考虑中区重新划分的中压配电网改造规划

李 滨[1],舒晴川[1,2],陶思思[1,2],梁宇帆[1,2]
(1. 广西大学 广西电力系统最优化与节能技术重点实验室,广西 南宁 530004;
2. 广东电网公司佛山供电局,广东 佛山 528000)

摘要:针对目前中压配电网环网线路自动转供率不高的问题,提出打破原有配电网中区限制,对中区进行重新划分后再行改造的规划策略,在新划分的中区范围内通过重构与分支层扩展并举的方法优化部分分支负荷的接入点,实现降低主干馈线负载率、满足转供安全校验条件的目的。基于Distflow潮流方程构建考虑中区重新划分的城市配电网扩展与重构改造模型,该模型满足中区划分约束、"*N*-1"负荷校验约束及网络拓扑约束要求。采用二阶锥松弛技术对该混合整数非凸非线性规划进行凸松弛,使原问题转化为可高效求解的混合整数二阶锥问题。采用Portugal 54节点配电网对所提模型进行仿真测试,结果表明中区的重新划分使配电网改造在有序的基础上更为灵活,改造后的馈线满足联络开关自动转供的要求,提高了网架整体的可靠性。

关键词:配电自动化;配电网改造;中区重新划分;混合整数二阶锥规划
中图分类号:TM 73 **文献标志码**:A DOI:10.16081/j.epae.201912002

0 引言

在主网建设日臻完善后,近年来业界开始关注配电网发展滞后的问题,为此国家制定了相应的提升方案[1],方案中明确指出通过实施自动化改造等手段提升配电网整体可靠性。

完善的互联网架与可靠的自动化设备的配合,理论上可极大缩短中压故障带来的用户停电时间,但在供电企业的实际应用中,配电自动化设备往往只能实现故障段隔离及上游复电,故障点后段的复电则难以实现,其主要原因是负荷快速发展导致线路普遍存在联络线瓶颈,从而影响了联络自动转供的投入。这使得线路近半用户不能第一时间复电,大幅降低了配电自动化改造的可靠性收益。如何对配电网进行改造升级,解决联络的瓶颈问题是规划人员亟需解决的难题,城市中压配电网结构复杂,线路走廊紧张,若在规划时仅以可靠性改善效果作为唯一考量可能使改造后的配电网混乱。如何在保证网架整体有序的情况下充分发挥现有配电网的潜能以满足负荷发展需求是目前迫切需要解决的问题。

目前,配电网优化改造研究以增强可靠性、节能降损、提升分布式能源消纳能力为目标,通过不同模型对改造项目进行分析与决策。从数学模型上看,部分研究采用了综合评价[2-3]的方法对改造策略进行决策,其特点是思路清晰明了、数学要求不高,但同时也存在方案形成时间长、工作量大、依赖规划人员经验等问题。因此,大部分研究将配电网优化改造问题抽象为数学规划类问题。文献[4]对联络瓶颈的识别与改造进行研究,采用配电网供电能力(TSC)理论的方法识别瓶颈线路,并通过计算灵敏度决定导线更换的先后次序;文献[5]针对可靠性提升问题,从基础设施、自动化设备、管理水平3个方面对改造措施进行优选;文献[6]对传统配电网引入分布式能源如何在费用、网损、电压3个方面取得平衡进行研究;文献[7]将分层分区规划应用于节能改造,上层规划实现改造线路的优选及投资金额的分配,下层规划制定具体方案;文献[8]提出一种考虑"*N*-1"安全和分布式电源(DG)与网架协调的配电网多目标双层优化规划模型,但改造成本偏高;文献[9]则考虑改造措施的实施时间,将模型向多阶段优化拓展。

上述针对配电网的改造问题研究均未考虑配电网规划运行中的一大特点——网格化。将规模庞大的配电网络划分为多个相互独立的网格,并采用标准接线对每一个网格独立供电称为配电网的网格规划[10]。配电网的网格通常依据道路、江河等客观条件进行划分[11],划分后各网格自成体系互不影响,正常运行时每个网格是一个独立个体,通过常开的网格间联络开关使各网格间组成弱联络。文献[5]对大规模配电网改造进行研究,其算例中考虑配电网的分区差异,不同分区内的改造目标不同,大部分改造工作在各自分区内进行,模型中通过规划分区间联络线体现各分区联系,虽然该研究的全区域求解结果比各分区单独求解结果更佳,但配电网改造仍受原分区划分的制约,未充分释放线路的改造潜能。

解决瓶颈问题的核心在于降低馈线负载率,上述研究普遍采用新增出线或增大线径的改造方法,但这仅能解决表面问题,改造不应仅关注发生问题的主干,分支层的负荷也可通过改造实现转移,充分

收稿日期:2019-03-27;**修回日期**:2019-10-09
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51767004)
Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51767004)

释放现有网架的改造潜力。本文从配电网自动化推广中遇到的联络瓶颈问题出发，结合配电网运行实际，提出考虑中区进行重新划分的配电网改造规划，通过分支层联络的扩展与重构来转移负荷并降低主干馈线负载率，从而以较低的成本解决联络的瓶颈问题，改造后既满足联络开关的转供要求，提升了供电可靠性，又保证了原有网架规划与运行的有序性。本文建立计及配电网“*N*–1”负荷校验的含 Distflow 潮流方程的配电网规划模型，采用二阶锥松弛的方法将原模型转化为可高效求解的混合整数二阶锥规划 SOCP（Second-Order Cone Programming）模型，并通过算例进行仿真分析。

1　规划模型设计思路

针对联络瓶颈带来的可靠性问题，以往的研究通常采用增大馈线容量的方法对配电网进行改造。配电网络中并非所有馈线均处在高负荷运行，如何利用低负载线路的剩余供电能力，以最低的成本充分发挥配电网络的整体供电能力是本文拟解决的问题。因与实际工程联系紧密，需要介绍 2 个重要概念——供电中区以及中压配电网分层结构。

1.1　供电中区

供电中区是以路网、河流、山脉等为边界划分的相对固定的供电区域。以“中区”为单位进行配电网网架规划的具体条件如下：

（1）各中区配电网通常以路网、河流、山脉等清晰边界划分，并应有明确供电范围，不宜交叉和重叠；

（2）10 kV 供电线路原则上不跨越中区供电；

（3）基于每个中区内的负荷总量、负荷分布以及可用线路走廊进行网架规划，每个中区配电网构建独立环网组进行供电；

（4）每个中区环网组由 4~6 回 10 kV 线路构成。

中区组成了配电网供电的独立单位，中区内线路的转供及改造均不能超过所在中区的范围。

1.2　中压配电网分层结构

中压配电网架的基本特点是结构分层，通常分为主干层和分支层。主干层由主干馈线及与其连接的开关设备组成，根据负荷需求不同采用单环网、*N* 供 1 备等接线方式。正常运行时联络开关打开，故障后联络开关根据预设逻辑与分段开关配合，隔离故障并恢复非故障段供电。分支层由主干层 T 接馈出，沿负荷走向辐射状建设，实际生产中若条件允许，对于分属不同主干的 2 条长分支通常会建设支线联络，以提高故障后或检修时的支线复电能力。分支联络开关正常运行时断开，其开闭由人工控制，不会对主干层馈线自动化开关逻辑产生影响。

1.3　模型设计

（1）中区划分。

解决联络瓶颈问题的关键在于如何使各主干层馈线所承担的负荷分布更均匀以降低部分线路的负载率，使其满足“*N*–1”校验的要求。若直接对主干馈线进行改造则涉及停电时间长、投资大等一系列问题，更经济的改造方案应着眼于分支负荷这一层面，通过分支层重构及新建分支联络的方法实现该层面负荷的再分配，但由于中区的限制只能进行中区范围内的改造，改造效果受到制约，由此本文提出考虑中区二次划分的改造规划模型。

本文模型在改造过程中对中区进行二次划分，从而打破原有中区的限制，在一定程度上扩大改造范围，提高改造的可行性。本文模型满足以下要求：

a. 中区二次划分后仍需满足原定 4~6 条主干馈线组成 1 个中区的要求；

b. 仅在新划分中区的范围内进行重构以及新建分支联络，不能跨中区改造；

c. 仅在分支层进行改造，主干层馈线联络关系不变，相关馈线自动化设备的逻辑设置不变。

（2）考虑重构的分支线路扩展规划。

现有考虑重构的扩展规划的研究通常建立双层规划模型，上层模型为扩展规划方案，下层规划在上层规划方案的基础上进行重构。采用双层规划模型的优点是，在规划配电网扩展建设时考虑网架结构动态重构影响，可以更接近配电网的实际运行状况，但却存在求解方法复杂、建模工作量及计算量庞大、较难高效得到最优解的问题。

由于扩展规划与重构的决策变量均为 0–1 变量，因此本文中将所有参与重构的开关视为新建成本为 0 的待建线路，由此将原有的双层规划模型简化为非线性单层规划模型。

2　考虑中区二次划分的改造规划模型

2.1　目标函数

本文模型以规划期内配电网改造产生的社会总成本综合费用最小为目标函数，即：

$$\min f = C^{\text{inv}} \tag{1}$$

$$C^{\text{inv}} = \sum_{l \in M_1} k_l L_l T_l \tag{2}$$

$$T_l = Z_l \frac{\delta(1+\delta)^{\eta}}{(1+\delta)^{\eta}-1} \quad \forall l \in M_1 \tag{3}$$

其中，C^{inv} 为规划方案建设投资等年值；M_1 为待建线路集合；k_l 为 0–1 变量，表示是否新建第 l 条线路，其值为 0 表示不新建，为 1 表示新建；L_l 为第 l 条线路的长度；T_l 为第 l 条线路的单位长度投资等年值；Z_l 为线路投资费用；δ 为电力工业贴现率；η 为设备经济运行年限。

2.2　约束条件

（1）中区划分约束。

各馈线所属中区采用 0–1 变量表示：

$$\delta_{ab}\in\{0,1\} \tag{4}$$

其中，a为主干支路编号，b为中区编号，$\delta_{ab}=1$表示支路a划分至中区b，$\delta_{ab}=0$表示支路a不属于中区b。

1条馈线仅属于1个中区，即：

$$\sum_{b=1}^{m}\delta_{ab}=1 \tag{5}$$

其中，m为划分的中区总数。

1个中区由4~6条馈线组成，即：

$$4\leqslant\sum_{a=1}^{n}\delta_{ab}\leqslant 6 \tag{6}$$

其中，n为变电站出口馈线总数。

(2)辐射状约束。

配电网遵循“闭环规划、开环运行”的原则，本文模型对网架进行扩展规划与重构后网架仍应开环运行。配电网辐射状运行约束解析性表达条件[12]为：

a. 网架改造规划后的闭合支路数为配电网节点数与配电网变电站数之差；

b. 负荷再分配后每个节点与电源点相连通。

为满足条件**a**，建立如下约束：

$$\sum_{l\in M_1}k_l=N-N_s \tag{7}$$

其中，N为配电网节点数；N_s为配电网变电站数。

为满足条件**b**，引入Distflow潮流方程，线路各节点满足该方程时必满足条件**b**。

(3)辐射状配电网的Distflow潮流方程。

对于配电网中的任意节点j，有：

$$\begin{cases}\sum\limits_{i\in u(j)}\left(P_{ij}-r_{ij}\dfrac{P_{ij}^2+Q_{ij}^2}{U_i^2}\right)=\sum\limits_{k\in v(j)}P_{jk}+P_{j.\mathrm{d}}\\ \sum\limits_{i\in u(j)}\left(Q_{ij}-x_{ij}\dfrac{P_{ij}^2+Q_{ij}^2}{U_i^2}\right)=\sum\limits_{k\in v(j)}Q_{jk}+Q_{j.\mathrm{d}}\end{cases} \tag{8}$$

对于任意支路ij，有：

$$U_j^2=U_i^2-2\left(r_{ij}P_{ij}+x_{ij}Q_{ij}\right)+\left(r_{ij}^2+x_{ij}^2\right)\frac{P_{ij}^2+Q_{ij}^2}{U_i^2} \tag{9}$$

其中，$u(j)$为电网中以j为末端节点的支路首端节点集合；$v(j)$为电网中以j为首端节点的支路末端节点集合；U_i为节点i电压幅值；P_{ij}和Q_{ij}分别为支路ij首端有功和无功功率；P_{jk}和Q_{jk}分别为节点j的有功和无功功率净注入值；$P_{j.\mathrm{d}}$和$Q_{j.\mathrm{d}}$分别为节点j上所连接的负荷有功、无功功率；r_{ij}、x_{ij}分别为三相支路的支路电阻和电抗。特别指出，变电站节点作为电源节点且视为平衡节点，其余节点都是负荷节点。

(4)联络转供约束。

联络转供约束即“N-1”约束，用以校验线路是否满足“N-1”情况下的转供要求，常以负载率为衡量标准。规划时每条出线应该保证除带起本身线路的负荷外，还能够带起相联络的故障出线的全部负荷。因此，每条出线应留有50%的裕度，即正常运行时的最大负荷是该线路安全载流量的50%[13]。

实际运行中难以保证各条线路的负载率均在规定负载率之下，机械的负载率校验并不能真实反映馈线在“N-1”情况下的供电能力，“N-1”校验的核心逻辑在于互为联络的馈线组在“N-1”条件下能满足“N”条件的负荷供电需求即为通过校验，因此本文提出如下联络转供约束：

$$\sum_{l}C_{lo}\leqslant\sum_{l}C_l-\max\{C_l\}\quad\forall l\in M_{\mathrm{k}} \tag{10}$$

其中，C_l为第l条线路的总容量；C_{lo}为第l条线路正常运行时占用的线路容量，通常采用馈线首段的电流或视在功率表征；M_{k}为互为联络的馈线组集合。

(5)支路传输功率约束。

系统任意支路电流应小于其安全电流上限：

$$\left|I_l\right|\leqslant I_{l.\max}k_l\quad\forall l\in M_1 \tag{11}$$

其中，I_l为第l条支路的电流；$I_{l.\max}$为第l条支路的安全电流上限。

(6)中区内改造约束。

考虑重构的分支层扩展规划应在新划分的中区内进行，不能跨中区改造：

$$\left|k_{lo}-k_l\right|\leqslant\min\{\delta_{a_1 1}-\delta_{a_2 1},\cdots,\delta_{a_1 m}-\delta_{a_2 m}\} \tag{12}$$

其中，k_{lo}为第l条支路的初始状态；a_1、a_2分别为参与规划的开关两端所连接的馈线始端编号。

本文模型的目标函数与约束条件中，除式(8)、(9)外均为线性函数，式(8)、(9)与二次型相近，可以将原问题转换为SOCP问题进行求解。

2.3 原始模型的二阶锥等价变形

SOCP是一个非线性凸规划且多项式时间可计算的问题，利用商业求解器均能方便地求解该问题。本文对模型中约束条件进行如下二阶锥等价变形。

对Distflow潮流方程约束进行SOCP松弛，定义：

$$I_{ij}^2=\left(P_{ij}^2+Q_{ij}^2\right)/U_i^2 \tag{13}$$

引入新变量对平方项进行替换，令$\tilde{U}_i=U_i^2$、$\tilde{I}_{ij}=I_{ij}^2$，式(8)、(9)、(13)可转换为：

$$\begin{cases}\sum\limits_{i\in u(j)}\left(P_{ij}-r_{ij}\tilde{I}_{ij}\right)=\sum\limits_{k\in v(j)}P_{jk}+P_{j.\mathrm{d}}\\ \sum\limits_{i\in u(j)}\left(Q_{ij}-x_{ij}\tilde{I}_{ij}\right)=\sum\limits_{k\in v(j)}Q_{jk}+Q_{j.\mathrm{d}}\end{cases} \tag{14}$$

$$\tilde{U}_j=\tilde{U}_i-2\left(r_{ij}P_{ij}+x_{ij}Q_{ij}\right)+\left(r_{ij}^2+x_{ij}^2\right)\tilde{I}_{ij} \tag{15}$$

$$\tilde{I}_{ij}=\left(P_{ij}^2+Q_{ij}^2\right)/\tilde{U}_i \tag{16}$$

经过上述变形，原始Distflow潮流方程变为1个线性方程组和1个二次等式，对式(16)松弛得到：

$$\tilde{I}_{ij}\geqslant\left(P_{ij}^2+Q_{ij}^2\right)/\tilde{U}_i \tag{17}$$

再进行进一步等价变形，将式(17)化为标准二阶锥形式：

$$\left\| \begin{matrix} 2P_{ij} \\ 2Q_{ij} \\ \tilde{I}_{ij}-\tilde{U}_i \end{matrix} \right\|_2 \leqslant \tilde{I}_{ij}+\tilde{U}_i \tag{18}$$

其中，$\|\cdot\|_2$为欧几里得范数。已有研究[14]证明式(13)的松弛不影响规划结果，最优解必落在式(13)的等式边界。

同时，由于进行了SOCP变形对变量进行代换，式(11)变形为：

$$\tilde{I}_l \leqslant I_{l.\max}^2 k_l \quad \forall l \in M_1 \tag{19}$$

本文选取变电站出口处馈线首段视在功率表征式(10)中C_{lo}：

$$\sqrt{P_l^2+Q_l^2}=C_{lo} \quad \forall l \in M_k \tag{20}$$

由此式(12)变为：

$$\sum_l \sqrt{P_l^2+Q_l^2} \leqslant \sum_l S_l - \max\{S_l\} \quad \forall l \in M_k \tag{21}$$

其中，S_l为馈线首段视在功率。

再对式(21)进行一次二阶锥变换，引入辅助变量β：

$$P_l^2+Q_l^2 \leqslant \beta_l^2 \quad \forall l \in M_k \tag{22}$$

由此式(21)可变形为：

$$\sum_l \beta_l \leqslant \sum_l S_l - \max\{S_l\} \quad \forall l \in M_k \tag{23}$$

通过第二次二阶锥变换，将原难以求解的二次根式松弛为1个标准二阶锥式和1个线性表达式。

上述2次变形将原不可解的非凸约束转换为SOCP凸约束进行求解，原始的考虑中区重新划分的配电网改造模型变为：

$$\begin{cases} \min f = C^{\text{inv}} \\ \text{s.t.} \quad \text{式}(4)—(7)、(12)、(14)、(15)、(18)、(19)、(22)、(23) \end{cases} \tag{24}$$

文献[15]对上述变形进行了严格论证，并证明对于树状拓扑结构描述的辐射状配电网，在负荷不受约束时，最优潮流问题的SOCP与原问题同解。

3　算例分析

为验证本文方法的有效性，在Spyder集成开发环境(IDE)下调用Gurobi7.5.1求解器求解模型。测试的硬件环境为Intel i7-5500U CPU 2.4 GHz，16 GB内存，操作系统为Win10 64 bit。本文选取Portugal 54节点系统为算例验证本文模型效果。

3.1　Portugal 54节点系统算例

Portugal 54节点系统共有54个节点，其中负荷节点50个，电源节点4个，可规划路径63条，本文所采用的系统原始状态见文献[16]中“Fig.5 Solution for Stage 3”。

文献[16]的规划结果没有考虑部分线路的备用问题，导致变电站S4的2回出线“S4-22”和“S4-21”并未与其他电源点形成环网，因此根据“闭环规划、开环运行”的原则对Portugal 54节点系统网架结构进行改造，改造结果见附录中图A1，即为本文中算例的初始状态。图中实线为常闭馈线，短虚线为联络开关，长虚线为待建线路，彩色为主干层，黑色为分支层，相同颜色且有联络开关的馈线互为备用。

取系统基准电压为15 kV，基准功率为10 MV·A，总负荷为65.9 MW，节点S1—S4为电源节点，共10回出线组成5对“2-1”单环网线路。

系统的相关参数如附录中表A1所示，系统初始电流及可靠性指标如表1所示(表中ENS为用户缺供电量；SAIDI为用户平均停电时间)。

表1　Portugal 54节点系统初始电流及可靠性指标

Table 1　Initial current and reliability indexes of Portugal 54-bus system

支路	电流/A	电流和/A	安全电流上限/A	ENS/(kW·h)	SAIDI/min
S1-1	271.77	503.72	600	10553.1	91.77
S4-21	231.95		600	7963.8	80.99
S1-3	239.90	372.93	600	7927.9	77.98
S3-28	133.03		600	5388.2	95.08
S4-22	212.09	420.21	600	6666.5	74.07
S3-36	208.12		600	6915.4	78.29
S2-11	363.93	800.53	600	18875.1	123.10
S4-30	436.60		600	25371.8	138.39
S3-41	331.79	500.33	600	15175.9	108.39
S2-14	168.54		600	6905.4	96.35

由表1知，算例系统在初始状态下各馈线所带负荷分布不均。支路S2-11和S4-30电流和超过安全电流上限，因此不能投入主干联络开关的自动转供功能，极大影响了该支路的供电可靠性。故采用本文模型对算例系统进行改造规划，以期均衡各馈线负荷并提高系统可靠性，规划结果见附录中图A2。

规划后配电网仍保持辐射状运行，原主干层支路开关状态不变，可保持原自动开关动作逻辑不变，新建3条分支层联络开关以转移负荷，新建支路为9-10、2-8、33-39，与之对应的原有3条分支层开关由闭合变为打开，打开的支路为10-31、1-2、38-39。

表2为Portugal 54节点系统改造规划后的支路最大电流情况及可靠性指标。规划前的重载线路支路S4-30及支路S2-11的负荷通过新建的分支层联络转移至相邻馈线，使该馈线对的电流和降为575.58 A，满足“N-1”负荷校验要求，中区内馈线均可投入主干联络开关自动转供。馈线对ENS和由规划前的44246.9 kW·h降为22877.2 kW·h。

表3为Portugal 54节点系统规划前后运行指标对比。规划新建分支层线路3条共11.2 km，一次性投资313.6万元，投资等年值34.55万元。规划后系统的负载均衡率降低表明系统的负荷分布更为均衡，线损率较规划前有所降低，系统运行经济性有所提高；可靠性指标方面，ENS及SAIDI均较规划前有

表2 Portugal 54节点系统规划后电流及可靠性指标

Table 2 Current and reliability indexes of Portugal 54-bus system after planning

支路	电流/A	电流和/A	安全电流上限/A	ENS/(kW·h)	SAIDI/min
S1-1	327.77	559.72	600	13329.1	96.36
S4-21	231.95		600	7963.8	80.99
S1-3	239.90	372.94	600	7927.9	77.98
S3-28	133.03		600	5388.2	95.08
S4-22	271.77	587.52	600	8639.3	75.12
S3-36	315.75		600	10987.8	82.40
S2-11	255.82	575.58	600	9553.1	88.18
S4-30	319.76		600	13324.1	98.69
S3-41	331.79	500.32	600	15175.9	108.39
S2-14	168.54		600	6905.4	96.35

表3 Portugal 54节点系统规划前后运行指标对比

Table 3 Comparison of operation indexes of Portugal 54-bus system before and after planning

参数	规划前	规划后
线损率/%	2.41	2.27
负载均衡率	2.121	1.989
ENS/(kW·h)	111743.1	99194.6
SAIDI/min	101.74	90.31
投资等年值/万元	34.55	
可靠性收益/万元	25.097	

所降低,表明规划后系统整体可靠性提升,其中ENS较规划前下降12 548.5 kW·h,预计可靠性收益为25.097万元,SAIDI由规划前的101.74 min降低至90.31 min,改造后停电时间减少11.43 min。

目前的研究中用来解决配电网联络开关瓶颈问题的网架升级改造方案主要有2种,分别为采用新建主干馈线(记为方案1)和更换瓶颈线路(记为方案2)的方式对配电网进行改造。将2种改造方案与本文方法(记为方案3)分别应用于Portugal 54节点系统,结果如表4所示。

表4 3种改造方案成本比较

Table 4 Cost comparison among three transformation schemes

方案	改造项目	改造量/km	一次性投资/万元
1	新建单回架空馈线	6.3	700.5
2	原有主干馈线更换为大线径馈线	14.1	564.0
3	新建3条分支联络	11.2	313.6

注:方案1同时考虑中压配电网线路建设投资及其占用的变电站间隔所应分摊的变电站建设投资费用。

由表4可知,与方案1和方案2相比,本文方案具有明显的经济性。虽然本文方案较方案1的改造量更大,但方案1需占用一个变电站的10 kV间隔,在负荷没有显著增长的情况下,该方案并不具有经济性的优势;方案2能够从根本上解决联络馈线的瓶颈问题,但该方案投资大、施工周期长、施工时的可靠性风险增加,因此供电企业对于更换导线通常采取较为慎重的态度,而本文方案的改造集中在分支层,工程量虽大,但单位成本不高,且施工对用户正常供电的影响微乎其微。因此与其余2种改造方案相比,本文方案具有显著的优势。

4 结论

在保证配电网规划运行秩序的前提下对其进行最为经济的改造是本文的立意所在。

(1)在改造过程中考虑配电网中区的重新划分问题,将重载的馈线划至负载率的中区,在新的中区内对配电网进行改造。

(2)将重构视为成本为0的扩展规划,使模型进行扩展规划的同时能考虑重构的问题。

(3)对辐射状配电网建立Distflow潮流模型,以改造成本最低为目标,以馈线组满足"*N*-1"负荷校验为主要约束。将Distflow潮流方程、"*N*-1"约束等价松弛为二阶锥形式,使原问题大为简化,降低寻优难度。

附录见本刊网络版(http://www.epae.cn)。

参考文献:

[1] 国家能源局. 配电网建设改造行动计划(2015—2020年)[Z]. 北京:国家能源局,2015.

[2] 彭显刚,林利祥,翁奕珊,等. 基于模糊综合评判和综合赋权的抗灾型配电网骨干网架规划[J]. 电力系统自动化,2015,39(12):172-178.
PENG Xiangang,LIN Lixiang,WENG Yishan,et al. Decision-making method for anti-disaster distribution network backbone upgrade based on fuzzy comprehensive evaluation and comprehensive weights[J]. Automation of Electric Power Systems,2015,39(12):172-178.

[3] 吴涵,陈彬,管霖,等. 供电可靠性提升措施优选的量化评价方法[J]. 电力自动化设备,2015,35(5):126-130.
WU Han,CHEN Bin,GUAN Lin,et al. Quantitative evaluation and optimized selection of power supply reliability enhancement measures[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(5):126-130.

[4] 肖峻,徐兵山,张跃,等. 一种新的配电网联络线瓶颈分析与改造方法[J]. 电力系统保护与控制,2012,40(10):35-41.
XIAO Jun,XU Bingshan,ZHANG Yue,et al. A new method of bottleneck tie lines analysis and reformation for distribution network[J]. Power System Protection and Control,2012,40(10):35-41.

[5] 苏韵掣,刘俊勇,刘友波,等. 大规模中压配电网可靠性建设改造措施优选模型及求解方法[J]. 电网技术,2017,41(1):201-210.
SU Yunche,LIU Junyong,LIU Youbo,et al. Optimization model of selecting power supply reliability reconstruction measures in large-scale MV distribution network and its solution method[J]. Power System Technology,2017,41(1):201-210.

[6] 栗然,马慧卓,祝晋尧,等. 分布式电源接入配电网多目标优化规划[J]. 电力自动化设备,2014,34(1):6-13.
LI Ran,MA Huizhuo,ZHU Jinyao,et al. Multi-objective optimization for DG integration into distribution system[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(1):6-13.

[7] 涂春鸣,董泰青,姜飞,等. 基于分层分区的配电网差异化节能

规划方法研究[J]. 电力系统保护与控制,2015,43(14):148-154.
TU Chunming,DONG Taiqing,JIANG Fei,et al. Research on differentiated energy saving method of partitioned distribution networks based on bi-level planning[J]. Power System Protection and Control,2015,43(14):148-154.
[8] 刘佳,程浩忠,徐谦,等. 网源协调驱动下考虑网络转供能力的配电系统多目标双层近期规划[J]. 电力自动化设备,2018,38(3):42-49.
LIU Jia,CHENG Haozhong,XU Qian,et al. Multi-objective bi-level short-term planning of distribution system considering network transfer capability under network-generation coordination drive[J]. Electric Power Automation Equipment,2018,38(3):42-49.
[9] ZIARI I,LEDWICH G,GHOSH A,et al. Integrated distribution systems planning to improve reliability under load growth[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2012,27(2):757-765.
[10] 张植华,李健,林毓,等. 网格化城市配电网目标网架动态构建方法[J]. 陕西电力,2015,43(2):23-29.
ZHANG Zhihua,LI Jian,LIN Yu,et al. Target grid dynamic construction method for gridding urban distribution network[J]. Shaanxi Electric Power,2015,43(2):23-29.
[11] 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.
[12] LAVORATO M,FRANCO J F,RIDER M J,et al. Imposing radiality constraints in distribution system optimization problems[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2012,27(1):172-180.
[13] 葛少云,巫卿,闫大威,等. 城市中压配电网联络线优化研究[J]. 电力系统及其自动化学报,2005,17(6):43-49.
GE Shaoyun,WU Qing,YAN Dawei,et al. Study on optimization of the tie lines for urban medium voltage distribution network[J]. Proceedings of the CSU-EPSA,2005,17(6):43-49.
[14] FARIVAR M,LOW S H. Branch flow model:relaxations and convexification:part I[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2013,28(3):2554-2564.
[15] LI N,CHEN L J,LOW S H. Exact convex relaxation of OPF for radial networks using branch flow model[C]//2012 IEEE Third International Conference on Smart Grid Communications(SmartGridComm). New York,USA:IEEE,2012:7-12.
[16] MIRANDA V,RANITO J V,PROENCA L M. Genetic algorithms in optimal multistage distribution network planning[J]. IEEE Transactions on Power Systems,1994,9(4):1927-1933.

作者简介:

李　滨

李　滨(1975—),女,广西南宁人,副教授,博士,主要研究方向为电力系统最优化(**E-mail**:lizhen@gxu.edu.cn);

舒晴川(1993—),男,广西桂林人,硕士,通信作者,主要研究方向为电力系统最优化(**E-mail**:shach123858@outlook.com);

陶思思(1994—),女,广西桂林人,硕士,主要研究方向为电力系统最优化(**E-mail**:ss_Tao@126.com);

梁宇帆(1993—),男,广西梧州人,硕士,主要研究方向为电力系统最优化(**E-mail**:yuf_Liang@163.com)。

(**编辑　王锦秀**)

Reconstruction planning of medium voltage distribution network considering partition re-division

LI Bin[1],SHU Qingchuan[1,2],TAO Sisi[1,2],LIANG Yufan[1,2]

(1. Key Laboratory of Guangxi Electric Power System Optimization and Energy-saving Technology,Guangxi University,Nanning 530004,China;
2. Foshan Power Supply Bureau of Guangdong Power Grid Corporation,Foshan 528000,China)

Abstract: Aiming at the problem of low automatic transfer rate of medium voltage distribution network,a planning strategy is proposed,which breaks the original partition limitation of distribution network and carries out the transformation after re-dividing the partitions. The access points of partial branch load are optimized by the method of reconstruction and branch level expansion in the newly-divided partitions,so as to realize the objects of reducing the load rate of main feeders and satisfying the transfer security verification condition. Based on Distflow power flow equation,an expansion and reconstruction model for urban distribution network is built considering partition re-division,which satisfies the partition division constraint,"N-1" load verification constraint and network topology constraint. The second-order cone relaxation technique is adopted for convex relaxation of the mixed integer non-convex nonlinear programming,so that the original problem can be transformed into a mixed integer second-order cone problem which can be solved efficiently. Portugal 54-bus distribution network is adopted for simulation and test of the proposed model,and results show that the partition re-division makes the distribution network transformation more flexible on the basis of order,and the feeders satisfy the automatic transfer requirement of tie switch after transformation,which improves the overall reliability of the grid.

Key words: distribution automation; distribution network transformation; partition re-division; mixed integer second-order cone programming

附录：

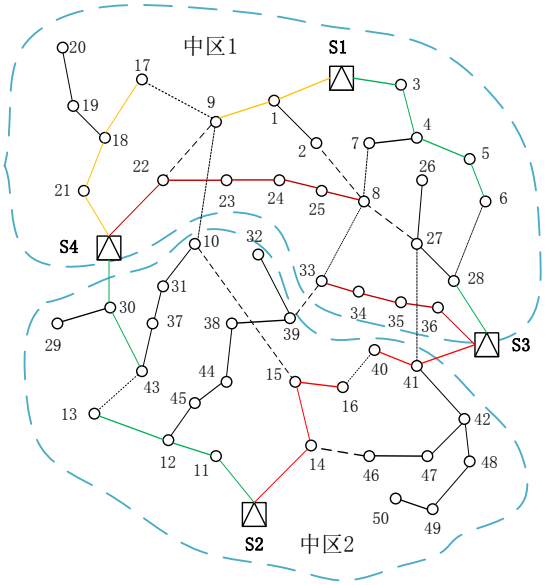

图 A1　规划前的 Portugal 54 节点系统

Fig.A1 Portugal 54-bus system before planning

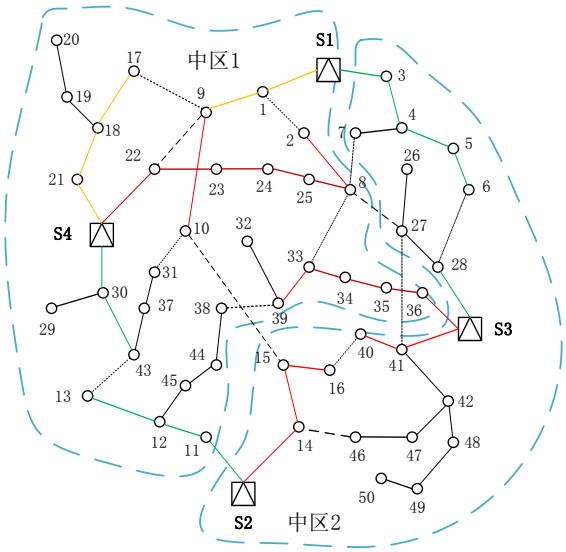

图 A2 Portugal 54 节点系统规划结果

Fig.A2 Planning result of Portugal 54-bus system

表 A1 Portugal 54 节点系统参数表

Table A1 Parameters of Portugal 54-bus system

参数	取值
支路安全电流上限	600A
线路投资费用	2.8×10^5 元/km
贴现率	10%
线路经济实用年限	25 a
支路综合故障率	0.1 次/km
故障平均修复时间	5 h
故障隔离时间	0.01 h
人工转供时间	2.5 h
自动转供时间	0.027 h
产电比	20