

引用格式:唐波,刘一龙,朱瑞金,等.考虑系统灵活性的配电网分布式电源消纳能力分析[J].电力科学与技术学报,2025,40(2):80-88.

Citation: TANG Bo, LIU Yilong, ZHU Ruijin, et al. Analysis of consumption capacity of distributed generators in distribution networks considering system flexibility[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2025, 40(2): 80-88.

# 考虑系统灵活性的配电网分布式电源消纳能力分析

唐 波<sup>1</sup>, 刘一龙<sup>2</sup>, 朱瑞金<sup>1</sup>, 龚雪娇<sup>1</sup>

(1. 西藏农牧学院电气工程学院, 西藏 林芝 860000; 2. 国网西藏电力有限公司超高压分公司, 西藏 拉萨 850000)

**摘 要:**随着电力需求的持续增长,可再生能源的大容量接入已成为配电网的发展趋势。然而,分布式电源的大规模接入使得配电系统的潮流、阻塞、电压波动等问题更加突出,给配电网的灵活运行提出了更高的挑战。同时,需要进一步考虑配电线路的容量以及末端节点的电压偏差问题,让配电网仍可以保留一定的可调度空间,即保持系统的灵活性。因此,需要针对所接入的配电网的实际情况,合理分析配电网对分布式电源的消纳能力。建立考虑系统灵活性的分布式电源消纳能力分析模型,包括灵活性的评价方法、灵活性的提升以及分布式电源消纳分析模型。通过改进的 IEEE 33 节点算例进行仿真分析,构建多个运行场景,验证所提出方法的有效性以及智能软开关对分布式电源消纳量和系统灵活性的提升。

**关 键 词:**分布式电源;配电网;消纳能力;系统灵活性;智能软开关

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2025.02.009

中图分类号: TM863

文章编号: 1673-9140(2025)02-0080-09

## Analysis of distributed generator consumption capacity of distribution networks considering system flexibility

TANG Bo<sup>1</sup>, LIU Yilong<sup>2</sup>, ZHU Ruijin<sup>1</sup>, GONG Xuejiao<sup>1</sup>

(1. Electric Engineering College, Xizang Agricultural and Animal Husbandry University, Linzhi 860000, China;

2. State Grid Xizang Electric Power High Voltage Branch, Lasa 850000, China)

**Abstract:** With the continuous growth of electricity demand, the high penetration level of renewable energy has become a trend in the development of distribution networks. However, the large-scale integration of distributed generators (DGs) has results in more prominent problems of power flow, congestion, and voltage fluctuations, which brings challenges to the flexible operation of distribution networks. At the same time, it is necessary to further consider the capacity of lines and the voltage deviation of terminal nodes, so that distribution networks can still retain schedulable space, that is, system flexibility. Therefore, it is necessary to rationally analyze the DG consumption capacity of distribution networks based on their actual operation status. This paper proposes a DG consumption capacity analysis model that considers system flexibility, including evaluation methods for flexibility, improvement of flexibility, and DG consumption analysis model. Through the simulation analysis of the modified IEEE 33-node test system and the construction of several scenarios, the paper verifies the effectiveness of the proposed method and the improvement of power consumption and system flexibility by soft open point.

**Key words:** distributed generator; distribution network; consumption capacity; system flexibility; soft open point

随着电力需求持续增长与传统发电能源短缺矛盾的日益突出,可再生能源的大容量接入已成为配电网的发展趋势,具有清洁性、高效性、灵活性等

特点的新型配电网应运而生<sup>[1-2]</sup>。可再生能源多以分布式电源(distributed generator, DG)的形式接入配电网。由于分布式电源的能源主要来自风能、太

收稿日期: 2023-10-31; 修回日期: 2025-03-10

基金项目: 西藏自治区自然科学基金(XZ202401ZR0048)

通信作者: 龚雪娇(1989—), 女, 硕士, 高级实验师, 主要从事新型配电网的规划与运行方面的研究; Email: gongxj@xza.edu.cn

阳能等一次能源,而气候、环境等自然条件具有随机性,导致其输出功率呈现显著的不确定性和时序特性,这对配电网的安全可靠运行构成挑战<sup>[3-5]</sup>。

受限于现有设备技术水平,配电网运行控制面临多重挑战。分布式电源装机容量的持续提升使得配电系统的潮流分布、线路阻塞及电压波动等问题日益凸显,对配电网灵活运行提出更高要求<sup>[6-8]</sup>。因此,在分布式电源规划设计阶段,需结合目标配电网的实际情况,科学评估其分布式电源消纳能力。并网后,还需兼顾线路热稳定极限与末端节点电压偏差约束,确保配电网保留足够的可调度裕度。需综合考量电压水平与支路容量约束,建立融合系统灵活性的分布式电源消纳能力分析模型。

当前,分布式电源接入问题已引发学术界广泛研究。文献[9-10]基于大规模分布式电源接入背景,对国内外可再生能源消纳技术并提出解决方案进行了综述。针对单条配电线路接入场景,文献[11]建立了不同负载率下的消纳能力模型,但其系统灵活性分析存在局限。文献[12]针对分布式电源预测误差问题,提出了日前调度方案以保障系统稳定运行。实际运行中,还需重点考虑配电网运行裕度以维持灵活性。在灵活性量化方面,文献[13-14]将调节容量与爬坡备用容量定义为灵活性指标;文献[15-16]则采用运行点至安全边界的距离作为评价依据。需指出,上述指标主要适用于输电网络,在配电网实时调度中需进行适应性改进,电力电子器件技术的进步为配电网灵活运行提供了新途径,例如智能软开关(soft open point, SOP)等新型可控设备<sup>[17]</sup>显著提升了分布式电源消纳潜力。

本文针对高渗透率分布式电源接入配电网的技术现状,提出一种考虑系统灵活性的消纳能力分析模型。具体而言,首先,系统阐述配电网灵活性评价体系,包括节点侧评价模型、系统级评价方法及以SOP为代表的灵活性提升措施;其次,构建以灵活性为约束条件的分布式电源消纳能力分析模型;最后,基于改进IEEE 33节点系统开展仿真验证,结果表明所提方法能有效提升消纳能力,并量化评估了可控设备对消纳能力的增强效果。

## 1 配电网的灵活性评价方法

随着DG的大规模接入,配电网的潮流分布特性日趋复杂。传统配电网的潮流呈现单向辐射状分布,即功率由上级电源节点流向末端负荷节点;

而可再生能源的接入使得潮流的大小与方向均呈现高度不确定性<sup>[18]</sup>。这一变化对配电网调度策略提出了更高要求,同时也亟待提升系统的运行灵活性。本节将系统阐述配电网灵活性的评价方法。

### 1.1 配电网的网络模型

分布式电源接入的主要电压等级为中压配电网。因此,面向实际的运行分析需求,对于稳态运行的配电网作如下假设:

- 1) 配电网处于稳定的运行状态,系统内不存在振荡、故障;
- 2) 不考虑系统中存在的三相不平衡问题;
- 3) 配电网的网架结构保持辐射状,不考虑联络、成环问题。

基于以上假设,针对一天中某时段 $t$ ,构建稳态运行的配电网网络模型<sup>[19]</sup>,即

$$P_{t,ij} = P_{t,i}^{\text{Grid}} + \sum_{k:(j,k) \in L} P_{t,jk} + i_{t,ij}^2 r_{ij} \quad (1)$$

$$Q_{t,ij} = Q_{t,i}^{\text{Grid}} + \sum_{k:(j,k) \in L} Q_{t,jk} + i_{t,ij}^2 x_{ij} \quad (2)$$

$$v_{t,j}^2 = v_{t,i}^2 - 2(r_{ij}P_{t,ij} + x_{ij}Q_{t,ij}) + i_{t,ij}^2(r_{ij}^2 + x_{ij}^2) \quad (3)$$

$$i_{t,ij}^2 v_{t,i}^2 = P_{t,ij}^2 + Q_{t,ij}^2 \quad (4)$$

式(1)~(4)中, $P_{t,ij}$ 、 $Q_{t,ij}$ 、 $i_{t,ij}$ 分别为该时段中线路 $ij$ 上的流过的有功功率、无功功率、电流;以配电网向节点传输功率为正, $P_{t,i}^{\text{Grid}}$ 、 $Q_{t,i}^{\text{Grid}}$ 分别为所传输的有功功率和无功功率; $r_{ij}$ 、 $x_{ij}$ 分别为线路的电阻和电抗; $v_{t,i}$ 为节点 $i$ 的电压幅值。同时, $L$ 为线路的集合, $k:(j,k)$ 为节点 $k$ 属于节点 $j$ 的下级负荷点,相应地,线路 $jk$ 则为线路 $ij$ 的下级线路。

其中,式(1)、(2)分别为配电网的线路上流过的有功、无功功率的计算方法,式(3)为配电网各个节点的电压计算方法,式(4)为线路电流的计算方法。基于以上稳态分析模型,通过标幺化的计算方法<sup>[7]</sup>,可以高效准确求解配电网的稳态潮流分布。

同时,为了保证配电网的可靠运行,一般预先设定节点的电压波动范围,并且限制线路电流不得超过稳定运行约束。因此,在该模型中新增2个安全约束,电压的波动区间和电流的上限约束分别为

$$\underline{v} \leq v_{t,i} \leq \bar{v} \quad (5)$$

$$|i_{t,ij}| \leq i_{\max} \quad (6)$$

式(5)、(6)中, $\bar{v}$ 、 $\underline{v}$ 分别为预先设定的电压波动上、下限; $i_{\max}$ 为电流幅值上限。其中,预先设定的上、下限指标一般为无量纲的标幺值。

## 1.2 节点灵活性

配电网是由各个节点及连接节点的线路构成的,故在评价系统灵活性前,需要厘清节点侧的灵活性资源。基于节点功率模型,量化分析每个节点处的功率交换情况,进而分析节点灵活性<sup>[20]</sup>,其表示如下:

$$C_{t,i}(x_{t,i} - x_{t-1,i}) = P_{t,i}^{\text{Grid}} + P_{t,i}^{\text{DG}} - P_{t,i}^{\text{LD}} - P_{t,i}^{\text{FR}} \quad (7)$$

$$0 = Q_{t,i}^{\text{Grid}} + Q_{t,i}^{\text{DG}} - Q_{t,i}^{\text{LD}} - Q_{t,i}^{\text{FR}} \quad (8)$$

$$0 \leq C_{t,i} \leq \bar{\varphi}_i \quad (9)$$

$$0 \leq x_{t,i} \leq 1 \quad (10)$$

$$\underline{\omega}_i \leq P_{t,i}^{\text{FR}} \leq \bar{\omega}_i \quad (11)$$

$$\underline{\tau}_i \leq Q_{t,i}^{\text{FR}} \leq \bar{\tau}_i \quad (12)$$

其中,式(7)、(8)分别为时段 $t$ 时节点 $i$ 的有功功率和无功功率的平衡情况。考虑到有功功率可以存储,因此引入参数 $C_{t,i}$ ,用来表示总存储容量,相应的荷电量表示为 $x_{t,i}$ ,实时的动态平衡由式(7)等式右侧部分组成,包括分布式电源功率 $P_{t,i}^{\text{DG}}$ 、实时负荷 $P_{t,i}^{\text{LD}}$ ,以及灵活资源 $P_{t,i}^{\text{FR}}$ ;而无功功率不能存储。因此,其实时平衡的组成包括分布式电源补偿的无功功率 $Q_{t,i}^{\text{DG}}$ 、实时无功负荷 $Q_{t,i}^{\text{LD}}$ ,以及灵活资源的无功补偿 $Q_{t,i}^{\text{FR}}$ ;同时,节点侧的各种设备需要满足自身容量约束。因此,引入不等式式(9)~(12),其中, $\bar{\varphi}_i$ 为储能容量上限, $\underline{\omega}_i$ 以及 $\bar{\omega}_i$ 分别为灵活资源的有功上、下限值, $\underline{\tau}_i$ 、 $\bar{\tau}_i$ 分别为灵活资源的无功上、下限值。整体的节点灵活性如图1所示。

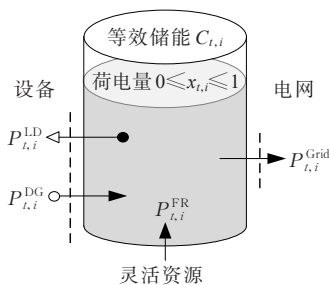


图1 节点灵活性

Figure 1 Node flexibility

从节点灵活性的来源分析,其灵活性体现在对其净负荷的调节能力上,而其物理基础是设备侧的灵活资源的有效调度。考虑到节点的灵活资源既可以吸收有功功率,亦可提供有功功率,故节点灵活性的评价指标(node flexibility, NF)分为上调灵活性和下调灵活性,分别表示如下:

$$P_{\text{NF}}(i) = \min \{ P_{i,\text{up}}(t), P_{i,\text{down}}(t) \} \quad (13)$$

$$P_{i,\text{up}}(t) = C_{t,i}(x_{t,i}) + (\bar{\omega}_i - P_{t,i}^{\text{FR}}) \quad (14)$$

$$P_{i,\text{down}}(t) = C_{t,i}(1 - x_{t,i}) + (P_{t,i}^{\text{FR}} - \underline{\omega}_i) \quad (15)$$

其中,式(13)为计算节点灵活性的方法,即求取所有分析计算时段内调节能力的最小值,考虑到不同时段的功率传输情况变化程度较大。因此,上调、下调灵活性的计算具有时序特征,式(14)为上调灵活性 $P_{i,\text{up}}(t)$ 的计算方法,式(15)为下调灵活性 $P_{i,\text{down}}(t)$ 的计算方法。

## 1.3 系统层面的灵活性评价

基于上述节点灵活性分析与网络模型,本节从系统层面构建灵活性评价指标。从灵活性本质来看,配电网的灵活运行基础在于其功率传输与平衡能力,而该能力主要受两类因素制约:线路过载与节点电压越限。当这两类问题发生时,配电网将处于最恶劣运行工况,此时系统丧失灵活调节能力,须通过设备调度恢复可调节裕度。依据以上分析,定义系统灵活性指标(system flexibility, SF) $P_{\text{SF}}$ :

$$P_{\text{SF}} = \min \{ \forall_{ij \in L} P_{\text{LP}}(ij), \forall_{i \in N} P_{\text{NV}}(i) \} \quad (16)$$

$$P_{\text{LP}}(ij) = \min (1 - i_{t,ij}/i_{\text{max}}) \quad (17)$$

$$P_{\text{NV}}(i) = \min \{ [(v_{t,i} - \underline{v})/v_0] | [(\bar{v} - v_{t,i})/v_0] \} \quad (18)$$

其中,式(16)反映了配电网的最恶劣运行场景与安全边界的距离,式(17)为线路传输功率的裕度 $P_{\text{LP}}$ ,式(18)为节点电压的裕度 $P_{\text{NV}}$ ,考虑到其指标均为标么化后的数据,因此其量纲单位为1。式(16)、(18)中, $L$ 、 $N$ 分别为配电网中线路和节点的集合; $v_0$ 为系统的额定电压。

通过系统灵活性指标SF,能够有效评价配电网的运行状态,该指标与“木桶原理”较为类似,均受限制于其短板。当SF指标降低至接近于0的场景中,反映配电网的运行状态逐步逼近极限。

## 1.4 系统灵活性的提升手段

随着电力电子技术的发展,配电网中的可控装置不断增多,给灵活性的提升提供了可能。近年来,智能软开关概念的提出和应用,为系统灵活性的提升带来了可能<sup>[19]</sup>。智能软开关的稳态运行模型可表示为如下形式:

$$P_{t,i}^{\text{SOP}} + P_{t,j}^{\text{SOP}} + P_{t,i}^{\text{SOP,L}} + P_{t,j}^{\text{SOP,L}} = 0 \quad (19)$$

$$P_{t,i}^{\text{SOP,L}} = A_i^{\text{SOP}} \sqrt{(P_{t,i}^{\text{SOP}})^2 + (Q_{t,i}^{\text{SOP}})^2} \quad (20)$$

$$P_{t,j}^{\text{SOP,L}} = A_j^{\text{SOP}} \sqrt{(P_{t,j}^{\text{SOP}})^2 + (Q_{t,j}^{\text{SOP}})^2} \quad (21)$$

$$0 \leq Q_{t,i}^{\text{SOP}} \leq \bar{Q}_i^{\text{SOP}} \quad (22)$$

$$0 \leq Q_{t,j}^{\text{SOP}} \leq \bar{Q}_j^{\text{SOP}} \quad (23)$$

$$\sqrt{(P_{t,i}^{\text{SOP}})^2 + (Q_{t,i}^{\text{SOP}})^2} \leq S_i^{\text{SOP}} \quad (24)$$

$$\sqrt{(P_{t,j}^{\text{SOP}})^2 + (Q_{t,j}^{\text{SOP}})^2} \leq S_j^{\text{SOP}} \quad (25)$$

式(19)~(25)中,  $P_{t,i}^{\text{SOP}}$ 、 $Q_{t,i}^{\text{SOP}}$  为智能软开关的功率;  $P_{t,i}^{\text{SOP,L}}$ 、 $A_i^{\text{SOP}}$  分别为其损耗和损耗系数;  $\bar{Q}_i^{\text{SOP}}$  为换流器无功补偿的上限;  $S_i^{\text{SOP}}$  为换流器的容量。

其中,智能软开关的两端分别接入在配电网中的节点  $i$  和节点  $j$ , 式(19)为智能软开关的传输功率等式, 式(20)、(21)为其换流器损耗的估算方法, 式(22)~(25)为换流器的无功补偿限制和传输容量限制。

智能软开关的控制变量为传输的有功功率和补偿的无功功率, 能够有效调节潮流分布, 构建新的功率传输路径。因此, 其对于系统灵活性指标的提升, 具有显著的作用。

## 2 配电网分布式电源消纳能力分析模型

分布式电源的接入能够为附近的负荷提供功率的支持, 但大规模接入的分布式电源会带来功率倒送、线路阻塞等问题。因此, 需要针对配电网现有的网架结构和设备, 分析在安全稳定约束下能够接入的最大分布式电源容量, 即消纳能力分析。

### 2.1 模型的目标函数

分布式电源消纳能力分析的首要目标是使分布式电源接入的总容量最大。在进一步考虑了系统灵活性后, 目标函数之一为提升系统灵活性水平。同时, 可以对网络整体的运行情况进行进一步的优化, 实现降低线损的运行目标。因此, 构建的目标函数如下所示:

$$\max f = \alpha_1 f_P + \alpha_2 f_F - \alpha_3 f_L \quad (26)$$

$$f_P = \sum_{i=1}^{N_N} S_i^{\text{DG}} \quad (27)$$

$$f_F = P_{\text{SF}} \quad (28)$$

$$f_L = \sum_{t=1}^{N_T} \sum_{ij=1}^{N_L} i_{t,ij}^2 r_{ij} \Delta t \quad (29)$$

式(26)~(29)中,  $f$  为所构建的目标函数;  $f_P$  为设定的分布式电源消纳目标函数;  $f_F$  为系统灵活性目标函数;  $f_L$  为降低系统损耗目标函数, 其系数为负。考虑到本文中所构建的稳态分析模型为基于标么值进行计算求解的数学模型, 因此进一步针对各目标函数进行权重系数的分析。其中,  $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 、 $\alpha_3$  为各个子目标函数的权重系数, 且满足  $\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 = 1$  的约束<sup>[21]</sup>,  $N_N$  为配电网节点总数,  $N_T$  为分析时段总数,  $\Delta t$  为时序分析步长,  $N_L$  为线路总数。

### 2.2 模型的约束条件

在进行消纳能力分析时, 分布式电源的装机容量视为目标函数, 而在实际运行中, 分布式电源的有功功率、无功功率影响节点的功率平衡, 进而进一步影响系统的运行灵活性, 因此, 需要计算分布式电源的有功、无功出力:

$$P_{t,i}^{\text{DG}} = P_{t,i}^{\text{DG,pre}} = S_i^{\text{DG}} \cdot \cos \theta \cdot k_t \quad (30)$$

$$Q_{t,i}^{\text{DG}} = Q_{t,i}^{\text{DG,pre}} = S_i^{\text{DG}} \cdot \sin \theta \cdot k_t \quad (31)$$

其中, 分布式电源在接入配电网后, 将其视为功率给定的  $P$ 、 $Q$  节点,  $\theta$  为分布式电源运行的功率因数角,  $k_t$  为不同时段中分布式电源的波动系数, 一般从运行曲线中获得。

同时, 配电网需满足稳态运行约束条件, 即文1.1所建立的网络模型中的电压约束与电流约束。考虑到本文研究聚焦于中压配电网的优化调度问题, 且分布式电源向上级电网的功率倒送涉及多级调度机构协调, 为简化分析, 本文仅研究本网架结构下的配电网消纳能力, 暂不考虑分布式电源向上级电网的功率倒送情形。基于此, 需增加如下约束条件:

$$P_{12} \geq 0 \quad (32)$$

$$Q_{12} \geq 0 \quad (33)$$

这些约束表示自源节点1至下级节点2的线路功率为正, 有向线路12的功率的正负值可以表征功率流动的方向, 该值大于零表示功率的方向由源节点向下级节点传递, 即不允许向上级倒送功率。

由式(7)、(8)可知, 随着分布式电源注入功率的持续增加, 其接入节点的灵活性持续衰减。当达到最大消纳容量时, 节点灵活性指标降为0。考虑到实际运行需求, 为维持系统调节能力, 需预先设定灵活性指标阈值, 将其作为系统运行约束条件。因此, 需增加如下约束条件:

$$P_{\text{SF}} \geq F \quad (34)$$

则分布式电源消纳能力分析模型可表示为

$$\begin{cases} \max f = \alpha_1 f_P + \alpha_2 f_F - \alpha_3 f_L \\ \text{s.t. 式(1)~(12), (16)~(25), (27)~(34)} \end{cases} \quad (35)$$

### 2.3 模型的线性化

上述模型中存在大量的二次项和非线性因素, 因此无法通过现有的模型进行高效的求解。考虑到配电网的运行状态波动幅度较小, 因此可通过线性化的方式, 将难以求解的复杂问题进行简化。具体表示如下:

1) 获取配电网现有参数、网架结构等信息, 获

取当前运行点信息( $P_{t,ij}^0, Q_{t,ij}^0, i_{t,ij}^0, v_{t,i}^0$ );

2) 将配电网在实际运行点处进行线性化,简化其为线性系统,并使其满足叠加定理,即通过分布式电源的消纳情况、可调设备的出力情况与初始运行状态进行叠加,得到实际的运行状态;

3) 构建线性化后的配电网灵活运行模型,通过优化模型进行分布式电源消纳能力计算,并计算此时的灵活性指标和网络运行损耗。

将配电网的网络模型式(1)~(4)进行线性化,并通过式(4)的二阶导数线性化计算线路电流,如下所示:

$$P_{t,ij} = \sum_{k \in \beta(j)} P_{t,k}^{\text{Grid}} \quad (36)$$

$$Q_{t,ij} = \sum_{k \in \beta(j)} Q_{t,k}^{\text{Grid}} \quad (37)$$

$$v_{t,i}^2 = 1 - 2 \sum_{L \in L_{ij}} r_{jk} P_{t,jk} - 2 \sum_{L \in L_{ij}} x_{jk} Q_{t,jk} \quad (38)$$

$$l_{t,ij} \approx \left[ 2P_{t,ij}^0 \sum_{k \in \beta(j)} P_{t,k}^{\text{Grid}} + 2Q_{t,ij}^0 \sum_{k \in \beta(j)} Q_{t,k}^{\text{Grid}} - (S_{t,ij}^0)^2 \right] / v_{t,i}^0 \quad (39)$$

其中, $\beta(j)$ 为节点 $j$ 的下级节点的集合,可通过配电网网架结构得到,定义 $L_i$ 为节点 $i$ 到源节点唯一路径的线路集合, $L_{ik}$ 为连通节点 $i$ 与节点 $k$ 之间路径的线路的集合,则可通过节点 $i$ 与节点 $k$ 的相关集合是否存在交集,确定计算2个节点间是否存在功率传输的通路,计算方法为

$$L_{ik} = [(C_L L_i) \cap L_k] \cup [(C_L L_k) \cap L_i] \quad (40)$$

同时,对智能软开关运行约束式(16)~(25)进行线性化,考虑到智能软开关的运行损耗系数较小,将其传输功率等式进行简化,待优化分析完成后,再通过传输容量以及损耗系数,通过下式进行计算:

$$P_{t,i}^{\text{SOP}} + P_{t,j}^{\text{SOP}} = 0 \quad (41)$$

$$0 \leq Q_{t,i}^{\text{SOP}} \leq \bar{Q}_i^{\text{SOP}} \quad (42)$$

$$0 \leq Q_{t,j}^{\text{SOP}} \leq \bar{Q}_j^{\text{SOP}} \quad (43)$$

$$-\sqrt{2} S_i^{\text{SOP}} \leq P_{t,i}^{\text{SOP}} + Q_{t,i}^{\text{SOP}} \leq \sqrt{2} S_i^{\text{SOP}} \quad (44)$$

$$-\sqrt{2} S_j^{\text{SOP}} \leq P_{t,j}^{\text{SOP}} + Q_{t,j}^{\text{SOP}} \leq \sqrt{2} S_j^{\text{SOP}} \quad (45)$$

$$-\sqrt{2} S_i^{\text{SOP}} \leq P_{t,i}^{\text{SOP}} - Q_{t,i}^{\text{SOP}} \leq \sqrt{2} S_i^{\text{SOP}} \quad (46)$$

$$-\sqrt{2} S_j^{\text{SOP}} \leq P_{t,j}^{\text{SOP}} - Q_{t,j}^{\text{SOP}} \leq \sqrt{2} S_j^{\text{SOP}} \quad (47)$$

综合以上分析,考虑系统灵活性的配电网分布式电源消纳能力分析模型可表示为

$$\begin{cases} \max f = \alpha_1 f_P + \alpha_2 f_F - \alpha_3 f_L \\ \text{s.t. 式(7)~(12)、(27)~(34)、(36)~(47)} \end{cases} \quad (48)$$

上述模型属于线性数学优化分析问题,可调用

诸如CPLEX、MOSEK等成熟的数学分析模型进行求解。

### 3 算例分析

为验证所提方法的有效性,基于改进的IEEE 33节点测试系统<sup>[22]</sup>开展仿真研究。系统拓扑结构如图2所示。在节点10、12、14、16处配置风机型分布式电源,运行期间保持功率因数恒定为0.9,其出力时序特性如图3所示。假设配电网负荷具有同质性,其波动特性如图4所示。在基准测试系统基础上,于支路18-33间部署SOP,其换流器容量可调且运行损耗系数设为0.02。

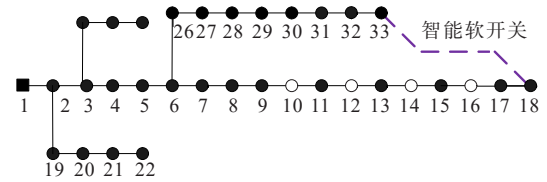


图2 改进的IEEE 33节点算例

Figure 2 Modified IEEE-33 node test system

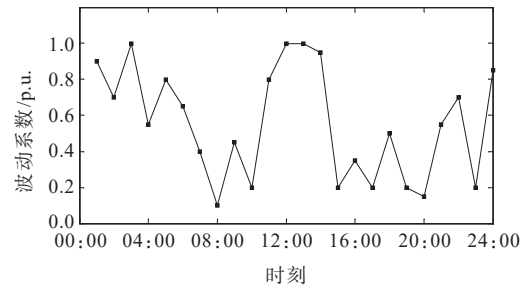


图3 风机的时序运行曲线

Figure 3 Daily operation curve of wind turbines

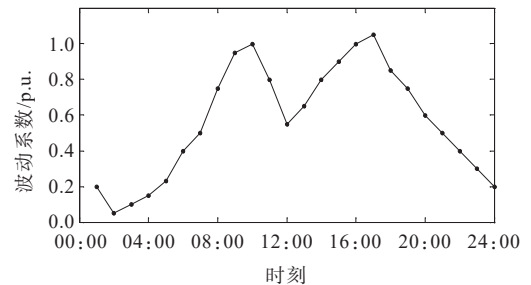


图4 负荷的时序运行曲线

Figure 4 Daily operation curve of loads

在配电网灵活性评估方面,以未接入分布式电源的基础运行工况为参考,采用表1所示的线路电流估算方法,计算各线路的热稳定极限电流。目标函数综合考虑多种运行需求,其权重系数设置如下: $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = 1/3$ 。电压方面,配电网的各个节点的电压上、下限分别设置为1.1、0.9 p.u.。

表1 线路电流量估计方法

Table 1 Estimated upper limits of line currents A

| 稳定运行时电流值 | 线路电流上限 |
|----------|--------|
| <50      | 100    |
| 50~120   | 250    |
| 120~250  | 600    |
| 250~600  | 1 500  |
| ≥600     | 2 000  |

通过用Yalmip软件包<sup>[23]</sup>进行本文所提出的相关模型的建模,平台为MATLAB R2014a,算法包为Cplex 12.6。建立场景1,即单一节点分布式电源定容量接入的情况,分析分布式电源的接入对于配电网的灵活性的影响。构建4个典型的分布式电源接入方案,用以量化分析系统的灵活性指标:

方案I 不接入分布式电源,分析配电网初始的运行状态和灵活性;

方案II 在节点16处接入容量400 kV·A的风机,分析此时的灵活性指标;

方案III 在节点16处接入容量800 kV·A的风机,分析此时的灵活性指标;

方案IV 在节点16处接入容量1 600 kV·A的风机,分析此时的灵活性指标。

以上所得到的结果如表2所示。由表2可知,在未接入分布式电源的初始状态下,配电网的线路传输功率的裕度 $P_{LP}=0.8419$ ,而节点电压的裕度 $P_{NV}=0.1552$ ,反映出此时的系统灵活性主要受限于电压偏差。详细分析此场景下电压波动特性,不同方案中各时段电压最大值与最小值的变化趋势如图5所示。各方案中节点的电压波动分布特性如图6~9所示。研究表明,随着方案II中分布式电源的接入,末端节点电压显著升高,电压裕度指标呈现增长趋势。方案III中大容量分布式电源接入导致线路传输功率裕度下降至0.3272,但电压质量指标进一步提升。方案IV由于分布式电源装机容量超限,系统灵活性指标降至零值,分布式电源

表2 场景1中配电网的运行状态和灵活性指标

Table 2 Operating status and flexibility indexes of distribution network in scenario 1

| 方案  | 分布式电源最大接入容量/(MV·A) | 系统灵活性指标/p.u.     | 系统运行损耗/(MW·h) |
|-----|--------------------|------------------|---------------|
| I   |                    | (0.8419, 0.1552) | 1.7828        |
| II  | 0.4                | (0.8429, 0.1890) | 1.6162        |
| III | 0.8                | (0.3272, 0.2499) | 1.4051        |
| IV  | 0.9673             | (0, 0.2667)      | 1.3769        |

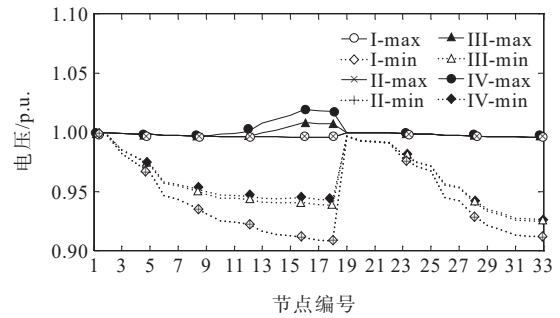


图5 场景1中节点电压最大、最小值的时序曲线

Figure 5 Maximum and minimum values of node voltage under different schemes in scenario 1

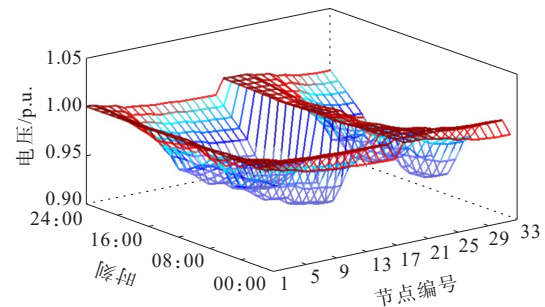


图6 场景1中方案I节点电压的时序曲线

Figure 6 Daily operation curves of node voltage under scheme I in scenario 1

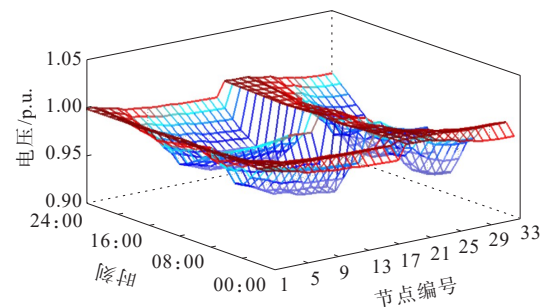


图7 场景1中方案II节点电压的时序曲线

Figure 7 Daily operation curves of node voltage under scheme II in scenario 1

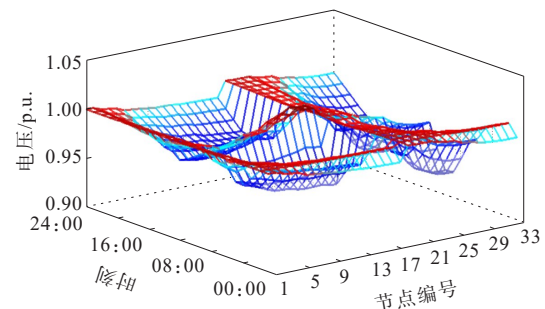


图8 场景1中方案III节点电压的时序曲线

Figure 8 Daily operation curves of node voltage under scheme III in scenario 1

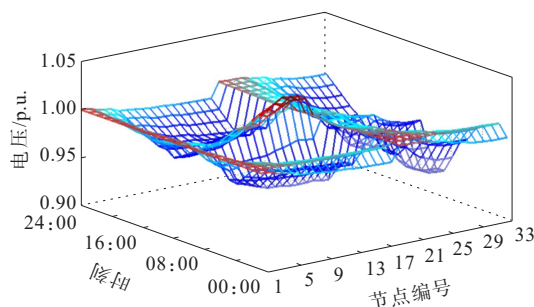


图9 场景1中方案IV节点电压的时序曲线

Figure 9 Daily operation curves of node voltage under scheme IV in scenario 1

出力无法全额消纳,消纳能力受限的主要约束条件为线路电流限值。纵向对比系统运行损耗数据可知,分布式电源渗透率提升对降低网损具有积极作用,有助于提升配电网经济运行水平。

接下来,建立场景2,即多节点分布式电源消纳能力分析。分析调度人员设定的灵活性指标 $F$ 对于平配电网消纳情况的影响。构建5个典型的调度方案,量化分析系统的装机容量灵活性指标:

方案V 灵活性指标 $F=0$ ,即调度人员 unlimited 配电网的系统灵活性;

方案VI 灵活性指标设定为 $F=0.05$ ;

方案VII 灵活性指标设定为 $F=0.10$ ;

方案VIII 灵活性指标设定为 $F=0.15$ ;

方案IX 灵活性指标设定为 $F=0.20$ 。

场景2中配电网的运行状态和灵活性指标如表3所示。分析表明,在未设定系统灵活性指标约束条件时,配电网待接入节点处最大分布式电源消纳容量为 $1.8824 \text{ MV} \cdot \text{A}$ ;随着系统灵活性指标提升,系统运行模式发生重构,分布式电源最大准入容量与网损率呈同步下降趋势。方案IX中,当预设灵活性指标下限为0.2时,因配电网缺乏可控调节设备,节点电压安全裕度约束导致无法满足该灵活性指标要求。各方案电压极值波动特性如图10所示。研究结论表明,灵活性指标阈值需依据电网实际调节能力进行精细化设定。

表3 场景2中配电网的运行状态和灵活性指标

Table 3 Operating status and flexibility indexes of distribution network in scenario 2

| 方案   | 分布式电源最大接入容量/( $\text{MV} \cdot \text{A}$ ) | 系统灵活性指标/p.u.       | 系统运行损耗/( $\text{MW} \cdot \text{h}$ ) |
|------|--------------------------------------------|--------------------|---------------------------------------|
| V    | 1.882 4                                    | (0, 0.199 9)       | 6.880 8                               |
| VI   | 1.831 4                                    | (0.050 0, 0.197 8) | 6.632 1                               |
| VII  | 1.779 4                                    | (0.100 0, 0.195 7) | 6.379 4                               |
| VIII | 1.726 2                                    | (0.150 0, 0.193 5) | 6.122 1                               |
| IX   |                                            |                    |                                       |

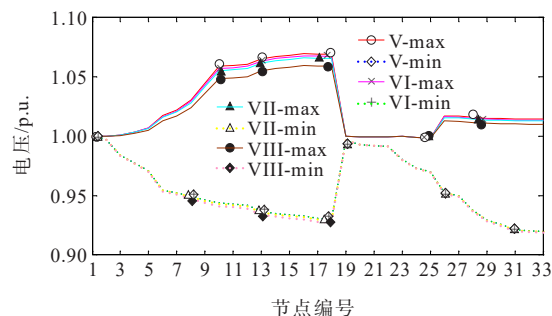


图10 场景2中节点电压最大、最小值的时序曲线

Figure 10 Maximum and minimum values of node voltage under different schemes in scenario 2

最后,建立场景3,用以分析智能软开关的接入对于分布式电源消纳能力以及灵活性的影响,以调度人员设定灵活性指标 $F=0.2$ ,方案IX作为对照,构建4个典型的运行方案:

方案X 所接入的智能软开关换流器的传输容量设置为 $0.25 \text{ MV} \cdot \text{A}$ ;

方案XI 所接入的智能软开关换流器的传输容量设置为 $0.5 \text{ MV} \cdot \text{A}$ ;

方案XII 所接入的智能软开关换流器的传输容量设置为 $0.75 \text{ MV} \cdot \text{A}$ ;

方案XIII 所接入的智能软开关换流器的传输容量设置为 $1 \text{ MV} \cdot \text{A}$ 。

场景3中配电网的运行状态和灵活性指标如表4所示。对比分析表明,引入智能软开关并设定灵活性指标后,通过优化调度其有功/无功传输功率,可有效消除线路电流越限问题,分布式电源消纳能力显著提升。各方案电压极值波动特性如图11所示。研究还表明,智能软开关容量增大可增强系统电压调节能力,推动灵活性指标持续优化。但需注意,分布式电源消纳上限仍受线路热稳定容量制约,且随智能软开关容量增加,消纳量增速趋缓,网损率增幅显著。因此,需通过智能软开关容量优化配置实现投资—运行综合成本最优。

表4 场景3中配电网的运行状态和灵活性指标

Table 4 Operating status and flexibility indexes of distribution network in scenario 3

| 方案   | 分布式电源最大装机容量/( $\text{MV} \cdot \text{A}$ ) | 系统灵活性指标/p.u.       | 系统运行损耗/( $\text{MW} \cdot \text{h}$ ) |
|------|--------------------------------------------|--------------------|---------------------------------------|
| IX   |                                            |                    |                                       |
| X    | 1.873 2                                    | (0.200 0, 0.316 4) | 6.540 8                               |
| XI   | 2.067 9                                    | (0.200 0, 0.414 2) | 7.375 6                               |
| XII  | 2.255 1                                    | (0.200 0, 0.487 9) | 8.466 6                               |
| XIII | 2.302 2                                    | (0.200 0, 0.501 1) | 8.775 0                               |

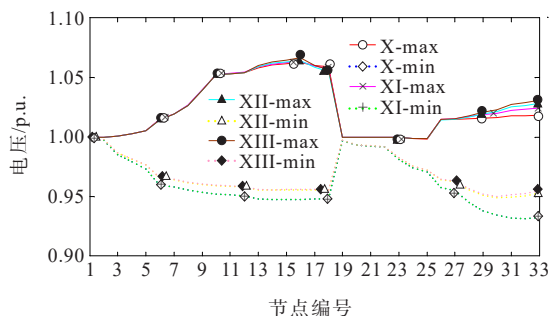


图11 场景3中节点电压最大、最小值的时序曲线

Figure 11 Maximum and minimum values of node voltage under different schemes in scenario 3

## 4 结语

面向配电网中大规模接入分布式电源的现状,结合系统灵活性的评价指标,本文提出了一种考虑系统灵活性的分布式电源消纳能力分析方法。通过在改进的IEEE 33节点算例上进行仿真分析,得到以下结论:

1) 所提出的分布式电源消纳能力分析方法,能够有效计算配电网的最大分布式电源装机容量,为配电网的规划设计提供辅助。同时,在进一步结合调度人员设定的系统灵活性指标后,得到更为保守的分布式电源消纳量,用以保证系统的灵活运行。

2) 通过智能软开关的接入,有效满足了配电网较高的灵活性的要求,同时,随着智能软开关装机容量的提升,增加了分布式电源的消纳量。但智能软开关的装机容量的提升不能无限地提高分布式电源的消纳量,其数值仍然受制于配电网的线路电流的上限约束。

## 参考文献:

- [1] 安宇,史晓超,李平,等.基于自愈控制建模的分布式电源优化研究[J].供用电,2024,41(3):88-95.  
AN Yu, SHI Xiaochao, LI Ping, et al. Optimization research on distributed power supply based on self-healing control modeling[J]. Distribution & Utilization, 2024,41(3):88-95.
- [2] 丁坤,陈博洋,秦建茹,等.大规模新能源集群接入弱电网的消纳能力评估方法[J].电力建设,2023,44(11):86-94.  
DING Kun, CHEN Boyang, QIN Jianru, et al. Evaluation method of consumption ability of new large scale energy clusters connected to weak grids[J]. Electric Power Construction, 2023,44(11):86-94.
- [3] 陈倩,王维庆,王海云.基于含分布式电源的配电网优化运行研究[J].电测与仪表,2023,60(11):19-28.  
CHEN Qian, WANG Weiqing, WANG Haiyun. Research on optimal operation of distribution network with distributed generation integration[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023,60(11):19-28.
- [4] 杨晶晶,阮国恒,杨玲,等.基于电力大数据的分布式电网异常负荷动态检测方法[J].电网与清洁能源,2023,39(3):17-22+32.  
YANG Jingjing, RUAN Guoheng, YANG Ling, et al. A dynamic detection method of abnormal load in distributed power grid based on power big data[J]. Power System and Clean Energy, 2023,39(3):17-22+32.
- [5] 陈灵,黄兴华,张功林,等.考虑削峰填谷的分布式电源集群协同控制方法[J].智慧电力,2023,51(4):8-15.  
CHEN Ling, HUANG Xinghua, ZHANG Gonglin, et al. Distributed generations clusters collaborative control method considering peak load shifting[J]. Smart Power, 2023,51(4):8-15.
- [6] 郝文斌,孟志高,张勇,等.新型电力系统下多分布式电源接入配电网承载力评估方法研究[J].电力系统保护与控制,2023,51(14):23-33.  
HAO Wenbin, MENG Zhigao, ZHANG Yong, et al. Carrying capacity evaluation of multiple distributed power supply access to the distribution network with the background of a new power system[J]. Power System Protection and Control, 2023,51(14):23-33.
- [7] 杨晓辉,杨爽,徐正宏,等.计及灵活配电单元的分布式电源优化配置方法[J].电力工程技术,2023,42(1):19-25.  
YANG Xiaohui, YANG Shuang, XU Zhenghong, et al. Optimal configuration method of distributed generation considering flexible distribution unit[J]. Electric Power Engineering Technology, 2023,42(1):19-25.
- [8] LI P, JI H R, WANG C S, et al. Optimal operation of soft open points in active distribution networks under three-phase unbalanced conditions[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019,10(1):380-391.
- [9] HUANG Y S, YANG L, GAO C, et al. A novel prediction approach for short-term renewable energy consumption in China based on improved Gaussian process regression [J]. Energies, 2019,12(21):4181.
- [10] CÎRSTEĂ Ș D, MARTIȘ C S, CÎRSTEĂ A, et al. Current situation and future perspectives of the Romanian renewable energy[J]. Energies, 2018,11(12):3289.
- [11] 崔荣,王国权,胡凌.主动配电网典型线路接入DG能力分析[J].电力系统及其自动化学报,2018,30(3):146-150.  
CUI Rong, WANG Guoquan, HU Ling. Adaptability analysis of typical lines with DG access in active

- distribution network[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2018,30(3):146-150.
- [12] CONG P W, TANG W, ZHANG L, et al. Day-ahead active power scheduling in active distribution network considering renewable energy generation forecast errors [J]. Energies, 2017, 10(9):1291.
- [13] VAN HORN K E. A network-inclusive, optimization-based approach to power system flexibility evaluation [C]//2014 North American Power Symposium (NAPS). Pullman, WA, USA. IEEE, 2014:1-8.
- [14] 周光东, 周明, 孙黎滢, 等. 含波动性电源的电力系统运行灵活性评价方法研究[J]. 电网技术, 2019, 43(6):2139-2146.
- ZHOU Guangdong, ZHOU Ming, SUN Liying, et al. Research on operational flexibility evaluation approach of power system with variable sources[J]. Power System Technology, 2019, 43(6):2139-2146.
- [15] QIN Z J, HOU Y H, LEI S B, et al. Quantification of intra-hour security-constrained flexibility region[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2017, 8(2): 671-684.
- [16] BUCHER M A, DELIKARAOGLU S, HEUSSEN K, et al. On quantification of flexibility in power systems[C]//2015 IEEE Eindhoven PowerTech. Eindhoven, Netherlands. IEEE, 2015:1-6.
- [17] CAO W Y, WU J Z, JENKINS N, et al. Benefits analysis of Soft Open Points for electrical distribution network operation[J]. Applied Energy, 2016, 165:36-47.
- [18] 孙健浩, 初壮. 考虑碳交易和无功补偿的分布式电源优化配置[J]. 发电技术, 2024, 45(1):142-150.
- SUN Jianhao, CHU Zhuang. Optimal configuration of distributed generation considering carbon trading and reactive power compensation[J]. Power Generation Technology, 2024, 45(1):142-150.
- [19] 宋关羽. 面向多运行场景的智能配电软开关运行与规划方法[D]. 天津: 天津大学, 2017.
- SONG Guanyu. Operation and planning method of intelligent distribution soft switch for multi-operation scenarios[D]. Tianjin: Tianjin University, 2017.
- [20] ULBIG A, ANDERSSON G. Analyzing operational flexibility of electric power systems[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2015, 72: 155-164.
- [21] 彭寒梅, 尹棠, 肖千皓, 等. 高比例分布式电源配电网中低压柔性互联协调规划[J]. 中国电力, 2024, 57(8): 117-129.
- PENG Hanmei, YIN Tang, XIAO Qianhao, et al. Coordinated planning of medium-voltage and low-voltage flexible interconnection for distribution networks with high proportion of distributed generation [J]. Electric Power, 2024, 57(8):117-129.
- [22] 黄代雄, 汪志军, 袁俑斌, 等. 考虑多源协同的主动配电网故障恢复策略[J]. 高压电器, 2024, 60(2): 210-215+222.
- HUANG Daixiong, WANG Zhijun, YUAN Yongbin, et al. Fault recovery strategy considering multi-source collaborative active distribution network[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(2):210-215+222.
- [23] BARAN M E, WU F F. Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1989, 4(2): 1401-1407.