

满足电能质量限值的分布式光伏极限峰值容量计算

李 滨, 潘国超, 陈碧云, 李佩杰

(广西电力系统最优化和节能技术重点实验室(广西大学), 广西壮族自治区南宁市 530004)

摘要: 随着分布式光伏在中低压配电网分散性大量接入, 配电网电能质量问题日益突出, 配电网馈线可接入分布式光伏极限容量成为了焦点问题。文中探求分布式光伏接入中低压配电网对电能质量的影响因素和影响程度, 提出了基于电流注入法满足电能质量限值的极限峰值容量优化计算模型。该模型以多个电能质量指标的国家标准作为优化限值约束, 对新建或扩容等多种情况均能有效给出分布式电源接入极限峰值容量。通过 IEEE 33 节点系统和实际配电网 LCX 系统的算例分析, 验证了模型计算结果的有效性和实用性。针对 10 kV 典型线路, 依据不同分区不同线型给出了满足电能质量限值的分布式光伏安全可接入极限容量, 为供电企业校核分布式光伏接入并网申请时提供参考。

关键词: 分布式电源; 光伏发电; 配电网; 电能质量; 极限峰值容量

0 引言

近年来随着国家一系列光伏发电补助政策的出台以及屋顶光伏技术的逐步成熟, 国内的分布式光伏报装容量有了井喷式的增长^[1-3]。然而, 分布式光伏电源的“不可见性”和“不易控性”对负荷终端性的传统配电网的安全稳定运行提出了新的挑战。当分布式光伏电源高渗透率时将难以保证用户供电电能质量和可靠性^[4-6]。因此, 供电部门亟须掌握每条馈线或每个台区可接入的分布式光伏的极限峰值容量值, 以便采取相关应对措施。

国内外学者对于分布式电源接入中低压配电网的极限峰值容量进行了深入的研究。文献[7-8]从继电保护的角度出发, 在不改变保护装置的前提下确定了可接入的分布式电源的极限容量。文献[9]研究了谐波约束下的主动配电网可接入的分布式电源极限容量问题, 并用渗透率、分散度、分布度 3 个指标来描述其接入对配电网谐波分布的影响。文献[10]考虑过电压限制, 通过计算分布式电源的最大允许输出功率及监测数据, 推算出可接入的分布式电源的峰值容量。文献[11]则以电压和载流量不越限为约束, 建立了接入位置与可接入极限容量之间的函数关系, 并进一步以网损最小为目标函数对

接入位置与容量进行了优化分析。文献[12]考虑了配电网中光伏电源出力突变以及有载调压变压器和并联电容器参与调压的情况, 利用遗传算法求解出多个光伏并网的极限功率。电能质量的指标众多, 仅使用其中一个指标作为约束的求解模型实用性较差, 计算结果具有片面性。例如文献[9-12]仅以电压质量作为约束, 求解结果可保障分布式电源接入之后的配电网电压质量符合国家标准。然而对于逆变型的分布式电源, 其向电网注入的谐波电流大小, 及造成的波形畸变大小都是供电企业较为关心的指标。且中低压配电网本身三相不平衡^[13]问题较为突出, 加之电动汽车^[14]等新型单相负荷逐渐普及, 配电网的三相参数不对称问题变得日益突出。依据电力系统参数对称、三相负荷均衡的传统单相潮流算法建立的分布式电源极限峰值容量计算模型已不能满足实际电网的需求。

本文利用 Digsilent/PowerFactory 搭建测试系统, 探求分布式光伏接入配电网对电能质量的影响因素和影响程度。综合考虑了线路载流量、注入谐波电流值、电压偏差、电压总畸变率、三相电压不平衡度等多个电能质量指标, 构建了基于电流注入法满足电能质量国家标准限值的三相极限峰值容量计算模型。以 IEEE 33 节点系统为例, 验证模型的有效性, 并结合工程实际给出中低压配电网不同供电分区线路接入分布式光伏的极限峰值容量。

1 电能质量分析

电能质量问题可定义为导致用电设备故障或不

收稿日期: 2015-09-29; 修回日期: 2016-02-02。

上网日期: 2016-05-09。

国家自然科学基金资助项目(51407036); 国家重点基础研究发展计划(973 计划)资助项目(2013CB228205)。

正常工作的电压、电流或频率的偏差,其中分布式光伏引起的主要问题包括电压偏差、三相不平衡、波形畸变。中国早已制定了相关的国家标准^[15-17]来监测和管理电能质量问题,而光伏的接入必须满足这些标准的要求。

晴天状态下,光伏的出力趋势是先增大后减小,一般在 11:00—14:00 之间达到最大。而负荷的波动趋势因类型而异,例如城市的居民负荷早晚各有一个用电高峰,在正午时刻总负荷很低。若此时光伏出力大于总负荷,潮流逆向,可能导致节点过电压。

目前,分布式光伏皆通过逆变器并网,必然会向系统注入大量高次谐波^[18],引起电压畸变。逆变器本身的三相不平衡度很小,但大量单相用户无序接入光伏电源也会导致配电网三相电压不平衡度超标。因此,必须根据配电网的消纳水平限制接入的光伏峰值容量,避免其他用户受到影响。

2 分布式光伏对电能质量的影响仿真分析

电压降落的大小与线路阻抗、电流大小相关。故分布式光伏的接入位置不同时,其注入电流的流向会因两侧负荷不同产生差异,电压降落大小也会因接入点至首节点的等效阻抗变化而改变。本文使用 Digsilent/PowerFactory 软件对 IEEE 33 节点测试系统进行稳态仿真,研究了光伏接入位置和线路长度等变化对配电网电能质量的影响。

2.1 接入位置差异对馈线电能质量的影响

为刺激光伏发电的发展,中国允许光伏业主实施自发自用,余电上网的运行模式,即分布式光伏不受电网调度。业主为利益最大化必定选择让光伏电源以高功率因数运行,尽可能发出有功功率,因此分布式光伏可以看做是功率因数一定的 PQ 节点。采用 IEEE 33 节点测试系统进行仿真分析,其结构图见附录 A 图 A1。

为方便分析,负荷采用恒功率模型,谐波选取恒流源模型,忽略电压畸变对注入谐波电流的影响,近似认为谐波源所产生的谐波电流仅取决于其所在节点的外加基波电压。系统基准电压为 12.66 kV,基准功率为 10 MVA,总最大有功负荷为 3.715 MW,总最大无功负荷为 2.3 Mvar,最小负荷为总最大负荷的 50%。

选取 6 台 0.5 MW(峰值功率)的逆变器模拟分布式光伏电源,依次集中接入在节点 1,5,10,17,观察接入位置变化对电压及谐波的影响。

如图 1 所示,光伏电源的接入位置越靠近线路末端,其对线路电压(标幺值)的支撑作用就越明显,

线路末端的电压偏差很容易越上限,同时整体谐波畸变水平也是越来越高的。如果接在首端,整体的谐波水平达到最低,但沿线电压逐渐下降,线路末端电压偏差又可能越下限。

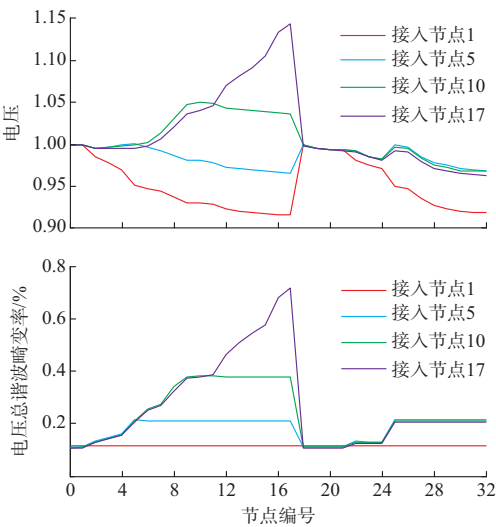


图 1 接入位置变化对电压及谐波的影响
Fig.1 Influence of different access positions on voltage and harmonic

根据国家电网公司在 2013 年发布的《分布式电源接入系统典型设计》,单相用户最大功率为 8 kW,从 220 V 侧接入。为方便研究,假设一种比较恶劣的接入状态,即某节点下属的低压配电台区用户大规模接入单相光伏,且配电变压器接线方式一致。假设三相分别接入 100 户、80 户和 60 户,且负荷处于轻载,分别从节点 5,10,17 接入,观察接入位置对电压三相不平衡度的影响。

如图 2 所示,本身三相不平衡的电源接入对全网各节点电压三相不平衡度影响随接入位置变化而变化。接入位置越靠近馈线末端,整体的三相电压不平衡度就越大,接入点及其后端节点的三相不平衡情况最为严重。

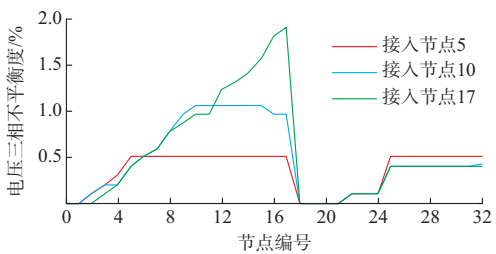


图 2 接入位置变化对电压三相不平衡度的影响
Fig.2 Influence of different access positions on three-phase voltage unbalance

2.2 线路长度对电能质量指标的响应差异分析
由以上分析可知,接入位置选择馈线末端时对

各电能质量指标影响就越严重,且馈线末端的电能质量最为恶劣。为比较不同线路长度对各电能质量指标的响应差异,选取 4 条实际配电网馈线,具体信息见表 1。

表 1 实际馈线参数
Table 1 Actual feeder line parameters

编号	线路名称	供电半径/km	主干线类型	分区	有功负荷/MW	无功负荷/Mvar
1	CYJX	2.37	架空	A	5.50	2.36
2	XJX	3.54	电缆	B	3.08	1.46
3	LCX	5.57	架空	C,D	6.34	2.10
4	XYJX	9.23	架空	E	4.46	1.34

图 3 为该实际配电网馈线的晴天 24 h 光伏出力(标么值)变化图,负荷类型为商业居民用电。由图中可以看出光伏出力在 12:00 左右达到最大。由于谐波畸变主要由光伏的出力决定,当光伏装机容量较大且出力达到最大时其与负荷之间的差值也就达到最大,此时电压偏差也很可能处在最恶劣的情况,故选择 12:00 的断面数据作为负荷水平以评估光伏对馈线电能质量的影响。

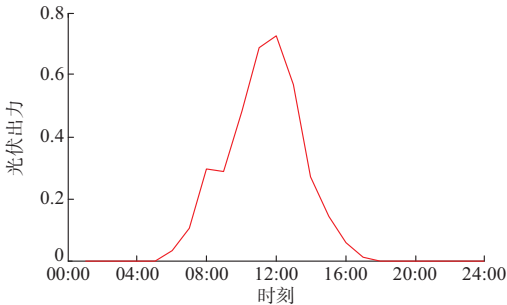


图 3 实测光伏出力随时间的变化
Fig.3 Time-varying photovoltaic output from actual measurement

将光伏分接至各馈线末端,功率因数设为 0.98。逐步增加光伏的出力,观察 4 条馈线末端的各项电能质量指标越限时的极限容量,结果见表 2。电压偏差上限设为 7%,电压总谐波畸变率上限为 4%,三相电压不平衡度设为 2%。首节点电压均为 10.4 kV,分三相接入时以 6:5:4 接入。

表 2 不同线路单个指标对应的极限容量
Table 2 Limit capacity corresponding to single index for each line

越限指标	极限容量/MVA			
	CYJX	XJX	LCX	YXJX
电压偏差	15.8	17.4	6.2	5.8
电压总谐波畸变率	21.8	36.5	8.6	2.7
三相电压不平衡度	16.8	28.8	10.6	3.5

表 2 中的结果表明,不同线路对每个电能质量指标的响应度有差异。其中 CYJX 与 XJX 都是电

压偏差先越限,其次是三相电压不平衡度,最后是电压总谐波畸变率。CYJX 负荷大于 XJX,长度小于 XJX,但其极限容量值小于 XJX,说明电缆线路更能适应光伏接入。基于电压偏差和三相电压不平衡度的极限容量与负荷水平有关,而负荷水平是一个变量,且与线路的类型相关。因此,限制馈线分布式光伏接入的极限容量的电能质量指标随线路参数变化而变化,且与调压措施、背景谐波等外界因素相关,无法确定一个确定的对应关系。

3 基于电流注入法的三相极限峰值功率计算模型

由仿真分析可知,电压偏差、谐波畸变、三相不平衡度会随线路长度变化而产生相应的差异性,指标与指标之间会存在长度临界点。然而临界点会因为线路的负荷水平、阻抗参数、网架结构、谐波源特性等因素改变而偏移。如果仅用一个指标作为约束求解可接入的极限峰值容量将大大降低求解结果的实用性。且一条长线路中,不同位置可能对应不同的限制指标,如果有两个以上接入点,由于接入点之间会相互影响,将无法通过单一指标来求得最终结果。因此,有必要建立一个针对实际网架的求解模型,综合多个电能质量指标,最终求出具体的线路及具体接入方案下的光伏极限峰值容量。

实际运行中的分布式光伏功率因数通常设定为固定值,因此各点光伏最大有功出力之和的最大值与馈线可消纳的光伏极限峰值容量等效,模型的目标函数为:

$$F = \max \sum P_{Gk}^s \tag{1}$$

式中: P_{Gk}^s 为 k 点 s 相注入的分布式光伏有功功率, $s \in \alpha_p = \{a, b, c\}$, $k = \{1, 2, \dots, g\}$, 其中 g 为总节点数。

3.1 等式约束

假设系统的负荷水平是给定的,目前通过逆变器并网的光伏电源额定功率因数可达到 0.99,且通常不参加电压调节,故可以将光伏电源看做 PQ 节点,且功率因数保持一定,设无功出力与有功出力的比值为 η 。

选择文献[19]提出的一种基于电流注入法的三相潮流解法作为本文模型的基础潮流方程,其基于直角坐标系的等式方程为:

$$\begin{cases} (I_{rk}^{calc})^s = \sum_{i=1}^n \sum_{t \in \alpha_p} (G_{ki}^{st} V_{ri}^t - B_{ki}^{st} V_{mi}^t) \\ (I_{mk}^{calc})^s = \sum_{i=1}^n \sum_{t \in \alpha_p} (G_{ki}^{st} V_{mi}^t - B_{ki}^{st} V_{ri}^t) \end{cases} \tag{2}$$

式中: $t \in \alpha_p$; G_{ki}^{st} 和 B_{ki}^{st} 分别为 k 节点和 i 节点 s 相和

t 相之间的相间电导和电纳; V_{ri}^t 和 V_{mi}^t 分别为 i 节点 t 相电压的实部和虚部。

节点有功、无功功率的不平衡量简写为:

$$\begin{cases} \Delta P_k^s = (P_k^{sp})^s - (P_k^{\text{calc}})^s \\ \Delta Q_k^s = (Q_k^{sp})^s - (Q_k^{\text{calc}})^s \end{cases} \quad (3)$$

式中: $(P_k^{sp})^s = P_{Gk}^s - P_{Lk}^s$, 为 k 点的 s 相注入的有功功率, 其中 P_{Gk}^s 和 P_{Lk}^s 分别为 k 点的分布式电源有功功率和负荷的有功功率, $p \in \alpha_p$; $(Q_k^{sp})^s = Q_{Gk}^s - Q_{Lk}^s$, 为 k 点的 s 相注入的无功功率, 其中 $Q_{Gk}^s = \eta P_{Gk}^s$, 若 k 点没有光伏接入, 则 P_{Gk}^s 设为固定值零, 有接入则为变量; $(P_k^{\text{calc}})^s = V_{rk}^s (I_{rk}^{\text{calc}})^s + V_{mk}^s (I_{mk}^{\text{calc}})^s$; $(Q_k^{\text{calc}})^s = V_{mk}^s (I_{rk}^{\text{calc}})^s - V_{rk}^s (I_{mk}^{\text{calc}})^s$ 。

基波潮流的等式约束可表述为:

$$\begin{cases} \Delta P_k^s = 0 \\ \Delta Q_k^s = 0 \end{cases} \quad (4)$$

谐波源可以用恒流源模型代替, 即忽略电压畸变对注入谐波电流的影响, 近似认为谐波源所产生的谐波电流仅取决于其所在节点的外加基波电压。故谐波潮流的等式约束可以作如下表述:

$$\begin{cases} (U^h)^s = (Z^h)^s (I_{in}^h)^s \\ (I_{mn}^h)^s = (Y_{mn}^h)^s (U_m^h - U_n^h)^s \end{cases} \quad (5)$$

式中: $(U^h)^s$ 为 s 相第 h 次谐波的电压向量; $(Z^h)^s$ 为 s 相的第 h 次谐波的阻抗矩阵; $(I_{mn}^h)^s$ 为 m 点到 n 点之间的支路流过的 s 相谐波电流; $(I_{in}^h)^s$ 为 s 相的第 h 次谐波注入电流, 没有光伏接入时该相注入电流固定为零, 有光伏接入时则与光伏的容量及注入水平相关。

$(I_{in}^h)^s$ 的量化关系如下:

$$(I_{in}^h)^s = (I_{in})^s (I_{perin}^h)^s \quad (6)$$

式中: $(I_{in})^s$ 为 s 相基波电流; $(I_{perin}^h)^s$ 为光伏逆变器的 s 相谐波注入水平, 同一型号的光伏逆变器的谐波注入水平可以认为是一致的, 具体数值可从光伏逆变器的入网检测报告中获取。

3.2 不等式约束

3.2.1 载流量约束

出于经济性考虑, 供电企业不会因为分布式光伏的接入而对主干线进行大规模的改造, 因此必须限制线路载流量:

$$I_{mn}^s \leq \bar{I}_{mn} \quad (7)$$

式中: I_{mn}^s 为节点 m 到节点 n 之间的支路基波电流, $\bar{I}_{mn}$ 为该支路线型的载流量, 具体数值因线路型号而异, 选取常温 25 °C 时的参数。

3.2.2 电压偏差约束

电压偏差的上限约束和下限约束分别为:

$$\begin{cases} V_k^{\text{ab}}, V_k^{\text{bc}}, V_k^{\text{ac}} \leq \bar{V}_{\text{max}}^s \\ -V_k^{\text{ab}}, -V_k^{\text{bc}}, -V_k^{\text{ac}} \leq -\bar{V}_{\text{min}}^s \end{cases} \quad (8)$$

国家标准^[15]中规定 10 kV 线路的最大电压偏差在 $\pm 7\%$ 以内, 400 V 的线路则为 $+7\%$ 至 -10% 之间。

3.2.3 谐波约束

节点电压总谐波畸变率约束:

$$V_{\text{THDk}}^s \leq \bar{V}_{\text{THD}} \quad (9)$$

电压总谐波畸变率可根据谐波潮流求解出的各次谐波电压表述:

$$V_{\text{THDk}} = \frac{\sqrt{(V_k^2)^2 + (V_k^3)^2 + \dots + (V_k^{h_{\text{max}}})^2}}{V_k^1} \times 100\% \quad (10)$$

国家标准^[17]中规定, 10 kV 母线的最大电压总谐波畸变率不超过 4% , 400 V 母线电压畸变率不超过 5% 。

尽管电流的畸变水平也可以用总谐波畸变率表征, 但在轻载情况下可能造成谐波分量很小, 但畸变程度很高的现象, 故本模型直接使用各次谐波分量约束:

$$(I_{\text{PCC}}^h)^s \leq \bar{I}_{\text{PCC}}^h \quad (11)$$

公共连接点(PCC)为电力系统中一个以上用户负荷连接处。考虑到分布式光伏容量小, 位置分散的特点, 此处的 PCC 定义为馈线首节点, I_{PCC}^h 为所有支路向首节点注入的 h 次谐波电流, $\bar{I}_{\text{PCC}}^h$ 则可以用国家标准规定值再根据光伏总容量与 PCC 的谐波供电/用电设备容量之比换算得出。

3.2.4 三相电压不平衡度约束

电压的不平衡度是电能质量的重要评价指标之一, 三相电压不平衡度约束为 $\epsilon_k \leq \bar{\epsilon}$ 。国家标准^[16]中规定三相电压不平衡度长时间内不超过 2% 。严格的三相电压不平衡度定义应为负序电压与正序电压比值的百分比, 由于本模型的基波潮流中结果为各相电压值, 此处 ϵ 可以使用 IEC 61000-4-30 中推荐的解析法来表征:

$$\epsilon = \frac{\sqrt{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}}{\sqrt{1 + \sqrt{3 - 6\beta}}} \times 100\% \quad (12)$$

$$\beta = \frac{(V_k^{\text{ab}})^4 + (V_k^{\text{bc}})^4 + (V_k^{\text{ac}})^4}{((V_k^{\text{ab}})^2 + (V_k^{\text{bc}})^2 + (V_k^{\text{ac}})^2)^2} \quad (13)$$

4 最大可接入极限容量仿真分析

本文采用 GAMS 软件编写了基于节点注入法的三相极限峰值功率计算模型的求解程序, 对于不

同状态下的 IEEE 33 节点测试系统进行了计算分析。

4.1 三相平衡时单点接入极限容量分析

同一母线上连接多条馈线,为保证不含分布式光伏的馈线有足够的电压降落空间,设母线电压即馈线首节点电压为 1.04(标么值),且三相平衡。主干线长期允许电流为 0.525 kA,功率因数为 0.95 滞后,逆变器的谐波注入水平见表 3。

表 3 谐波电流
Table 3 Harmonic currents

谐波次数	谐波电流含有率/%	谐波次数	谐波电流含有率/%
2	0.961	3	0.702
4	0.358	5	0.832
6	0.170	7	0.441
8	0.136	9	0.073
10	0.041	11	0.062
12	0.051	13	0.089
14	0.034	15	0.065
16	0.036	17	0.082
18	0.011	19	0.028
20	0.008	21	0.007
22	0.007	23	0.005
24	0.006	25	0.006

系统内无其他谐波供电/用电设备,变电站低压侧母线最小短路容量为 80 MVA,根据国家标准^[17]中的换算方法得出各次谐波电流限值见表 4。

表 4 PCC 注入谐波电流允许值
Table 4 Allowable value of harmonic current injecting in PCC

谐波次数	注入谐波电流允许值/A	谐波次数	注入谐波电流允许值/A
2	20.80	3	16.00
4	10.40	5	16.00
6	6.80	7	12.00
8	5.12	9	5.44
10	4.08	11	7.44
12	3.44	13	6.32
14	2.96	15	3.28
16	2.56	17	4.80
18	2.24	19	2.72
20	2.08	21	2.32
22	1.84	23	3.60
24	1.68	25	3.28

利用本文模型对 IEEE 33 节点测试系统进行单节点接入极限容量求解,并使用 PowerFactory 软件进行试探法求解。由仿真分析可知各指标大小与接入容量成正比,可采用二分法进行试探求解,结果对比见图 4。

如图 4 所示,单节点接入时,接入位置越靠近线

路首端,可接入的极限峰值容量就越大,与仿真分析一致,算法与试探法的结果一致,验证了模型的有效性及其精确性。同一条线路的首端和末端的可接入极限容量差别明显,故在接入分布式光伏时,接入点应优先选择离馈线首端更近的节点。

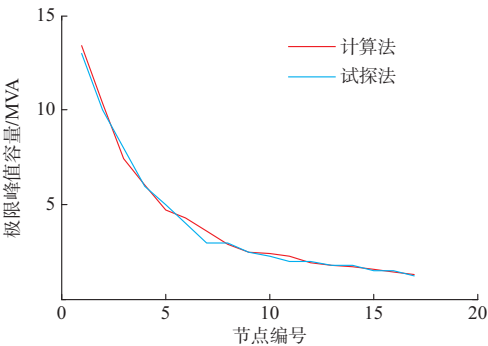


图 4 单节点接入极限容量
Fig.4 Limit capacity with a single-bus access

节点 1 接入的光伏达到极限容量时,节点 0 至节点 1 之间的线路电流为 0.525 kA,载流量约束起限制作用。从节点 2 至 16 接入的光伏达到极限容量时,接入点电压三相电压均为 1.07(标么值),电压偏差约束起作用。从节点 17 接入的光伏达到极限容量时,节点 17 的电压总谐波畸变达到 4%,谐波畸变约束起限制作用。单点接入时,接入点的前一段导线流经的功率为光伏出力减去接入点之后的总负荷的净出力,由于负荷的分散性,接入点越靠前,净出力越大,载流量指标也就越容易越限。电压总谐波畸变率和电压偏差指标都会随接入点往后而增大,由于基波电流会大量流向分散的负荷,而谐波电流则沿主干线流向系统,因此接入点越靠后,主干线中谐波电流占基波电流的比重就越大,电压畸变的响应度就会高过电压偏差,所以从长线末端接入光伏时,电压畸变指标会首先越限。

为增加线路对光伏的消纳能力,可以对馈线前端的线路进行改造,增大线径以提高线路载流量。对主干线进行电缆化改造,降低线路阻抗,潮流倒送时产生的电压压升和谐波电压随之降低,也能增大馈线对光伏的消纳能力。

4.2 三相平衡时多点接入极限容量分析

当可选择的接入点处于同一分支时,最大可接入极限容量方案应为选择分支的首节点接入。当可选择接入点处在不同分支,则需要详细的计算才能得出最大极限峰值容量的接入方案。仍以 IEEE 33 节点测试系统进行分析,假设可选择接入点为节点 7,20,24,26,其单节点接入与多节点配合接入时的极限峰值容量对比见表 5。

表 5 单节点接入与多节点接入极限容量对比
Table 5 Comparison of limit capacity between single-bus access and multi-bus access

接入方式	极限容量/MW				
	节点 7	节点 20	节点 24	节点 26	最大值
单点接入	3.6	2.03	2.71	4.08	4.08
多点配合	1.6	1.80	1.83	2.26	7.49

如表 5 所示,可选接入点单点接入时最大有功出力为 4.08 MW,但多点配合接入,最大有功出力可达 7.49 MW。当光伏分别从节点 7,20,24,26 单点接入时,仅有接入点电压偏差达到上限,起限制作用。当 4 个节点配合接入时,4 个接入点电压偏差均达到+7%的上限,多点接入时整体电压水平要高于单点接入但均不超过国家标准,即多点接入更好地利用了馈线的电压裕度空间。通过将光伏分散到线路多个分支接入,不仅可以让光伏被就地消纳,减少上网潮流,还可以让上网潮流在馈线中分布得更均匀,减小了接入点前一段线路的载流量压力,使得电压压降分布更为均匀,以此来提高馈线可接入极限峰值容量的上限。

4.3 三相不平衡时馈线可接入极限容量分析

低压配电网的三相负荷通常是不平衡的,一定限度内的三相不平衡运行不会导致电力系统故障,国家标准规定短时间内不超过 4%,长时间内不超过 2%即可正常运行。由仿真分析可知,馈线前端接入的单相光伏对整体的三相不平衡度影响较小,因此馈线可以允许一定量的单相光伏接入。

屋顶光伏的迅猛发展使得接入配电网的小容量单相光伏越来越多,因此每个各节点都可能作为光伏的接入点,在保证配电网三相不平衡度不超过国家标准限值的情况下,存在一个馈线最大可接入极限峰值容量。仍以 IEEE 33 节点测试系统进行分析,所有节点均可以作为光伏接入点,利用本文模型求解,结果见表 6。

表 6 最大有功出力方案
Table 6 Maximum power output scheme

节点编号	最大有功出力/MW			节点编号	最大有功出力/MW		
	a 相	b 相	c 相		a 相	b 相	c 相
1	0.46	0.57	0.23	22	0	0	0.36
2	0	0	2.72	28	0.59	0	0
18	3.15	2.85	0	30	0.09	0	0
19	0	0	0.65	31	0.07	0	0
20	0	0.36	0.04	32	0.03	0.69	0.46
21	0.09	0	0.03				

各节点三相电压不平衡度如表 7 所示,仍在国家标准规定的 2%限值以内。

表 7 电压三相不平衡度
Table 7 Three-phase voltage unbalance

节点编号	三相电压不平衡度/%	节点编号	三相电压不平衡度/%
1	0.9	2	0.9
3	1.5	4	1.5
5	1.5	6	1.4
7	1.5	8	1.6
9	1.7	10	1.7
11	1.8	12	1.8
13	1.9	14	1.9
15	1.9	16	1.9
17	1.9	18	1.9
19	1.9	20	1.1
21	0.6	22	0.5
23	0.5	24	1.7
25	1.7	26	1.4
27	1.4	28	1.2
29	1.3	30	1.0
31	0.6	32	0.5

表 6、表 7 的结果表明,合理分配接入点和接入相位,配电网可以接入大量单相光伏用户而使得各节点三相不平衡度仍满足国家标准要求。

5 实例应用分析

对配电网中已有馈线或馈线中已有部分光伏接入,此时有业主申报光伏接入项目,供电企业利用本文模型即可方便计算出该业主申报项目的接入点可接入的极限峰值容量,以此来校核项目并网之后该馈线是否满足电能质量的国家标准要求。以表 1 中的实际线路 LCX 作为测试,网架结构如图 5 所示,已接入的光伏情况如下:节点 14,15,16,17 接入的容量分别为 1.5,1.5,1.5,1.5 MVA。现有两个业主申报项目,业主 A 欲从节点 12 接入 2 MVA 的光伏,业主 B 欲从节点 13 接入 2.5 MVA 的光伏。

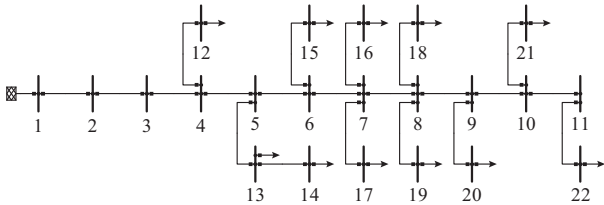


图 5 LCX 网架结构图
Fig.5 System structure of LCX

将已有光伏接入的节点出力设为固定值,利用本模型求得该状态下节点 12 可接入的极限峰值容量为 2.37 MVA,节点 13 可接入的极限容量为 1.96 MVA,基于电能质量角度只能批准业主 A 的项目,建议业主 B 减少接入量。

对于一条既定的线路存在一个关于电能质量安

全的分布式光伏可接入极限容量,只要接入馈线的总容量不超过该极限容量值,在任何接入方式或负荷状态下,该条馈线的电能质量指标都不会超过国家标准。每条线的安全可接入极限容量与其供电半径及线路阻抗相关。为方便管理,供电企业根据供电半径和负荷密度将配电网馈线分为 A,B,C,D,E,F 六类,并规定了每类线路的主要线径。根据城市配电网规划导则建立各类供电分区的标准化线路,假设接入点至主干线的线路可根据实际情况改造,功率因数最低为 0.95,首节点电压为 1.04(标么值)。利用本文的模型进行计算,可给出各类线路的安全可接入极限容量,即无论何种接入方案,只要小于安全可接入极限容量,均不会造成电能质量超标现象,结果见表 8。

表 8 城市配电网安全可接入光伏极限容量
Table 8 Limit access photovoltaic capacity of urban distribution network

主干线 线路型号	安全可接入极限容量/MVA				
	A 类	B 类	C,D 类	E 类	F 类
LGJ-120	—	—	—	1.2	0.7
LGJ-150	—	—	—	1.6	0.9
LGJ-185	5.7	4.3	2.8	1.7	1.1
LGJ-240	6.5	4.8	3.2	1.9	1.3
YJLV-240	7.4	7.4	5.0	—	—
YJLV-300	8.3	8.3	6.0	—	—
YJLV-400	9.6	9.6	6.9	—	—

注:“—”表示无此数据。

6 结论

通过仿真分析及算例验证,可得出如下结论。

1)分布式光伏接入点至变电站母线的等效阻抗大小是光伏接入后引起各电能质量指标变化差异性的最重要的因素,电压偏差是最为容易越限的电能质量指标。

2)当分布式光伏接入项目在一条馈线上有多个可选的接入点,应选择离馈线首端较近的节点。同一供电分区的电缆线路对光伏的消纳能力要强于架空线路,反映了为适应分布式光伏的发展,未来城市配电网改造必然会进一步提高电缆出线率。

3)多点配合接入光伏比单点接入更能有效地利用馈线的电压偏差裕度空间,让光伏就地被消纳,甚至能使光伏的渗透提升 50%以上。

4)辐射型馈线前 30%的位置保证在三相不平衡度不超过国家标准限值的情况下可以消纳大量的单相光伏。

5)表 8 中给出了 A,B,C 和 D,E,F 这 5 类分区不同主干线型号下对应的安全可接入极限容量值,

当供电企业校核分布式光伏接入项目时可作为参考,辅助审批。

本文中的模型考虑电压偏差、谐波畸变、电压三相不平衡度这 3 个指标时,对于任意接入情况均能有效给出基于各节点单相功率的极限峰值容量。本模型还能方便地添加其他约束,如线损率,但约束量增加以后对光伏接入原则及求解效率的影响还有待进一步研究。

附录见本刊网络版 (<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>)。

参考文献

[1] YUAN Yue, CAO Yang, ZHANG Xinsong, et al. Optimal proportion of wind and PV capacity in provincial power systems based on bilevel optimization algorithm under low-carbon economy[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2015, 3(1): 33-40.

[2] 罗凤章,米肇丰,王成山,等.并网光伏发电工程的低碳综合效益分析模型[J].电力系统自动化,2014,38(17):163-169.DOI: 10.7500/AEPS20140131002.

LUO Fengzhang, MI Zhaofeng, WANG Chengshan, et al. Comprehensive low-carbon benefit analysis models of grid-connected photovoltaic power generation projects [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(17): 163-169. DOI: 10.7500/AEPS20140131002.

[3] 娄素华,胡斌,吴耀武,等.碳交易环境下含大规模光伏电源的电力系统优化调度[J].电力系统自动化,2014,38(17):91-97.DOI: 10.7500/AEPS20140508005.

LOU Suhua, HU Bin, WU Yaowu, et al. Optimal dispatch of power system integrated with large scale photovoltaic generation under carbon trading environment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(17): 91-97. DOI: 10.7500/AEPS20140508005.

[4] ESAU Z, JAYAWEERA D. Reliability assessment in active distribution networks with detailed effects of PV systems[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2014, 2(1): 59-68.

[5] WANG Chengshan, JIAO Bingqi, GUO Li, et al. Optimal planning of stand-alone microgrids incorporating reliability[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2014, 2(3): 195-205.

[6] AL KAABI S S, ZEINELDIN H H, KHADKIKAR V. Planning active distribution networks considering multi-DG configurations[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2014, 29(2): 785-793.

[7] 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.

[8] 付文秀,范春菊,杨炼,等.配电网中分布式电源的选址定容和电流保护策略[J].电力系统自动化,2014,38(10):78-84.DOI:

10.7500/AEPS20130523009.

FU Wenxiu, FAN Chunju, YANG Lian, et al. Locating and sizing of distributed generators and current protection strategy in distribution networks [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(10): 78-84. DOI: 10.7500/AEPS20130523009.

[9] 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.DOI:10.7500/AEPS20131214002.

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. DOI: 10.7500/AEPS20131214002.

[10] 文升,顾洁,程浩忠,等.分布式电源的准入容量与优化布置的实用方法[J].电力自动化设备,2012,32(10):109-114.

WEN Sheng, GU Jie, CHENG Haozhong, et al. Maximum penetration level and optimal placement of distributed generation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(10): 109-114.

[11] 范元亮,赵波,江全元,等.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.

FAN Yuanliang, ZHAO Bo, JIANG Quanyuan, et al. Peak capacity calculation of distributed photovoltaic source with constraint of over-voltage[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(17): 40-44.

[12] 丁明,刘盛.基于遗传算法的多个光伏电源极限功率计算[J].电网技术,2013,37(4):922-926.

DING Ming, LIU Sheng. Calculation of maximum penetration level of multi PV generation systems based on genetic algorithm[J]. Power System Technology, 2013, 37(4): 922-926.

[13] GONG Wenming, HU Shuju, SHAN M, et al. Robust current control design of a three phase voltage source converter[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2014, 2(1): 16-22.

[14] 占恺峤,胡泽春,宋永华,等.考虑三相负荷平衡的电动汽车有序充电策略[J].电力系统自动化,2015,39(17):201-207.DOI: 10.7500/AEPS20150402012.

ZHAN Kaiqiao, HU Zechun, SONG Yonghua, et al. A coordinated charging strategy for electric vehicle three-phase load balance[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(17): 201-207. DOI: 10.7500/AEPS20150402012.

[15] 电能质量 供电电压偏差:GB/T 12325—2008[S].2008.

[16] 电能质量 三相电压不平衡度:GB/T 15543—2008[S].2008.

[17] 电能质量 公用电网谐波:GB/T 14549—1993[S].1993.

[18] GUO Xiaoqiang, WANG Huaibao, LU Zhigang, et al. New inverter topology for ground current suppression in transformerless photovoltaic system application[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2014, 2(2): 191-194.

[19] GARCIA P A N, PEREIRA J L R, CARNEIRO S, et al. Three-phase power flow calculations using the current injection method[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2000, 15(2): 508-514.

李 滨(1975—),女,博士,副教授,主要研究方向:电力系统最优化。E-mail: lizhen@gxu.edu.cn

潘国超(1990—),男,通信作者,硕士研究生,主要研究方向:分布式电源电能质量。E-mail: 15296575775@163.com

陈碧云(1978—),女,博士,副教授,主要研究方向:电力系统可靠性分析与规划。E-mail: chenbiyun@foxmail.com

(编辑 蔡静雯)

Limit Peak Capacity Calculation of Distributed Photovoltaic with Power Quality Constraints

LI Bin, PAN Guochao, CHEN Biyun, LI Peijie

(Key Laboratory of Guangxi Electric Power System Optimization and Energy-saving Technology
(Guangxi University), Nanning 530004, China)

Abstract: With the large number of distributed photovoltaics (PVs) dispersedly accessed in middle-low voltage distribution network, power quality problems of distribution network are becoming increasingly conspicuous, making the limit peak capacity of distributed PV accessed in distribution network the focus of attention. Following a study of the influence factors and the influence level of distributed PV on the power quality, an optimal calculation model based on the current injection method is proposed to meet the need of limits of power quality. The model is constrained by power quality indices of multiple national standards, with the peak value of the distributed generator accessed given for both new and expanded cases of limit peak capacity. The validity and practicability of the model are verified by the test results of the IEEE 33-bus system and actual LCX system. For the features of typical 10 kV line, the safety limits of distributed PV with power quality constraints are given according to different line types in different regions. The results can provide reference for the power supply enterprise in checking the grid-connected application of distributed PVs.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51407036) and National Basic Research Program of China (973 Program) (No. 2013CB228205).

Key words: distributed generator (DG); photovoltaic power generation; distribution network; power quality; limit peak capacity