

[分布式光伏]

基于电能质量机会约束的配电网分布式光伏承载能力研究

文/高茂成

国网安徽省电力有限公司淮北供电公司

基于电能质量机会约束提出配电网分布式光伏接入容量分析模型，优化配电网光伏承载能力，确保电力系统稳定运行。构建数学模型，不同场景分析分布式光伏接入容量影响。分析结果表明，光伏出力的相关性、机会约束置信水平对系统的光伏接入容量有明显影响，电能质量机会约束的配电网分布式光伏接入容量分析模型为配电网光伏规划提供科学工具，有助于推动分布式光伏合理接入。

分布式光伏作为可再生能源代表，在电力系统中所占比例迅速上升。在配电网中，分布式光伏接入使得负荷容量与光伏输出之间难以形成有效动态匹配，导致净负荷曲线发生变化，出现负值现象。这种变化不仅影响配电网稳定性，也对电力供应安全性提出更高的要求。随着大量分布式光伏接入，功率返送现象愈发明显，配电网过载风险增大，分布式光伏并网运行会引发网损增加、电压超限等问题，降低配电网供电质量，需要制定合理接入方案，评估配电网分布式光伏承载能力，确保电力系统运行^[1]。基于上述问题，提出光伏承载能力评估方法，该方法通过对配电网中电能质量进行约束，为配电网运行提供科学指导。

电能质量约束配电网分布式光伏接入分析模型

1. 目标函数

配电网中分布式光伏接入容量直接影响电能质量，当分布式光伏接入容量过大时会导致配电网内的网络损耗上升，对经济运行产生不利影响。为优化配电网的运行效率，函数表达式为

$$f(x, y, u, d, H) = \max \left(\sum_{i=1}^n x_i y_i - \left(P^s \text{loss} + \sum_{h=1}^H P^h \text{loss} \right) \right) \quad (1)$$

式中， x_i 为二进制变量，若节点 i 接入分布式光伏，取值为1，否则为0； y_i 为节点 i 权重，反映其在配电网中的接入潜力； n 为配电网的节点总数； u 为光伏出力效率因子， P^s_{loss} 为配电网基波损耗，反映正常运行下的能量损失； P^h_{loss} 为第 h 次谐波损耗，反映因谐波产生的额外能量损失； H 为最高谐波频次。

目标函数通过优化分布式光伏接入容量和接入位置，最大化配电网的经济效益，确保电能质量符合相关标准，考虑光伏出力对电能质量的影响，通过机会约束方法来处理这些不确定性，确保在各种随机扰动情况下配电网的稳定运行^[2]。

2. 约束条件

(1) 潮流方程式约束

配电网潮流分布须满足潮流方程，确保电力供需之间的平衡，基波潮流方程表述为

$$P_i^V - P_i^U + \sum_{j \in N_i} (G_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j) + B_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j)(V_i^2 - V_j^2)) = 0 \quad (2)$$

式中， P_i^V 和 P_i^U 分别为接入节点 i 的分布式光伏系统输出的有功和无功功率。

式(2)确保在任何给定时刻，电力生产平衡，避免供电中断。

(2) 节点基波电压机会约束

由于分布式光伏输出功率的不确定性，配电网各节点的基波电压会受到影响，节点基波电压的机会约束计算式为

$$P_r\{V_i \in [V_{\min}, V_{\max}]\} \geq \alpha \quad (3)$$

式中， V_i 为节点 i 基波电压； $V_{\min}$ 和 $V_{\max}$ 分别为节点电压下限和上限； α 为节点电压在该范围内的置信水平，确保电压水平在安全范围内波动，避免对用电设备造成潜在损害。

(3) 支路均方根电流约束

为防止支路过载，支路电流应满足以下约束

$$I_{ij,rms} \leq I_{ij,max} \quad (4)$$

式中， $I_{ij,rms}$ 为支路 ij 的均方根电流； $I_{ij,max}$ 为支路允许最大均方根电流。

约束有助于确保线路的安全性，降低电路故障风险。

(4) 支路传输容量约束

支路传输容量必须在安全范围内，防止过载现象发生，该约束表示为

$$S_{ij} \leq S_{ij,max} \quad (5)$$

式中， S_{ij} 为支路 ij 实际传输容量； $S_{ij,max}$ 为支路的最大传输容量。

通过约束管理配电网的负载能力，确保电力系统稳定运行。

(5) 分布式光伏接入容量上限约束

为确保系统安全性，分布式光伏的接入容量受到限制，表达式为

$$P_{pv,i} \leq P_{pv,i,max} \quad (6)$$

式中， $P_{pv,i}$ 为节点 i 分布式光伏接入容量； $P_{pv,i,max}$ 为该节点的最大接入容量。

约束确保在不超过配电网安全运行极限情况下，分布式光伏的接入能够得到合理配置，防止线路和设备因过载而发生故障。

配电网分布式光伏承载能力分析

1. 算例分析

为验证配电网分布式光伏承载能力分析模型的有效性，采用EEE33节点算例系统进行测试。该系统能够模拟实际配电网运行情况，为分析模型提供测试平台。本算例中各个节点的负荷被设定为服从正态分布，有功功率和无功功率的期望值参考了

IEEE 33节点系统的标准参数。为模拟实际电力系统中负荷的波动性，负荷的变异系数设定为10%，光伏出力模拟采用单位功率因数运行，将分布式光伏系统视为唯一的谐波源。重点分析第5和第7次的低次谐波电流。表1展示与基波成分之间的谐波频谱数据，模拟光伏逆变器的实际谐波电流输出^[3]。

表1 谐波频谱数据

谐波次数	幅值 (%)
1	100
5	7.89
7	6.29

5号、12号、20号和29号分布式光伏接入点设计光伏设备的最大装机容量为5 MW，同时规定节点的基波电压需控制在基准电压的0.9~1.05倍之间，电压的总谐波畸变限制设定为不超过3%。为符合电能质量标准，两个参数的置信水平则设定为0.9，保障配电网的稳定性。在优化算法的设计当中，种群规模为60，遗传算法的终止条件是累计迭代达300次或目标函数的误差在0.001以内。

2. 分布式光伏接入容量结果分析

研究旨在对分布式光伏的电能质量机会约束进行实证验证，设计四种不同的实验场景，这些场景在电源和负荷的概率特征上保持一致，且采用相同的置信水平，确保各实验结果间的可比性。

场景一在节点5与29接入分布式光伏，不考虑电压谐波失真限制；场景二在节点5与29接入分布式光伏，考虑电压总谐波失真限制；场景三在节点5、12、20和29接入分布式光伏，不考虑电压谐波失真限制；场景四在节点5、12、20和29接入分布式光伏，需考虑电压总谐波畸变限制，接入容量的详情见表2。

在四种场景中，随着分布式光伏接入节点数量的增加，各节点的光伏容量相较于仅有两个节点接入时有所降低，由于电能质量约束条件增加，限制光伏总接入容量。四种分布式光伏接入场景下节点基波电压质量得到改善，且所有节点的电压均处于正常范围内。节点电压总谐波畸变约束场景中，多数节点基波电压位于0.98~1.02 (pu) 间，电压质量得到提升。因此合理设置分布式光伏的接入容量和位置，能提高配电网可再生能源利用率，确保电网电能质量，实现配电网优化运行^[4]。

表2 不同场景下分布式光伏接入容量 (单位: kW)

场景	节点5容量	节点12容量	节点20容量	节点29容量	光伏总容量	系统基波损耗	系统谐波损耗	目标函数值
场景一	4 700	-	-	2 600	7 300	120	6	7 000
场景二	4 500	-	-	1 400	5 900	100	4	6 000
场景三	4 200	1 000	4 000	1 700	10 800	200	8	2 000
场景四	4 000	500	380	800	9 100	150	5	1 800

3. 机会约束置信水平的影响分析

选择85%、90%、95%和100%作为置信水平，评估其对配电网分布式光伏接入容量的影响，并计算在不同置信水平下系统能够承载的最大光伏接入容量。图1展示不同置信水平下系统光伏最大接入容量的变化趋势，当置信水平达到100%时，视为不考虑机会约束情况。

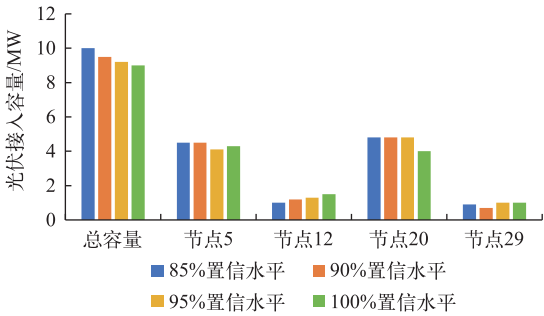


图1 不同置信水平下光伏接入容量对比图

随着分布式光伏的大规模接入，配电网的源荷随机性增强，表3展示在不同置信水平下，配电网光伏接入容量的变化情况，数据揭示置信水平对光伏接入容量的重要影响。当置信水平为85%，系统允许的光伏接入容量较大，表明在较低风险接受度下，配电网可以承载更多光伏发电。随着置信水平提高，光伏接入容量减少，表明在更高风险规避要求下，为保证系统的安全稳定运行，必须限制光伏的接入容量。

表3 不同置信水平下光伏容量数据表

置信水平 (%)	光伏最大接入容量/kW	节点电压越限概率 (%)	谐波电压越限概率 (%)	系统网损 (%)
85	6 800	5	3	2.5
90	6 300	3	2	2.7
95	5 800	2	1.5	2.9
100	5 300	1	1	3.1

在对电能质量要求极高区域，选择较高置信水平，如95%或100%，意味着光伏接入容量会受到限制。相反在电能质量要求相对宽松区域，选择较低

置信水平85%，确保系统安全运行。

4. 分布式光伏相关性的影响分析

为探讨分布式光伏之间出力相关性对配电网光伏接入容量的影响，设定不同相关性系数，分析分布式光伏的出力相关性如何影响系统的光伏承载能力。设置三个不同的相关性系数，即0、0.4和0.8，分别代表光伏单元之间的无相关性、中等相关性和强相关性。通过设置计算在不同相关性水平下，系统能够承载的最大分布式光伏接入容量，不同相关性系数对光伏最大接入容量的影响，如图2所示。

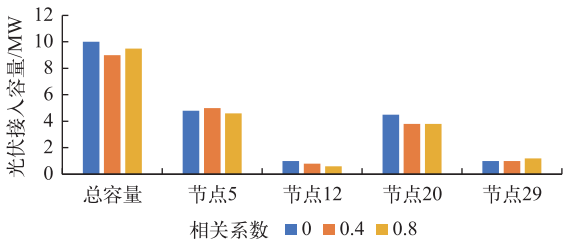


图2 不同相关性系数对光伏最大接入容量影响数据

在没有相关性情况下，各分布式光伏单元的出力变化是独立的，系统能够承载更大的光伏接入容量。各个光伏单元的出力波动不会同步放大，在很大程度上减少对系统电压稳定性的影响，系统基波损耗和谐波损耗均维持在较低水平，分别为120 kW、6 kW。

在中等相关性的情形下，光伏出力的一致性有所增加，虽然波动性并不会过于集中，但系统光伏承载能力有所下降，最大接入容量为6 500 kW，基波损耗上升至130 kW，谐波损耗增加至7 kW，表明尽管系统仍能保持较高的光伏接入容量，但其电压稳定性开始受到一定程度的影响。

当相关性系数为0.8时，光伏出力变化的一致性增强，系统中电压波动和谐波电压的波动性加剧，系统允许接入的光伏容量减少至6 000 kW，基波损耗和谐波损耗分别上升至140 kW和8 kW，结果强调在强相关性情况下，系统需要采取措施以避免电

(下转第119页)

$E_L = \frac{C_{12}}{C_{12} + C_{2E}} \times E_H$ 。由电炉变压器厂家提供的资料可知， C_{12} 与 C_{2E} 数值极为接近，故 $E_L \approx 0.5 E_H$ ，这个幅值的电压对电炉变压器二次绕组及冶炼短网设备的绝缘安全是致命的。

在电炉变压器二次侧并联一个附加电容 C_A 后，等效电路图如图6所示。

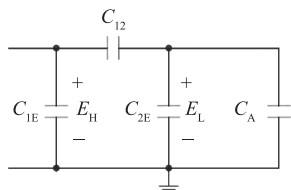


图6 并联附加电容后的电炉变压器电容传递过电压等效电路图

由图6可知， $E_L = \frac{C_{12}}{C_{12} + C_{2E} + C_A} \times E_H$ 。

大容量电炉变压器， C_{12} 、 C_{2E} 电容值在4 000～6 000 pF之间，当 C_A 取0.1 μF，电炉变压器二次侧传递电压 E_L 仅为一次侧零序电压 E_H 的1/25，处于电炉变压器二次绕组及冶炼短网耐受电压范围内。

普通配电网中，电力变压器一次侧因故障发生不对称运行的概率非常低，一般情况下，无需对电力变压器二次侧传递过电压采取抑制措施。

电炉变压器一次侧二次侧通过电容耦合进行零序电压传递是相互的，二次侧不对称运行产生的零序电压传递至一次侧时，不足以危害一次侧绝缘，故本文不做分析讨论。

结束语

配置阻容吸收装置时，首先，为了降低绕线式电阻电感效应影响阻容吸收装置的响应速度，应选用无感电阻，电阻自感需小于10 μH；其次，在满足限制截流过电压需求的前提下，电阻、电容的选择应充分考虑阻容吸收装置的发热量，3只电阻的总发热量不宜超过3 000 W；再次，阻容吸收装置不宜布置在封闭的柜体内。

电炉变压器一、二次侧之间传递过电压限制，二次侧电容装置取值不宜大于0.1 μF。

(收稿日期：2024-09-03)

参考文献

[1] 吴广宁，张冠军，刘刚. 高电压技术[M]. 北京：机械工业出版社，2014.

(上接第 64 页)

压和谐波电压超出安全运行范围，确保系统安全稳定运行，不同相关性系数下系统光伏最大接入容量和系统损耗情况见表4。

表4 不同相关性系数下光伏最大接入容量和系统损耗数据

相关性系数	光伏最大接入容量/ kW	系统基波损耗/ kW	系统谐波损耗/ kW
0	7 000	120	6
0.4	6 500	130	7
0.8	6 000	140	8

结束语

通过建立基于电能质量机会约束的配电网分布式光伏接入容量分析模型，深入探讨不同因素对分布式光伏接入容量的影响。通过算例分析、接入容量结果分析、机会约束置信水平的影响分析、分布式光伏相关性的影响分析，验证模型有效性，确保

配电网在接入分布式光伏后的稳定性。EA

(收稿日期：2024-12-05)

参考文献

[1] 段明辉，乞胜静，王大成. 分布式光伏接入导致配电网电压越限问题的研究[J]. 农村电气化，2024(10)：41-46.

[2] 江爱华. 分布式光伏并网对配电网的影响和对策[J]. 农村电工，2024，32(7)：32.

[3] 周群，陈灿玉，青倚帆，等. 考虑光伏波动性的配电网线损率阈值评估[J]. 太阳能学报，2024，45(10)：354-362.

[4] 陈勇，沈艳婷，贺永昌. 含高比例分布式光伏的低压配电网电压就地控制策略[J]. 电气技术与经济，2024(10)：27-31.