

基于单端口降阶模型的分布式光伏接入配电网交互影响分析

文贤旭, 周科, 张俊玮, 何明君, 蔡永翔

(贵州电网有限责任公司电力科学研究院, 贵州 贵阳 550002)

摘要: 高比例光伏渗透的配电网中含有大量电压敏感型电力电子设备, 这些设备之间存在严重交互影响, 导致节点并网极限容量的计算复杂度显著增加。为此, 文中提出一种基于单端口降阶模型的分布式光伏设备接入配电网后馈入点并网极限容量解析计算方法, 并分析接入设备与馈入点间交互影响。首先, 基于配电网注入电流平衡方程, 定义电网特性函数以刻画馈入点电流与电压间的非线性关系, 进而采用单端口降阶模型简化电网特性函数, 从而降低计算复杂度。然后, 通过选取电网特性函数的特定截面计算模型等值参数, 解析推导馈入点并网极限容量表达式, 并定量分析接入设备与馈入点间交互影响。最后, 基于 IEEE 33 节点配电网算例进行验证, 研究表明, 当光伏设备接入馈入点临近位置时, 其并网极限容量提升效果更为显著。在不同配电网拓扑中, 辐射状配电网中接入设备与馈入点交互影响最大, 环状配电网次之, 而两端供电型配电网的交互影响最小。

关键词: 分布式光伏; 高比例光伏渗透配电网; 并网极限容量; 交互影响; 单端口降阶模型; 电网特性函数

中图分类号: TM712

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2025)04-0187-10

0 引言

大规模光伏接入配电网后, 系统运行特性受到深刻影响, 使系统从无源网络转变为多源非线性复杂网络^[1-10]。同时, 以电力电子接口为核心的光伏设备通常采用电压跟踪型并网方式^[11-14], 进一步加剧了设备间的耦合程度, 导致配电网馈入点并网极限容量的准确估计变得更加困难。若并网极限容量分析结果偏离实际工况, 可能引起馈入点电压超限甚至电压崩溃, 从而威胁配电网的安全稳定运行^[15-17]。因此, 有必要精确量化光伏设备接入对馈入点并网极限容量的影响, 以便及时调控系统运行状态, 最终构建安全可控、灵活高效的现代配电网。

目前, 国内外学者从多个角度对高比例新能源系统并网极限容量展开研究。文献[18-20]采用短路比指标量化新能源接入设备与电网的强弱关系, 并基于临界短路比确定并网极限容量。考虑到不同节点并网母线阻抗的差异, 文献[21-22]采用改进后的新能源集群短路比评估设备并网极限容量。文献[23-24]将接入设备等值为恒阻抗模型, 并利用阻抗模指标计算系统馈入点的并网极限容量。文献[25]建立有功功率与电压的灵敏度指标, 通过该指标在电压崩溃点处趋于无穷大的特性, 推导并网极限容量。该灵敏度指标还可用于系统薄弱点识别, 从而优化系统性能^[26-27]。文献[28-29]基于系统潮流方程的雅可比矩阵定义广义短路比指标, 并推导出广义短路比与接入设备容量关系, 发现当广义

短路比为 0 时, 对应的容量即为节点的并网极限容量。

上述研究在实际应用中均取得良好效果, 但仍存在值得改进的方面。首先, 现有方法均采用戴维南等效电路简化网络结构, 忽略网络中电力电子设备间的非线性交互影响, 导致系统馈入点并网极限容量的计算结果存在较大误差。其次, 基于灵敏度指标和潮流方程方法的计算过程相对繁琐, 且难以推导出解析表达式, 不利于实际工程应用。最后, 上述研究主要针对新能源场站或大电网场景下设备并网极限容量计算, 鲜有涉及配电网接入光伏设备与馈入点并网极限容量交互影响的分析。

为此, 文中在计及设备与电力网络(后文简称网络)耦合特性的基础上, 提出一种基于单端口降阶模型的分布式光伏接入配电网馈入点并网极限容量计算方法, 并详细分析接入设备与馈入点间的交互影响。主要研究内容如下:

(1) 针对多源主动配电网中馈入点电压电流的复杂映射关系, 提出考虑设备与网络交互和设备间耦合效应的电网特性函数。基于此, 提出通过关键断面信息拟合电网特性函数的单端口降阶模型, 相较于戴维南等值电路, 该方法能更准确地表征馈入点电压电流非线性关系。

(2) 基于单端口降阶模型, 从系统电压运行点存在性的角度出发, 解析推导在电压安全运行区间约束下的配电网馈入点并网极限容量表达式。通过该表达式, 定量分析光伏接入位置和网络拓扑对馈入点并网极限容量的影响规律, 有效指导配电网安全稳定运行。

收稿日期: 2024-10-18; 修回日期: 2025-01-08

基金项目: 贵州省科技计划资助项目(CXTD[2022]008)

1 基于单端口降阶模型的分布式光伏交互影响分析

1.1 配电网结构及建模

在如图1所示的高比例光伏渗透配电网中,配电网包含 n 个节点,分别接入光伏、储能、工业负荷和居民负荷等设备。假设节点1为配电网公共连接点(point of common coupling, PCC),节点 k 和节点 l 作为馈入点,暂未接入其他设备。当在节点 l 接入光伏设备后,由于设备与网络间的交互影响,节点 k 的运行状态将发生改变,进而影响节点 k 并网极限容量。因此,文中研究在考虑并网光伏设备影响下,求解馈入节点 k 在满足电压运行范围要求时的并网极限容量。

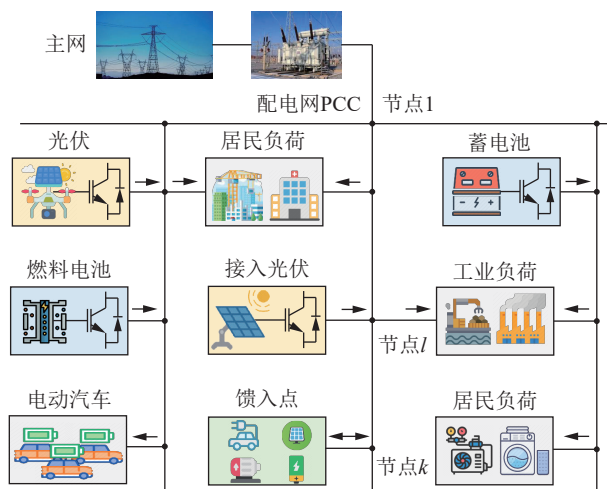


图1 单馈入配电网示意

Fig.1 Schematic diagram of single-infeed distribution network

图1中的配电网注入电流平衡方程由设备特性和网络特性共同组成,表达式为:

$$Y e^{j\theta} V = e^{j\theta} \left[\sum_{i=1, i \neq k, l}^n (h_{di}(V_i) - j h_{qi}(V_i)) e_i + (I_{dk} - j I_{qk}) e_k + (I_{dl} - j I_{ql}) e_l \right] \quad (1)$$

式中: $Y \in \mathbf{C}^{n \times n}$ 、 $V \in \mathbf{R}^n$ 分别为系统导纳矩阵和节点电压幅值向量; $\theta \in \mathbf{R}^n$ 为设备本地 dq 坐标系与全局坐标系的角度差向量; e_i 、 e_k 、 e_l 为长度为 n 的单位向量,表示第 i 、 k 、 l 个分量为1,其余分量为0的向量; I_{dk} 、 I_{qk} 、 I_{dl} 、 I_{ql} 分别为节点 k 和节点 l 相连设备向网络注入 d 轴和 q 轴电流; $h_{di}(V_i)$ 、 $h_{qi}(V_i)$ 分别为与节点 i 相连设备向网络注入的 d 轴和 q 轴电流,其为关于节点 i 电压幅值 V_i 的函数,表征设备注入电流对并网点电压的高度敏感性。在此基础上,当给定节

点 k 接入设备的容量和控制特性后,将设备注入电流 I_{dk} 和 I_{qk} 代入式(1)中,若通过牛顿法解得第 k 个节点电压 V_k 满足运行范围要求,则说明接入设备存在运行平衡点;若不存在满足要求的解,则会导致接入设备失稳。

文中采用恒定电压源 $E \angle 0$ 串联电抗 X_{pcc} 刻画主网对配电网 PCC 的作用,即电抗越小,主网对 PCC 的支撑能力越强^[30]。当给定 PCC 电压为 $V_1 \angle \theta_1$ 时,得到 PCC 注入 d 轴和 q 轴电流分别为:

$$\begin{cases} I_d = -\frac{E \sin \theta_1}{X_{pcc}} \\ I_q = \frac{E \cos \theta_1 - V_1}{X_{pcc}} \end{cases} \quad (2)$$

以电力电子设备为接口的光伏和储能设备通常采用电压跟踪模式。这类设备通过锁相环实现内部坐标系与并网点电压的相位同步,在功率外环和电流内环协同控制下输出指定有功功率 P_{ref} 和无功功率 Q_{ref} 。基于此控制特性,在分析馈入点静态并网极限容量时,可将光伏和储能设备等效为 PQ 节点,从而得到注入电流表达式为:

$$\begin{cases} I_d = \frac{P_{ref}}{V} \\ I_q = \frac{Q_{ref}}{V} \end{cases} \quad (3)$$

式中: V 为设备所连接节点的电压幅值。

现代配电网中负荷类型多且控制复杂^[31],为简化分析,采用阻抗-电流-功率(impedance current power, ZIP)负荷近似模拟各种负荷特性。ZIP 负荷由恒阻抗、恒电流和恒功率三部分按比例构成,其注入电流表达式为:

$$\begin{cases} I_d = a_d V + b_d + c_d \frac{1}{V} \\ I_q = a_q V + b_q + c_q \frac{1}{V} \end{cases} \quad (4)$$

式中: a_d 、 b_d 、 c_d 分别为恒阻抗、恒电流、恒功率的有功负荷比例; a_q 、 b_q 、 c_q 分别为恒阻抗、恒电流、恒功率的无功负荷比例,根据节点负荷特性差异具有不同取值。

1.2 电网特性函数与单端口降阶模型

式(1)完整地描述了在考虑设备与网络以及设备间交互影响情况下,馈入节点的注入电流 I_{dk} 和 I_{qk} 对运行电压状态的影响。对于任意给定的 I_{dk} 和 I_{qk} ,可从式(1)解出 V_k 。因此基于隐函数定理,可以建立 I_{dk} 、 I_{qk} 与 V_k 的映射关系 $f(\cdot)$,并将其定义为电网特性函数:

$$V_k = f(I_{dk}, I_{qk}) \quad (5)$$

设备注入网络电流 I_{dk} 和 I_{qk} 可表示为关于极限

容量 S 和 V_k 的函数:

$$\begin{cases} I_{dk} = g_d(S, V_k) \\ I_{qk} = g_q(S, V_k) \end{cases} \quad (6)$$

式中: $g_d(\cdot)$ 、 $g_q(\cdot)$ 分别为设备 d 轴和 q 轴注入电流与极限容量 S 、馈入点电压 V_k 的映射关系, 由设备具体特性所决定。

由此, 通过联立电网特性函数和设备注入电流函数, 可计算出给定容量设备接入配电网后的稳态电压运行点。当系统节点电压的安全运行范围为 $[V_{\min}, V_{\max}]$ 时, 设备的并网极限容量 S 表示为:

$$\begin{cases} S = \min \sqrt{P^2 + Q^2} \\ \text{s.t. } \forall V_k \in [V_{\min}, V_{\max}] \\ V_k = f(I_{dk}, I_{qk}) \\ I_{dk} = g_d(S, V_k) \\ I_{qk} = g_q(S, V_k) \end{cases} \quad (7)$$

式中: P 、 Q 分别为模型注入的有功、无功功率。

然而, 由于高维非线性的电网特性函数过于复杂, 直接计算式(7)的成本较高, 在实际工程应用中存在一定的困难。因此, 文中在兼顾计算复杂度与准确前提下, 采用单端口降阶模型简化电网特性函数。

单端口降阶模型将电网特性函数简化为等效电压源 $E_{\text{eq}} \angle 0$ 串联等效电抗 X_{eq} 和等效电阻 R_{eq} , 如图2所示, 并通过选取关键运行点求取模型等效参数。

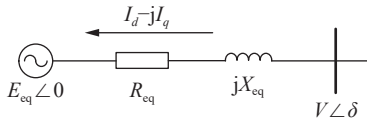


图2 单端口降阶模型示意

Fig.2 Schematic diagram of single-port reduced-order model

假设单端口降阶模型的端口电压为 $V \angle \delta$, 注入电流为 $I_d - jI_q$, 则模型的注入电流方程为:

$$\frac{V e^{j\delta} - E_{\text{eq}}}{R_{\text{eq}} + jX_{\text{eq}}} = e^{j\delta} (I_d - jI_q) \quad (8)$$

根据 $\sin^2 \delta + \cos^2 \delta = 1$ 可以得到 V 关于 I_d 和 I_q 的解析表达式:

$$V = \sqrt{E_{\text{eq}}^2 - (X_{\text{eq}} I_d - R_{\text{eq}} I_q)^2 + R_{\text{eq}} I_d + X_{\text{eq}} I_q} \quad (9)$$

式(9)中包含 E_{eq} 、 X_{eq} 和 R_{eq} 3个未知数, 因此需要3个独立方程进行求解。为此, 选择电网特性函数注入电流为0、 d 轴和 q 轴电流分别为额定电流 I_n 的3种情况, 并假设3种情况下的电网特性函数为:

$$\begin{cases} f(0, 0) = V_1 \\ f(I_n, 0) = V_2 \\ f(0, I_n) = V_3 \end{cases} \quad (10)$$

式中: V_1 、 V_2 、 V_3 分别为无电流、仅有 d 轴电流、仅有 q 轴电流注入时的端口电压。

将式(10)代入式(9)后, 得到模型等效参数表达式如下:

$$\begin{cases} E_{\text{eq}} = V_1 \\ R_{\text{eq}} = \frac{1}{2I_n} \left(V_3 - V_2 \sqrt{\frac{4V_1^2 - V_2^2 - V_3^2}{V_2^2 + V_3^2}} \right) \\ X_{\text{eq}} = -\frac{V_2}{I_n} + \sqrt{2V_2 V_3 \sqrt{\frac{4V_1^2 - V_2^2 - V_3^2}{V_2^2 + V_3^2}} + \frac{V_2^4 + 4V_1^2 V_3^2 - V_3^4}{V_2^2 + V_3^2}} \end{cases} \quad (11)$$

单端口降阶模型是基于网络和设备间非线性交互影响建立的电网特性函数的简化表达式, 适用于馈入点并网极限容量分析。该模型同时适用于电网在线应用场景。其参数辨识方法为在系统馈入点施加多个方向上电流微小扰动, 观察电压变化情况, 并采用最小二乘法进行参数辨识, 从而快速准确地获取模型参数, 为后续分析提供基础。

1.3 馈入点并网极限容量

在图2中, 假设降阶模型注入功率为 $P + jQ$, 则系统潮流方程为:

$$P + jQ = (V \angle \delta) \left(\frac{V \angle \delta - E_{\text{eq}}}{R_{\text{eq}} + jX_{\text{eq}}} \right)^* \quad (12)$$

将其简化后得到电压幅值、有功功率和无功率率间的关系为:

$$V^4 - [2(PR_{\text{eq}} + QX_{\text{eq}}) + E_{\text{eq}}^2] V^2 + (R_{\text{eq}}^2 + X_{\text{eq}}^2)(P^2 + Q^2) = 0 \quad (13)$$

式(13)是关于 V^2 的一元二次方程。图3展示了不同功率因数 $\cos \alpha$ 条件下, 节点电压随注入有功功率变化的 PV 曲线。从图3可知, PV 曲线上半支对应电压稳定解, 而越过鞍结分岔点后的电压解不再稳定, 同时当注入功率超过鞍结分岔点时系统将不存在可行解。

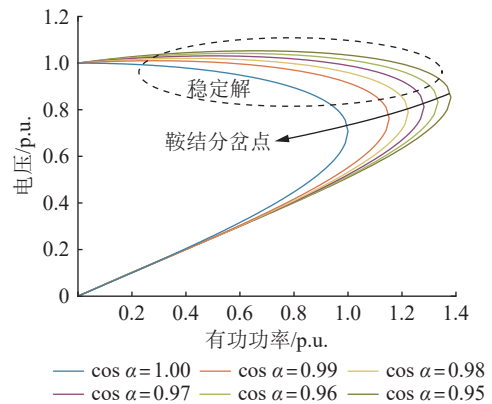


图3 有功功率与节点电压变化曲线

Fig.3 Node voltage versus active power curves

当式(13)在电压允许运行范围下不包括鞍结分岔点时, 根据网络性质可知, 随着节点功率的增

加,端口电压变化幅度也将逐渐增大。当端口电压等于电压要求运行范围边界时,此时对应的最小功率即为馈入点的并网极限功率。因此,需要分别计算当馈入点运行在电压上、下边界时对应的极限功率 S_u 和 S_d 。

$$\begin{cases} S_u = \min \sqrt{P^2 + Q^2} \\ \text{s.t. } V_{\max}^4 - [2(PR_{\text{eq}} + QX_{\text{eq}}) + E_{\text{eq}}^2] V_{\max}^2 + \\ (R_{\text{eq}}^2 + X_{\text{eq}}^2)(P^2 + Q^2) = 0 \end{cases} \quad (14)$$

$$\begin{cases} S_d = \min \sqrt{P^2 + Q^2} \\ \text{s.t. } V_{\min}^4 - [2(PR_{\text{eq}} + QX_{\text{eq}}) + E_{\text{eq}}^2] V_{\min}^2 + \\ (R_{\text{eq}}^2 + X_{\text{eq}}^2)(P^2 + Q^2) = 0 \end{cases} \quad (15)$$

分别解得:

$$\begin{cases} S_u = \frac{V_{\max}(V_{\max} - E_{\text{eq}})}{\sqrt{R_{\text{eq}}^2 + X_{\text{eq}}^2}} \\ S_d = \frac{V_{\min}(E_{\text{eq}} - V_{\min})}{\sqrt{R_{\text{eq}}^2 + X_{\text{eq}}^2}} \end{cases} \quad (16)$$

得到馈入点并网极限容量为:

$$S = \min \{S_u, S_d\} \quad (17)$$

如果馈入点电压运行范围包含鞍结分岔点,则表明电压运行范围下界低于鞍结分岔点对应的电压值,属于不稳定电压解。因此,采用鞍结分岔点电压替代电压运行范围下界。此时馈入点并网极限容量 S 可能对应于一元二次方程判别式等于0时的最小注入功率 S_b ,其表达式为:

$$\begin{cases} S_b = \min \sqrt{P^2 + Q^2} \\ \text{s.t. } E_{\text{eq}}^4 + 4E_{\text{eq}}^2(PR_{\text{eq}} + QX_{\text{eq}}) - \\ 4(PX_{\text{eq}} - QR_{\text{eq}})^2 = 0 \end{cases} \quad (18)$$

解得:

$$S_b = \frac{E_{\text{eq}}^2 (\sqrt{R_{\text{eq}}^2 + X_{\text{eq}}^2} + X_{\text{eq}})}{2R_{\text{eq}}^2} \quad (19)$$

此时的馈入点并网极限容量为:

$$S = \min \{S_u, S_b\} \quad (20)$$

如果馈入点的并网极限容量对应于鞍结分岔点,则表明馈入点初始运行状态距离系统分岔点较近,电压稳定裕度低;反之则说明电压稳定裕度较大。

1.4 接入设备与馈入点间交互影响分析计算流程

基于上述分析,以图1中配电网为例,分布式光伏接入配电网交互影响的计算为节点 l 接入或不接入光伏设备时,节点 k 的并网极限容量,通过对比分析这两种工况的计算结果,可定量评估馈入点间交互影响强弱。

光伏并网极限容量的具体计算步骤如下:

(1) 获取网络阻抗参数、光伏设备控制特性和控制参数,构建电网特性函数。

(2) 在3个特定注入电流场景下计算电网特性函数值,基于式(11)求解单端口降阶模型的等值电势和阻抗参数。

(3) 根据式(13)在馈入点电压允许运行范围内解的存在性条件下,确定馈入点光伏并网极限容量。

2 算例分析

以图4所示 IEEE 33 节点配电网结构为算例,分析光伏接入位置和配电网拓扑对并网极限容量的影响。系统基准功率和电压分别为 10 MV·A 和 12.66 kV,网络划分为 7 个区域。区域间通过联络开关 TS1—TS5 进行交互,可根据不同场景设置开关通断状态。光伏、储能的实际出力值和负荷参数具体数据如表1和表2所示。

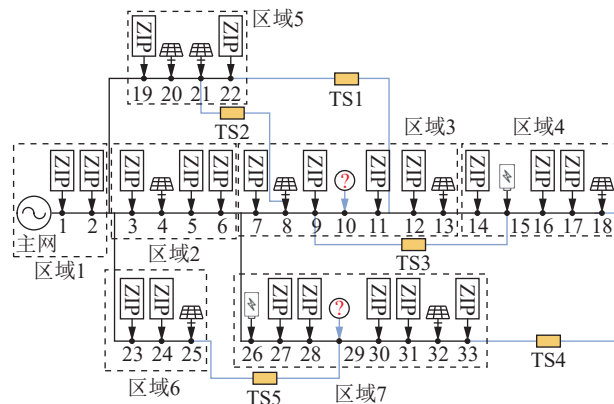


图4 IEEE 33 节点配电网示意

Fig.4 Schematic diagram of IEEE 33-node distribution network

表1 光伏和储能实际出力值

Table 1 Actual power values of photovoltaics and energy storage

节点	设备	有功/MW	无功/Mvar
4	光伏	1.5	0
8	光伏	2.0	0
13	光伏	0.8	0
15	储能	0.6	0.1
18	光伏	0.9	0
20	光伏	0.8	0
21	光伏	0.5	0
25	光伏	1.0	0
26	储能	0.6	0.3
32	光伏	0.9	0

2.1 光伏接入位置对馈入点并网极限容量影响分析

以图4中配电网节点10为研究对象,假定馈入点电压要求运行范围为[0.9,1.1] p.u.,从每个区域

表 2 ZIP 负荷具体数据
Table 2 The specific data of ZIP load

节点	有功/ MW	无功/ Mvar	a_d	b_d	c_d	a_q	b_q	c_q
2	1	0.6	0.1	0.1	0.8	0.1	0.1	0.8
3	0.9	0.4	0.8	0.1	0.1	0.8	0.1	0.1
5	0.6	0.3	0	0	1	0	0	1
6	0.6	0.2	0.1	0.1	0.8	0.1	0.1	0.8
7	0.6	0.3	0.1	0.1	0.8	0.1	0.1	0.8
9	0.6	0.2	0	0	1	0	0	1
11	0.45	0.3	0.8	0.1	0.1	0.8	0.1	0.1
12	0.6	0.35	0	0	1	0	0	1
14	1.2	0.8	0.1	0.1	0.8	0.1	0.1	0.8
16	0.6	0.2	1	0	0	1	0	0
17	0.6	0.2	0.8	0.1	0.1	0.8	0.1	0.1
19	0.9	0.4	0	0	1	0	0	1
22	0.9	0.4	0.1	0.1	0.8	0.1	0.1	0.8
23	0.9	0.5	0	0	1	0	0	1
24	3.2	2	0.1	0.8	0.1	0.1	0.8	0.1
27	0.6	0.25	1	0	0	1	0	0
28	0.6	0.2	0.8	0.1	0.1	0.8	0.1	0.1
30	2	0.6	0.1	0.8	0.1	0.1	0.8	0.1
31	1.5	0.7	0	0	1	0	0	1
33	0.6	0.4	0.1	0.1	0.8	0.1	0.1	0.8

中选取 1 个节点(节点 2、节点 5、节点 9、节点 16、节点 19、节点 24、节点 27), 分别接入 1 MW 光伏设备, 定量分析光伏接入不同配电网位置对馈入点并网极限容量的影响。7 种光伏接入场景和未接入光伏场景下的模型等效参数与并网极限容量 S 如表 3 所示。

表 3 光伏接入不同位置时馈入点降阶模型
参数及其并网极限容量
Table 3 Reduced-order model parameters and grid-connected critical capacity of infeed point for photovoltaic access at different locations

节点	$E_{eq}/p.u.$	$R_{eq}/p.u.$	$X_{eq}/p.u.$	S/MW
2	0.953 4	0.109 1	0.209 4	2.036
5	0.955 5	0.108 7	0.209 4	2.117
9	0.961 7	0.106 3	0.209 8	2.360
16	0.963 4	0.107 8	0.214 6	2.374
19	0.953 4	0.109 1	0.209 4	2.037
24	0.954 3	0.109 0	0.209 7	2.066
27	0.956 9	0.108 7	0.211 0	2.158
未接入	0.953 3	0.110 7	0.209 6	2.023

从表 3 可以看出, 在配电网任意节点接入光伏设备都有利于提升馈入点并网极限容量, 增强系统静态稳定特性。其中, 节点 9 和节点 16 接入光伏设备后对馈入点并网极限容量改善最大, 节点 5 和

节点 27 次之, 而节点 2、节点 19 和节点 24 提升幅度相对较小。这种差异主要是由于各节点与馈入点之间的电气距离不同。电气距离越近, 设备间交互影响越大。因此, 要使相同容量光伏设备接入配电网后对馈入点并网极限容量提升效果最大化, 应将光伏设备接入位置尽可能靠近馈入点。

为深入分析光伏设备与馈入点的交互影响, 将图 4 中的馈入节点 10 和节点 29 作为研究对象, 分别接入光伏设备观察另一个节点并网极限容量的变化情况, 最终的等效参数和并网极限容量如表 4 所示。

表 4 节点 10 和节点 29 不同场景下降阶模型
参数及其并网极限容量

Table 4 Reduced-order model parameters and grid-connected critical capacity for different scenarios at node 10 and node 29

接入场景说明	$E_{eq}/p.u.$	$R_{eq}/p.u.$	$X_{eq}/p.u.$	S/MW
节点10空载, 节点29接入光伏	0.957 0	0.108 2	0.209 3	2.179
节点10空载, 节点29未接入光伏	0.953 3	0.110 7	0.209 6	2.023
节点29空载, 节点10接入光伏	0.951 2	0.091 4	0.188 8	2.197
节点29空载, 节点10未接入光伏	0.947 5	0.093 9	0.188 7	2.030

从表 4 中可知, 当光伏设备接入节点 29 时, 节点 10 的并网极限容量提升了 156 kW, 而当光伏设备接入节点 10 时, 节点 29 的并网极限容量提升了 167 kW。虽然这两种情况下接入设备与馈入点之间的电气距离相同, 但由于 2 个节点位于配电网中不同位置, 其初始状态不同, 从而导致节点 10 对节点 29 的影响大于节点 29 对节点 10 的影响。这也反映出配电网对节点 29 的支撑能力弱于节点 10, 节点 29 比节点 10 更容易发生故障。因此, 通过交互影响分析, 可以有效识别配电网中的薄弱点, 从而为其安全稳定运行提供指导依据。

2.2 电网特性函数与单端口降阶模型有效性分析

电网特性函数与馈入点并网极限容量密切相关。节点 10 的电网特性函数值随 d 轴和 q 轴注入电流的变化如图 5 所示。图 5 中, 斜向彩色等高线表示不同注入电流条件下馈入点的稳态电压值, 即电网特性函数的等值线, 黄色、红色和蓝色闭合曲线分别对应 1 MW、2.023 MW(并网极限容量)和 2.5 MW 注入功率时的电压等值线。

从图 5 中可见, 随着节点注入功率 S 的增加, 馈入点电压的变化范围也相应扩大。当注入功率小于等于 2.023 MW 时, 馈入点电压最小值正好等

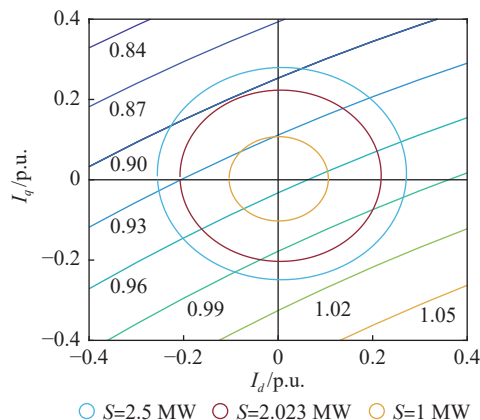


图5 电网特性函数等高线

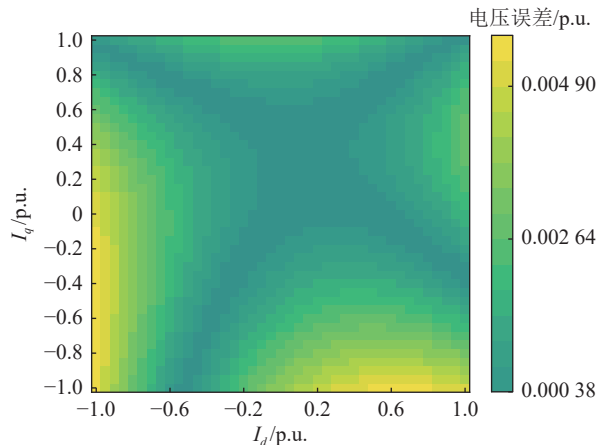
Fig.5 Contour plots of the grid characteristic function

于运行要求的下界值 0.9 p.u.。然而,当注入功率增大到 2.5 MW 时,部分功率特性设备接入后会导致工作点超出规定的电压运行范围,这一现象验证了基于单端口降阶模型的馈入点并网极限容量计算结果的准确性。

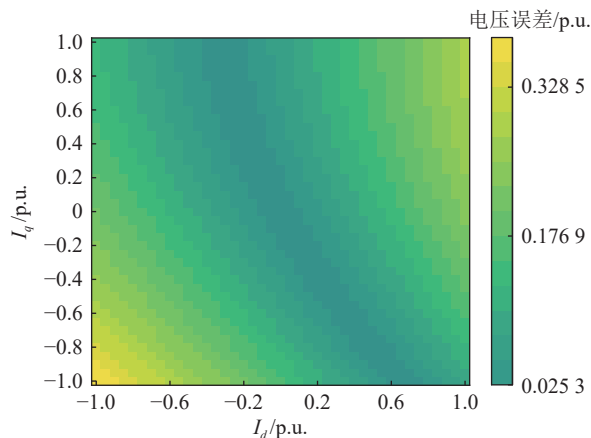
为评估单端口降阶模型的精度,研究在不同注入电流条件下计算模型端口电压值,并将其与电网特性函数值进行对比,所得误差分布如图 6(a)所示。此外,文中还采用戴维南等效原理进行误差对比^[32]。戴维南等效方法将负荷视为恒阻抗并入网络导纳矩阵,并将 PCC 和电力电子并网设备外特性分别等效为电压源和电流源,进而求取戴维南等效电势和阻抗。基于戴维南等效电路得到馈入点电压与电网特性函数值误差如图 6(b)所示。

从图 6 中可知,单端口降阶模型和戴维南等效的误差值均是随着电流的增大而增大。然而,单端口降阶模型在给定电流范围内的最大误差不超过 0.005,平均误差仅为 0.001 7,而戴维南等效电路平均误差超过 0.1。这一对比结果表明,单端口降阶模型比戴维南等效电路具有更高的精度。由于戴维南等效仅适用于线性电路分析,而实际配电网中存在大量电力电子设备和 ZIP 负荷,导致系统呈现高度非线性特性,因此等效误差较大。相反,文中提出的单端口降阶模型充分考虑设备间非线性交互影响,通过选取系统关键截面得到等效参数,从而实现更高的计算精度。

为验证单端口降阶模型的有效性,文中在 Simulink 平台中分别仿真 2 MW 光伏接入节点 33 配电网、单端口降阶模型和戴维南等效电路共 3 种场景。其中,光伏变流器模型包括 PQ 功率控制环和锁相环,由于电流内环的时间尺度远小于其他控制环节,在此忽略不计。3 种场景下馈入点电压变化情况如图 7 所示。



(a) 单端口降阶模型电压误差



(b) 戴维南等效模型电压误差

图6 简化模型与电网特性函数误差值

Fig.6 Error values between the simplified model and the grid characteristic function

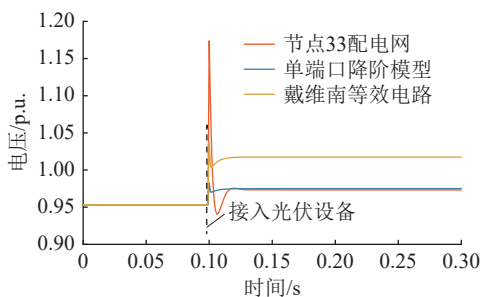


图7 不同场景下馈入点电压仿真结果

Fig.7 Simulation results of infeed point voltage under different scenarios

从图 7 中可知,在 3 种场景下,变流器均进入新的稳态工作点,但通过戴维南等效电路计算得到的馈入点静态电压与节点 33 配电网实际电压值之间的误差为 0.042 4 p.u.,而单端口降阶模型的误差仅为 0.001 8 p.u.,远小于戴维南等效电路。此外,虽然变流器接入单端口降阶模型和节点 33 配电网后的动态响应过程存在较大差异,但文中研究主要关注节点静态电压约束下的设备并网极限容量计算,这种动态过程的差异不会影响最终分析结果。

因此,在计算配电网节点并网极限容量时,文中提出的单端口降阶模型比戴维南等效电路具有更高的计算准确性。

2.3 拓扑结构对馈入点并网极限容量影响分析

根据不同的应用场景需求,配电网形成了辐射状、环状和两端供电3种典型配电网拓扑。由于不同拓扑会影响系统初始潮流分布和设备间电气距离,从而导致不同配电网拓扑下节点并网极限容量出现较大差异,给系统运行优化带来挑战。因此,采用单端口降阶模型量化分析不同配电网拓扑下馈入点的设备并网极限容量,并分析馈入节点间交互影响强弱。

在研究环状配电网时,将图4中所有联络开关闭合,使得每个区域至少和两个区域相连,增强供电可靠性。然后分别计算节点10和节点29在接入和未接入光伏设备时的单端口降阶模型参数和并网极限容量,具体结果如表5所示。进一步分析,在环状结构基础上于节点33引入主网供电,形成两端供电型配电网,计算得到节点10和节点29的单端口降阶模型参数和并网极限容量,如表6所示。

表5 环状配电网中节点10和节点29并网极限容量
Table 5 Grid-connected critical capacity at node 10 and node 29 in a ring distribution network

接入场景说明	$E_{eq}/p.u.$	$R_{eq}/p.u.$	$X_{eq}/p.u.$	S/MW
节点10空载,节点29接入光伏	0.976 8	0.057 0	0.172 9	3.799
节点10空载,节点29未接入光伏	0.975 3	0.059 1	0.173 0	3.706
节点29空载,节点10接入光伏	0.972 6	0.047 8	0.161 3	3.886
节点29空载,节点10未接入光伏	0.971 1	0.049 8	0.161 4	3.789

表6 两端供电配电网中节点10和节点29并网极限容量
Table 6 Grid-connected critical capacity at node 10 and node 29 in a two-terminal power distribution network

接入场景说明	$E_{eq}/p.u.$	$R_{eq}/p.u.$	$X_{eq}/p.u.$	S/MW
节点10空载,节点29接入光伏	0.980 8	0.036 2	0.096 7	7.046
节点10空载,节点29未接入光伏	0.979 3	0.036 7	0.096 7	6.898
节点29空载,节点10接入光伏	0.977 6	0.021 0	0.082 6	8.196
节点29空载,节点10未接入光伏	0.976 1	0.021 5	0.082 6	8.023

从表4—表6可知,辐射状配电网馈入点并网极限容量最小,改变为环状结构后可适度提升并网极限容量,而采用两端供电结构则能显著提高并网

极限容量。这一结果表明两端供电型配电网具有更大的稳定裕度,更加适用于重要负荷的供电需求。此外,3种配电网拓扑中接入光伏设备后均能提升馈入点并网极限容量,节点10在辐射状、环状和两端供电型下的并网极限容量分别提升了7.7%、2.5%和2.1%,节点29则分别提升了8.2%、2.6%和2.2%。其中,辐射状提升幅度最大,而两端供电型提升最小,表明两端供电型配电网馈入点状态对邻近节点状态变化不敏感,具有更强的支撑能力。相反,在辐射状配电网中,邻近节点状态变化将使馈入点产生较大响应,因此在稳定性分析时须充分考虑节点设备间的交互影响,否则将带来严重误差。

通过分析表4—表6中的单端口降阶模型等效参数可知,馈入点等效阻抗越小,其并网极限容量越大;同时,馈入点并网极限容量与等效电势呈正相关关系。这是因为等效电势越接近于1时,其距离馈入点电压要求运行边界的距离越远,则馈入点电压变化范围越大,进而可以接纳更大容量的并网设备。因此,单端口降阶模型能够充分地表征多源复杂配电网的馈入点特性,准确高效地计算出馈入点并网极限容量。

3 结论

文中基于系统注入电流平衡方程定义电网特性函数,进而提出单端口降阶模型,并实现馈入点并网极限容量的精确量化。主要研究成果如下:

(1) 针对高比例光伏渗透配电网,文中充分考虑设备间的非线性交互影响,建立高精度单端口降阶模型。与戴维南等效电路相比,该模型能更精确地表征配电网馈入点电压与电流的映射关系。

(2) 基于单端口降阶模型,通过解析推导获得馈入点电压要求运行范围内的并网极限容量表达式,并建立详细计算流程。该方法适用于各种复杂的配电网场景。

(3) 从接入位置分析可知,光伏设备越靠近馈入点,对馈入点并网极限容量提升效果越显著。从拓扑看,两端供电型配电网具有最大的并网极限容量且节点间交互影响最小,而辐射状结构则呈现相反特性。

由于实际配电网中光伏出力存在一定的随机性和波动性,后续研究将考虑光伏出力不确定性影响,以进一步提升高比例光伏渗透配电网馈入点并网极限容量的估计精度。

致 谢

本文得到南方电网科技项目“极高渗透率分布式

光伏发电自适应并网与主动同步关键技术”(GZKJXM 20222258)资助, 谨此致谢!

参考文献:

- [1] 马钊, 张恒旭, 赵浩然, 等. 双碳目标下配用电系统的新使命和新挑战[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(19): 6931-6945.
MA Zhao, ZHANG Hengxu, ZHAO Haoran, et al. New mission and challenge of power distribution and consumption system under dual-carbon target[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(19): 6931-6945.
- [2] 袁昌昊, 朱金大, 倪建富. 含分布式光伏的配电网双层协调电压优化方法[J]. 电力工程技术, 2023, 42(6): 74-82.
YUAN Changhao, ZHU Jinda, NI Jianfu. Coordinated voltage optimization method in distribution network with distributed photovoltaic[J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(6): 74-82.
- [3] 潘美琪, 贺兴, 艾芊, 等. 新型配电系统分布式资源调度研究现状与展望[J]. 电网技术, 2024, 48(3): 933-949.
PAN Meiqi, HE Xing, AI Qian, et al. Research status and prospect of distributed energy resource dispatching in new distribution system[J]. Power System Technology, 2024, 48(3): 933-949.
- [4] 黄子桐, 徐永海, 叶兴杰. 考虑有源配电网运行灵活性的智能储能软开关优化规划[J]. 电力工程技术, 2023, 42(1): 143-153.
HUANG Zitong, XU Yonghai, YE Xingjie. Optimal planning of soft open point integrated with energy storage system considering operation flexibility of active distribution network[J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(1): 143-153.
- [5] 张林垚, 吴桂联, 廖锦霖, 等. 考虑共享储能的配电网多主体协同调度策略[J]. 电力科学与技术学报, 2024, 39(2): 44-52.
ZHANG Linyao, WU Guilian, LIAO Jinlin, et al. Multi-agent cooperative dispatching strategy for distribution network considering shared energy storage[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(2): 44-52.
- [6] 张光儒, 马振祺, 陈杰, 等. 考虑降压节能和光伏误差三维特性的主动配电网多时间尺度优化调度[J]. 电力建设, 2024, 45(8): 159-172.
ZHANG Guangru, MA Zhenqi, CHEN Jie, et al. Multi-timescale scheduling method for active distribution network considering three-dimensional characteristics of PV prediction error and voltage regulation[J]. Electric Power Construction, 2024, 45(8): 159-172.
- [7] 朱丹丹, 周前, 贾勇勇, 等. “规划-运行”融合框架下基于“源-荷”多时序联合场景的新型配电系统无功资源优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(20): 62-78.
ZHU Dandan, ZHOU Qian, JIA Yongyong, et al. Optimal allocation of reactive power resources in a new distribution system based on the "sourceload" multi-sequence scenario in a "planning-operation" fusion framework[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(20): 62-78.
- [8] 水恒华, 顾阳, 徐晓春, 等. 一种适用于光伏高渗透率地区的太阳辐照短时预测技术研究[J]. 电测与仪表, 2024, 61(4): 149-154.
SHUI Henghua, GU Yang, XU Xiaochun, et al. Research on a short-term solar radiation prediction technology for photovoltaic high permeability area[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(4): 149-154.
- [9] 何振武, 姜飞, 欧阳卫, 等. 基于自适应分区和 SFVMD-LSTM 伪量测建模的新型配电系统抗差状态估计[J]. 电力建设, 2024, 45(10): 78-89.
HE Zhenwu, JIANG Fei, OUYANG Wei, et al. Novel distribution system robust state estimation based on adaptive partitioning and SFVMD-LSTM pseudo-measurement modeling[J]. Electric Power Construction, 2024, 45(10): 78-89.
- [10] 林泽源, 王宗尧, 张凡, 等. 考虑氢能应用的光伏直流微电网中储能容量配置寻优方法研究[J]. 高压电器, 2024, 60(7): 78-87.
LIN Zeyuan, WANG Zongyao, ZHANG Fan, et al. Research on optimization method for energy storage capacity configuration in photovoltaic DC micro grid considering hydrogen energy application[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(7): 78-87.
- [11] 于琳, 孙华东, 徐式蕴, 等. 电力电子设备接入电压支撑强度量化评估指标综述[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(2): 499-515.
YU Lin, SUN Huadong, XU Shiyun, et al. Overview of strength quantification indexes of power system with power electronic equipment[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(2): 499-515.
- [12] 耿华, 何长军, 刘浴霜, 等. 新能源电力系统的暂态同步稳定研究综述[J]. 高电压技术, 2022, 48(9): 3367-3383.
GENG Hua, HE Changjun, LIU Yushuang, et al. Overview on transient synchronization stability of renewable-rich power systems[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(9): 3367-3383.
- [13] 江卓翰, 周胜瑜, 何禹清, 等. 基于 K-I-ELM 多模型集成的分布式光伏出力短期预测方法[J]. 电力科学与技术学报, 2024, 39(4): 146-152.
JIANG Zhuohan, ZHOU Shengyu, HE Yuqing, et al. Short-term prediction method of distributed PV output power based on K-I-ELM multi-model integration[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(4): 146-152.
- [14] 欧奕昊, 姜彤, 张一航, 等. 考虑变流器无功调节特性的含高比例分布式光伏配电网电压控制方法[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(20): 105-118.
OU Yihao, JIANG Tong, ZHANG Yihang, et al. Voltage regulation method for a distribution network with high-penetration of distributed photovoltaic energy considering a converter's

- reactive power regulation characteristics[J]. *Power System Protection and Control*, 2024, 52(20): 105-118.
- [15] 李泽成, 孙燕盈. 新型电力系统下考虑分布式光伏并网的配电网可靠性评估[J]. *山东电力技术*, 2023, 50(5): 1-5, 47. LI Zecheng, SUN Yanying. Reliability evaluation of distribution network considering flexible grid connection of distributed photovoltaic power generations[J]. *Shandong Electric Power*, 2023, 50(5): 1-5, 47.
- [16] 郭勇, 李秋燕, 马杰, 等. 新基建负荷与光伏接入下配电网可开放容量评估及优化[J]. *电力工程技术*, 2023, 42(6): 64-73. GUO Yong, LI Qiuyan, MA Jie, et al. Evaluation and optimization of available capacity of distribution network under new infrastructure load and photovoltaic access[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2023, 42(6): 64-73.
- [17] 陈中, 顾叮咚, 郭庆. 考虑全局相关性的主动配电网电压安全优化控制[J]. *电力系统自动化*, 2023, 47(21): 99-107. CHEN Zhong, GU Dingdong, GUO Qing. Optimization and control of voltage security in active distribution network considering global correlation[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2023, 47(21): 99-107.
- [18] 于琳, 孙华东, 赵兵, 等. 新能源并网系统短路比指标分析及临界短路比计算方法[J]. *中国电机工程学报*, 2022, 42(3): 919-929. YU Lin, SUN Huadong, ZHAO Bing, et al. Short circuit ratio index analysis and critical short circuit ratio calculation of renewable energy grid-connected system[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(3): 919-929.
- [19] 孙华东, 徐式蕴, 许涛, 等. 新能源多场站短路比定义及指标[J]. *中国电机工程学报*, 2021, 41(2): 497-506. SUN Huadong, XU Shiyun, XU Tao, et al. Definition and index of short circuit ratio for multiple renewable energy stations[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(2): 497-506.
- [20] 李欣蔚, 刘崇茹, 韩玉蓉, 等. 送端系统对交直流系统输电功率极限的影响[J]. *电力系统自动化*, 2017, 41(17): 101-105, 141. LI Xinwei, LIU Chongru, HAN Yurong, et al. Effect of sending-end system on maximum transmission power of AC/DC system[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2017, 41(17): 101-105, 141.
- [21] 朱凌志, 曲立楠, 刘纯, 等. 新能源发电集群的改进等效短路比计算方法[J]. *电力系统自动化*, 2021, 45(22): 74-82. ZHU Lingzhi, QU Linan, LIU Chun, et al. Improved calculation method of equivalent short-circuit ratio for power generation cluster of renewable energy[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2021, 45(22): 74-82.
- [22] YU L, SUN H D, XU S Y, et al. A critical system strength evaluation of a power system with high penetration of renewable energy generations[J]. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, 2022, 8(3): 710-720.
- [23] SONG Y, HILL D J, LIU T. Static voltage stability analysis of distribution systems based on network-load admittance ratio[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2019, 34(3): 2270-2280.
- [24] 孔贺, 李业成, 张哲, 等. 阻抗模裕度指标在新能源多馈入系统静态电压稳定评估的适应性分析[J]. *中国电机工程学报*, 2024, 44(8): 3002-3016. KONG He, LI Yecheng, ZHANG Zhe, et al. Adaptability analysis of impedance modulus margin index for static voltage stability evaluation of multi-infeed renewable energy power system[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2024, 44(8): 3002-3016.
- [25] 薛安成, 刘瑞煌, 李铭凯, 等. 基于支路电压方程的在线电压稳定指标[J]. *电工技术学报*, 2017, 32(7): 95-103. XUE Ancheng, LIU Ruihuang, LI Mingkai, et al. A new on-line voltage stability index based on voltage equation of the branch[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2017, 32(7): 95-103.
- [26] 刘运鑫, 姚良忠, 廖思阳, 等. 光伏渗透率对电力系统静态电压稳定性影响研究[J]. *中国电机工程学报*, 2022, 42(15): 5484-5497. LIU Yunxin, YAO Liangzhong, LIAO Siyang, et al. Study on the impact of photovoltaic penetration on power system static voltage stability[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(15): 5484-5497.
- [27] 姚竞宙, 付强, 杜文娟, 等. 基于特征值指标的光伏并网系统静态电压稳定性[J]. *电力工程技术*, 2023, 42(6): 32-41, 140. YAO Jingzhou, FU Qiang, DU Wenjuan, et al. Static voltage stability of photovoltaic grid-connected system based on eigenvalue index[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2023, 42(6): 32-41, 140.
- [28] 汪家铭, 张静, 杨建华, 等. 基于广义短路比的多馈入直流系统受端电网结构优化方法[J]. *电力系统自动化*, 2020, 44(24): 111-118. WANG Jiaming, ZHANG Jing, YANG Jianhua, et al. Optimization method of receiving-end AC grid structure for multi-infeed DC system based on generalized short-circuit ratio[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2020, 44(24): 111-118.
- [29] 黄锐, 兰洲, 辛焕海, 等. 基于广义短路比的光伏多馈入系统容量优化方法[J]. *电力系统自动化*, 2019, 43(3): 147-154. HUANG Rui, LAN Zhou, XIN Huanhai, et al. Capacity optimization method for multi-infeed photovoltaic system based on generalized short circuit ratio[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2019, 43(3): 147-154.
- [30] 李海啸. 集中式光伏电站并网无功电压控制策略研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2021. LI Haixiao. Research of volt-var control strategy for integration of centralized photovoltaic power station[D]. Chongqing: Chongqing University, 2021.
- [31] 陈心宜, 胡秦然, 石庆鑫, 等. 新型电力系统居民分布式资源

管理综述[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(5): 157-175.

CHEN Xinyi, HU Qinran, SHI Qingxin, et al. Review on residential distributed energy resource management in new power system[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2024, 48(5): 157-175.

[32] 徐政. 新型电力系统背景下电网强度的合理定义及其计算方法[J]. 高电压技术, 2022, 48(10): 3805-3819.

XU Zheng. Reasonable definition and calculation method of power grid strength under the background of new type power systems[J]. *High Voltage Engineering*, 2022, 48(10): 3805-

3819.

作者简介:



文贤馼

文贤馼(1972), 男, 学士, 研究员级高级工程师, 从事储能及新能源工作 (E-mail: 13985410224@139.com);

周科(1984), 男, 硕士, 高级工程师, 从事新能源消纳及碳减排工作;

张俊玮(1987), 女, 硕士, 高级工程师, 从事电能计量工作。

Interaction effect analysis of distributed photovoltaic access to distributed network based on single-port reduced model

WEN Xiankui, ZHOU Ke, ZHANG Junwei, HE Mingjun, CAI Yongxiang

(Electric Power Research Institute of Guizhou Power Grid Co., Ltd., Guiyang 550002, China)

Abstract: A high penetration photovoltaic distribution network contain numerous voltage-sensitive power electronic devices, which effect with each other, increasing the computational complexity of the node grid-connected critical capacity. Therefore, an analytical method for calculating the grid-integration capacity of distributed photovoltaic devices at feeder injection points is proposed, using a single-port reduced-order model, while analyzing the interactions effect between connected devices and the injection point. Firstly, based on the current injection balance equation of the distribution network, the grid characteristic function is defined to characterize the nonlinear relationship between the current and voltage at the infeed point. A single-port reduced model is used to simplify the grid characteristic function to reduce the computational complexity. Then, the equivalent parameters of the model are calculated by selecting some specific cross-sections of the grid characteristic function. The grid-connected critical capacity expression at the infeed point and quantify the interaction effect is analytically derived. Finally, a case study on the IEEE 33-node distribution network shows that the grid-connected critical capacity is improved to a greater extent when the photovoltaic equipment is connected to the adjacent location of the infeed point. Among the different distribution network topologies, radial distribution network has the strongest effect of access equipment with the infeed point, followed by the ring distribution network and the smallest in the two-terminal power distribution network.

Keywords: distributed photovoltaic; high penetration photovoltaic distribution network; grid-connected critical capacity; interaction effect; single-port reduced-order model; grid characteristic function

(编辑 吴昊)