(6)所示。

$$\eta_{\text{ash}}(d) = a [1 - \exp(-bd)] \quad (6)$$

式中: d 表示每次组件完全清洗后的第 d 天; $\eta_{\text{ash}}(d)$ 为第 d 天的发电量损失率; a 和 b 为经验常数,由不同

地区的积灰速率决定。

2 模型实施方法

本文利用 MATLAB 建立分布式光伏最优运维周期模型,模拟运维周期 $T_c \in [10, 50]$ d 的情况。利用蒙特卡洛法在每个运维周期均运行模型 1 000 次以得到每个运维周期的总成本概率分布,最后通过 1 000 次模拟的平均值得到最优运维周期。

每次模拟分布式光伏运行 1 a 时间,模型模拟运行时间间隔为 1 h。全年运维次数为:

$$T_{\text{tot}} = \left\lceil \frac{365}{T_c} \right\rceil \quad (7)$$

式中: T_{tot} 为全年运维次数,全年运行总天数为 $T_c T_{\text{tot}}$; $\lceil \cdot \rceil$ 表示向上取整。根据运维周期 T_c 取值的不同,全年运行总天数有所差别,本文在得到全年运维总成本后,将其除以全年运行总天数,计算出每天的平均值,以消除运行总天数不同带来的影响。

模拟开始后,随着模拟时间推移,分布式光伏系统部件的状态会发生改变。分布式光伏系统部件共有 4 种状态:第 1 种为正常状态,此时光伏部件并网发电,同时随着时间推移,面板上的积灰量不断增加;第 2 种为失效状态,根据文献[18],当光伏组件发生故障时,即使故障没有修复,只要光伏阵列能达到光伏逆变器的最小工作电压,光伏逆变器就可以继续工作,而一旦光伏逆变器发生故障,则不能将其所连组件发出的功率送至电网,相当于组件处在离网状态,因此本文假定光伏组件失效不会影响其他部件的运行,而其他部件失效则会导致与其相连的所有光伏组件离网,发电量变为 0,部件的失效时间由可靠性模型随机确定,一旦部件失效,则将其标记为失效状态;第 3 种为维修状态,处于该状态的部件是失效的,直到维修结束后才恢复至正常状态;第 4 种为清洗状态,由于每块组件的清洗时间很短,无法准确评估积灰导致的发电量变化,因此本文假定在清洗开始至结束的时段内,所有光伏组件的发电量损失率为清洗开始时的一半,当清洁结束后,发电量损失率重新变为 0。

当模型模拟运行时长达到设定的运维周期时,光伏运维公司在 08:00 派出团队对系统进行运维,每天的最长工作时间为 8 h。运维团队的行动包括 4 种:第 1 种为驾车,运维团队驾车从运维公司到分布式光伏系统现场,并在当天运维结束后驾车返回,如果在当天工作时间内没有完成所有运维任务,则需次日重新驾车至现场,同时,本文假设较短的驾车时间不计入工作时间中;第 2 种为打开/关闭部件,在到达现场后,首先将失效部件所连支路的所有设备关闭,使其处于维修状态,在维修完毕后,打开部件,使其恢复至正常状态,本文假设该行动不消耗时间

且没有成本;第 3 种为维修,针对失效部件进行维修,维修时长由部件种类及运维团队人数共同确定;第 4 种为清洗,当所有失效部件维修结束后,对所有光伏组件进行清洗,清洗时长由光伏应用场景、系统规模及运维团队人数共同确定。模型实施方法流程图见附录 A 图 A2。

3 运维经济成本

3.1 发电量损失成本

发电量损失成本主要由光伏系统部件失效损失和光伏组件积灰损失 2 个部分组成。

1) 部件失效损失。

因光伏系统部件失效使光伏组件离线而导致的经济效益损失表示为:

$$C_{\text{loss}}(t) = N_{\text{mod}}(t)P(t)p_{\text{el}} \quad (8)$$

式中: $C_{\text{loss}}(t)$ 为 t 时刻因部件失效而导致的经济效益损失; $N_{\text{mod}}(t)$ 为 t 时刻离线的光伏组件总数,表达式如式(9)所示; $P(t)$ 为 t 时刻单个光伏组件的输出功率; p_{el} 为并网电价。

$$N_{\text{mod}}(t) = n_{\text{mod}}(t) + \sum_i n_i(t)n_{\text{con}}(i) \quad (9)$$

式中: $n_{\text{mod}}(t)$ 为 t 时刻失效的光伏组件总数; $n_i(t)$ 为除光伏组件外在 t 时刻失效的第 i 个部件总数; $n_{\text{con}}(i)$ 为与第 i 个部件连接的光伏组件数量。若线路后端的部件失效,则不再考虑所有之前部件的失效情况,避免重复计算离线光伏组件的数量。

2) 组件积灰损失。

因光伏组件积灰使发电量下降而导致的经济效益损失表示为:

$$C_{\text{ash}}(t) = (N_{\text{tot}} - N_{\text{mod}}(t))P(t)\eta_{\text{ash}}(t)p_{\text{el}} \quad (10)$$

式中: $C_{\text{ash}}(t)$ 为 t 时刻因积灰而导致的经济效益损失; N_{tot} 为光伏组件总数, $N_{\text{tot}} - N_{\text{mod}}(t)$ 表示 t 时刻在线光伏组件总数; $\eta_{\text{ash}}(t)$ 为 t 时刻由积灰导致的发电量损失率。

3.2 运维成本

运维成本主要由运维固定成本以及运维时间成本 2 个部分组成。

1) 运维固定成本。

每次运维的固定成本可表示为:

$$C_{\text{mai}} = 2n_p t_{\text{dr}} c_{\text{dr}} + c_{\text{cl}} \quad (11)$$

式中: C_{mai} 为每次运维的固定成本; n_p 为运维人员数量; t_{dr} 为从运维公司驾车至分布式光伏系统的时长; c_{dr} 为每人每小时的车费; c_{cl} 为每次运维的积灰清洗费用。

2) 运维时间成本。

由于每个运维周期内失效的部件存在差异,因此每次的维修任务都不尽相同。每次运维所需的时间可表示为:

$$t_{\text{tol}}(T) = (N_{\text{fai}}(T)t_{\text{fix}} + t_{\text{cl}}) / n_p \quad (12)$$

式中: $t_{\text{tol}}(T)$ 为第 T 个运维周期内运维所需时间; $N_{\text{fai}}(T)$ 为第 T 个运维周期内失效的部件总数; t_{fix} 为维修每个失效部件所需的时间, 本文假设维修所有部件的耗时是相同的; t_{cl} 为清洗积灰所需时间。本文假设驾车时间不计入运维时间内。

本文假设运维团队每人每天的工作时间为 8 h, 则根据运维所需时间可得每次运维所需天数为:

$$t_{\text{day}}(T) = \left\lceil \frac{t_{\text{tol}}(T)}{8} \right\rceil \quad (13)$$

式中: $t_{\text{day}}(T)$ 为第 T 个运维周期内运维所需天数。

则每次运维所需的时间经济成本可表示为:

$$C_{\text{ti}}(T) = 2(t_{\text{day}}(T) - 1)n_p t_{\text{dr}} c_{\text{dr}} + t_{\text{day}}(T)n_p c_w \quad (14)$$

式中: $C_{\text{ti}}(T)$ 为第 T 个运维周期内运维时间成本; c_w 为每人每天的工资。 $2(t_{\text{day}}(T) - 1)n_p t_{\text{dr}} c_{\text{dr}}$ 表示运维时间每多一天产生的驾车费用。

3.3 运维总成本

将发电量损失成本和运维成本求和可得到分布式光伏全年运维总成本为:

$$C_{\text{tot}} = \sum_{t=1}^{t_{\text{tol}}} (C_{\text{loss}}(t) + C_{\text{ash}}(t)) + \sum_{T=1}^{T_{\text{tol}}} (C_{\text{mai}} + C_{\text{ti}}(T)) \quad (15)$$

式中: C_{tot} 为分布式光伏全年运维总成本; t_{tol} 为全年运行小时数, 其表达式如式(16)所示。

$$t_{\text{tol}} = 24T_c T_{\text{tol}} \quad (16)$$

则分布式光伏平均每天的运维总成本为:

$$C_{\text{mean}} = \frac{C_{\text{tot}}}{T_c T_{\text{tol}}} \quad (17)$$

式中: C_{mean} 为分布式光伏平均每天的运维总成本。

4 模型参数确定

4.1 部件失效率参数

根据文献[19]提供的光伏系统信息, 2种典型分布式光伏部件的失效率分别如附录A表A1和表A2所示。2种典型分布式光伏单个部件所连光伏组件数量分别如附录A表A3和表A4所示。

4.2 组件输出功率

在考虑分布式光伏全年平均每天有效时间为 3.5 h 的情况下, 采用分布式光伏四季平均每日出力曲线计算 t 时刻光伏组件的输出功率 $P(t)$, 如附录A图A3所示。

4.3 积灰模型参数

本文利用江苏某运维公司提供的积灰数据, 计算组件积灰模型的经验常数, 以确定光伏每日的积灰发电量损失率。该公司某小型分布式光伏系统在第 1、5、10、15、20、25、30、35 天的组件效率分别为 13.61%、12.94%、12.68%、12.61%、12.29%、12.02%、

11.92%、11.79%, 则该光伏系统相应的发电量损失率分别为 4.92%、6.83%、7.34%、9.70%、11.68%、12.42%、13.37%。拟合得到积灰模型经验常数 $a=20.48$ 、 $b=-0.0387$ 。则因光伏每日积灰而导致的发电量损失率为:

$$\eta_{\text{ash}}(d) = 20.48 [1 - \exp(-0.0387d)] \quad (18)$$

4.4 经济参数

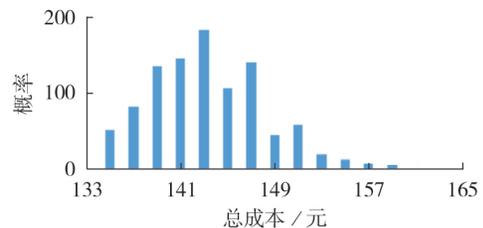
本文假定: 并网电价 $p_{\text{el}}=0.40$ 元/(kW·h), 运维团队共有 2 人, 即 $n_p=2$; 从运维公司驾车至 2 种分布式光伏系统的时长 t_{dr} 均为 1 h; 每人每小时的车费 $c_{\text{dr}}=25$ 元; 维修单个失效部件所需的时间 $t_{\text{fix}}=2$ h; 运维时每人每天的工资 $c_w=600$ 元。

对于家用屋顶式分布式光伏, 单次运维的积灰清洗费用 $c_{\text{cl}}=300$ 元, 清洗积灰所需时间 $t_{\text{cl}}=8$ h。对于分布式光伏电站, 单次运维的积灰清洗费用 $c_{\text{cl}}=2000$ 元, 清洗积灰所需时间 $t_{\text{cl}}=8$ h。

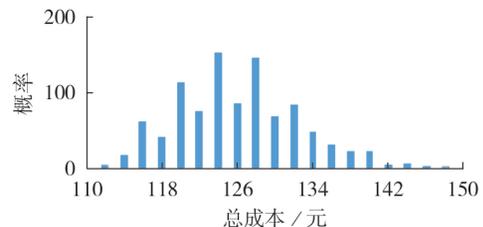
5 结果讨论

5.1 模型运行结果的概率分布

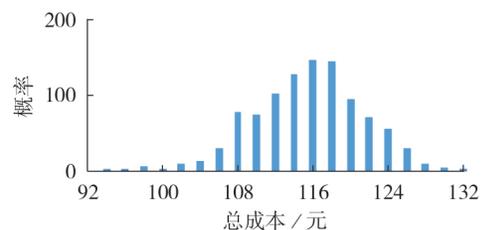
分布式光伏运维周期分别取为 14、21、30 d, 家用屋顶式分布式光伏运维总成本概率分布如图 1 所示, 分布式光伏电站总成本概率分布如附录 A 图 A4 所示。



(a) 运维周期为 14 d



(b) 运维周期为 21 d



(c) 运维周期为 30 d

图1 家用屋顶式分布式光伏运维总成本概率分布
Fig.1 Probability distribution of total operation and maintenance cost of household rooftop distributed PV

对于家用屋顶式分布式光伏,其 1000 次模拟运维总成本的波动主要是由时间成本导致的。从图 1 可以看出,随着运维周期增加,概率分布峰值更加明显,这主要是由于运维周期增加使运维团队行动更加集中,时间成本波动变小。对于分布式光伏电站,其运维总成本的波动主要是由部件失效损失导致的,与家用屋顶式分布式光伏相反,随着运维周期增加,其概率分布更加离散,这主要是由于分布式光伏电站故障率较高,运维周期增加使失效部件数量增多且失效影响更大。

5.2 模型运行结果平均值

5.2.1 基本方案结果

2 种典型场景分布式光伏运维周期的模拟结果平均值如图 2 所示。由图可知,随着运维周期的增加,失效部件数量、失效时间以及积灰程度均增长,2 种典型场景的发电量损失成本均增加。同时,由于运维周期增加,一年内的运维总次数减少,总运维时间缩短,因此 2 种典型场景的运维成本均降低。对于发电量损失成本,家用屋顶式分布式光伏主要为组件积灰损失,而分布式光伏电站主要为部件失效损失,其主要原因是分布式光伏电站部件连接的光伏组件较多且故障率较高。对于运维成本,2 种典型场景均主要为时间成本,由于分布式光伏电站每次清洗所需时间较短,因此其时间成本随运维周期增加下降幅度较小。

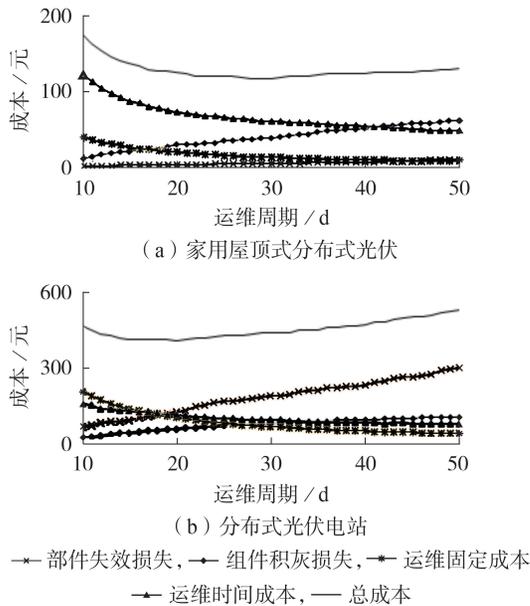


图 2 2 种典型场景分布式光伏最优运维周期及成本
Fig.2 Optimal operation and maintenance cycles and costs of distributed PV under two typical scenarios

由图 2 可知:家用屋顶式分布式光伏的最优运维周期为 29 d,此时运维总成本最优,平均每天的运维总成本为 116.7 元,平均每天的部件失效损失为

4.8 元,组件积灰损失为 37.9 元,运维固定成本为 13.8 元,运维时间成本为 60.2 元;分布式光伏电站的最优运维周期为 20 d,平均每天的运维总成本为 410.6 元,平均每天的部件失效损失为 128.3 元,组件积灰损失为 61.7 元,运维固定成本为 105.0 元,运维时间成本为 115.6 元。

根据传统运维方案得到的家用屋顶式分布式光伏和分布式光伏电站的运维周期分别为 90、30 d,平均每天的运维总成本分别为 152.4、440.7 元。与传统运维方案相比,采用本文方案时,家用屋顶式分布式光伏和分布式光伏电站平均每天可分别节省成本 35.7、30.1 元,全年可分别节省成本 1.3、1.1 万元。可见,本文最优运维周期确定方法显著提高了 2 种典型分布式光伏系统的经济效益。

5.2.2 并网电价对最优运维周期的影响

本文通过改变并网电价 p_{el} 来模拟光伏并网电价调整对最优运维周期的影响。分别设定 p_{el} 为 0.25、0.40、0.55 元 / (kW·h)。2 种场景下不同并网电价的运维总成本如图 3 所示。

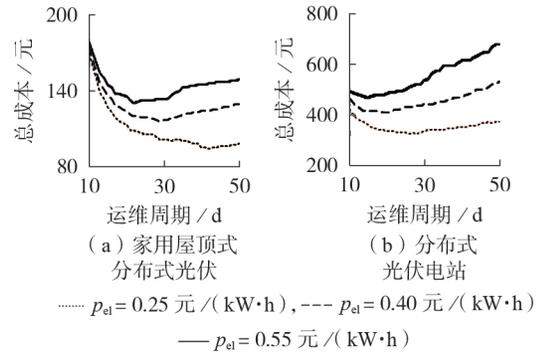


图 3 不同并网电价的最优运维周期
Fig.3 Optimal operation and maintenance cycles for different electricity prices

对于 2 种典型场景的所有运维周期,总成本都会随着并网电价增加而增长,增长的费用为发电量损失成本。随着运维周期增加,发电量损失成本在总成本中的占比逐渐提高,并网电价的影响更大,因此,该总成本增长趋势会进一步扩大。在并网电价分别为 0.25、0.40、0.55 元 / (kW·h) 时:家用屋顶式分布式光伏的最优运维周期分别为 42、29、22 d,平均每天的运维总成本分别为 94.4、116.7、131.3 元;分布式光伏电站的最优运维周期分别为 26、20、15 d,平均每天的运维总成本分别为 327.3、410.6、471.0 元。

5.2.3 季节对最优运维周期的影响

分布式光伏发电在不同季节的发电量有明显的差异性,因此,应根据季节调整分布式光伏最优运维周期。由于春秋两季光伏出力几乎一致,因此本文认为春秋两季的最优运维周期相同,只模拟其中一个季节。2 种场景下不同季节的运维总成本见图 4。

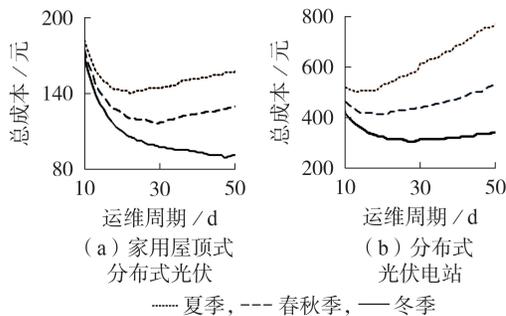


图4 不同季节的最优运维周期

Fig.4 Optimal operation and maintenance cycles for different seasons

在夏季、春秋季节、冬季:家用屋顶式分布式光伏的最优运维周期分别为22、29、47 d,平均每天的运维总成本分别为140.4、116.7、90.0元;分布式光伏电站的最优运维周期分别为13、20、28 d,平均每天的运维总成本分别为502.3、410.6、305.8元。

5.2.4 服役时长对最优运维周期的影响

光伏系统在运行过程中会受到环境因素如光、热、氧、液体介质等作用,使材料、接头、电缆等产生老化,同时,会因长期内部热机械应力作用积累疲劳损伤,影响系统可靠性^[20]。因此,应根据服役时长调整分布式光伏最优运维周期。本文设定分布式光伏服役时长为 Y 年,若在第 Y 年开始时设备从未进行过维修,则第 Y 年的可靠度函数为:

$$R(t) = \exp\{-\lambda[t + t_{tol}(Y-1)]\} \quad t \in [0, t_{tol}] \quad (19)$$

若设备之前进行过维修,则根据维修后的时长计算设备在第 Y 年的初始可靠度。本文计算2种场景下设备服役10 a间每年的最优运维周期及运维总成本,如表1所示。

表1 不同服役时长的最优运维周期

Table 1 Optimal operation and maintenance cycles for different service years

服役时长 / a	家用屋顶式分布式光伏		分布式光伏电站	
	最优运维周期 / d	总成本 / 元	最优运维周期 / d	总成本 / 元
1	29	116.7	20	410.6
2	29	118.3	19	439.2
3	28	121.5	19	465.1
4	28	124.9	18	495.0
5	28	129.5	18	521.4
6	27	131.7	17	549.3
7	27	134.0	17	574.3
8	27	136.8	16	590.7
9	26	138.2	16	611.8
10	26	140.5	16	627.6

6 结论

1) 本文在考虑分布式光伏系统部件可靠性、组件积灰速率的基础上,建立灵活的分布式光伏运维

周期模型。该模型是以通用方式建立并实施的,通过调整模型参数,实现不同场景、影响因素下最优运维周期的确定以及经济效益的定量评估,这有助于指导分布式光伏运维策略,提高经济性。

2) 分布式光伏的应用场景是确定最优运维周期的主要因素,由于不同应用场景下组件数量、系统部件连接方式不同,各项成本在运维总成本中的占比区别较大。最优运维周期也与系统连接结构、部件性能、灰尘积累、所处季节、并网电价、服役时长等因素密切相关,可以根据实际情况将该最优运维周期确定方法拓展应用于不同类型、不同条件的分布式光伏系统。

3) 本文的最优运维周期确定方法依赖于对系统部件失效的预测,而未考虑光伏系统状态实时监测、诊断的结果,这将是笔者下一步研究的重点,以进一步精细确定分布式光伏最优运维时间。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 国家能源局. 2019年光伏发电并网运行情况[EB/OL]. [2020-11-01]. http://www.nea.gov.cn/2020-02/28/c_138827923.htm.
- [2] HERNÁNDEZ-CALLEJO L, GALLARDO-SAAVEDRA S, ALONSO-GÓMEZ V. A review of photovoltaic systems: design, operation and maintenance[J]. Solar Energy, 2019, 188: 426-440.
- [3] AHADI A, GHADIMI N, MIRABBASI D. Reliability assessment for components of large scale photovoltaic systems[J]. Journal of Power Sources, 2014, 264: 211-219.
- [4] 朱晓荣, 王羽凝, 金绘民, 等. 基于马尔科夫链蒙特卡洛方法的光伏电站可靠性评估[J]. 高电压技术, 2017, 43(3): 1034-1042.
ZHU Xiaorong, WANG Yuning, JIN Huimin, et al. Reliability evaluation of photovoltaic power plant based on Markov chain Monte Carlo method[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(3): 1034-1042.
- [5] DARWISH Z A, KAZEM H A, SOPIAN K, et al. Effect of dust pollutant type on photovoltaic performance[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, 41: 735-744.
- [6] ABDERREZEK M, FATHI M. Experimental study of the dust effect on photovoltaic panels' energy yield[J]. Solar Energy, 2017, 142: 308-320.
- [7] ENBAR N, WENG D A, KLISE G. Budgeting for solar PV plant operations & maintenance: practices and pricing[R]. Albuquerque, NM, USA: Office of Scientific and Technical Information (OSTI), 2016.
- [8] VILLARINI M, CESAROTTI V, ALFONSI L, et al. Optimization of photovoltaic maintenance plan by means of a FMEA approach based on real data[J]. Energy Conversion and Management, 2017, 152: 1-12.
- [9] POLO F A O, FERRERO BERMEJO J, FERNÁNDEZ J F G, et al. Failure mode prediction and energy forecasting of PV plants to assist dynamic maintenance tasks by ANN based models[J]. Renewable Energy, 2015, 81: 227-238.
- [10] HUANG C C. Intelligent maintenance scheduling system for maximum performance of solar-energy-generating system[J]. Sensors and Materials, 2017, 29(11): 1579-1588.

- [11] 邱腾飞,曹潇,郭雅娟,等. 考虑不同补贴方式的分布式光伏运维模式决策[J]. 电力需求侧管理,2017,19(3):5-9.
QIU Tengfei, CAO Xiao, GUO Yajuan, et al. Decision on operation and maintenance modes for distributed PV power generation considering different subsidies[J]. Power Demand Side Management, 2017, 19(3): 5-9.
- [12] CARRASCO L M, MARTÍN-CAMPO F J, NARVARTE L, et al. Design of maintenance structures for rural electrification with solar home systems. The case of the Moroccan program [J]. Energy, 2016, 117: 47-57.
- [13] HAMMAD B, AL-ABED M, AL-GHANDOOR A, et al. Modeling and analysis of dust and temperature effects on photovoltaic systems' performance and optimal cleaning frequency: Jordan case study[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 82: 2218-2234.
- [14] 赵波,张妹伟,曹生现,等. 基于状态监测的电池板积灰清洗周期确定与费用评估[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(14): 4205-4213.
ZHAO Bo, ZHANG Shuwei, CAO Shengxian, et al. Cleaning cycle determination and cost estimation for photovoltaic modules based on dust accumulating condition monitoring[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(14): 4205-4213.
- [15] 黑晨阳,关远鹏,谢运祥,等. 基于戴维南-诺顿等效的含分布式光伏发电系统的配电网仿真分析[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(10): 71-78.
HEI Chenyang, GUAN Yuanpeng, XIE Yunxiang, et al. Simulation analysis of distribution network with distributed photovoltaic generation system based on Thevenin-Norton equivalence [J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(10): 71-78.
- [16] 李更丰,黄玉雄,别朝红,等. 综合能源系统运行可靠性评估综述及展望[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(8): 12-21.
LI Gengfeng, HUANG Yuxiong, BIE Zhaohong, et al. Review and prospect of operational reliability evaluation of integrated energy system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(8): 12-21.
- [17] JONES R K, BARAS A, SAEERI A A, et al. Optimized cleaning cost and schedule based on observed soiling conditions for photovoltaic plants in central Saudi Arabia[J]. IEEE Journal of Photovoltaics, 2016, 6(3): 730-738.
- [18] ZHAO Y, BALL R, MOSESIAN J, et al. Graph-based semi-supervised learning for fault detection and classification in solar photovoltaic arrays[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(5): 2848-2858.
- [19] GALLARDO-SAAVEDRA S, HERNÁNDEZ-CALEJO L, DUQUE-PÉREZ O. Quantitative failure rates and modes analysis in photovoltaic plants[J]. Energy, 2019, 183: 825-836.
- [20] JAMIL W J, RAHMAN H A, SHAARI S, et al. Performance degradation of photovoltaic power system: review on mitigation methods[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 67: 876-891.

作者简介:



尹德扬

尹德扬(1995—),男,博士研究生,主要研究方向为光伏系统状态评估及运维(E-mail: 230179580@seu.edu.cn);

梅飞(1982—),男,讲师,博士,主要研究方向为智能电网与分布式电源(E-mail: meifei@hhu.edu.cn);

郑建勇(1966—),男,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为智能电网与新能源发电(E-mail: zhengjy_seu@163.com)。

(编辑 王锦秀)

Determination method of optimal operation and maintenance cycles for distributed photovoltaic system

YIN Deyang¹, MEI Fei², ZHENG Jianyong¹, HE Weigu^{3,4}, QI Xiaojing¹

(1. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China;

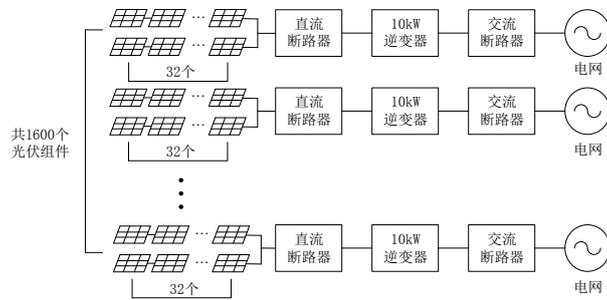
3. School of Automation, Southeast University, Nanjing 210096, China;

4. China Electric Power Research Institute, Nanjing 210003, China)

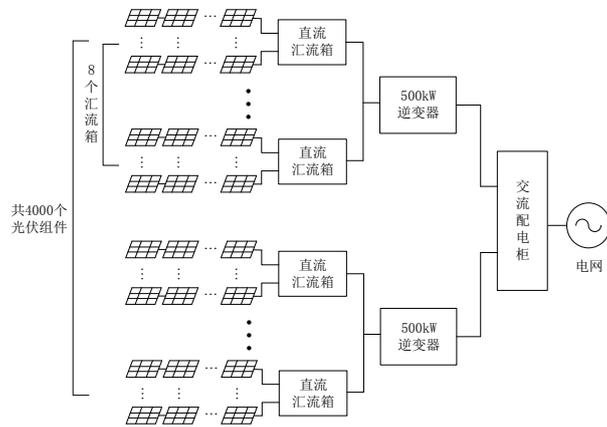
Abstract: The current PV (PhotoVoltaic) operation and maintenance cycles are mainly determined by human experience, the cost is too high, and it is not conducive to the development of PV industry, for which, a determination method of optimal operation and maintenance cycles is proposed considering the typical scenarios of distributed PV system. The mathematic models of two typical application scenarios of distributed PV are established. Based on the models of PV reliability model and PV module dust accumulation model, an operation and maintenance cycle model is established. The Monte Carlo method is used to calculate the probability distribution of total operation and maintenance cost composed by power generation loss cost and operation and maintenance cost under different operation and maintenance cycles. The optimal operation and maintenance cycles are determined by the average values of simulative results of different examples, verifying the validity and rationality of the proposed method.

Key words: distributed photovoltaic; operation and maintenance cycle; economic benefit; reliability; module dust accumulation

附录 A:



(a) 家用屋顶式分布式光伏



(b) 分布式光伏电站

图 A1 2 种典型应用场景结构图

Fig.A1 Structure diagram of two typical application scenarios

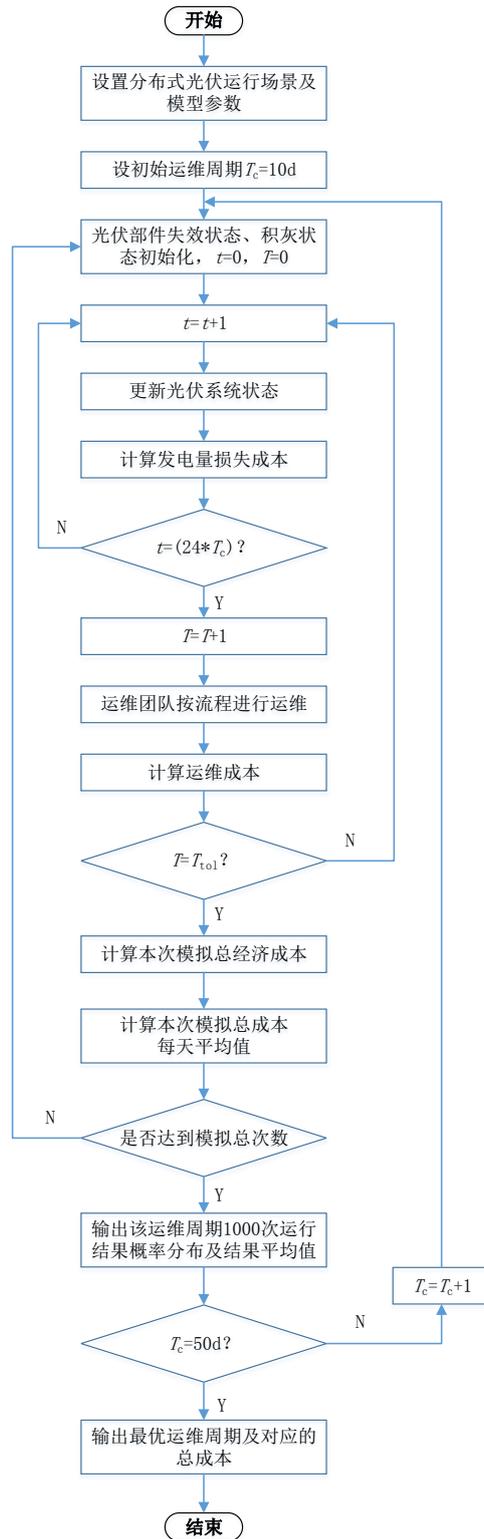


图 A2 模型实施方法流程图

Fig.A2 Flowchart of model implementation method

表 A1 家用屋顶式分布式光伏组件失效率

Table A1 Failure rate of components of household rooftop distributed PV

部件类型	失效率 λ /(次 h^{-1})
光伏组件	3.3×10^{-7}
直流断路器	5.71×10^{-6}
10 kW 逆变器	1.290×10^{-5}
交流断路器	5.71×10^{-6}

表 A2 分布式光伏电站组件失效率

Table A2 Failure rate of components of distributed PV power plant

部件类型	失效率 λ /(次 h^{-1})
光伏组件	3.3×10^{-7}
直流汇流箱	4.513×10^{-5}
500 kW 逆变器	3.8808×10^{-4}
交流配电柜	1.145×10^{-5}

表 A3 家用屋顶式分布式光伏组件连接组件数量

Table A3 Number of modules connected to components of household rooftop distributed PV

部件类型	连接数量 $n_{con}(i)$ /个
直流断路器	32
10 kW 逆变器	32
交流断路器	32

表 A4 分布式光伏电站组件连接组件数量

Table A4 Number of modules connected to components of distributed PV power plant

部件类型	连接数量 $n_{con}(i)$ /个
直流汇流箱	250
500 kW 逆变器	2 000
交流配电柜	4 000

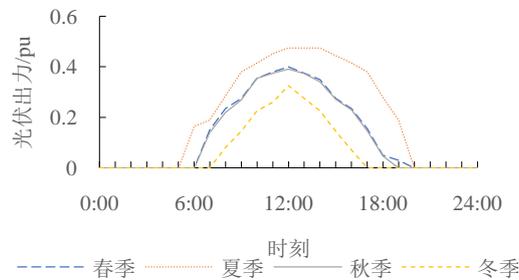
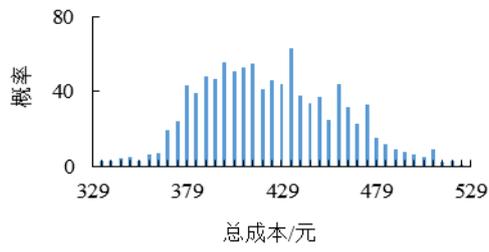
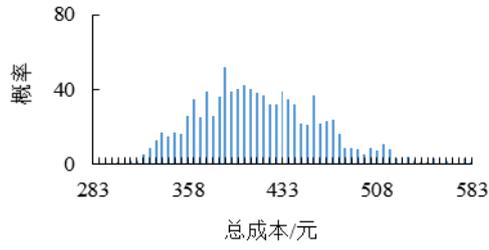


图 A3 光伏四季出力曲线

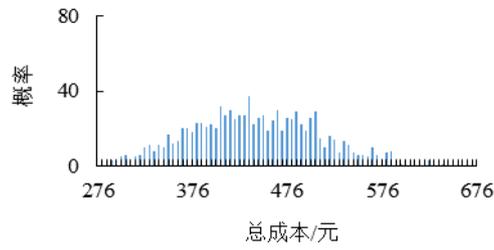
Fig.A3 Output curves of PV in four seasons



(a) 运维周期为 14 d



(b) 运维周期为 21 d



(c) 运维周期为 30 d

图 A4 分布式光伏电站运维总成本概率分布

Fig.A4 Probability distribution of total operation and maintenance cost of distributed PV power plant