

数据驱动的配电网分布式光伏承载力评估技术研究

梁志峰¹, 夏俊荣², 孙檬檬², 周昶²

(1. 国家电力调度控制中心, 北京市西城区 100031;
2. 中国电力科学研究院有限公司(南京), 江苏省南京市 210003)

Data Driven Assessment of Distributed Photovoltaic Hosting Capacity in Distribution Network

LIANG Zhifeng¹, XIA Junrong², SUN Mengmeng², ZHOU Chang²

(1. National Power Dispatching and Control Center, Xicheng District, Beijing 100031, China;
2. China Electric Power Research Institute (Nanjing), Nanjing 210003, Jiangsu Province, China)

ABSTRACT: Distributed photovoltaic(PV) is widely favored by taking advantages of clean, efficient and close to the load side. The excessive installed capacity of distributed PV to the hosting capacity in distribution network will lead to various problems such as overloading and overvoltage in transformers and feeders, harmonic distortion and protection failure, bringing bad effect on the safety and stability of the power grid. Based on the operating state and safety boundary of the distribution network, a data driven assessment method of distributed PV hosting capacity in distribution network is proposed. Detailed case studies on the distribution network within a city in East China are carried out, and the results show that by taking full advantages of data resources accumulated in the grid operation, the distributed PV hosting capacity and its ranking corresponding to the buses of different voltage levels can be efficiently assessed. The proposed method can be widely applied with its good versatility. It provides a guidance for the healthy and orderly development of the distributed PV.

KEY WORDS: distributed photovoltaic; hosting capacity; thermal stability evaluation; data driven

摘要：分布式光伏在负荷侧就近利用，清洁、高效，广受青睐。分布式光伏接入规模超过配电网的实际承载能力，会导致变压器和线路过载、线路电压偏差越限、谐波超标、保护失效等问题，影响电网的安全稳定运行。基于配电网实际运行状态和安全边界，提出了一种数据驱动的配电网分布式光伏承载力评估方法。以华东地区某市配电网为例，进行了详细测算和分析，结果表明：提出的方法可充分利用电网数据资源，评估出配电网各级母线的分布式光伏承载力及其等级。该方法通用性高，可大范围推广，为分布式光伏健康有序发展提供指导。

关键词：分布式光伏；承载力；热稳定评估；数据驱动

DOI : 10.13335/j.1000-3673.pst.2019.2599

0 引言

近年来，随着化石能源短缺和环境污染问题的加剧，在国家政策和技术发展的促进下，新能源发展迅猛。分布式光伏作为负荷侧太阳能利用的有效形式，具有清洁、高效、经济、灵活等优点。在国家和当地政府相关激励政策的推动下，我国分布式光伏高速增长，呈现“点多面广、局部高密度并网”的特点^[1]。据国家能源局统计，截至2019年6月底，我国分布式光伏装机容量已达5502万kW^[2]，已接近《能源发展“十三五”规划》公布的6000万kW目标值^[3]。

分布式光伏出力与当地太阳能实时辐照强度密切相关，具有明显的间歇性和波动性。大规模分布式光伏接入电网后，改变了传统配电网的特征，配电网由“无源网”转变为“有源网”，配电网潮流从“单向”转变为“双向”，对配电网的电压^[4-6]、电能质量^[7-8]、继电保护^[9-10]、规划^[11-13]和调度运行^[1]等带来了诸多不利影响，严重威胁了配电网的安全稳定运行。此外，分布式光伏通常位于配电网末端，接入电压等级较低，信息接入率不高，可观可测性差，对于电网调度部门来说，其无序接入导致的安全风险往往不可预知。因此，为了保障分布式光伏与负荷和电网的协调发展，必须基于配电网稳定运行边界和实际运行状态，评估各节点未来可接入的分布式光伏容量裕度，进而为分布式光伏和配电网的规划、建设提供指导。

分布式光伏承载力即指在满足供电设备和线路不过载、系统各项性能参数不超标的条件下，配电网接纳分布式光伏的最大容量。国内外学者通常用“接纳能力”^[14-15]、“准入容量”^[16-17]或“HostingCapacity”^[18-19]来表征此量。我国政府在鼓励和促进分布式发电发展的同时，也出台了相关政策来规范其接入。《分布式发电管理办法》^[20]中指出：“省级能源主管部门会同所在区域内电网企业应研究并逐步建立定期公布分电压等级、分区域配电网可接纳分布式发电容量、负荷情况以及其他分布式发电并网所需信息的工作机制”。《关于开展分布式发电市场化交易试点的通知》^[21]中指出：“试点地区电网企业对 2020 年底前接入配电网就近消纳的光伏发电、风电等项目，按既有变电站、已规划改造扩容和新建变电站 3 种情况测算接入能力”。因此，在全国范围内广泛开展配电网分布式光伏承载力测算迫在眉睫。

本文首先分析了分布式光伏承载力的关键影响因素，基于此提出了配电网实际运行状态数据驱动的分布式光伏承载力评估方法，并以某地市配电网为对象开展了测算，得出了算例电网各电压等级母线可接入的分布式光伏容量裕度和评估等级，为全范围开展配电网分布式光伏承载力测算提供了高效可行的解决方案。

1 分布式光伏承载力影响因素分析

限制分布式光伏接入容量大小的因素主要包括配电网设备和线路的载流能力、节点电压水平和电压控制能力、电能质量指标、短路电流水平和保护配置等。

1.1 设备线路热稳定

分布式光伏以适当容量接入适当位置可以降低设备和线路的负载率及网损^[22]，有利于配电网的安全经济运行。然而，分布式光伏的选址定容方案通常由业主或投资者决策，接入方案设计往往缺乏全局性考虑。目前，我国局部地区配电网分布式光伏渗透率较高，在负荷水平低且太阳能辐照度强的情况下，分布式光伏出力高于用电负荷，上级变压器和线路会出现反向潮流，少数 220kV 变压器在节假日，由于分布式光伏反送电，加之下级 110kV 接入的集中式新能源大发，其反向载流量已接近变压器的热稳极限。此外，传统配电网的设计并未考虑分布式光伏大规模接入的情景，其作为大型基础设施，从规划到投产的周期比分布式光伏项目长得多，短期内无法通过新建或扩容来解决问题。因此，

配电网设备和线路的热稳定裕度是影响分布式光伏承载力的关键因素。

1.2 电压偏差越限

当分布式光伏出力高于接入点的用电负荷，向电网反向注入有功功率时，除了会导致配电网设备和线路反向负载超热稳极限外，还会导致配电网节点电压抬升^[23]。分布式光伏若不以单位功率因数运行，会向电网注入无功功率，也会导致电压偏差发生变化。分布式光伏接入导致的节点电压偏差量除了与其并网容量相关，还与其接入点位置和阻抗值相关。一般来说，分布式光伏容量越大，有功出力越大，导致的电压偏差量越大；接入点越靠近配网末端，导致的电压偏差也越大^[24]。当配电网调压能力不足时，节点电压偏差过高直接影响供电安全性和可靠性，严重时可能导致电源脱网。因此，配电网各节点允许的电压偏差范围限制了分布式光伏的接入容量和接入位置。

1.3 电能质量超标

分布式光伏逆变器的开关器件动作频繁，容易产生与开关频率相近的谐波分量，从而加剧配电网的谐波污染程度。分布式光伏接入规模越大，配电网中的谐波源数量越多，多个谐波源叠加以及与配电网交互作用使谐波问题变得更复杂、分析更加困难。通常，分布式光伏接入容量越大，接入位置越接近配网末端，对谐波的影响越大^[25]。此外，分布式光伏的投切或出力波动会导致电压的波动或闪变；分布式光伏若单相接入低压配电网，会导致系统三相不平衡。因此，配电网电能质量面临的问题和挑战也是分布式光伏承载力的限制因素。

1.4 保护失效

传统配电网通常采用不带方向的三段式电流保护作为线路的主保护。分布式光伏接入配电网后，会导致故障电流的大小和方向发生改变，进而导致传统配电网的电流保护发生误动或拒动，影响保护的选择性、灵敏性和范围。尽管在配电网发生短路故障时，分布式光伏贡献的短路电流不大^[26]，但是局部高密度接入的分布式光伏对短路电流的影响不能忽略不计，应在短路电流计算和保护参数整定时予以考虑。此外，可以采用自适应保护或纵联差动保护等技术解决以上问题，但改造成本高、经济性差，现阶段配电网的主流保护方式不会发生大的变化，只能通过动态整定来避免问题。因此，分布式光伏应以保护不失效为限进行规划和建设。

分布式光伏承载力需要同时满足以上 4 个维度的约束条件，如图 1 所示。目前，国内外学者已对

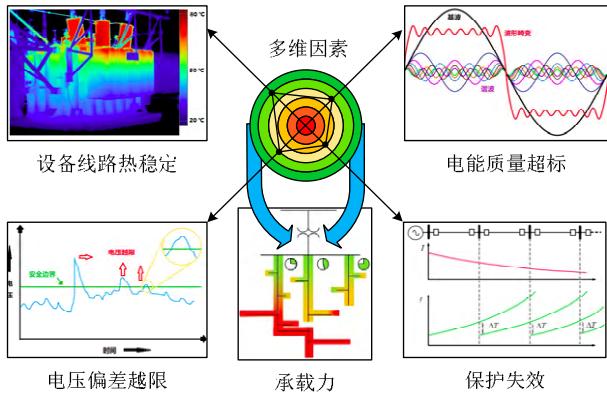


图 1 分布式光伏承载力影响因素

Fig.1 Influencing factors of distributed PV hosting capacity

配电网分布式电源承载力的计算方法进行了探索研究，文献[27-29]考虑电压约束，文献[30-32]考虑谐波约束，文献[33-34]考虑电流保护约束，文献[25, 35-36]综合考虑多个约束，开展了案例分析。但尚未提出适应配电网复杂性的分布式电源承载力通用计算方法，无法支撑在全国范围内开展评估。

2 分布式光伏承载力评估方法

2.1 分布式光伏承载力评估思路

2.1.1 以“数”为据

开展分布式光伏承载力评估，可通过构建配电网仿真模型，以配电网安全运行为边界，不断试探出分布式光伏的极限渗透率，也可采用迭代优化类算法，得出优化配置下的分布式光伏渗透率极限^[37]。若要在地市乃至省级电网全范围计算分布式光伏承载力，前者动态建模和仿真工作量巨大，后者往往无普遍适用的建模方法，且计算量巨大，两者皆不能提供高效的解决方案。

目前，我国电网调度自动化水平较高，调度系统积累了大量宝贵数据，包括电网模型数据、电网运行数据等。充分利用已有量测数据，可以对电网进行态势感知和评估，具有较高的工程实际价值。基于电网历史运行状态，以“数”为据，感知并评估分布式光伏承载力切实可行。

2.1.2 以“稳”为界

如前节所述，分布式光伏无序接入电网会导致电网设备和线路过载，母线、线路电压越限，电能质量超标和保护失效等问题。分布式光伏承载力评估应以保障已投运电网的安全稳定为前提，着重开展电网设备和线路的热稳定性评估，即分布式光伏的接入不应使流经电网设备和线路的电流超过其热稳极限而发生过载。电压越限、短路电流超标、

电能质量超标等问题虽可以通过调整有载调压变压器抽头、新增无功补偿装置、利用光伏逆变器自身功率因数调节能力、运行方式调整、加装储能设备等手段来缓解，但设备的新增或改造会增加额外资金投入。因此，电网未发生相应改造前，应在热稳定性评估的基础上，进行电压偏差、短路电流、谐波等指标的校核，以满足相关标准要求。

2.1.3 依据拓扑、分层测算

分布式光伏承载力评估主要以配电网(220kV电压等级以下)为分析对象，分布式光伏通常多点分散接入配电网各电压等级母线或线路，各接入点的负荷特性也不尽相同，配电网拓扑结构随着其运行方式的调整也会发生变化。某接入点的分布式光伏承载力依据本电压等级变压器、母线、线路的热稳定性、电压偏移量、短路电流水平和谐波污染程度进行测算，而该点分布式光伏可承载容量还受其上级电压等级测算结果的约束，即同一辐射线路上低电压等级母线的分布式光伏承载力不得大于高电压等级母线的测算结果。因此，分布式光伏承载力评估应以220kV变压器为单位，基于配电网实际运行拓扑，遵循“分区分层”原则，从总体到局部、从高压到低压，按供电区域和电压等级开展。

2.1.4 等级可视、定期评估

分布式光伏承载力测算应得出配电网各电压等级母线的可新增装机容量，除此之外还应通过不同颜色综合划分各母线的评估等级，直观展示分布式光伏可新增装机裕度，为分布式光伏和电网规划、设计、建设、运行提供依据。

随着时间推移，配电网的负荷水平、电源建设情况、网架结构等会发生变化，分布式光伏的承载力也随之改变。因此，需要定期开展评估，及时把“脉”，不断更新承载力结果，评估周期可与电网年度方式分析、电网规划同步。对于负荷、电源、网架发生重大变化的配电网，可按需适时开展评估工作，对于承载力较弱的区域应缩短评估周期。

2.2 分布式光伏承载力测算流程

2.2.1 数据准备

分布式光伏接入电网的承载力以待评估区域电源装机信息、电源特性数据、电网设备参数、电网历史运行数据、电能质量实测数据、电网安全运行边界数据等为基础开展评估，并充分考虑该区域的地理位置、电网拓扑、运行方式、负荷类型、负荷水平、时间尺度、在建及已批复电源和电网项目等因素。数据需求可归类为：系统数据、设备数据、运行数据、安全边界数据4类，具体如下：

1) 系统数据。包括待评估电网的一次接线图、电网等值阻抗图、各级母线大小方式短路容量表。

2) 设备数据。包括各级变压器容量限值、各级线路电流限值、区域内电源装机和规划信息、分布式光伏逆变器功率因数调节范围。

3) 运行数据。包括待评估电网及区域内电源的正常运行方式数据，评估周期内各级变压器历史负载时序数据、各级线路历史负载时序数据、各电源历史出力时序、各级母线电压历史时序、电能质量监测点的谐波电流和间谐波电压含有率实测值。

4) 安全边界数据。包括母线电压偏差限值、短路电流限值、谐波电流允许值、间谐波电压含有率限值。

详细数据需求及用途如附录表 A1 所示。

2.2.2 测算方法

1) 热稳定评估。

热稳定评估指基于变压器、线路的历史负载时序，以变压器或线路热稳定不越限为原则，评估分布式光伏可新增容量裕度。首先，计算历史各时刻点变压器和线路的反向负载率， t 时刻的反向负载率 $\lambda(t)$ ，按以下公式计算。

$$\lambda(t) = \frac{P_D(t) + P_C(t) - P_L(t)}{S_e} = -\frac{P_{Net}(t)}{S_e} \times 100\% \quad (1)$$

式中： $P_D(t)$ 为变压器或线路供电范围内分布式光伏 t 时刻的出力； $P_C(t)$ 为分布式光伏以外其他电源 t 时刻出力； $P_L(t)$ 为 t 时刻用电负荷； $P_{Net}(t)$ 为 t 时刻变压器或线路的下网功率， t 的时间分辨率通常为 15min； S_e 为变压器或线路实际运行限值。

接着，评估变压器或线路供电范围内可新增分布式光伏容量 P_m ，按以下公式计算。

$$P_m = \min\left(\frac{(1 - \lambda(t)) \times S_e}{r_{pv}(t)}\right) \times k_r \quad (2)$$

式中： $r_{pv}(t)$ 为 t 时刻单位容量分布式光伏的理论出力，与当地 t 时刻辐照强度和发电效率相关； k_r 为裕度系数， $k_r \leq 1$ 。

2) 短路电流校核。

短路电流校核以分布式光伏接入前后，系统各级母线短路电流均不超过短路电流限值为原则，分布式光伏接入前，按以下公式校核。

$$I_{xz} < I_m \quad (3)$$

待校核容量(P_m)的分布式光伏接入后，按以下公式校核。

$$I_{xz} + 1.5 \times \frac{P_m}{\sqrt{3}U_N} < I_m \quad (4)$$

式中： I_{xz} 为系统最大运行方式下，母线短路电流现

状值，可按母线大方式短路容量来确定； U_N 为各级母线额定电压，分布式光伏产生的短路电流通常不超过其额定电流的 1.5 倍^[26]； I_m 为允许的短路电流限值，应选取与母线联接的相应断路器开断电流限值的最小值，电力行业标准《配电网规划设计技术导则》^[38]也对各级母线短路电流水平进行了规定。

3) 电压偏差校核。

电压偏差校核以无功功率就地平衡和分布式光伏接入前后电网电压不越限为原则，待校核容量(P_m)的分布式光伏接入后导致的各级母线电压偏差按以下公式计算。

$$\delta U = \frac{R_L \Delta P + X_L \Delta Q}{U_N^2} \times 100\% \quad (5)$$

式中： U_N 为各级母线额定电压； ΔP 、 ΔQ 分别为分布式光伏注入的有功功率和无功功率增量； R_L 、 X_L 分别为电网阻抗的电阻和电抗分量；在高压电网中，一般 $X_L \gg R_L$ ，可忽略电网电阻分量，则：

$$\delta U \approx \frac{X_L \Delta Q}{U_N^2} = \frac{\Delta Q}{S_{sc}} \times 100\% \quad (6)$$

式中： S_{sc} 为母线小方式短路容量；国标《分布式电源并网技术要求》^[39]规定分布式光伏功率因数调节范围为 0.98(超前)~0.98(滞后)，可据此估算无功注入量 ΔQ 的正负最大值。

根据评估周期内各级母线电压时序和国家标准《电能质量供电电压偏差》^[40]规定的电压偏差限值，估算分布式光伏接入导致的正负电压偏差允许值 ΔU_+ 和 ΔU_- 。然后，按以下公式校核。

$$\delta U_+ < \Delta U_+ \text{ 且 } \delta U_- > \Delta U_- \quad (7)$$

式中 δU_+ 、 δU_- 为按式(6)计算得出的正负电压偏差极值。

4) 谐波校核。

谐波校核以系统中分布式光伏接入电网节点谐波电流值、间谐波电压含有率不越限为原则。校核对象包括分布式光伏提供的谐波电流和间谐波电压有可能影响的所有节点。

谐波电流按以下公式校核。

$$I_{xz,h} < I_h \quad (8)$$

式中： $I_{xz,h}$ 为电网节点第 h 次谐波电流实测值； I_h 为注入各电压等级电网节点的第 h 次谐波电流允许值，按国家标准《电能质量公用电网谐波》^[41]的规定选取。

间谐波电压含有率按以下公式校核。

$$I_{HRUxz,i} < I_{HRUi} \quad (9)$$

式中： $I_{HRU_{XZ,i}}$ 为电网节点 i 次间谐波电压含有率实测值； I_{HRU_i} 为各电压等级下 i 次间谐波电压含有率限值，按国家标准《电能质量公用电网间谐波》^[42] 的规定选取。

2.2.3 评估流程

分布式光伏承载力评估流程如图 2 所示，具体步骤如下：

1) 确定待评估区域电网范围，画出待评估区域电网拓扑图。一般来说，评估范围以单台 220kV 变压器的供电区域划分，评估对象包括该区域内所有 35~220kV 等级的变压器、35~110kV 等级的线路、10~220kV 等级的母线。

2) 按照附录表 A1 所列数据需求进行数据收集，判断待评估区域是否发生分布式光伏向 220kV 及以上电网反送电，即该区域分布式光伏总输出是否大于用电负荷，若反送则该评估区域各电压等级分布式光伏承载力等级为红色。

3) 按照电压等级从高至低分层进行评估。基于搜集的系统数据、设备参数、运行数据，统计当前层级各母线短路电流、电压偏差的现状值和諐波实测值，并参照各项限值进行校核，若校核不通过，则

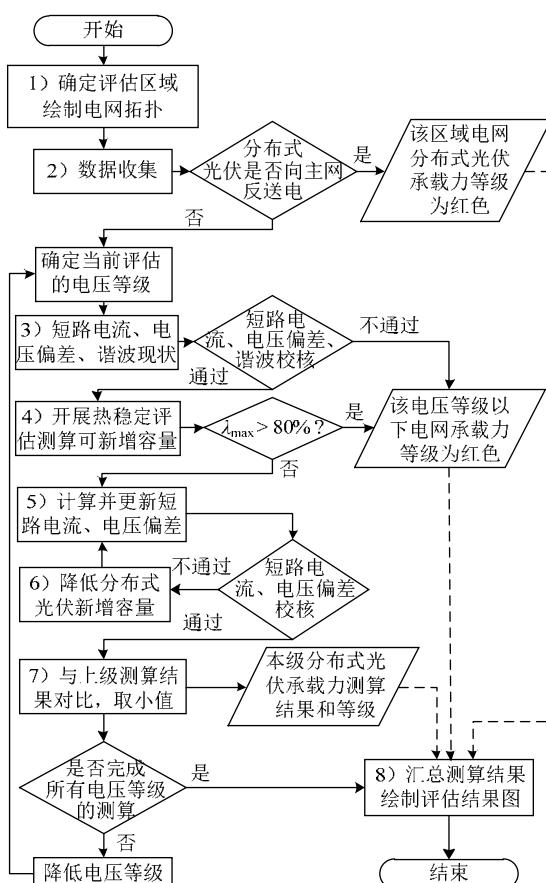


图 2 分布式光伏承载力评估流程图

Fig.2 Flow chart of distributed PV hosting capacity assessment

则该电压等级及以下区域电网的分布式光伏承载力等级为红色。

4) 在待评估区域电网正常运行方式下，按照式(1)(2)开展热稳定评估，确定当前层级变压器和线路的反向负载率及可新增分布式光伏容量。统计评估周期内反向负载率的最大值 λ_{max} ，若 $\lambda_{max} > 80\%$ ，则该电压等级及以下区域电网的分布式光伏承载力等级为红色。

5) 根据步骤 4) 得出的可新增分布式光伏容量，按照式(4)—(7)计算并校核短路电流和电压偏差。

6) 若步骤 5) 校核不通过，逐步降低可新增分布式光伏的容量，重复步骤 5)，直到校核通过，通过校核的容量即为待评估电网当前层级的分布式光伏承载力。

7) 完成当前电压等级电网的测算后，依据拓扑联接关系，将测算结果与上一电压等级的进行比较，取两者间较小值作为本级评估结果。然后，逐渐降低电压等级，重复步骤 3)—6)，直至完成待评估电网所有电压等级的测算。

8) 汇总各级测算结果，按表 1 所示原则，划分待评估电网分布式光伏承载力等级，列出各级母线的分布式光伏承载力裕度，最终依据电网拓扑绘制该区域的分布式光伏承载力结果图。

表 1 分布式光伏承载力评估等级划分依据

Tab.1 Basis for graded assessment of distributed PV hosting capacity

评估等级	判断依据	含义	建议
红色	1) 分布式光伏向 1) 分布式光伏就地 220kV 及以上电压等消纳条件不足。 2) 变压器或线路热 3) 网络存在安全风 4) 短路电流、电压偏差、谐波校核 不通过	建议在负荷水平、级主网反送电。改善前，暂停分布	
	2) $\lambda_{max} > 80\%$ 。 稳告警。	改善前，暂停分布	
	3) 短路电流、电压偏差或谐波校核不通过。 风险。	改善前，暂停分布	
黄色	0 < $\lambda_{max} \leq 80\%$ ，且通过 5) 计算并更新短路电流、电压偏差 变压器或线路反向 6) 降低分布式光伏新增容量 负载未达警戒值，新建项目进行 7) 与上级测算结果对比，取小值 变压器或线路反向 8) 汇总测算结果 绘制评估结果图 负载未达警戒值，接入条件良好。容量审核。	建议对分布式光	
绿色	$\lambda_{max} \leq 0$ ，且通过 5) 计算并更新短路电流、电压偏差和諐波 7) 与上级测算结果对比，取小值 变压器或线路反向 8) 汇总测算结果 绘制评估结果图 向负载，分布式光参考承载力结果校核。消纳条件较优。优先接入。	建议分布式光	

3 算例分析

本文以我国华东地区某地市配电网为例，选取两个局部 220kV 供电网络作为评估对象，综合分布式光伏出力水平、负荷水平等因素，选取历史典型日为评估提供特征时序。然后，按附录表 A1 进行系统数据、设备数据、运行数据和安全边界数据的

收集，再基于提出的评估方法对算例电网开展分层评估，最终得出各级母线的分布式光伏承载力测算结果和评估等级。

3.1 算例 1

3.1.1 算例介绍

算例 1 的电网拓扑如图 3 所示，评估范围内含 220 kV 变压器 1 台、110kV 变压器 2 台、35kV 变压器 2 台，集中式光伏电站 1 座。历史典型日 220kV 变压器高压侧负荷、集中式光伏出力及等效负荷曲线如图 4 所示。220kV 变压器高压侧负荷由于日间集中式、分布式光伏出力和高于用电负荷，产生反向负载，最大反向负载发生在中午 11:45，为 93.23 MW；集中式光伏电站最大出力同样发生在中午 11:45，为 79.28MW；等效负荷为供电范围内实际用电负荷扣减分布式光伏出力后的等效值，从图中可以看出日间 8:45—15:15 时段，分布式光伏出力大于用电负荷，向 220kV 主网反送电。

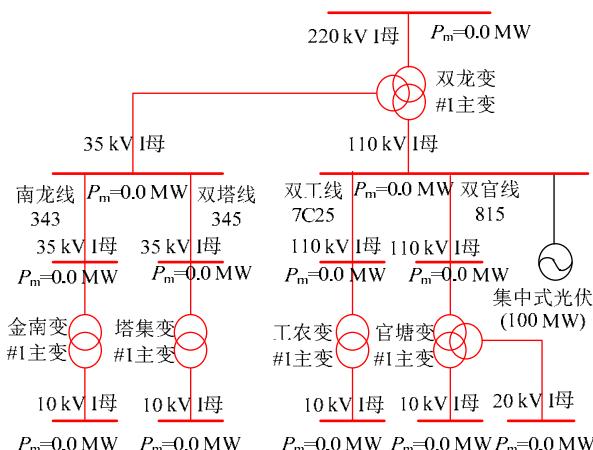


图 3 算例 1 电网拓扑

Fig.3 Grid topology of example 1

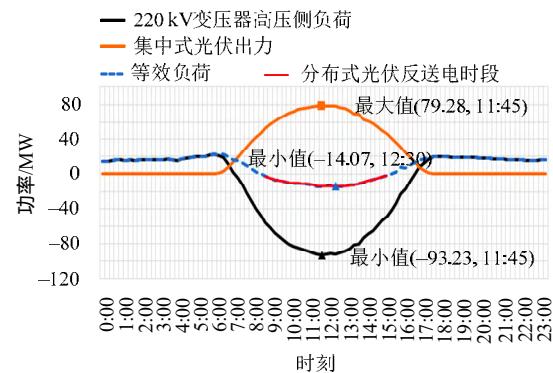


图 4 算例 1 典型日运行数据

Fig.4 Typical daily operating data of example 1

3.1.2 测算结果

按照图 2 所示评估流程对算例 1 电网的分布式光伏承载力进行测算，测算结果和评估等级如附录表 A2 和图 3 所示。由于算例 1 电网在日间发生分布式光伏向 220kV 主网反送电，代表该供电区域已无法实现分布式光伏的就地消纳，继续新增分布式光伏只会加剧消纳困难，评估流程执行到步骤 2）即结束，按照评估等级划分原则，该区域内各级母线的评估等级应为红色，可新增分布式光伏容量裕度 P_m 为 0。因此，建议该区域在用电负荷水平提高前，暂停所有分布式光伏项目的规划和建设。

3.2 算例 2

3.2.1 算例介绍

算例 2 的电网拓扑如图 5 所示，评估范围内含 220kV 变压器 1 台、110kV 变压器 3 台、35kV 变压器 2 台，无集中式电源接入。历史典型日 220kV 变压器高压侧负荷曲线如图 6 所示，由于该区域内无集中式电源，该曲线即为供电范围内实际用电负荷扣减分布式光伏出力后的等效负荷曲线。从图 6

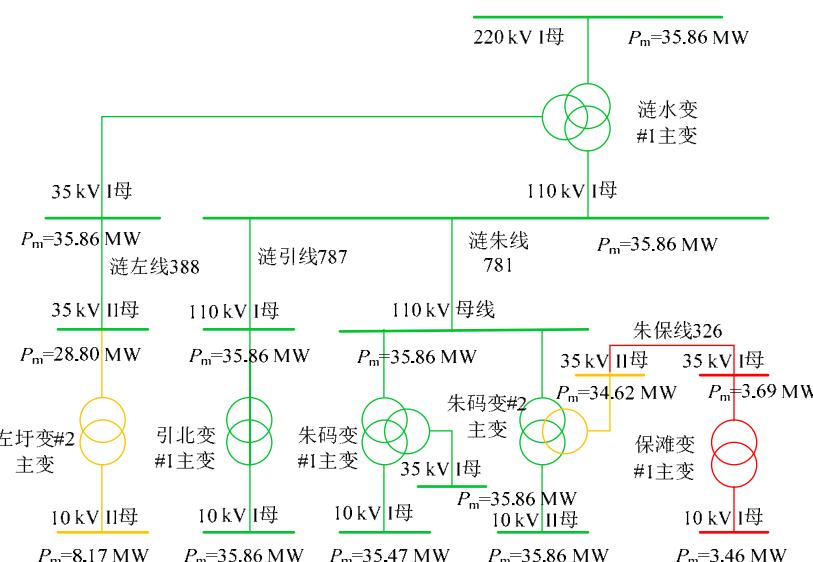


图 5 算例 2 电网拓扑

Fig.5 Grid topology of example 2

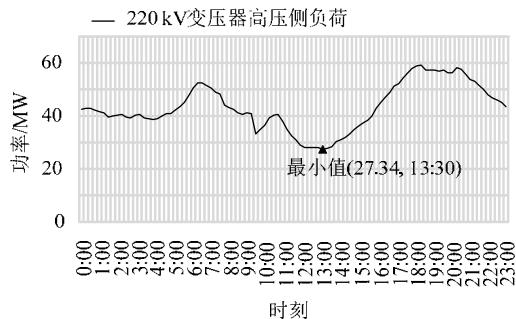


图 6 算例 2 典型日运行数据

Fig.6 Typical daily operating data of example 2

可以看出，最小等效负荷发生在中午 13:30，为 27.34 MW，说明分布式光伏的接入明显改变了该区域内网供负荷的特性。

3.2.2 测算结果

按照图 2 所示评估流程对算例 2 电网的分布式光伏承载力进行测算，各电压等级设备、线路的热稳定评估得出的分布式光伏可新增容量裕度，经过上下级拓扑关系约束核定，电压偏差、短路电流、谐波校核，最终得出符合所有安全约束的各级母线分布式光伏承载力结果。测算结果和评估等级如附录表 A3 和图 5 所示。其中 220kV 主变高压侧母线供电范围内的分布式光伏承载力为 35.86MW，代表该区域短期内规划建设的分布式光伏总量不应超过该值，且所有下级母线的承载力不得大于此值。35kV 左圩变#2 主变供电范围内，由于分布式光伏出力超其用电负荷，产生反向负载，当日最大反向负载率为 20.9%， $0 < \lambda_{\max} \leq 80\%$ ，所以评估等级为黄色，承载力为 8.17MW。35kV 朱保线和保滩变#1 主变供电范围内由于分布式光伏出力远大于用电负荷，且当日最大反向负载率 $\lambda_{\max} > 80\%$ ，因此其评估等级为红色，虽然还有少量新增裕度，但建议暂停分布式光伏继续接入。110kV 朱码变#2 主变中压侧当日最大反向负载率为 30.76%，因此其中压侧母线评估等级为黄色，由于中压侧反送的电能被低压侧负荷消纳，分布式光伏未继续向上级设备和线路反送。若在该算例电网供电范围内进行分布式光伏规划、建设，应优先选择评估等级为绿色的 35 kV 和 10kV 电压等级的母线接入，各母线接入的分布式光伏容量不得超过其承载力数值，且短期内区域总接入量不得超过 35.86MW。

4 结论与展望

随着我国分布式光伏高速发展，其对电网的影响开始从局部到全局、配网到主网延伸，电网企业急需全范围开展配电网分布式光伏承载力测算，为

分布式光伏有序接入、网源协同规划提供指导。针对已有分布式光伏承载力评估技术成果无法支撑大规模测算工作开展的问题，本文提出一种数据驱动的配电网分布式光伏承载力评估方法。

本文提出的分布式光伏承载力评估方法以系统模型数据、运行数据等为基础，充分考虑配电网的热稳定性、短路电流、电压偏差和谐波的约束，分层分级开展测算，通过算例分析，证实评估流程科学可行。该方法最终可得出配电网各级母线的分布式光伏承载力数值结果，并以颜色划分承载力等级，可为政府、电网企业、投资者制定决策提供有效依据。

本文算例仅对局部电网开展典型日内的分布式光伏承载力评估，下一步可以开发配套软件并推广应用，基于年/季/月运行数据定期开展历史全时刻的分布式光伏承载力评估分析，为相关部门及时掌握配电网分布式光伏承载力发展趋势提供支撑。

附录见本刊网络版(<http://www.dwjs.com.cn/CN/column/current.shtml>)。

参考文献

- [1] 裴哲义, 丁杰, 李晨, 等. 分布式光伏并网问题分析与建议[J]. 中国电力, 2018, 51(10): 80-87.
Pei Zheyi, Ding Jie, Li Chen, et al. Analysis and suggestion for distributed photovoltaic generation[J]. Electric Power, 2018, 51(10): 80-87(in Chinese).
- [2] 国家能源局. 2019 年上半年光伏发电建设运行情况 [EB/OL]. (2019-08-23). http://www.nea.gov.cn/2019-08/23/c_138330885.htm.
- [3] 国家发展改革委, 国家能源局. 能源发展“十三五”规划 [EB/OL]. (2017-05-17). https://www.ndrc.gov.cn/fggz/fzzlgh/gjjzxg/h/201705/t20170517_1196766.html.
- [4] 许晓艳, 黄越辉, 刘纯, 等. 分布式光伏发电对配电网电压的影响及电压越限的解决方案[J]. 电网技术, 2010, 34(10): 140-146.
Xu Xiaoyan, Huang Yuehui, Liu Chun, et al. Influence of distributed photovoltaic generation on voltage in distribution network and solution of voltage beyond limits[J]. Power System Technology, 2010, 34(10): 140-146(in Chinese).
- [5] 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.
Li Qingran, Zhang Jiancheng. Solutions of voltage beyond limits in distribution network with distributed photovoltaic generators[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(22): 117-123(in Chinese).
- [6] 王颖, 文福拴, 赵波, 等. 高密度分布式光伏接入下电压越限问题的分析与对策[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(5): 1200-1206.
Wang Ying, Wen Fushuan, Zhao Bo, et al. Analysis and countermeasures of voltage violation problems caused by high-density distributed photovoltaics[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(5): 1200-1206(in Chinese).
- [7] 左伟杰, 马钊, 周莉梅, 等. 基于配电网电能质量健康评估策略的分布式光伏接入方法[J]. 电网技术, 2015, 39(12): 3442-3448.
ZuoWeijie, Ma Zhao, Zhou Limei, et al. Grid-connection of

- distributed photovoltaic generation method based on the power quality health status of distribution system[J]. Power System Technology , 2015 , 39(12) : 3442-3448(in Chinese) .
- [8] 叶琳浩 , 黄伟 , 张勇军 . 分布式光伏发电接入对配电网谐波特性的影响[J]. 华南理工大学学报(自然科学版) , 2016 , 44(4) : 84-90 . Ye Linhao , Huang Wei , Zhang Yongjun . Influence of distributed photovoltaic power generation on harmonic characteristics of power distribution network[J]. Journal of South China University of Technology(Natural Science Edition) , 2016 , 44(4) : 84-90(in Chinese) .
- [9] 张惠智 , 李永丽 . 光伏电源接入的配电网短路电流分析及电流保护整定方案[J]. 电网技术 , 2015 , 39(8) : 2327-2332 . Zhang Huizhi , Li Yongli . Short-circuit current analysis and current protection setting scheme in distribution network with photovoltaic power[J]. Power System Technology , 2015 , 39(8) : 2327-2332(in Chinese) .
- [10] 李晶 , 李鑫 , 马越 , 等 . 分布式电源容量对配电网保护的影响分析[J]. 电力系统及其自动化学报 , 2016 , 28(2) : 98-102 . Li Jing , Li Xin , Ma Yue , et al . Analyze on the capacity of distributed generation on distribution network protection[J]. Proceedings of the CSU-EPSA , 2016 , 28(2) : 98-102(in Chinese) .
- [11] 范志成 , 朱俊澎 , 袁越 , 等 . 基于改进型直流潮流算法的主动配电网分布式电源规划模型及其线性化方法[J]. 电网技术 , 2019 , 43(2) : 504-513 . Fan Zhicheng , Zhu Junpeng , Yuan Yue , et al . Distributed generation planning model of active distribution network and linearization method based on improved dc power flow algorithm[J]. Power System Technology , 2019 , 43(2) : 504-513(in Chinese) .
- [12] Camargos R S , Shayani R A , De Oliveira M A , et al . Evaluation whether photovoltaic distributed generation postpones or anticipates reinforcements detected by distribution network expansion planning[J]. IET Generation Transmission & Distribution , 2019 , 13(7) : 1036-1048 .
- [13] 章力 , 高元海 , 熊宁 , 等 . 考虑潮流倒送约束的分布式光伏电站选址定容规划[J]. 电力系统自动化 , 2014 , 38(17) : 43-48 . Zhang Li , GaoYuanhai , XiongNing , et al . Siting and sizing of distributed photovoltaic power station considering reverse power flow constraints[J]. Automation of Electric Power Systems , 2014 , 38(17) : 43-48(in Chinese) .
- [14] 王守相 , 葛磊蛟 , 张齐 , 等 . 配电网分布式能源接纳能力影响因素分析[J]. 供用电 , 2016 , 33(4) : 2-7 , 63 . Wang Shouxiang , GeLeijiao , Zhang Qi , et al . Impact factor analysis of distributed energy accommodation capacity for distribution networks[J]. Distribution & Utilization , 2016 , 33(4) : 2-7 , 63(in Chinese) .
- [15] 易海川 , 张彼德 , 王海颖 , 等 . 提高 DG 接纳能力的配电网动态重构方法[J]. 电网技术 , 2016 , 40(5) : 1431-1436 . Yi Haichuan , Zhang Bide , Wang Haiying , et al . Distribution network dynamic reconfiguration method for improving distribution network's ability of accepting DG[J]. Power System Technology , 2016 , 40(5) : 1431-1436(in Chinese) .
- [16] 夏成军 , 崔弘 , 王强 , 等 . 考虑静态安全约束的分布式电源准入容量计算[J]. 电网技术 , 2009 , 33(16) : 96-100 . Xia Chengjun , Cui Hong , Wang Qiang , et al . Penetration capacity calculation for distributed generation considering static security constraints[J]. Power System Technology , 2009 , 33(16) : 96-100(in Chinese) .
- [17] 苏小玲 , 韩民晓 , 赵正奎 , 等 . 配电网中分布式电源最大准入容量分析[J]. 电网技术 , 2012 , 36(10) : 87-92 . Su Xiaoling , Han Minxiao , Zhao Zhengkui , et al . Research on maximum capacity of grid-connected distributed generation in distribution network[J]. Power System Technology , 2012 , 36(10) : 87-92(in Chinese) .
- [18] Capitanescu F , Ochoa L F , Margossian H , et al . Assessing the potential of network reconfiguration to improve distributed generation hosting capacity in active distribution systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems , 2015 , 30(1) : 346-356 .
- [19] Ding F , Mather B . On distributed PV hosting capacity estimation, sensitivity study , and improvement[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy , 2017 , 8(3) : 1010-1020 .
- [20] 国家能源局 . 分布式发电管理办法(征求意见稿)[EB/OL] . (2018-03-20) . http://zfxgk.nea.gov.cn/auto87/201803/t20180323_3132.htm .
- [21] 国家发展改革委 , 国家能源局 . 关于开展分布式发电市场化交易试点的通知(发改能源[2017]1901号)[EB/OL] . (2017-10-31) . http://zfxgk.nea.gov.cn/auto87/201711/t20171113_3055.htm .
- [22] 陈虎 , 张田 , 裴晖明 , 等 . 分布式光伏接入对电网电压和网损的影响分析[J]. 电测与仪表 , 2015 , 52(23) : 63-69 . Chen Hu , Zhang Tian , Pei Huiming , et al . Analysis of distributed photovoltaic power influence on grid voltage and power losses[J]. Electrical Measurement & Instrumentation , 2015 , 52(23) : 63-69(in Chinese) .
- [23] 刘嘉彦 , 李勇 , 曹一家 , 等 . 考虑光伏利用效率的中低压配电网电压抬升抑制方法[J]. 电力系统自动化 , 2018 , 42(15) : 171-177 , 248-250 . Liu Jiayan , Li Yong , Cao Yijia , et al . Suppression method of voltage rise in medium and low distribution networks considering utilization efficiency of photovoltaic power[J]. Automation of Electric Power Systems , 2018 , 42(15) : 171-177 , 248-250(in Chinese) .
- [24] 杨晓辉 , 杨莉 , 杨磊 , 等 . 分布式光伏对配电网电压的影响机理及仿真分析[J]. 实验技术与管理 , 2019 , 36(10) : 63-68 . Yang Xiaohui , Yang Li , Yang Lei , et al . Influence mechanism and simulation analysis of distributed photovoltaic on distribution network voltage[J]. Experimental Technology and Management , 2019 , 36(10) : 63-68(in Chinese) .
- [25] 黄巍 , 吴俊勇 , 鲁思棋 , 等 . 电压偏差和谐波约束下配网光伏最大渗透率评估[J]. 电力系统保护与控制 , 2016 , 44(6) : 49-55 . Huang Wei , Wu Junyong , Lu Siqi , et al . Maximum photovoltaic penetration considering voltage deviation and harmonic constraints[J]. Power System Protection and Control , 2016 , 44(6) : 49-55(in Chinese) .
- [26] 刘健 , 林涛 , 同向前 , 等 . 分布式光伏电源对配电网短路电流影响的仿真分析[J]. 电网技术 , 2013 , 37(8) : 2080-2085 . Liu Jian , Lin Tao , Tong Xiangqian , et al . Simulation analysis on influences of distributed photovoltaic generation on short-circuit current in distribution network[J]. Power System Technology , 2013 , 37(8) : 2080-2085(in Chinese) .
- [27] 刘健 , 黄炜 . 分布式光伏电源与负荷分布接近条件下的可接入容量分析[J]. 电网技术 , 2015 , 39(2) : 299-306 . Liu Jian , Huang Wei . Analysis on grid-connectable capacity of distributed PV generation in case of PV generation distribution close to load distribution[J]. Power System Technology , 2015 , 39(2) : 299-306(in Chinese) .
- [28] 刘科研 , 刘永梅 , 盛万兴 , 等 . 考虑电压约束的分布式电源接入配电网最大准入容量计算方法[J]. 电力自动化设备 , 2016 , 36(6) : 81-87 . Liu Keyan , Liu Yongmei , Sheng Wanxing , et al . Maximal allowable DG penetration capacity calculation considering voltage constraints[J]. Electric Power Automation Equipment , 2016 , 36(6) : 81-87(in Chinese) .

- [29] 张勇军,张紫珩.考虑电压约束的 10kV 配电网光伏容量评估[J].*电网与清洁能源*,2017,33(3):119-124,130.
Zhang Yongjun, Zhang Ziheng . Assessment of photovoltaic power capacity in 10 kV distribution network considering voltage constraints[J] . Power System and Clean Energy , 2017 , 33(3) : 119-124 , 130(in Chinese) .
- [30] Sakar S ,Balci M E ,Aleem S H ,et al . Integration of large- scale PV plants in non-sinusoidal environments: considerations on hosting capacity and harmonic distortion limits[J] . *Renewable & Sustainable Energy Reviews* , 2018 , 82(1) : 176-186 .
- [31] 江南,龚建荣,甘德强.考虑谐波影响的分布式电源准入功率计算[J].*电力系统自动化*,2007,31(3):19-23.
Jiang Nan , Gong Jianrong , GanDeqiang . Computing the maximum penetrating level of distributed generators in distribution network by taking into account of harmonic constraints[J] . Automation of Electric Power Systems , 2007 , 31(3) : 19-23(in Chinese) .
- [32] 钟清,高新华,余南华,等.谐波约束下的主动配电网分布式电源准入容量与接入方式[J].*电力系统自动化*,2014,38(24):108-113.
Zhong Qing ,Gao Xinhua ,Yu Nanhua ,et al .Accommodating capacity and mode of distributed generation under harmonic constraint in active distribution networks[J] . Automation of Electric Power Systems , 2014 , 38(24) : 108-113(in Chinese) .
- [33] 陶顺,郭静,肖湘宁.基于电流保护原理的 DG 准入容量与并网位置分析[J].*电网技术*,2012,36(1):265-270.
Tao Shun ,Guo Jing ,Xiao Xiangning . Analysis on allowed penetration level of distributed generation and its grid-connected position based on principles of current protection[J] . Power System Technology , 2012 , 36(1) : 265-270(in Chinese) .
- [34] 马晓博.考虑配电网电流保护约束的分布式电源准入容量研究[J].*中国电力*,2016,49(4):88-92.
Ma Xiaobo . Study on maximum penetration level of distributed generation in distribution network by considering current protection[J] . Electric Power , 2016 , 49(4) : 88-92(in Chinese) .
- [35] 邹宏亮,韩翔宇,廖清芬,等.考虑电压质量与短路容量约束的分布式电源准入容量分析[J].*电网技术*,2016,40(8):2273-2280.
ZouHongliang , Han Xiangyu , Liao Qingfen , et al . Penetration capacity calculation for distributed generation considering voltage quality and short circuit capacity constraints[J] . Power System Technology , 2016 , 40(8) : 2273-2280(in Chinese) .
- [36] 刘志文,董旭柱,黄豫,等.考虑多种约束的分布式电源最大渗透率计算方法[J].*电力系统及其自动化学报*,2019,31(6):85-92.
Liu Zhiwen , Dong Xuzhu , Huang Yu , et al . Calculation method for maximum penetration of distributed generations considering multiple constraints[J] . Proceedings of the CSU-EPSA , 2019 , 31(6) :85-92(in Chinese) .
- [37] 董逸超,王守相,闫秉科.配电网分布式电源接纳能力评估方法与提升技术研究综述[J].*电网技术*,2019,43(7):2258-2266.
Dong Yichao , Wang Shouxiang , Yan Bingke . Review on evaluation methods and improvement techniques of DG hosting capacity in distribution network[J] . Power System Technology , 2019 , 43(7) : 2258-2266(in Chinese) .
- [38] 中国电力科学研究院,国家电网公司,中国南方电网有限责任公司,等.DL/T 5729—2016 配电网规划设计技术导则[S].北京:中国电力出版社,2016.
- [39] 中国电力科学研究院,中电普瑞张北风电研究检测有限公司.GB/T 33593—2017 分布式电源并网技术要求[S].北京:中国标准出版社,2017.
- [40] 中国电力科学研究院,华北电力科学研究院有限公司,中机生产力促进中心,等.GB/T 12325—2008 电能质量供电电压偏差[S].北京:中国标准出版社,2008.
- [41] 能源部电力司,能源部电力科学研究院,四川省电力工业局,等.GB/T 14549—93 电能质量公用电网谐波[S].北京:中国标准出版社,1993.
- [42] 西安领步电能质量研究所,中国电力科学研究院,中机生产力促进中心,等.GB/T 24337—2009 电能质量公用电网间谐波[S].北京:中国标准出版社,2009.

收稿日期:2019-12-18。

作者简介:



梁志峰

梁志峰(1984),男,硕士,高级工程师,长期从事电力系统运行与控制、水电及新能源调度等工作,E-mail:liang-zhifeng@sgcc.com.cn;

夏俊荣(1985),男,博士,高级工程师,通信作者,研究方向为新能源发电并网技术,E-mail:xiajunrong@epri.sgcc.com.cn;

孙檬檬(1988),女,本科,工程师,研究方向为新能源发电并网技术,E-mail:sunmengmeng@epri.sgcc.com.cn;

周昶(1985),男,硕士,高级工程师,从事分布式发电、新能源调度自动化方面研究工作,E-mail:zhouchang@epri.sgcc.com.cn。

(责任编辑徐梅)

附录

表 A1 分布式光伏承载力测算基础数据需求表
Tab.A1 Basic data requirements for calculating distributed PV hosting capacity

类别	详细需求	用途及说明
系统数据	电网拓扑	确定评估范围；确定区域内变压器、线路、电源间的拓扑关系；直观展示评估等级。根据已投运电网绘制。
	母线大小方式短路阻抗/短路容量	分布式光伏以设备热稳允许的容量接入后，估算各级母线的电压偏差值、短路电流值。
	变压器容量限值	评估各级变压器的热稳定性。
设备参数	线路电流限值	评估各级线路的热稳定性，一般取线路的保护限值、CT 限值和热稳限值三者的最小值。
	电源装机和规划信息	基于集中式、分布式电源装机现状，评估分布式光伏承载力，基于已批复、在建的电源信息，修正承载力结果。
	逆变器功率因数调节范围	确定分布式光伏有功、无功出力范围，估算各级母线的电压偏差值。
运行数据	运行方式	按照电网历史典型运行方式，复原电网拓扑结构，确保电网拓扑和运行方式的一致性。
	变压器负载时序	按照变压器的历史负载时序，评估其热稳定性及分布式光伏新增裕度。
	线路负载时序	按照线路的历史负载时序，评估其热稳定性及分布式光伏新增裕度。
	电源出力时序	基于集中式电源历史出力时序，依据电力平衡原则，分析区域内用电负荷与分布式电源出力的关系。
	母线电压时序	按照母线的历史电压时序，校核电压偏差是否满足要求。
	实测谐波电流	按照电能质量监测点的谐波电流实测值，校核谐波电流是否超标。
安全边界	实测间谐波电压含有率	按照电能质量监测点的间谐波电压含有率实测值，校核间谐波电压含有率是否超标。
	电压偏差限值	用于电压偏差校核，参考相关国家标准规定的限值。
	短路电流限值	用于短路电流校核，参考相关国家标准规定的限值。
	谐波电流允许值	用于谐波电流校核，参考相关国家标准规定的限值。
数据	间谐波电压含有率限值	用于间谐波电压含有率校核，参考相关国家标准规定的限值。

表 A2 算例 1 评估结果表
Tab.A2 Assessment results of example 1

评估母线	λ_{max}	短路电流校核	电压偏差校核	谐波校核	评估等级	P_m/MW
220kV 双龙变 220kV I 母	77.69%	—	—	—	红	0.00
220kV 双龙变 110kV I 母	—	—	—	—	红	0.00
220kV 双龙变 35kV I 母	—	—	—	—	红	0.00
110kV 工农变 110kV I 母	—	—	—	—	红	0.00
110kV 工农变 10kV I 母	—	—	—	—	红	0.00
110kV 官塘变 110kV I 母	—	—	—	—	红	0.00
110kV 官塘变 20kV I 母	—	—	—	—	红	0.00
110kV 官塘变 10kV I 母	—	—	—	—	红	0.00
35kV 金南变 35kV I 母	—	—	—	—	红	0.00
35kV 金南变 10kV I 母	—	—	—	—	红	0.00
35kV 塔集变 35kV I 母	—	—	—	—	红	0.00
35kV 塔集变 10kV I 母	—	—	—	—	红	0.00

表 A3 算例 2 评估结果表
Tab.A3 Assessment results of example 2

评估母线	λ_{max}	短路电流校核	电压偏差校核	谐波校核	评估等级	P_m/MW
220kV 淇水变 220kV I 母	-15.19%	通过	通过	通过	绿	35.86
220kV 淇水变 110kV I 母	-13.67%	通过	通过	通过	绿	35.86
220kV 淇水变 35kV I 母	-2.95%	通过	通过	通过	绿	35.86
110kV 朱码变 110kV 母线	-10.74%	通过	通过	通过	绿	35.86
110kV 朱码变 35kV I 母	-10.74%	通过	通过	通过	绿	35.86
110kV 朱码变 35kV II 母	30.76%	通过	通过	通过	黄	34.62
110kV 朱码变 10kV I 母	-9.46%	通过	通过	通过	绿	35.47
110kV 朱码变 10kV II 母	-2.51%	通过	通过	通过	绿	35.86
35kV 保滩变 35kV I 母	81.53%	通过	通过	通过	红	3.69
35kV 保滩变 10kV I 母	82.69%	通过	通过	通过	红	3.46
110kV 引北变 110kV I 母	-13.03%	通过	通过	通过	绿	35.86
110kV 引北变 10kV I 母	-13.03%	通过	通过	通过	绿	35.86
35kV 左圩变 35kV II 母	-2.95%	通过	通过	通过	绿	28.80
35kV 左圩变 10kV II 母	20.90%	通过	通过	通过	黄	8.17