

基于深度优先遍历的配电网可开放容量分析和业扩报装决策

徐成司¹, 董树锋², 吴振杰¹, 华一波², 唐剑¹, 杨兴超¹

(1. 国网浙江省电力有限公司杭州供电公司, 杭州市 310016; 2. 浙江大学电气工程学院, 杭州市 310027)

摘 要:针对当前配电网可开放容量计算粗略、业扩报装依赖人工经验、未能有效发挥数据赋能决策的问题,将可开放容量与业扩报装分析相结合,提出基于深度优先遍历的配电网可开放容量计算和业扩报装优化决策方法。首先,考虑季节和日负荷特性,基于深度优先遍历算法计算包含季节和日内时序特性的配电网馈线分区和台区公变可开放容量。其次,考虑可开放容量与负荷曲线相匹配、负载均衡、台区三相平衡等多目标,建立业扩报装优化决策模型,得到馈线分区至台区两个层次的精细化负荷最优接入方案。最后,采用 IEEE 标准配电系统和某实际配电网络的算例,分析验证了所提可开放容量计算方法的高效性,所提业扩报装决策方法能够有效应用可开放容量分析结果,得到兼顾多目标的精细化负荷接入方案。

关键词: 配电网; 深度优先遍历; 可开放容量; 负荷特性; 业扩报装; 配电台区

Available Capacity Analysis and Business Expansion Decision for Distribution Network Based on Depth-first Traversal

XU Chengsi¹, DONG Shufeng², WU Zhenjie¹, HUA Yibo²,
TANG Jian¹, YANG Xingchao¹

(1. Hangzhou Power Supply Company of State Grid Zhejiang Electricity Power Co., Ltd., Hangzhou 310016, China;
2. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

ABSTRACT: Aiming at the current problems of the rough calculation of distribution network available capacity, reliance on personal experience, and failure to give full play to the decision-making of data empowerment, this study combines available capacity with the analysis of business expansion and proposes an available capacity analysis and optimization decision method of business expansion for distribution networks based on depth-first traversal. First, considering the seasonal and daily load characteristics in the substation area, the available capacities of the feeder and public transformer were calculated based on the depth-first traversal algorithm. Second, considering the multi-objective matching of the available capacity with the load curve, load balancing, and three-phase balance in the substation area, an optimization decision model of business expansion was established, and a refined optimal load access scheme from feeder zoning to the substation area was obtained. Finally, the simulation examples using IEEE standard distribution systems and an actual distribution network were used to verify the efficiency of the proposed available capacity calculation method. It was observed that the proposed method can effectively apply the available capacity analysis results to obtain a refined load access scheme considering multiple objectives.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 52077193).

KEYWORDS: distribution network; depth-first traversal; available capacity; load characteristics; business expansion; distribution station area

中图分类号: TM715

文献标志码: A

文章编号: 1000-7229(2023)05-0034-09

DOI: 10.12204/j.issn.1000-7229.2023.05.004

0 引 言

构建以新能源为主体的新型电力系统是电力能

源行业承载“碳达峰、碳中和”使命的主要途径^[1],未来在配电网层面将有大量分布式新能源及电动汽车等多元负荷接入,配电网的形态特征和负荷特性将受到深刻影响^[2-4],为此有必要对配电网的可开放容量进行分析,为配电网对分布式新能源和负荷的承载力

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52077193)

<http://www.cepc.com.cn>

分析提供依据^[5]。同时,随着国家电网有限公司提出进一步简化用户业扩报装手续、提高办电效率的要求,业扩报装时限性和准确性需求越来越高^[6],迫切需要计算配电网线路和台区可开放容量,建立用户业扩报装智能决策方法,通过数据分析支撑业扩报装人员决策及配电网运维规划方案制定^[7],提升业扩报装过程的自动化、智能化水平。

配电网可开放容量是指在现有配电网网络条件下最大可接入的负荷容量^[8],包括馈线、线路和台区可开放容量。目前国内外对配电网可开放容量的研究取得了一定成果。文献[9]提出了一种城市配电网在正常运行约束下的最大供电能力计算模型。文献[10]考虑配电网满足 $N-1$ 安全准则,基于配电网的供电路径描述其拓扑特征,提出一种配电网馈线分区可开放容量计算方法。文献[11]提出了一种考虑负荷可进行多次转供的配电网最大供电能力评估模型。文献[12]采用连续潮流法通过小步长调节负荷搜索配电网最大供电能力。文献[13]考虑用户侧进行需求响应所产生的可调节容量,建立配电网馈线可开放容量评估模型。文献[14]提出通过协调引导电动汽车充电负荷的动态充电行为,有助于提高配电网的供电能力。

对于配电网可开放容量分析,当前在学术研究方面主要考虑配电网整体和馈线分区层面的可开放容量计算,未精细到台区层面进行分析,所得结果尚不能直接用于指导业扩报装工作。同时现有研究中仅取负荷最大容量计算可开放容量,忽略了负荷的时序特性,应用该结果无法充分发挥配电网的供电能力。在实际应用方面,现有可开放容量分析方法复杂度高、尚未得到有效应用,实际可开放容量仍是通过人工粗略计算得到。

对于业扩报装工作,在实践中长期以来电网调控人员对辖区线路和变压器的可开放容量缺乏直观的数据信息,在为新装用户选择电源点时,往往根据经验判断能否接入,造成业扩报装效率不高、负荷分配不科学、设备重载等问题,给配电网运维带来一定困难。文献[15]考虑单个低压配电台区范围,以台区三相不平衡度和线损率的加权指标评估并确定负荷最优接入位置和相别。文献[16]考虑大用户负荷的时序特性,以电源点的日负荷曲线平缓为目标,确定大用户负荷接入的馈线。在业扩报装决策研究方面,现有研究考虑了负荷历史数据,但尚未将业扩报装决策与配电网可开放容量分析相结合,所得结果难以对负荷进行合理均衡分配及提升电网安全性和供电质量。

在现有研究基础上,本文将配电网可开放容量分析与业扩报装决策相结合,提出基于深度优先遍历的配电网可开放容量分析方法以及考虑负荷时序特性、负载均衡、三相平衡的多目标业扩报装优化决策方法。现有文献多采用优化模型求解配电网最大可开放容量,计算耗时较长,为更好地满足业扩报装工作时限性的需要,本文基于深度优先遍历算法,考虑负荷的季节特性和日负荷特性,计算配电网各馈线分区和台区公变(简称公变)的可开放容量。进而根据所得可开放容量,考虑可开放容量曲线与负荷曲线相匹配、负载均衡、台区三相平衡等多目标,建立业扩报装优化决策模型,得到馈线分区至台区两个层次的精细化负荷最优接入方案。

1 基于深度优先遍历的配电网可开放容量分析模型

1.1 考虑时序特性的可开放容量

准确详实的配电网可开放容量可为业扩报装、配电网运维和规划等工作提供数据辅助支持。现有配电网可开放容量计算模型中忽略了负荷时序特性,仅取负荷额定容量进行计算,得到的可开放容量也为单一数值,无法充分反映配电网的供电能力^[13,17]。本文考虑负荷的时序特性,分析在不同季节下,包含随时间变化信息的可开放容量日曲线。其中所应用的负荷历史数据蕴含了配电网中分布式新能源出力和电动汽车充电的时序特征,基于该历史数据计算得到的可开放容量日曲线可充分考虑新能源和电动汽车等多元负荷波动性的影响,克服由于多元负荷峰谷差大造成计算结果过于保守的问题,充分挖掘配电网供电能力。进一步通过将该可开放容量曲线与用户负荷曲线相匹配来辅助业扩报装方案制定。

实际配电网通常在智能开关和台区公变处采集负荷、电压等数据,并上送至配电主站^[18]。配电网接线示意图如图1所示,其中智能开关通常位于馈线主

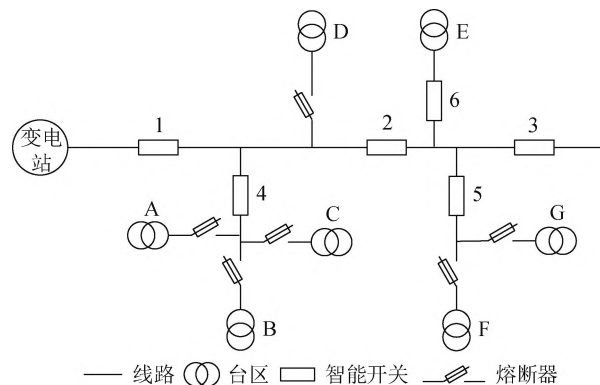


图1 配电网接线示意图

Fig. 1 Schematic diagram of distribution network

线上以及支线的出口处,台区位于配电馈线的末端,低压用户负荷和分布式新能源等通过台区接入配电网。通过智能开关可对配电线路进行分区,如图1中智能开关1、2、4之间的所有配电元件和负荷构成一个馈线分区。配电线路的接入容量包含该线路下游的所有负荷量,例如智能开关4所在支线线路的接入容量为台区A、B、C的负荷量总和。

以智能开关和台区的负荷历史数据为基础,对配电网线路和台区可开放容量进行分析。在不同季节,负荷特性不同,本文按季节分别计算负荷的可开放容量曲线,将智能开关和台区采集的负荷数据表示如下:

$$\begin{cases} \mathbf{I}_{j,s,d} = [I_{j,s,d,1}, \dots, I_{j,s,d,t}, \dots, I_{j,s,d,N}] \\ \mathbf{L}_{k,s,d} = [L_{k,s,d,1}, \dots, L_{k,s,d,t}, \dots, L_{k,s,d,N}] \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{I}_{j,s,d}$ 为第 j 个智能开关在季节 s 、第 d 天各时段负荷电流构成的向量; $I_{j,s,d,t}$ 为第 j 个智能开关在季节 s 、第 d 天、时段 t 的负荷电流; $\mathbf{L}_{k,s,d}$ 为第 k 个台区公变在季节 s 、第 d 天各时段负荷构成的向量; $L_{k,s,d,t}$ 为第 k 个台区公变在季节 s 、第 d 天、时段 t 的负荷; N 为一天的时段数量,通常负荷数据采集周期为 15 min, N 可取 96。

架空线路和电力电缆的输送限额受到环境温度影响^[19-20],在不同季节应采用经不同温度修正后的限额进行计算。

$$I_{r,j,s} = \beta_{j,s} I_{r,j} \quad (2)$$

式中: $I_{r,j,s}$ 为第 j 个智能开关在季节 s 的额定载流量; $\beta_{j,s}$ 为线路载流量的温度修正系数; $I_{r,j}$ 为第 j 个智能开关在温度修正系数为 1 时的额定载流量。

可开放容量反映对负荷的长期承载力,在分析时对历史数据进行预处理,剔除短路故障电流值,并将合解环操作^[21]引起的电流突变值用下一个时刻采集值作为稳定值替代。为了保证线路和台区负荷不超限,在分析可开放容量时,将一天各时段的电流取该季度历史数据的最大值,考虑采样点离散和负荷波动性,在实测数据上保留一定裕度:

$$I_{m,j,s,t} = y \times \max_d(I_{j,s,d,t}) \quad (3)$$

$$L_{m,k,s,t} = y \times \max_d(L_{k,s,d,t}) \quad (4)$$

式中: $I_{m,j,s,t}$ 为第 j 个智能开关在季节 s 时段 t 的最大电流计算值; $L_{m,k,s,t}$ 为第 k 个公变在季节 s 时段 t 的最大负荷计算值; y 为保留的负荷裕度系数。

仅考虑配网单个元件时,得到考虑时序特性的线路和台区可开放容量如下:

$$C_{o,j,s,t} = \sqrt{3}U(I_{r,j,s} - I_{m,j,s,t}), t = 1, 2, \dots, N \quad (5)$$

$$C_{to,k,s,t} = R_k - L_{m,k,s,t}, t = 1, 2, \dots, N \quad (6)$$

式中: $C_{o,j,s,t}$ 为仅考虑线路本身限额时第 j 条线路在季节 s 时段 t 的可开放容量; U 为配电网电压等级; $C_{to,k,s,t}$ 为仅考虑公变本身限额时第 k 个台区公变在季

节 s 时段 t 的可开放容量; R_k 为第 k 个公变的额定容量。

1.2 考虑网络约束的可开放容量

配电网中线路和台区公变的可开放容量不仅受该线路或变压器本身容量裕度的影响,还受网络整体供电能力的影响,包括从电源点到元件供电路径上的线路容量裕度的影响,以及在 $N-1$ 安全要求下馈线转供能力的限制。实际配电网发生故障后,为快速恢复供电,通常只允许闭合一个联络开关,其余开关状态保持不变^[22]。针对馈线故障中最严重的馈线出口故障,配电网可开放容量应保证在负荷增加该容量后仍可实现整条馈线负荷转供且不发生容量超限:

$$\begin{cases} C_{n,j,s,t} = \min(C_{o,j,s,t}, C_T), t = 1, 2, \dots, N \\ C_{tn,k,s,t} = \min(C_{to,k,s,t}, C_T), t = 1, 2, \dots, N \end{cases} \quad (7)$$

式中: $C_{n,j,s,t}$ 和 $C_{tn,k,s,t}$ 分别为考虑元件本身限额及 $N-1$ 安全要求的线路和台区可开放容量; C_T 为馈线 $N-1$ 安全要求的可开放容量限值。

进一步分析元件供电路径上的线路容量裕度对其可开放容量的影响。为减小短路电流、避免电磁环网运行风险以及缩小配电网故障影响范围,目前实际配电网以辐射状结构运行^[23]。基于此可通过搜索从电源到待分析元件的供电路径,取供电路径上所有线路及该元件可开放容量的最小值,得到考虑网络整体供电能力约束的元件可开放容量。

配电网的供电路径可采用图论中的深度优先遍历算法进行搜索^[24],本文基于深度优先遍历的思路,在搜索供电路径的过程中完成线路及台区可开放容量的计算。首先根据配电网公共信息模型(common information model, CIM)建立配电网拓扑模型。在 CIM 中,线路、智能开关和台区公变是导电设备,各个元件通过连接节点相连接^[25],因此可将连接节点作为节点,将导电设备作为边,建立配电网的图数据结构。

基于深度优先遍历的思路,从电源节点开始对配电网进行搜索,得到网络中每一个元件的供电路径,进而计算其可开放容量。为了能够从搜索到的元件推出其到电源节点的供电路径,本文采用堆栈结构^[26]来实现深度优先遍历,并在栈中存储供电路径信息。首先访问电源节点并令其入栈。之后,每次成功访问一个节点,根据所建立的配电网图数据结构找出该节点与栈顶节点之间的导电设备,然后令该节点入栈,若设备类型为线路或台区公变,则计算其可开放容量。将栈中节点依次用对应的导电设备连接,就能得到从电源节点到新访问的设备之间的供电路径,令该路径中的线路集合为:

$$\Pi_j = [\Pi_{j,1}, \Pi_{j,2}, \dots, \Pi_{j,m}, \dots, \Pi_{j,l_j}] \quad (8)$$

式中: Π_j 为第 j 个导电设备的供电路径中的线路集合; $\Pi_{j,m}$ 为第 j 个导电设备供电路径中的第 m 条线路; l_j 为第 j 个导电设备供电路径中的线路数量。

线路和台区公变的最终可开放容量取其自身可开放容量以及其供电路径上所有线路可开放容量的最小值。

$$C_{j,s,t} = \min(C_{n,j,s,t}, C_{\Pi_{j,1},s,t}, C_{\Pi_{j,2},s,t}, \dots, C_{\Pi_{j,m},s,t}, \dots, C_{\Pi_{j,l_j},s,t}), t = 1, 2, \dots, N \quad (9)$$

$$C_{t,k,s,t} = \min(C_{t,k,s,t}, C_{\Pi_{k,1},s,t}, C_{\Pi_{k,2},s,t}, \dots, C_{\Pi_{k,m},s,t}, \dots, C_{\Pi_{k,l_k},s,t}), t = 1, 2, \dots, N \quad (10)$$

式中: $C_{j,s,t}$ 为第 j 条线路在季节 s 的可开放容量; $C_{\Pi_{j,m},s,t}$ 为第 j 个导电设备的供电路径中第 m 条线路的可开放容量; $C_{t,k,s,t}$ 为第 k 个台区公变在季节 s 的可开放容量。

完成可开放容量计算后,再对新栈顶元素 T 的邻接点进行搜索。若 T 的所有邻接点都已访问过,则 T 出栈。重复上述搜索和可开放容量计算过程,直至栈为空,计算完成。

上述基于深度优先遍历的配电网可开放容量分析流程如图2所示。

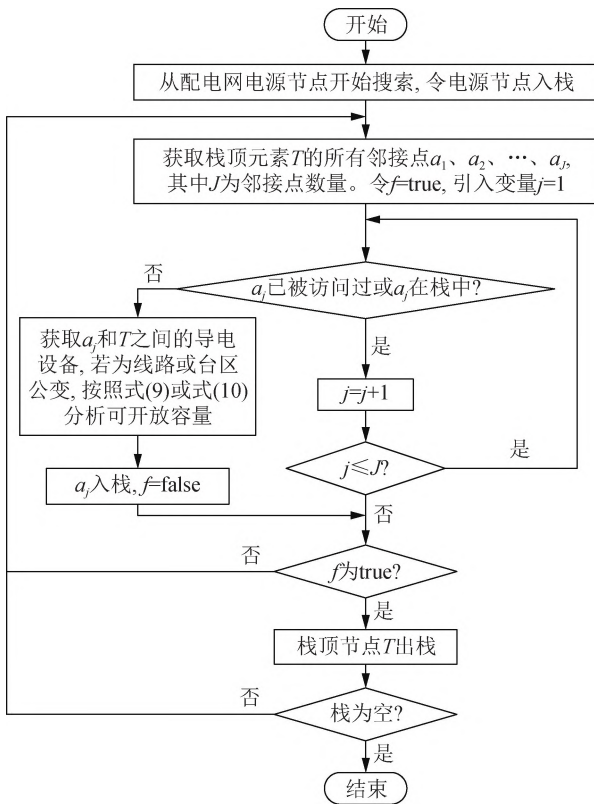


图2 基于深度优先遍历的可开放容量分析流程

Fig. 2 Flow chart of available capacity analysis based on depth first traversal

如图1所示配电网智能开关采集的负荷数据中

已包含了该开关下游所有台区的负荷,因此按照上述流程计算得到的可开放容量能够适用于存在多个台区的情形。

2 业扩报装优化决策模型

现有配电网可开放容量分析和业扩报装决策研究独立,得到的可开放容量结果无法直接用于指导业扩报装工作,本文将二者相结合,基于第1节的可开放容量计算结果建立精细化的业扩报装优化决策模型。按照配电网结构层次,首先在2.1节中建立确定负荷接入馈线分区的模型,进一步在2.2节中建立确定负荷接入具体台区的模型,两个模型依次计算,最终可得到馈线分区至台区两个层次的精细化负荷最优接入方案。

2.1 负荷接入馈线分区优化决策

实际配电网通常通过智能开关隔离处理故障及进行网络重构等,因此可以智能开关为分界点对馈线进行分区^[27],并在业扩报装中首先分析负荷接入的最优馈线分区。

随着分布式新能源及电动汽车等多元负荷接入,用电高峰期与低谷期产生的峰谷差问题越来越严峻,在业扩报装中应考虑负荷的峰谷特性,使馈线分区可开放容量与负荷时序特性相匹配,同时兼顾配电网负载均衡。目前用户报装负荷时通常不能给出一天完整的典型负荷曲线,仅给出部分负荷特征。设用户提供负荷的容量为 $L_{\max}$,峰时段和谷时段的负荷率为 p_h 和 p_s ,最小负荷率为 p_m ,负荷波动的标准差为 D ,本文基于随机游走算法^[28]生成全天的负荷曲线:

$$L_t = \max[\min(L_{t-1} + x, L_{\max}), p_m L_{\max}] \quad (11)$$

式中: L_t 为时段 t 的负荷,在峰时段和谷时段的起始时段取值分别为 $p_h L_{\max}$ 和 $p_s L_{\max}$; x 为以概率0.5取值 D 或 $-D$ 的随机变量。

在用户负荷接入某馈线分区后,该馈线分区线路的剩余可开放容量为 $[C_{j,s,1} - L_1, C_{j,s,2} - L_2, \dots, C_{j,s,t} - L_t, \dots, C_{j,s,N} - L_N]$ 。若存在 $C_{j,s,t} - L_t < 0$,则表明线路 j 的可开放容量不足,负荷不能接在该线路下。考虑如下三个目标建立负荷接入馈线分区的优化决策模型。

1) 负荷优先接入可开放容量相对额定容量比例较大的线路下,使得各馈线分区的负载均衡。该指标可基于线路剩余可开放容量与额定容量比例的日平均值表征:

$$C_{\text{resavg},j} = \frac{1}{4N} \sum_{s=1}^4 \sum_{t=1}^N \frac{C_{j,s,t} - L_t}{\sqrt{3} U_{I,r,j,s}} \quad (12)$$

式中: $C_{\text{resavg},j}$ 为线路剩余可开放容量比例。

2) 负荷曲线与线路可开放容量的时序特性相匹配,使得负荷接入后线路的剩余可开放容量曲线更平稳。该指标可以线路剩余可开放容量的最小值与额定容量的比例表征,该值越大反映负荷与线路可开放容量时序特性的匹配程度越高:

$$C_{\text{resm},j} = \min_s [(C_{j,s,1} - L_1, C_{j,s,2} - L_2, \dots, C_{j,s,t} - L_t, \dots, C_{j,s,N} - L_N) / (\sqrt{3}UI_{r,j,s})] \quad (13)$$

式中: $C_{\text{resm},j}$ 为负荷接入线路 j 后该线路剩余可开放容量的日最小值与额定容量的比例。

式(13)中计算可开放容量与额定容量比例的作用是使得数值归一化。负荷接入前线路的可开放容量曲线和接入负荷曲线可表示为线性空间 $\mathbf{R}^6$ 中的两个点,负荷接入后线路的剩余可开放容量曲线可表示为这2个点的坐标差向量:

$$\begin{cases} \mathbf{C}_{j,s} = [C_{j,s,1}, C_{j,s,2}, \dots, C_{j,s,t}, \dots, C_{j,s,N}] \\ \mathbf{L} = [L_1, L_2, \dots, L_t, \dots, L_N] \\ \mathbf{C}_{\text{res},j} = [C_{j,s,1} - L_1, C_{j,s,2} - L_2, \dots, C_{j,s,t} - L_t, \dots, C_{j,s,N} - L_N] \end{cases} \quad (14)$$

式中: $\mathbf{C}_{j,s}$ 为负荷接入前线路的可开放容量曲线向量; $\mathbf{L}$ 为接入负荷曲线向量; $\mathbf{C}_{\text{res},j}$ 为负荷接入后线路的剩余可开放容量曲线向量。

在 $\mathbf{C}_{j,s}$ 和 $\mathbf{L}$ 两个点的欧式距离一定的情况下,若 $C_{\text{resm},j}$ 越大,则表明 $\mathbf{C}_{\text{res},j}$ 中各坐标分量之间的值越接近,在 $C_{\text{resm},j}$ 取最大值的情况下,有 $C_{j,s,1} - L_1 = C_{j,s,2} - L_2 = \dots = C_{j,s,N} - L_N$ 。因此 $C_{\text{resm},j}$ 能够反映线路的剩余可开放容量曲线的平稳性, $C_{\text{resm},j}$ 越大表明负荷与线路可开放容量时序特性的匹配程度越高。

根据以上两个优化目标,将负荷接入馈线分区决策的优化目标函数写为:

$$\max_j (\alpha_1 C_{\text{resavg},j} + \alpha_2 C_{\text{resm},j}) \quad (15)$$

式中: α_1 和 α_2 为两个子目标的权重系数。

由于 $C_{\text{resavg},j}$ 和 $C_{\text{resm},j}$ 均无量纲且取值范围为 $[0,1]$,可令 α_1/α_2 的取值区间为 $[0,10]$ 从而调节两个子目标相对重要程度。当配电网整体可开放容量较大时,如在配电网建成初期,可主要考虑负荷曲线与线路可开放容量匹配目标, α_1/α_2 取较小的值;而在配电网整体负载率较高、可开放容量较小时,应主要考虑网络负载均衡,增大 α_1/α_2 取值。

优化的约束条件为负荷接入馈线分区后其剩余可开放容量须大于0:

$$C_{j,s,t} - L_t > 0, t = 1, 2, \dots, N \quad (16)$$

3) 若按照上述两个目标求得多个最优解,则将负荷优先接入与馈线出口距离更近的馈线分区,使得受影响的线路更少。

根据式(15)计算报装负荷接入每个馈线分区对应的目标函数值,选择其中的最大值并结合目标3),可确定最优的馈线分区。

2.2 负荷接入台区优化决策

确定报装负荷接入的馈线分区后,进一步优化负荷接入的台区及相别,使得台区负载趋于均衡,同时减小台区三相不平衡度,以减小配电网电能损耗,提升经济性^[15]。

首先找到馈线分区下所有台区公变,台区负载均衡的目标要求负荷接入可开放容量比例更大,并且满足公变在各时段均不越限条件。台区可开放容量比例大小指标可基于台区可开放容量的日平均值衡量:

$$C_{t,k} = \frac{1}{4NR_k} \sum_{s=1}^4 \sum_{t=1}^N C_{t,k,s,t} \quad (17)$$

式中: $C_{t,k}$ 为第 k 个公变的可开放容量比例。

为了减小负荷接入后台区三相不平衡度,应将负荷优先接入三相不平衡度较大的台区负荷最小相,以减小该台区三相不平衡度,同时避免影响三相较平衡的台区。负荷三相不平衡度可用电流负序基波分量与正序基波分量的方均根值百分比表示^[29]:

$$\varepsilon_{12,k} = \frac{1}{4N_{d,s}N} \sum_{s=1}^4 \sum_{d=1}^{N_{d,s}} \sum_{t=1}^N \frac{I_{2,k,s,d,t}}{I_{1,k,s,d,t}} \times 100\% \quad (18)$$

式中: $\varepsilon_{12,k}$ 为台区负荷三相不平衡度; $I_{1,k,s,d,t}$ 和 $I_{2,k,s,d,t}$ 分别为在季节 s 、第 d 天、时段 t 台区三相电流的正序分量方均根值和负序分量方均根值; $N_{d,s}$ 为季节 s 的天数。

结合式(17)和式(18),给出兼顾台区负载均衡和三相平衡的优化目标函数如下:

$$\max_k (\beta_1 C_{t,k} - \beta_2 \varepsilon_{12,k}) \quad (19)$$

式中: β_1 和 β_2 为两个子目标的权重系数。

$C_{t,k}$ 和 $\varepsilon_{12,k}$ 均无量纲,可令 β_1 和 β_2 的取值区间为 $[0,10]$ 从而调节两个子目标相对重要程度。当馈线分区内台区负载率均已较高时,应主要考虑台区负载均衡目标, β_1/β_2 取较大的值;而在台区可开放容量较大时,可主要考虑台区三相平衡,减小 β_1/β_2 取值。

优化的约束条件为负荷接入台区后其剩余可开放容量须大于0:

$$C_{t,k,s,t} - L_t > 0, t = 1, 2, \dots, N \quad (20)$$

在报装负荷接入后台区各时段均不过载的约束下,以式(19)所示目标函数最大为目标确定负荷接入的最优台区,该台区公变负荷最小相即为报装负荷接入的相别。

上述业扩报装决策相比现有方法考虑了负荷峰谷特性,能够更好地适用于工商业、居民常规负

荷的报装决策。对于大规模新能源和电动汽车接入的情形,峰谷特性无法完全反映其波动性及功率返送对电网的影响,负荷模型及分析方法需进一步完善。

对于多个用户接入的问题,可按照报装负荷容量从大到小、用户重要程度从高到低的顺序,依次按照本节模型优化接入,得到各用户的业扩报装决策方案。

3 算例分析

3.1 可开放容量分析

本文以不同规模的 IEEE 标准配电系统和浙江某实际配电网络为例,验证所提基于深度优先遍历的可开放容量分析方法的有效性和高效性。其中实际配电网络为一条电压等级为 10 kV 的馈线,包含 576 个连接节点、23 个智能开关、345 条线路、78 个公变。基于智能开关和台区公变一年的历史电流、负荷数据进行分析,线路的载流量在秋季、冬季按环境温度 10 ℃进行修正,春季、夏季按环境温度 35 ℃进行修正^[19]。现有文献中基于优化模型的可开放容量计算方法和本文方法计算耗时对比如表 1 所示,其中算法均采用 Java 语言编程实现,优化模型部分调用 CBC 优化软件^[30]求解,并使用配置为 Intel Core i5-3337U 1.80 GHz 型号处理器、4 GB 内存的计算机运行计算。

表 1 可开放容量分析耗时对比
Table 1 Time consuming comparison of available capacity analysis

配电系统	可开放容量分析时间/s	
	基于优化模型的方法	本文方法
IEEE 4 节点	0.21	0.11
IEEE 13 节点	0.26	0.12
IEEE 34 节点	0.47	0.14
IEEE 123 节点	7.06	1.48
某实际 576 节点配电网	72.45	7.13

在上述算例中,本文方法的计算结果和文献中基于优化模型的可开放容量计算结果相同。对于 IEEE 13 节点系统,各节点和线路的可开放容量计算结果如表 2 所示。

由表 1 可看出,本文基于深度优先遍历的配电网可开放容量计算耗时相比基于优化模型的方法显著减少,在网络规模较大时尤为明显。目前对于县域级别的配电网,所包含的馈线数量就可能达到上千条,且每条馈线的节点数量可达数百,采用本文方法可提升可开放容量分析效率,且所得结果可在满足时限要

表 2 IEEE 13 节点系统可开放容量
Table 2 Available capacity of IEEE 13-node system

节点	可开放容量/kW	线路	可开放容量/kW
632	1 794	650 - 632	1 794
633	1 794	632 - 645	705
634	100	645 - 646	705
645	705	632 - 633	1 794
646	705	633 - 634	100
671	1 794	632 - 671	1 794
692	1 794	671 - 680	1 794
675	1 528	671 - 684	807
680	1 794	684 - 611	383
684	807	684 - 652	244
652	244	671 - 692	1 794
611	383	692 - 675	1 528

求下用于指导业扩报装工作。
对于所分析的实际 576 节点配电网,在计算中基于历史数据考虑季节及日负荷时序特性后,得到其中一馈线分区的可开放容量分析结果,如图 3 所示。

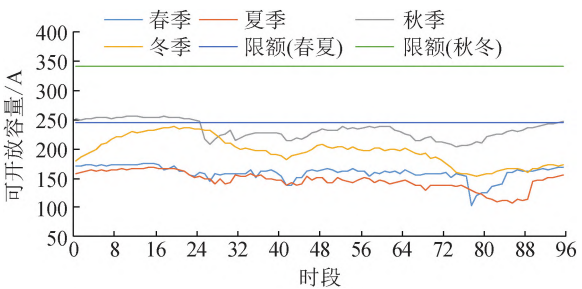


图 3 考虑时序特性的可开放容量分析结果
Fig. 3 Analysis results of available capacity considering timing characteristics

由图 3 可看出,不同季节的环境温度对馈线分区线路限额和可开放容量会产生较大影响。秋冬季气温较低,线路限额较大,因此可开放容量整体上大于春夏季,其中冬季可开放容量小于秋季,夏季可开放容量小于春季,该结果体现了可开放容量的季节特性,且符合浙江地区可开放容量经验认知。

此外,图 3 所示曲线存在明显的波动,反映了可开放容量在一日内的时序特性,可看出在 00:00—08:00 可开放容量保持在较大水平,08:00—20:00 可开放容量下降,下降程度与季节相关,而到 20:00 以后可开放容量开始上升。所得结果更全面地反映了可开放容量的时序特性,将该结果与业扩报装负荷相匹配,可更充分地发挥配电网供电能力。

3.2 业扩报装优化决策分析

基于 3.1 节可开放容量分析结果,对其中 576 节点配电网进行业扩报装优化决策分析。某一用户提

供的负荷特征信息为: $L_{\max} = 200 \text{ kW}$, $p_h = 0.75$, $p_s = 0.5$, $p_m = 0.3$, $D = 0.1$ 。基于随机游走算法添加负荷波动随机性,生成用户的全天负荷曲线,如图4所示。

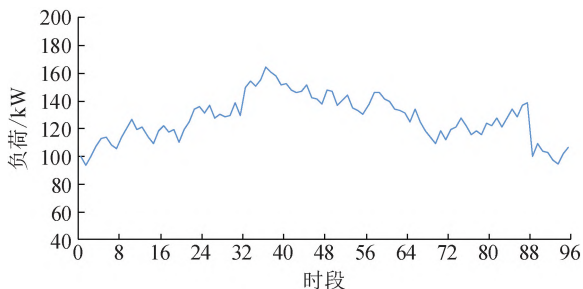


图4 业扩报装负荷
Fig. 4 Business expansion load

取 $\alpha_1 = \alpha_2 = 1$, 建立2.1节中负荷接入馈线分区的优化决策模型,求解得到负荷接入的最优馈线分区。该分区剩余可开放容量的平均值为234.1 A,最小值为230.8 A,指标 $\alpha_1 C_{\text{resavg},j} = 0.9546$ 、 $\alpha_2 C_{\text{resm},j} = 0.9413$,目标函数值为1.8959。最优和次优馈线分区在负荷接入前后的夏季可开放容量如图5所示。

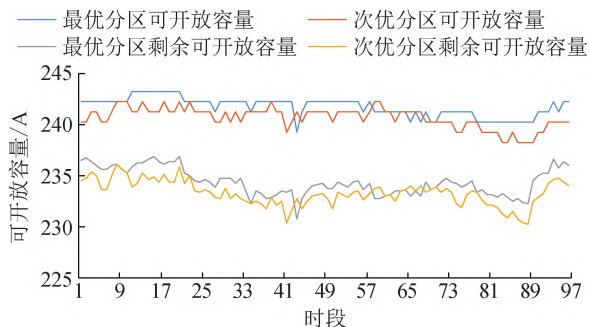


图5 馈线分区可开放容量
Fig. 5 Available capacity of feeder partition

由图4和图5可看出,报装负荷具有在电价峰时段(08:00—22:00)负荷功率大于谷时段(22:00—08:00)的时序特性,与可开放容量不具有完全互补性,优化结果选择了峰谷差较小且与负荷特性相对较为匹配的馈线分区。最优和次优馈线分区的可开放容量时序特性相近,次优馈线分区剩余可开放容量指标 $\alpha_1 C_{\text{resavg},j} = 0.9511$ 、 $\alpha_2 C_{\text{resm},j} = 0.9373$,目标函数值为1.8884,子目标和目标函数值均小于最优分区,因此所得的最优决策方案能够达到负载均衡和匹配负荷特性的效果,更充分地利用馈线分区的可开放容量。

确定负荷接入的馈线分区后,进一步根据2.2节模型制定负荷接入台区的优化决策方案。取 $\beta_1 = 1$ 、 $\beta_2 = 0.2$,求解得到最优台区的可开放容量比例 $C_{t,k} = 0.9296$,三相不平衡度 $\varepsilon_{12,k} = 0.2291$,目标函数值为0.9754,最终可确定报装负荷应接入最优台

区的负荷最小相B相,接入后该台区负荷三相不平衡度将下降为0.2068。求解得到次优台区的可开放容量比例为0.1936,负荷三相不平衡度为0.5523,目标函数值为0.3041。虽然次优台区三相不平衡度较大,但其可开放容量比例很小,因此负荷应接入最优台区。上述分析表明本文业扩报装优化结果可使各台区负载均衡,同时避免台区三相不平衡度扩大。

4 结论

本文提出基于深度优先遍历的配电网可开放容量分析和业扩报装决策方法,通过算例分析及与现有方法对比得到以下结论:

1) 将配电网可开放容量计算与业扩报装决策相结合,可开放容量分析精细至台区层面,在业扩报装决策中充分利用可开放容量结果数据与负荷进行匹配,提升了可开放容量与业扩报装分析方法的实用性。

2) 基于深度优先遍历的可开放容量计算相比现有基于优化模型的方法可显著提升计算效率,同时考虑可开放容量的时序特性后,所得结果可更全面地反映配电网供电能力,适用于业扩报装等业务的辅助分析。

3) 所提业扩报装优化决策方法可兼顾可开放容量与负荷曲线互补、负载均衡和台区三相平衡等目标,得到馈线分区至台区两个层次的精细化负荷最优接入方案,提升业扩报装的精益化、自动化水平。

本文对于多个负荷点的报装采用逐一接入方式,无法保证最优性。建立配电网多负荷点接入的优化评价指标及决策模型,是进一步的研究内容。此外,通过聚类算法提取区域负荷特征并进行更精细的季节划分,以及考虑大规模新能源和电动汽车接入的业扩报装决策,也是本文的后续研究方向。

5 参考文献

- [1] 董旭柱,华祝虎,尚磊,等. 新型配电系统形态特征与技术展望[J]. 高电压技术, 2021, 47(9): 3021-3035.
DONG Xuzhu, HUA Zhuhu, SHANG Lei, et al. Morphological characteristics and technology prospect of new distribution system[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(9): 3021-3035.
- [2] 刘科研,贾东梨,王薇嘉,等. 考虑分布式光伏电源接入模式的低压配电网不平衡线损计算方法[J]. 电力建设, 2021, 42(10): 129-138.
LIU Keyan, JIA Dongli, WANG Weijia, et al. Calculation method of unbalanced line loss in low-voltage distribution network considering the access mode of distributed photovoltaic generation[J]. Electric Power Construction, 2021, 42(10): 129-138.
- [3] 诸晓骏,陈曦,李妍,等. 考虑电动汽车接入的主动配电网优化调度[J]. 电力工程技术, 2021, 40(3): 141-147.

- ZHU Xiaojun, CHEN Xi, LI Yan, et al. Optimal dispatching of active distribution network considering electric vehicle access [J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(3): 141-147.
- [4] ZHANG L S, LIU Y B, LIANG D L, et al. Local and remote cooperative control of hybrid distribution transformers integrating photovoltaics in active distribution networks[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2022, 13(4): 2012-2026.
- [5] 王婷, 陈晨, 谢海鹏. 配电网对分布式电源和电动汽车的承载力评估及提升方法综述[J]. 电力建设, 2022, 43(9): 12-24.
- WANG Ting, CHEN Chen, XIE Haipeng. Review on evaluation and promotion methods of carrying capacity for distributed generation and electric vehicles in distribution network [J]. Electric Power Construction, 2022, 43(9): 12-24.
- [6] 韦昊男. 电力公司业扩报装标准化管理系统设计与实现[D]. 成都: 电子科技大学, 2021.
- WEI Haonan. The design and realization of standardization management system of power company's public equipment [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2021.
- [7] ZHANG C R, LI J Y, ZHANG Y J A, et al. Data-driven sizing planning of renewable distributed generation in distribution networks with optimality guarantee [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2020, 11(3): 2003-2014.
- [8] SUN M, DONG S F, CAO Z J, et al. A path-based method for feeder partition available capacity evaluation under N-1 security criterion [C]//2017 IEEE Power & Energy Society General Meeting. July 16-20, 2017, Chicago, IL, USA. IEEE, 2018: 1-5.
- [9] XIAO J, QU Y Q, SONG C H, et al. Security region and total supply capability under N-0 for urban distribution network [C]//2020 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM). August 2-6, 2020, Montreal, QC, Canada. IEEE, 2020: 1-5.
- [10] 孙明, 董树锋, 夏圣峰, 等. 基于路径描述的馈线分区 $N-1$ 可装容量计算方法 [J]. 电力系统自动化, 2017, 41(16): 123-129.
- SUN Ming, DONG Shufeng, XIA Shengfeng, et al. Path description based calculation method for available capacity of feeder partition satisfied with $N-1$ security criterion [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(16): 123-129.
- [11] 朱嘉麒, 董树锋, 徐成司, 等. 考虑多次转供的配电网最大供电能力评估方法[J]. 电网技术, 2019, 43(7): 2275-2282.
- ZHU Jiaqi, DONG Shufeng, XU Chengsi, et al. Evaluation model of total supply capability of distribution network considering multiple transfers[J]. Power System Technology, 2019, 43(7): 2275-2282.
- [12] 黄兵, 赵晋泉. 基于连续潮流的配电网供电能力评估[J]. 电力工程技术, 2019, 38(1): 14-18.
- HUANG Bing, ZHAO Jinquan. Power supply capability evaluation of distribution network based on continuation power flow [J]. Electric Power Engineering Technology, 2019, 38(1): 14-18.
- [13] 孙伟卿, 黄福泉, 张巍. 考虑需求响应的馈线可开放容量评估 [J]. 电力自动化设备, 2021, 41(6): 156-165.
- SUN Weiqing, HUANG Fuquan, ZHANG Wei. Evaluation of feeder available capacity considering demand response[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(6): 156-165.
- [14] XIAO J, YOU S T, YUAN W D, et al. Optimal scheduling to improve load supply capability considering the integration of electric vehicles in active distribution system [C]//2019 IEEE Innovative Smart Grid Technologies-Asia (ISGT Asia). May 21-24, 2019, Chengdu, China. IEEE, 2019: 3333-3338.
- [15] 郭志民, 张永浩, 周兴华, 等. 考虑三相不平衡的低压用户业扩报装供电方案精准编制[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(12): 71-76.
- GUO Zhimin, ZHANG Yonghao, ZHOU Xinghua, et al. Accurate compilation of power supply scheme for low voltage customer considering the three-phase unbalance[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(12): 71-76.
- [16] 张小斐, 魏玲, 王自强, 等. 基于负荷特性的大用户业扩辅助分析方法[J]. 电测与仪表, 2019, 56(12): 44-48, 84.
- ZHANG Xiaofei, WEI Ling, WANG Ziqiang, et al. Auxiliary analysis method of power supply access for large consumers based on load characteristics [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(12): 44-48, 84.
- [17] HUANG D S, CHEN B J, HUANG T, et al. Open capacity enhancement model of medium voltage distribution network with mobile energy storage system[J]. IEEE Access, 2020, 8: 205061-205070.
- [18] 徐世琨. 基于非序贯蒙特卡罗模拟的配电网信息物理系统可靠性分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.
- XU Shikun. Reliability analysis of distribution network CPS based on non-sequential Monte-Carlo simulation [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019.
- [19] 中华人民共和国电力工业部. 架空绝缘配电线路设计技术规程: DL/T 601—1996[S]. 北京: 中国电力出版社, 1996.
- Ministry of Power Industry of the People's Republic of China. Design technique regulations for overhead distribution lines with insulated conductors: DL/T 601—1996 [S]. Beijing: China Electric Power Press, 1996.
- [20] 马国栋. 电线电缆载流量[M]. 2版. 北京: 中国电力出版社, 2013: 231-264.
- [21] LI J L, WANG X C, XIE C, et al. A novel method for seamless closed-loop load transfer in radial distribution networks[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2023, 59(2): 2254-2265.
- [22] 胡伟, 杨梓俊, 荆江平, 等. 计及 $N-1$ 安全和网络重构的配网可开放容量评估[J]. 现代电力, 2020, 37(2): 125-132.
- HU Wei, YANG Zijun, JING Jiangping, et al. Open capacity evaluation of distribution network considering $N-1$ security criteria and network reconfiguration[J]. Modern Electric Power, 2020, 37(2): 125-132.
- [23] HONG H F, HU Z S, GUO R P, et al. Directed graph-based distribution network reconfiguration for operation mode adjustment and service restoration considering distributed generation [J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2017, 5(1): 142-149.
- [24] 徐成司, 董树锋, 孙洲, 等. 基于网络简化和深度优先遍历的配电网路径搜索算法[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(24): 170-176.
- XU Chengsi, DONG Shufeng, SUN Zhou, et al. A path searching algorithm for distribution network based on network simplification

- and depth first traversal [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(24): 170-176.
- [25] MCMORRAN A W, LINCOLN R W, TAYLOR G A, et al. Addressing misconceptions about the common information model (CIM) [C]//2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting. July 24-28, 2011, Detroit, MI, USA. IEEE, 2011: 1-4.
- [26] 朱剑锋, 缪万胜, 康介祥. 基于堆栈回溯的异常处理[J]. 计算机工程与设计, 2014, 35(12): 4176-4180.
- ZHU Jianfeng, MIAO Wansheng, KANG Jiexiang. Exception handling of VxWorks applications based on stack trace [J]. Computer Engineering and Design, 2014, 35(12): 4176-4180.
- [27] 颜翰宇. 基于改进“二分法”的配电网线路故障快速处理策略研究[D]. 南宁: 广西大学, 2019.
- YAN Hanyu. Research on fast processing strategy of distribution line fault based on improved dichotomy [D]. Nanning: Guangxi University, 2019.
- [28] 许鹏博. 非遍历反常扩散随机游走理论的模型、分析及蒙特卡洛算法模拟[D]. 兰州: 兰州大学, 2020.
- XU Pengbo. Random models, analyses in non-ergodic diffusion and Monte Carlo simulations [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2020.
- [29] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 电能质量 三相电压不平衡: GB/T 15543—2008 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Power quality three-phase voltage unbalance: GB/T 15543—2008 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2009.
- [30] 李佩杰, 万海涛, 赵晓慧, 等. 定制化求解机组组合混合整数线性规划模型的固定—推断法[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(2): 11-21.
- LI Peijie, WAN Haitao, ZHAO Xiaohui, et al. A customized fix and implicate method for mixed integer linear programming models of unit commitment problems [J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(2): 11-21.
-
- 收稿日期: 2022-08-08
- 作者简介:
- 徐成司(1995), 男, 硕士, 主要研究方向为配电网规划与运行、配电网供电能力分析, E-mail: 924094856@qq.com;
- 董树锋(1982), 男, 博士, 副教授, 通信作者, 主要研究方向为主动配电网分析, E-mail: dongshufeng@zju.edu.cn;
- 吴振杰(1975), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统调度控制、继电保护;
- 华一波(1998), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为综合能源系统规划与运行、综合需求响应;
- 唐剑(1975), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统调度控制与自动化技术;
- 杨兴超(1982), 男, 高级工程师, 主要研究方向为电力大数据、监控信息分析。
- (编辑 魏希辉)