

基于联络馈线负载率松弛约束的中压配电网供电单元划分

刘洪¹,王浩嘉¹,徐正阳¹,王冰赛¹,马良²,杨帆³

(1. 天津大学 智能电网教育部重点实验室,天津 300072;2. 国网经济技术研究院有限公司,北京 102209;
3. 国网天津市电力公司经济技术研究院,天津 300171)

摘要:当前中压配电网供电单元划分时未能充分考虑相互联络馈线间所供负荷的互补特性,易造成供电单元数量偏多、整体线路利用效率偏低等问题,为此提出了一种基于负载率松弛约束的供电单元划分方法。构建了以供电单元数量最少、各供电单元内 $N-1$ 校验后转供馈线负载率均衡为目标的中压配电网供电单元划分数学模型;解析了网格中站内供电单元与站间供电单元之间的划分次序问题,并提出了基于馈线负载率松弛约束的站间供电单元划分方法及以此为基础的站内供电单元划分方法。通过实例分析验证所提模型和方法可以对供电单元进行合理划分,节约变电站出线条数与供电单元数量,有效提高配电线路的资产利用效率。

关键词:中压配电网;供电网格;供电单元;负荷特性;负载率松弛

中图分类号:TM715

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202403018

0 引言

中压配电网规划问题具有大规模、多目标、非线性、离散性等特征^[1],整体规划求解难度较大。通过模块化的技术思路^[2],可以有效解决相关问题。国家电网公司2020年发布的配电网规划设计技术导则明确规定,需要以供电网格(2—4座互联变电站)、供电单元(1—4组馈线供电范围)为基本单位来开展网架规划^[3]。其中,供电单元的划分工作主要在完成供电网格划分和变电站规划的基础上,结合标准接线模式来开展^[4]。通过供电单元合理划分,可有效减少变电站出线条数并提升线路/间隔利用效率,考虑到主干和分支线路单位长度造价的差异,也能进一步降低网架的建设成本。

传统的供电单元划分主要依靠笼统的技术原则和规划人员的经验开展。文献[5]提出了地块法、路网法、电网法3种单元划分方法,并总结了各方法优缺点。文献[6]将规划区域划分成若干个功能分区,而后将负荷密度相近、对可靠性要求相同的功能分区合并形成供电单元。文献[7]通过差异化确定供电单元内联络馈线的负载率进行供电单元划分,但仅靠人为经验进行馈线负载率选择。上述研究工作可能因规划人员的不同而呈现差异化结果。

为保证供电单元划分的科学性,文献[8-11]建立了供电单元划分的数学模型,实现了供电单元划分的严谨规范。文献[8]考虑各个单元内负荷最大值均衡,用负荷权重改进的 K -means聚类算法划分供电单元。文献[9]以各个供电单元内负荷密度均衡为目标,提出了一种基于图像处理的供电单元划分方法。文献[10]以供电单元中配电变压器间距最小为原则,建立了基于空间聚类的中压配电网供电单元划分模型。文献[11]基于负荷沿线均匀分布等原则,提出了将供电网格按照串行和并行排列方式划分成供电单元的方法。上述研究均基于全网的最大负荷预测结果进行供电单元划分。传统的最大负荷预测通常在各个用电小区最大负荷预测的基础上,通过经验值确定同时率并得到全网预测结果^[12]。然而,受到负荷类型及其占比等多因素影响,采用经验确定同时率的方法不够严谨,需要进一步结合负荷的时序特性开展供电单元划分。文献[13]考虑上级变电站之间的联络,并将下级若干供电网格内相邻或交叉的接线组合形成“联络组合”,解决了规划区域内高峰负荷时转供能力不足以及低谷时负荷闲置的问题。文献[14]基于“就近备供”的原则,对供电单元划分结果进行人工调整,以满足供电单元内负荷特性互补。文献[15]结合线路供电范围,提出了考虑馈线所供负荷特性互补的供电单元划分方法,有效解决了单条馈线利用效率偏低的问题,然而该方法的优化效果将受到变电站内负荷类型的限制。若供电单元中联络馈线所供负荷的特性也存在互补空间,某条馈线故障后,则另一条非故障馈线对其转供后仍具备为更多负荷供电的能力,因此需要通过更加细致的技术方法来挖掘单元的整体供电潜力。

为此,本文提出考虑联络馈线间负荷特性互补与馈线负载率松弛约束的中压配电网目标年供电单

收稿日期:2023-09-09;修回日期:2023-12-04

在线出版日期:2024-03-31

基金项目:国家电网有限公司总部科技项目(新型城市配电系统单元集群组网结构及规划评价技术)(5100-202356014A-1-1-ZN)

Project supported by the Science and Technology Project of Headquarters of State Grid Corporation of China (New Urban Distribution System Unit Cluster Grouping Structure and Planning Evaluation Technology)(5100-202356014A-1-1-ZN)

元划分方法。首先,分析联络馈线间负荷特性互补对供电单元划分的价值;其次,以中压配电网供电单元个数最少、各供电单元内 $N-1$ 校验后转供馈线负载率均衡为目标,建立供电单元划分模型;然后,分析站间与站内供电单元划分的差异化技术特性,制定求解次序,并分别提出考虑联络馈线间负荷特性互补的站间供电单元和站内供电单元划分方法;最后,通过算例验证所提模型和方法的有效性 with 实用性。

1 联络馈线间负荷特性互补对供电单元划分的价值

1.1 供电单元定义

供电单元定义为在多个变电站的供电范围,考虑行政区划、地形地貌、负荷空间分布等多种因素,按照标准接线规定的馈线条数将变电站内或变电站间一定数量的相邻馈线供电范围组合而成的区域^[15]。本文面向单联络接线模式开展供电单元划分方法的研究,其具体划分形式如图1所示。

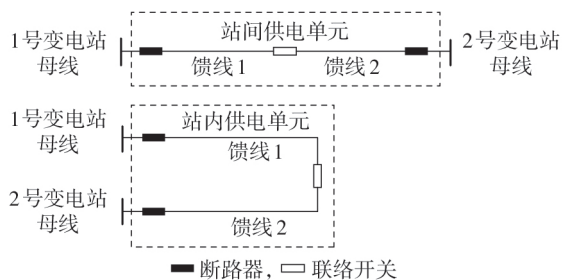


图1 供电单元划分形式

Fig.1 Forms of power supply unit division

1.2 转供馈线定义

在配电网规划中,需保证规划方案满足 $N-1$ 安全准则,即要求某条馈线出口故障时,能够将负荷转移到其他非故障馈线,以实现配电网安全可靠运行^[16]。本文将为故障馈线提供转供电的非故障馈线定义为转供馈线。

1.3 联络馈线间负荷特性互补的价值分析

受到网供负荷类型与时空分布的影响,单条馈线与整个区域配电网的负荷峰值时刻并不相同,若采用传统的同时率进行规划,则难以准确判断各条馈线的负载率是否满足 $N-1$ 安全约束。

通过负荷特性曲线可分析联络馈线间负荷的互补关系,进而改善供电单元划分结果。在单联络接线模式下, $N-1$ 安全约束要求每条馈线的最大负载率不超过50%,该约束条件没有考虑联络馈线间的互补特性,可能造成各馈线的利用率偏低。以供电单元内联络馈线所带负荷为例,馈线1与馈线2所带负荷的曲线见图2。可见2条馈线的负荷存在一定的互补性。在最大负载率为50%约束下,当某条馈线故障时,即使转供馈线对故障馈线的全部负荷进

行转供,转供馈线的最大负载率也仅为75%左右。

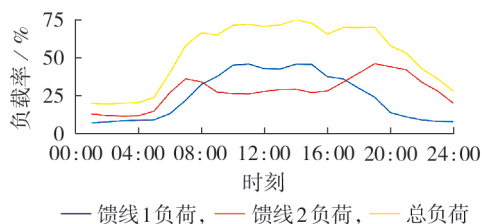


图2 联络馈线负荷互补示意图

Fig.2 Schematic diagram of load complementarity of tie line

而在考虑联络馈线间负荷特性互补的条件下,各馈线负载率可以控制在50%的4/3倍左右。此时若某馈线发生故障,则转供馈线对故障馈线负荷进行全部转供后仍然未过载运行,并且转供馈线的利用率和供电能力将得到显著提升。因此,在实际规划时,可以结合不同的负荷特性互补情况,将馈线负载率约束设定为大于50%的值,以期在保障 $N-1$ 安全准则的情况下尽量提升资产利用率。

2 考虑 $N-1$ 校验后转供馈线负载率约束的供电单元划分模型

2.1 目标函数

中压配电网供电单元划分需要通过各组联络馈线间负荷特性互补来保障变电站出线条数的减少和配电网整体建设规模的降低,以期有效挖掘中压馈线的供电能力并提升其利用效率。基于供电单元定义,减少供电单元总数等价于减少变电站的出线条数,进而降低后续线路建设中的规划成本,所以本文将供电单元总数最少作为规划目标。然而,单纯考虑供电单元总数最少的规划目标具有跳跃性,在满足供电单元数量最少的基础上,还需要计及各供电单元内 $N-1$ 校验后转供馈线负载率均衡。该规划目标有助于降低配电网的网损费用、提升模型对负荷发展预测误差的适应能力,可以更加有效地评判供电单元划分的优劣。需要说明的是,本文面向目标年负荷开展供电单元划分,未考虑负荷大幅增长问题。具体目标函数如式(1)、(2)所示。

$$\min Z = Z_{zj} + Z_{zn} \quad (1)$$

$$\min \alpha = \sum_{y=1}^Z (\eta_{y\max} - \bar{\eta})^2 / Z \quad (2)$$

$$\bar{\eta} = \sum_{y=1}^Z \eta_{y\max} / Z \quad (3)$$

式中: Z 、 Z_{zj} 、 Z_{zn} 分别为全部、站间和站内供电单元数; α 为各供电单元内转供馈线最大负载率的方差,用于描述各供电单元内转供馈线最大负载率间的均衡性; $\eta_{y\max}$ 为第 y 个供电单元中转供馈线的最大负载率,转供馈线的最大负载率指转供馈线为故障馈线

全部负荷进行供电情况下的负载率峰值,每个供电单元均存在转供馈线最大负载率; $\bar{\eta}$ 为各供电单元转供馈线最大负载率的均值,该值反映了联络馈线间负荷的互补程度,互补特性挖掘得越充分, $\bar{\eta}$ 越大。

2.2 约束条件

1) $N-1$ 校验后转供馈线负载率约束。

传统 $N-1$ 安全约束要求配电网中每条馈线的最大负载率小于该接线模式下的负载率上限,如单联络接线模式下,每条馈线最大负载率为 50%。由于本文研究对象为供电单元,所以约束条件设置也转变为供电单元中考虑 $N-1$ 校验后转供馈线负载率不过载。针对第 y 个供电单元,当供电单元任意一条馈线故障时,非故障馈线对故障馈线进行转供后最大负载率为 $\eta_{y\max}$,其计算公式如(4)所示。

$$\eta_{y\max} = W_{y\max} / (L_{\max} \cos \varphi) \quad (4)$$

式中: $W_{y\max}$ 为第 y 个供电单元内将各负荷时序特性曲线叠加后所形成总负荷的最大值; L_{\max} 为馈线最大的传输容量; $\cos \varphi$ 为功率因数。

供电单元内转供馈线最大负载率约束如下:

$$\eta_{y\max} \leq 100\% \quad (5)$$

2) 供电单元的站间联络数量约束。

供电网络中的中压馈线间联络包括站内联络和站间联络 2 类。站内联络需要花费的经济代价较小,但对主变故障时的负荷转供没有支撑作用,站间联络则正好相反。从另一角度,站间联络在保障主变故障时负荷转供的情况下也可以提升主变的资产利用效率。同时,对满足主变 $N-1$ 安全准则而言,不同变电站互联结构仅需必要的站间联络馈线数量即可^[17]。基于此,供电单元的站间联络数量约束如下:

$$N_s^q = N_s \quad (6)$$

式中: N_s^q 为第 s 座变电站形成站间联络的馈线数量; N_s 为该接线模式下对第 s 座变电站的站间联络馈线数量要求。

3 考虑联络馈线间负荷特性互补与负载率松弛约束的供电单元划分方法

3.1 计及不同供电单元差异化特性的划分次序

在供电网络基础上所划分的供电单元包括站内馈线联络的供电单元与站间馈线联络的供电单元,二者在划分技术特性上存在较大差异。

站内供电单元划分的技术特点是以地理上相邻的一组馈线供电区域作为基本单位,对同一座变电站的供电范围进行划分,以实现馈线组内负荷特性互补。而受到各座变电站供电范围的影响,站间馈线的具体联络情况未知,无法以馈线组为单位进行划分。站间供电单元划分的技术特点是以单条馈线的理论最大负载率为基础,分别在不同变电站的站间供电区域中挖掘单条馈线的供电能力,而后组合

形成供电单元。

由此可见,2种供电单元在划分技术上存在差异,无法进行整体规划。因此需要合理地安排站内、站间供电单元的求解次序,并根据各自技术特点提出差异化的划分方法。理论上供电网络中任何区域都可以形成站内供电单元,但站间供电单元的位置受到各座变电站供电范围影响。若先进行站内供电单元划分,由于供电网络中变电站地理位置的约束,各座变电站剩余区域的接壤程度会大幅受限,相互联络的站间馈线负荷特性互补空间会减小,甚至存在负荷特性不互补的情况。以此为基础进行的站间供电单元划分求解空间较小,易生成大量不可行解,难以支撑最优供电单元划分的实现。

因此,合理的划分次序应如下:①针对各座变电站相互接壤的站间区域,对站间供电单元进行划分;②通过挖掘站内联络馈线间的供电能力,进行一体化的站内供电单元划分。

3.2 馈线负载率松弛策略及划分效果分析

3.2.1 馈线负载率的松弛调节策略及参数分析

如上文所述,站间供电单元的划分需要以馈线供电范围划分为基础,再确定具体的站间联络对象。而在馈线供电范围划分时尚且不能确定联络对象以及联络馈线间的负荷特性互补程度,也难以预知馈线负载率约束的具体数值。为此,本文提出馈线负载率松弛约束的概念,即将馈线的负载率约束设置为某个限定区间的变量,并将该变量定义为馈线负载率松弛系数 η_0 。 η_0 的松弛区间如式(7)所示。

$$k_{\min} \leq \eta_0 \leq k_{\max} \quad (7)$$

式中: k_{\max} 、 k_{\min} 分别为松弛区间的上、下限参数。

在实际求解过程中,馈线负载率松弛系数 η_0 的调节策略如下:为在保证求解精度的前提下降低求解时间,本文设定 η_0 为离散变量,并以一定松弛步长 η_{step} 对区间 $[k_{\min}, k_{\max}]$ 进行遍历;为保证馈线负载率松弛区间可以适应负荷互补程度天然较差的情况,将区间下限 k_{\min} 作为不变参数,并设置为该接线模式要求的最大负载率,如单联络接线模式松弛区间下限为 50%;为充分挖掘联络馈线间负荷特性互补程度,需要通过不断调整上限 k_{\max} 来寻找到最优的负载率松弛,进而得到对应的最佳划分方案。

3.2.2 考虑负载率松弛约束的划分效果分析

本文供电单元划分是在考虑联络馈线间负荷特性互补的基础上,结合负载率松弛来实现变电站出线条数的有效节约,所以供电单元划分结果的综合最优是最大限度地减少变电站的总体出线条数。由于站间、站内供电单元划分存在明确的先后顺序,所以在划分站间供电单元时,站间、站内供电区域未知,站间出线条数需满足接线模式要求;而在划分站内供电单元时,站间、站内供电区域已知,站内出线

条数取决于站内供电区域的范围、负荷情况以及负载率约束值。通过负载率松弛调节,站间联络馈线的数量不变,但是站间供电区域变大,站内供电区域会相对变小,最终实现的是站内出线数量的减少。所以,为实现站间与站内供电单元划分的综合最优性,需保证站间供电单元划分方案最优,即最大限度地提升站间联络馈线的供电能力。通过使更多负荷采用站间联络馈线供电,实现各变电站的站内出线条数最少,达到综合最优的效果。

3.3 供电单元划分方法

3.3.1 基于负载率松弛约束的站间供电单元划分

变电站的供电范围通常是以变电站为中心的类圆形区域。中压配电网供电单元划分的实质是在类圆形区域中以从变电站向边缘辐射^[18]的若干馈线为核心的空间划分,其结果应为类扇形区域的组合。故本文结合馈线负载率松弛约束的概念,计及联络馈线间负荷特性互补,提出负载率松弛供电单元旋转划分算法,以实现站间供电单元划分,流程如下。

1) 根据变电站的接壤情况,确定变电站形成站间联络的最远处,如图 3 所示,图中馈线 a_i 与 b_j 为 2 座变电站站间馈线的初始位置。令馈线初始位置调整次数 $k=0$ 、松弛系数调整次数 $r=0$,设置站间馈线的负载率松弛系数 $\eta_0=k_{\min}+r\eta_{\text{step}}$ 。

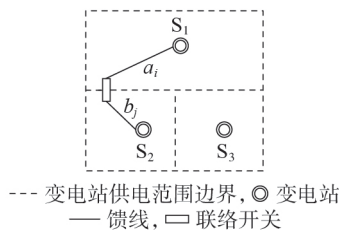


图 3 变电站 S_1 与 S_2 间初始供电单元的划分
Fig.3 Division of initial power supply unit between Substation S_1 and S_2

2) 初始时令 $i=1, j=1$, 计算变电站 S_1 和 S_2 中负荷点到馈线 a_i 与馈线 b_j 的加权距离,将加权距离最小的负荷归属馈线 a_i 与 b_j 的供电范围。加权距离与加权因子如下:

$$l_{mi} = l'_{mi} \omega_1 \quad (8)$$

$$l_{nj} = l'_{nj} \omega_1 \quad (9)$$

$$\omega_1 = [(p_{\max} - p_{\min}) / p_{\max}]^q \quad (10)$$

式中: l'_{mi} 和 l_{mi} 分别为第 m 个负荷到馈线 a_i 的欧氏距离和加权距离; l'_{nj} 和 l_{nj} 分别为第 n 个负荷到馈线 b_j 的欧氏距离和加权距离; ω_1 为加权因子,其与站间馈线 a_i 与 b_j 组成的供电单元内总负荷时序曲线的峰谷差率有关; q 为加权因子的放大系数; p_{\max} 为负荷点加入馈线 a_i 或馈线 b_j 后,该供电单元内总时序负荷的最大值, p_{\min} 为该供电单元内总时序负荷的最小值。若负荷加入会增大峰谷差,则加权因子 ω_1 变大,加

权距离变大,不利于负荷点归属该供电单元,保证了供电单元内负荷特性互补。

3) 将馈线 a_i 与 b_j 按照所带负荷的位置进行角度更新,使馈线穿过所带负荷的地理位置中心。

4) 保存馈线 a_i 的供电范围划分方案,计算并判断馈线 a_i 负载率的最大值是否小于预设的负载率松弛系数 η_0 。若小于则令 $i=i+1$, 跳转到步骤 2), 继续划分馈线 a_i 的供电范围, 否则输出馈线 a_{i-1} 供电范围划分方案。对馈线 b_j 同样进行上述操作。

5) 判断 k 是否达到迭代次数 N_{step} , 若是则转至步骤 6), 否则将馈线 a_i 与 b_j 的初始角度旋转 $\Delta\theta_1$ ($\Delta\theta_1$ 为设置的馈线调整角度, 本文设为 3°), 令 $k=k+1$, 而后返回步骤 2), 计算下一组方案。

6) 计算并输出满足供电单元内转供馈线最大负载率约束的划分方案, 详见式 (4) 和式 (5)。

7) 判断负载率松弛系数 η_0 是否达到 k_{\max} , 若达到则结束供电范围划分, 否则令 $r=r+1$, 返回步骤 1)。

各变电站之间的其他供电单元划分均采用上述方法, 图 4 展示了一种站间供电单元的划分方案, 以此为基础进行站内供电单元的划分。

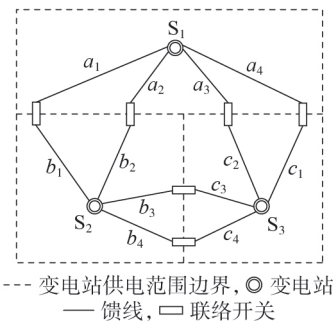


图 4 一种站间供电单元划分方案

Fig.4 A division scheme of power supply units between stations

当站间馈线接线模式为两联络时, 其示意图如图 5 所示。当馈线 a_1 发生故障时, 馈线 a_2 和馈线 b_1 对其进行转供。本文认为故障后进行转供时, 馈线 a_1

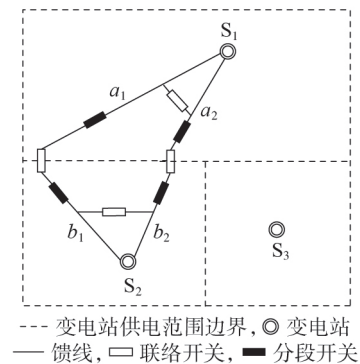


图 5 站间两联络示意图

Fig.5 Schematic diagram under two-tie connection mode between stations

所带负荷按照与变电站 S_1 、 S_2 距离就近的原则分配给馈线 a_2 和馈线 b_1 进行供电。为满足 $N-1$ 安全约束,馈线 a_2 对馈线 a_1 转供后的最大负载率、馈线 b_1 对馈线 a_1 转供后的最大负载率要小于100%。

3.3.2 基于站间供电单元性能的评判指标

基于3.1节的分析可知,站内供电单元以一组联络馈线为基本单位进行划分,而站间供电单元是将不同变电站的馈线供电范围组合来实现划分。由于站间供电单元划分的组合情况不确定,且划分结果的优劣会直接影响整体划分结果的质量,所以本文引入评判指标对各种站间供电单元划分方案进行优选。而对于站内供电单元划分结果,则未引入评判指标。这是由于供电单元划分是在已知各变电站供电范围的前提下进行的。对于某个变电站而言,如果站间供电单元划分结果确定,那么站内供电区域随之确定。所以,不同站内供电单元划分方案的差异并不会很大,其优化空间较小,可通过目标函数进行供电单元整体划分方案的优选,不必引入站内供电单元划分的评判指标。

为了定量分析站间供电单元的划分效果,本文定义负荷特性互补指标作为站间供电单元划分方案的评判指标,具体如下。

令 X 表示站间供电单元时序负荷矩阵,假设第 h 个站间供电单元内有 n 个负荷, $x_{n,t}$ 表示该供电单元中第 n 个负荷在 t 时刻的大小,其中 $t=1,2,\dots,24$,如式(11)所示。

$$X = \begin{bmatrix} x_{1,1} & x_{1,2} & \cdots & x_{1,24} \\ x_{2,1} & x_{2,2} & \cdots & x_{2,24} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_{n,1} & x_{n,2} & \cdots & x_{n,24} \end{bmatrix} \quad (11)$$

设 τ_h 为第 h 个供电单元的负荷特性互补指标,即供电单元内总负荷时序特性最大值与各个负荷时序特性最大值之和的比值,具体计算公式如下:

$$\tau_h = \frac{\max \{ (x_{1,1} + x_{2,1} + \cdots + x_{n,1}), \dots, (x_{1,24} + x_{2,24} + \cdots + x_{n,24}) \}}{\max \{ x_{1,1}, x_{1,2}, \dots, x_{1,24} \} + \cdots + \max \{ x_{n,1}, x_{n,2}, \dots, x_{n,24} \}} \quad (12)$$

H 个站间供电单元内负荷特性互补指标的均值 $\bar{\tau}$ 表达式如下:

$$\bar{\tau} = \frac{1}{H} \sum_{h=1}^H \tau_h \quad (13)$$

指标 $\bar{\tau}$ 值越小,说明该站间供电单元划分方案下的负荷特性互补效果越好。各负载率松弛系数 η_0 下生成 N_{step} 种站间供电单元划分方案后,计算每一种方案的指标 $\bar{\tau}$ 值,选择指标 $\bar{\tau}$ 值最小的方案,作为该负载率松弛系数下最优的站间供电单元划分方案,以此为基础进行站内供电单元的划分,有助于节约站内供电单元数量。

3.3.3 站内供电单元的一体化划分方法

站内供电单元的划分是以给定负载率松弛系数 η_0 下最优站间供电单元划分方案为基础的,在各座变电站的站内供电区域,以站内联络馈线组为单位,进行一体化的站内供电单元划分。

首先,以变电站为中心,在站内区域均匀生成若干条中心线,每2条相邻的中心线互联形成一个站内供电单元。其次,计算每个负荷点到各条中心线的加权距离;按照加权距离最小的原则,并要求每条中心线的负载率不超过对应的负载率松弛系数 η_0 ,将各个负荷点划分至各条中心线的供电范围;每条中心线供电范围划分完成后,对其角度进行更新,使中心线穿过所带负荷地理位置的中心。然后,完成区域内所有站内供电单元的划分,并将各中心线的初始角度旋转 $\Delta\theta_1$,重新进行上述划分过程。最后,进行 N_{step} 次初始角度旋转,得到 N_{step} 种站内供电单元划分方案,并输出满足 $N-1$ 校验后转供馈线负载率约束的划分方案。

综合站间与站内供电单元划分方法,得到整体划分流程,进而实现对供电单元划分模型的求解,供电单元整体划分流程见附录A。

4 算例验证

4.1 算例概况

算例中包括由3座 $2 \times 63 \text{ MV} \cdot \text{A}$ 变电站形成的供电网络^[19],主变平均负载率为60%,3座变电站供电范围内各有160、166、160个负荷,平均负荷大小为430 kW,10 kV馈线型号为LGJ-185,传输容量为7.8 MW。负荷共有居民、商业、工业、行政4种负荷类型,共有春夏秋冬各自工作日和周末8个典型日的负荷曲线。算例概况见附录B图B1,不同典型日下的负荷曲线见附录B图B2—B5。

根据负荷规模与接线模式对线路负载率的要求^[20],可以确定当站间与站内馈线形成单联络时,各变电站出20条馈线,其中12条互联形成站内联络,8条形成站间联络;当站间馈线形成两联络、站内馈线形成单联络时,各变电站出18条馈线,其中14条互联形成站内联络,4条形成站间联络。

4.2 站间为单联络接线模式的供电单元划分结果

4.2.1 不同划分方法下的结果分析

本节用3种方法对变电站进行供电单元划分,进而体现考虑联络馈线之间负荷特性互补的优势。3种划分方法如下:考虑联络馈线间的负荷特性互补,并对各馈线进行负载率松弛约束;考虑联络馈线间的负荷特性互补,但不考虑馈线的负载率松弛约束,默认各条馈线的最大负载率为50%;考虑供电单元中单条馈线供电范围内的负荷特性互补。划分过程所涉及的 k_{max} 、加权因子 ω_1 、馈线调整角度 $\Delta\theta_1$

等参数取值及合理性说明分别见附录C表C1—C3。

不同划分方法考虑的因素及每种划分方法所得最优供电单元划分方案中变电站的出线条数见表1。

表1 不同划分方法下的最优供电单元划分方案

Table 1 Optimal power supply unit division schemes under different division methods

供电单元划分方案	是否考虑联络馈线间所带负荷特性互补	是否考虑负载率松弛约束	变电站出线条数
1	是	是	54
2	是	否	60
3	否	否	66

由表1可知,2种考虑联络馈线间负荷特性互补的供电单元划分方案中变电站出线条数均少于仅考虑单条馈线负荷特性互补的划分方案,其中方案1与方案3相比,变电站出线条数节约了约18.18%。而对比前2种方案可知,通过对馈线进行负载率松弛来划分供电单元,可以进一步减少变电站的出线条数。以方案1为例,附录D图D1展示了供电单元划分的结果图。由图可知,在方案1中,各变电站所出站内馈线条数为10,站间馈线条数为8,3座变电站总出线条数为54。

上述3种供电单元划分方案中,各供电单元内转供馈线最大负载率的最大值、最小值和平均值见表2。

表2 不同供电单元划分方案转供馈线最大负载率信息

Table 2 Information about maximum load rate of transfer line in different power supply unit division schemes

划分方案	各转供馈线最大负载率的最大值/%	各转供馈线最大负载率的最小值/%	各转供最大负载率的平均值/%
1	97.2	89.1	93.3
2	88.6	78.2	83.1
3	78.8	67.1	73.8

由表2可知,方案3相比于前2种划分方案,其各个供电单元内转供馈线最大负载率取值普遍较低,这是由于在供电单元划分时,未考虑联络馈线间的负荷特性互补,造成每条馈线未能充分发挥各自的供电能力,存在一定的裕量,因此方案3中变电站出线条数最多,配电线路的设备利用效率较低。对于方案1与方案2,在站间供电单元划分过程中,由于优先将互补情况较好的居民负荷与行政负荷、商业负荷划分在同一个站间供电单元中,因此每条馈线可以带更多的负荷,充分挖掘了各馈线的供电能力,并降低了供电单元内所带负荷的峰谷差,具体体现在式(10)中。方案1、2中各个供电单元内转供馈线的最大负载率均处在较高数值,配电线路的资产利用效率得到较大提升。

然而,方案2中各条馈线最大负载率为50%,即

便将2条负荷特性完全不互补的馈线形成供电单元,其供电单元内转供馈线的最大负载率也会低于100%,若该供电单元内负荷特性互补,其转供馈线最大负载率会进一步下降,因此仅考虑联络馈线间负荷特性互补而不充分挖掘各条馈线的供电能力,所得到的供电单元划分结果还存在可提升空间。相比之下,方案1通过考虑联络馈线的负荷特性互补以及负载率松弛约束,充分挖掘了各条馈线的供电能力,供电单元内馈线转供后最大负载率均值可以达到93.3%,馈线的设备利用效率较高。

4.2.2 不同负载率松弛上限的供电单元划分

馈线负载率松弛上限的选择体现了对联络馈线间负荷特性互补的挖掘程度。表3给出了当负载率松弛步长 η_{step} 为1%、负载率松弛上限不同时,得到的不同供电单元划分方案。

表3 不同负载率松弛上限的供电单元划分方案

Table 3 Power supply unit division scheme under different upper limits of relaxed load rate

负载率松弛上限/%	各转供馈线最大负载率平均值/%	出线条数	供电单元内转供馈线负载率方差
58	93.3	54	20.2
56	89.8	56	22.7
54	83.1	60	26.4

由表3可知,当负载率松弛上限为58%时,3座变电站共出线54条,各供电单元内转供馈线负载率方差为20.2。与负载率松弛上限为54%和56%时的供电单元划分方案相比,分别节约了6条和4条馈线,供电单元内转供馈线负载率更均衡。

综上所述,当馈线的负载率松弛上限较大时,联络馈线间负荷特性互补的程度较好,各馈线的供电能力得到了充分挖掘,进而减少了变电站出线条数,提高了线路的利用率,当 η_0 越大时,馈线可带负荷越多。然而馈线的负载率松弛并非越大越好,这是由于受到负荷实际地理分布情况的影响^[21],联络馈线间的负荷难以达到理想的互补效果,当负载率松弛较大时,馈线所带负荷较多,而联络馈线间负荷的互补程度是有限的,必然会导致转供馈线的最大负载率增加,所以会出现无法满足转供馈线最大负载率约束的情况。

4.3 站间为两联络接线模式的供电单元划分方案

图6展示了站间馈线为两联络、站内馈线为单联络接线模式下最优的供电单元划分方案。其中站间馈线负载率松弛上限为75%,负载率松弛步长 η_{step} 为1%。

由图6可知,最优供电单元划分方案中,每座变电站形成6个站内供电单元,每2座变电站之间形成1组站间供电单元,3座变电站共出线最少为48条,各个供电单元内转供馈线负载率方差 α 最小为

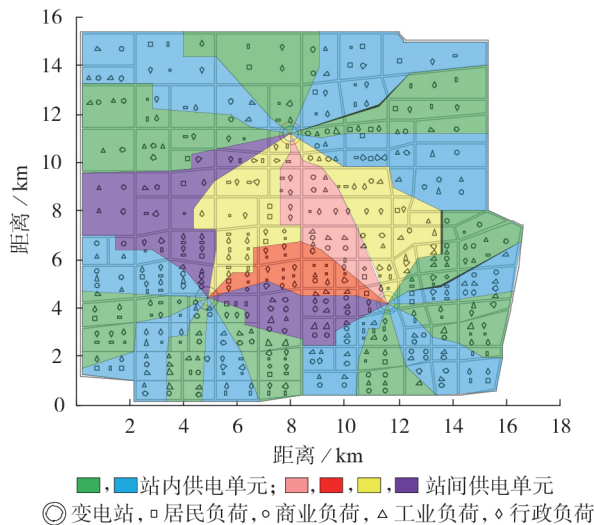


图6 站间为两联络下的最优供电单元划分方案

Fig.6 Optimal power supply unit division scheme under two-tie connection mode between stations

23.1,各负载率之间最为均衡。

由上述分析可知,所提方法不仅限于单联络接线模式下的供电单元划分。根据接线模式的不同,通过对负载率松弛进行合理的设置,均可以得到最优的供电单元划分方案,达到节约变电站出线条数、降低网架规划成本的效果。

5 结论

本文提出了一种考虑联络馈线间负荷特性互补与负载率松弛约束的中压配电网供电单元划分方法,并得到以下结论。

1)考虑联络馈线间负荷特性互补的供电单元划分,可以提高线路的资产利用效率,节约变电站出线条数。若在考虑联络馈线间负荷特性匹配的基础上对馈线负载率进行松弛调节,则可以进一步减少变电站出线条数,提高配电线路设备利用率。

2)馈线负载率松弛约束的上限决定了对馈线供电能力的挖掘程度。馈线负载率松弛约束的上限 k_{\max} 越大,供电单元划分的求解空间越大,所得到的各供电单元内转供馈线最大负载率方差越小。

随着新能源技术快速发展,配电网供电单元划分亟需考虑分布式电源接入的影响。分布式电源出力具有很强的间歇性与波动性,大规模接入后不仅改变了网供负荷大小^[22],而且使其具有很强的不确定性,为供电单元划分带来了新的挑战,主动配电网的供电单元划分将是未来的重点工作。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

[1] 肖白,郭蓓. 配电网规划研究综述与展望[J]. 电力自动化设备,2018,38(12):200-211,217.

XIAO Bai, GUO Bei. Review and prospect of distribution network planning[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(12):200-211, 217.

[2] 李海涛,孙波,王轩. 配电网网格化规划方法及其应用[J]. 电力系统及其自动化学报,2015,27(增刊1):33-37.

LI Haitao, SUN Bo, WANG Xuan. Grid planning method of distribution network and its application[J]. Proceedings of the CSU-EPAS, 2015, 27(Supplement 1):33-37.

[3] 国家电网公司. 配电网规划设计技术导则: QGDW 10738—2020[S]. 北京:中国电力出版社,2020.

[4] 刘伟生,刘洪,刘志清,等. 配电网模块化规划体系与方法[J]. 电力系统及其自动化学报,2019,31(11):139-144.

LIU Weisheng, LIU Hong, LIU Zhiqing, et al. Framework and methods of modular planning for distribution network[J]. Proceedings of the CSU-EPAS, 2019, 31(11):139-144.

[5] 吴杰. 数据驱动的配电网供电单元划分以及规划项目评价方法研究[D]. 南京:东南大学,2019.

WU Jie. Research on the methods of dividing distribution network into units and evaluating planning projects[D]. Nanjing:Southeast University, 2019.

[6] 赵婧琦. 配电网供电分区划分方法研究[D]. 北京:华北电力大学,2017.

ZHAO Jingqi. Research on classification method of distribution network partition[D]. Beijing:North China Electric Power University, 2017.

[7] 王赛一,吴正骅,华月申,等. 基于网格化理念的配电网规划评价模型[J]. 广东电力,2016,29(7):49-52,58.

WANG Saiyi, WU Zhengye, HUA Yueshen, et al. Evaluation model for power distribution network planning based on grid concept[J]. Guangdong Electric Power, 2016, 29(7):49-52, 58.

[8] 肖白,郭蓓,姜卓,等. 基于负荷点聚类分区的配电网网架规划方法[J]. 电力建设,2018,39(11):85-95.

XIAO Bai, GUO Bei, JIANG Zhuo, et al. Distribution network planning method based on clustering blocks of load nodes[J]. Electric Power Construction, 2018, 39(11):85-95.

[9] 陈志鹏,谢宁,王承民,等. 基于图像处理的配电网差异性网格划分方法研究[J]. 智慧电力,2020,48(1):49-54,62.

CHEN Zhipeng, XIE Ning, WANG Chengmin, et al. Mesh generation method for distribution network considering differences based on image processing[J]. Smart Power, 2020, 48(1):49-54, 62.

[10] 陈超,李志铿,苏悦平. 基于空间聚类的中压配电网网格优化划分方法[J]. 四川电力技术,2017,40(4):20-23.

CHEN Chao, LI Zhikeng, SU Yueping. Optimal grid division method for medium-voltage distribution network based on spatial clustering[J]. Sichuan Electric Power Technology, 2017, 40(4):20-23.

[11] 张漫,王主丁,李强,等. 中压目标网架规划中供电分区优化模型和方法[J]. 电力系统自动化,2019,43(16):125-135.

ZHANG Man, WANG Zhuding, LI Qiang, et al. Optimization model and method of power supply area division for planning of medium-voltage target network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(16):125-135.

[12] 苏海峰,张建华,梁志瑞,等. 基于GIS空间分析与改进粒子群算法的变电站全寿命周期成本规划[J]. 中国电机工程学报,2012,32(16):92-99.

SU Haifeng, ZHANG Jianhua, LIANG Zhirui, et al. Substation life cycle cost planning based on the GIS spatial analysis and improved PSO algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(16):92-99.

[13] 姚刚,仲立军,张代红. 复杂城市配电网网格化供电组网方式

- 优化研究及实践[J]. 电网技术,2014,38(5):1297-1301.
YAO Gang, ZHONG Lijun, ZHANG Daihong. Research and practice of mesh-networking optimization for power supply by complex urban distribution network [J]. Power System Technology, 2014, 38(5): 1297-1301.
- [14] 陈哲,王主丁,黄河,等. 中压配电网规划中计及多因素影响的供电分区划分方法[J]. 电网技术,2020,44(12):4636-4643.
CHEN Zhe, WANG Zhuding, HUANG He, et al. Power supply area division method with multiple factors' influence for medium voltage distribution network planning [J]. Power System Technology, 2020, 44(12): 4636-4643.
- [15] 葛少云,蔡期塬,刘洪,等. 考虑负荷特性互补及供电单元划分的中压配电网实用化自动布线[J]. 中国电机工程学报,2020,40(3):790-803.
GE Shaoyun, CAI Qiyuan, LIU Hong, et al. Practical automatic planning for MV distribution network considering complementation of load characteristic and power supply unit partitioning [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(3): 790-803.
- [16] 徐俊俊,陈洪凯,张腾飞,等. 需求响应视角下有源配电网分层分区切负荷方法[J]. 电力自动化设备,2022,42(7):244-252.
XU Junjun, CHEN Hongkai, ZHANG Tengfei, et al. Hierarchical and partitioned load shedding method of active distribution network in demand response perspective [J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(7): 244-252.
- [17] 石方迪,刘洪,曹春,等. 配电网供电块联络模型的构建及匹配性分析[J]. 电力系统及其自动化学报,2011,23(5):119-124.
SHI Fangdi, LIU Hong, CAO Chun, et al. Construction and match analysis of the power block contact model of distribution network [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2011, 23(5): 119-124.
- [18] 傅长熠,杨镜非,顾家辉. 基于双层动态时段划分的配电网重构[J]. 电力自动化设备,2022,42(6):30-36,52.
FU Changyi, YANG Jingfei, GU Jiahui. Reconfiguration of distribution network based on bi-level dynamic time division [J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(6): 30-36, 52.
- [19] 韩俊,谈健,黄河,等. 基于改进K-means聚类算法的供电块划分方法[J]. 电力自动化设备,2015,35(6):123-129.
HAN Jun, TAN Jian, HUANG He, et al. Power-supplying block partition based on improved K-means clustering algorithm [J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(6): 123-129.
- [20] 程鹏,葛少云,刘洪. 基于三角形单联络供电模型的中压配电网智能规划[J]. 电网技术,2013,37(4):947-953.
CHENG Peng, GE Shaoyun, LIU Hong. Intelligent planning of medium voltage distribution network based on triangle-shaped power supply model with single contact [J]. Power System Technology, 2013, 37(4): 947-953.
- [21] 李争博,刘友波,任鹏哲,等. 考虑地理信息聚类分区的配电网多阶段动态规划方法[J]. 电力系统自动化,2022,46(14):38-45.
LI Zhengbo, LIU Youbo, REN Pengzhe, et al. Multi-stage dynamic planning method for distribution network considering clustering and partitioning of geographic information [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(14): 38-45.
- [22] 王笑雪,徐骏,王成山,等. 基于MAS的主动配电网分布式电压控制[J]. 中国电机工程学报,2016,36(11):2918-2926.
WANG Xiaoxue, XU Tao, WANG Chengshan, et al. Distributed voltage control in active distribution networks utilizing multiple agent system [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(11): 2918-2926.

作者简介:

刘洪(1979—),男,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为智能配用电及综合能源系统仿真分析与规划运行(E-mail: liuhong@tju.edu.cn);

王浩嘉(1997—),男,硕士研究生,主要研究方向为配电网规划。

(编辑 李玮)

Medium-voltage distribution network power supply unit division considering relaxed load rate constraint of tie line

LIU Hong¹, WANG Haojia¹, XU Zhengyang¹, WANG Bingsai¹, MA Liang², YANG Fan³

(1. Key Laboratory of Smart Grid of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. State Grid Economic and Technological Research Institute Co., Ltd., Beijing 102209, China;

3. Economic and Technological Research Institute of State Grid Tianjin Electric Power Company, Tianjin 300171, China)

Abstract: Currently, in the division of medium-voltage distribution network power supply unit, the complementary characteristics of the load connected by tie line are not fully considered, which easily leads to problems such as too many power supply units and low utilization efficiency of overall lines. Therefore, a power supply unit division method based on relaxed load rate relaxation is proposed. The mathematical model of power supply unit division in medium-voltage distribution network is established, which not only ensures the minimum number of power supply units, but also considers the load rate balance of transfer lines after $N-1$ verification in each power supply unit. The division order between the power supply units in the station is analyzed, and the division method of the power supply units between the stations is proposed based on the relaxed load rate constraint, as well as the division method of the power supply units in the station. Finally, through an example analysis, it is verified that the proposed model and method can reasonably divide the power supply units, save the number of substation outgoing lines and power supply units, and fully improve the usage efficiency of distribution lines.

Key words: medium-voltage distribution network; power supply grid; power supply unit; load characteristics; relaxed load rate

附录 A

综合站间与站内供电单元划分方法，得到整体划分流程，进而实现对供电单元划分模型的求解，划分流程具体如下。

步骤 1：确定馈线负载率松弛系数 η_0 的松弛区间 $[k_{\min}, k_{\max}]$ 、松弛步长 η_{step} 等参数，并根据参数进行站间供电单元划分，划分方法具体见 3.3.1 节，得到不同负载率松弛系数 η_0 下的全部站间供电单元划分方案。

步骤 2：以各个站间供电单元内负荷特性互补指标均值最小为原则，对站间供电单元划分方案进行优选，得到不同负载率松弛系数 η_0 下的最优站间供电单元划分方案。

步骤 3：基于站间供电单元划分方案，进行站内供电单元的一体化划分，得到不同负载率松弛系数 η_0 下的全部供电单元整体划分方案。

步骤 4：比较各划分方案的供电单元总数 Z ，得到供电单元划分总数 Z 最小的划分方案。若方案唯一，则完成供电单元划分；若方案不唯一，则进行下一步骤。

步骤 5：在供电单元总数最小的基础上，计算并比较各划分方案的转供馈线最大负载率方差 α ，选择 α 最小的方案作为最优供电单元划分方案。

附录 B

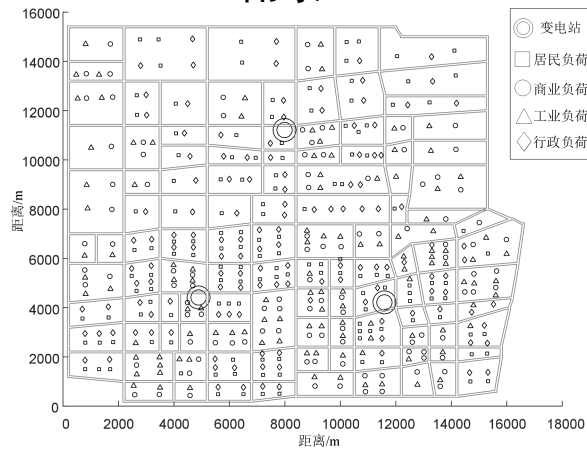


图 B1 算例地理信息图

Fig.B1 Geographical information diagram of case study

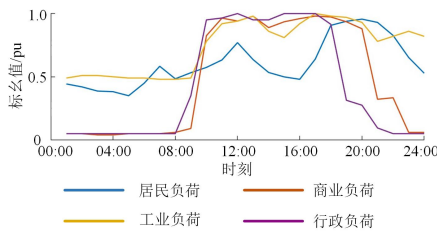


图 B2 各类负荷春季典型日负荷曲线

Fig.B2 Typical daily load curves in spring for each type of load

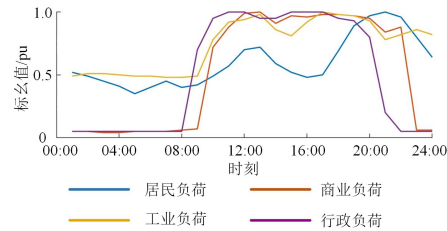


图 B3 各类负荷夏季典型日负荷曲线

Fig.B3 Typical daily load curves in summer for each type of load

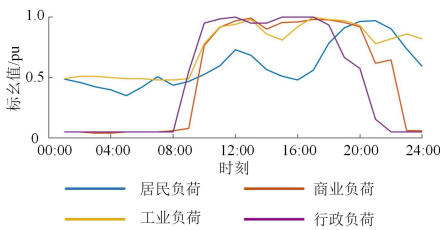


图 B4 各类负荷秋季典型日负荷曲线

Fig.B4 Typical daily load curves in autumn for each type of load

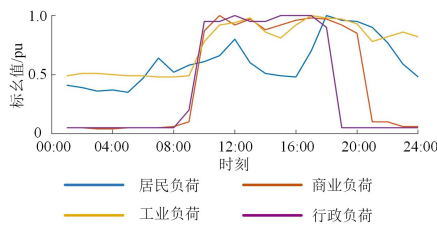


图 B5 各类负荷冬季典型日负荷曲线

Fig.B5 Typical daily load curves in winter for each type of load

附录 C

基本参数取值及说明。

1) 负载率松弛上限 k_{\max} 。

本文的负载率松弛上限 k_{\max} 取值为 58%，该取值与供电区域内负荷的互补特性有关，由于转供馈线的最大负载率约束为 100%，所以 k_{\max} 的取值应保证在供电单元划分时不能出现转供馈线过载的现象。本文设置负载率松弛上限 k_{\max} 取值分别为 58%、59%，负载率松弛步长为 1%，得到不同 k_{\max} 取值下各转供馈线的最大负载率结果如表 C1 所示。

表 C1 不同 k_{\max} 取值下转供线路最大负载率信息
Table C1 Information on maximum load rate of transferring line for different values of k_{\max}

负载率松弛上限/%	各转供馈线最大 负载率的最大值/%	出线数
58	97.2	54
59	97.2	54

根据表 C1 中结果可以看出，负载率松弛上限 k_{\max} 取值为 58% 和 59% 情况下的各转供馈线最大负载率结果均相同，这是由于在供电单元划分过程中，会尽量保证各馈线的负载率接近或到达松弛负载率上限，而联络馈线间负荷的互补程度是有限的，所以可能出现转供馈线的最大负载率大于 100% 的情况。针对本文算例而言，当负载率松弛上限 k_{\max} 取值大于 58% 时，所划分得到的方案中总会出现个别供电单元转供馈线过载的情况，无法满足转供馈线负载率约束，故当 k_{\max} 为 59% 时，划分得到的供电单元方案均会被舍弃。

综上，当负载率松弛上限 k_{\max} 大于 58% 时，无法保证供电单元方案满足转供馈线负载率约束，所以本文的负载率松弛上限 k_{\max} 取值最大为 58%。

2) 加权因子。

本文的加权因子表达式为 $\omega_1 = \left(\frac{p_{\max} - p_{\min}}{p_{\max}} \right)^q$ ，其中： q 为加权因子的放大系数； p_{\max} 为负荷点加入馈线后，该供电单元内总时序负荷的最大值， p_{\min} 为该供电单元内总时序负荷的最小值。 p_{\max} 和 p_{\min} 一定时，放大系数 q 越大，加权因子越小。针对本文算例，设置加权因子分别为 2、3、4，负载率松弛上限 k_{\max} 为 58%，负载率松弛步长为 1%，得到不同加权因子下的供电单元划分结果，具体结果和分析如下。

表 C2 不同加权因子取值下的供电单元划分结果
Table C2 Division results of power supply units with different values of weighting factors

加权因子	出线数	供电单元内转供 馈线负载率方差
2	54	22.8
3	54	20.2
4	54	20.6

由表 C2 可以看出：当加权因子取值为 3 时，馈线负载率方差为 20.2，其结果最好；当加权因子取值为 2 时，所划分方案的馈线负载率方差为 22.8，所划分得到的方差较大，这是由于加权因子为 2 时，在划分中对于馈线间负荷互补特性的考虑不够充分，供电区域内的负荷仍存在互补的空间，各供电单元

转供馈线负载率的均衡性较差；当加权因子为 4 时，馈线负载率方差为 20.6，在划分中更多地考虑了负荷对于供电单元峰谷差的影响，为了降低供电单元内的峰谷差，会出现将距离馈线较远但时序互补性较强的负荷点划分进供电单元的情况，导致供电单元划分结果较为混乱，无法将划分结果应用到实际的规划工作中，同时受到算例中实际负荷分布的影响，规划区域内负荷的互补程度是有限的，反而难以得到较低的负载率方差。

3) 旋转角度。

针对本文算例，设置馈线旋转角度分别为 1° 、 3° 、 5° ，负载率松弛上限 k_{\max} 为 58%，负载率松弛步长为 1%，得到不同旋转角度下的供电单元划分结果以及求解用时，具体结果和分析如下。

表 C3 不同旋转角度下的供电单元划分结果
Table C3 Division results of power supply units with different values of weighting factors

旋转角度/ $(^\circ)$	求解用时/s	出线数	供电单元内转供 馈线负载率方差
1	531.4	54	19.7
3	182.5	54	20.2
5	111.2	54	30.5

由表 C3 可知，当旋转角度从 5° 减小到 3° 时，转供馈线负载率方差减小了 10.3，求解用时增加了 71.3 s，但当旋转角度从 3° 减小到 1° 时，转供馈线负载率方差仅减小了 0.5，而求解用时增加了 348.9 s。因此，旋转角度越小，供电单元划分方案的转供馈线负载率方差越小，求解用时越大。针对本文算例而言，旋转角度取 3° 时便足以实现对划分模型的精细化求解，旋转角度取值更小时并不会对划分结果有明显的改善效果，为保证供电单元划分同时具有较为理想的求解用时，本文将旋转角度取值为 3° 。

附录 D

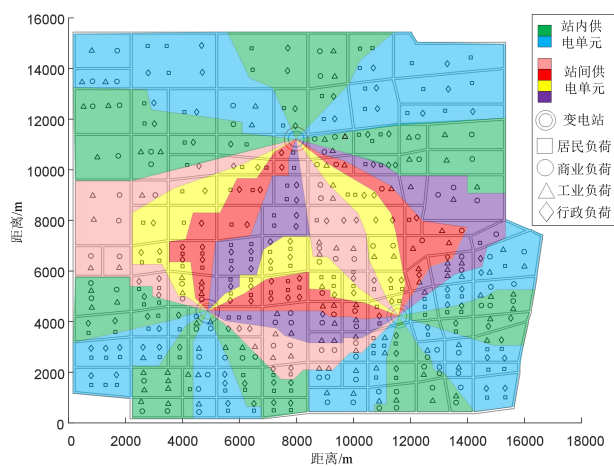


图 D1 站间为单联络接线模式下的最优供电单元划分方案

Fig.D1 Optimal power supply unit division scheme under single-tie connection mode between stations