

DOI: 10.7667/PSPC171123

以解决现状电网问题为导向的配电网自动规划方法研究

高崇¹, 赵懿祺², 唐俊熙¹, 张俊潇¹

(1. 广东电网发展研究院有限责任公司, 广东 广州 510080; 2. 北京清软创新科技股份有限公司, 北京 100085)

摘要: 为提高配电网规划工作的科学性, 提出了一种以解决现状电网问题为导向的配电网自动规划方法。首先利用配电网接线模式识别及潮流运算的结果对待规划电网中的典型问题进行识别。其次通过对规划中如线路安全载流量、配变容量等各类电网技术约束及其他普适的边界条件, 如馈线挂接配变容量限制、负荷供电距离等进行抽象、量化形成了针对各类典型问题的方案自动生成方法。最后以中压线路重/过载问题及单辐射线路与首端环网线路改造问题为例, 对所提自动规划方法进行了详细的说明与验证。

关键词: 配电网; 自动规划方法; 辅助决策; 典型问题识别

Research on an innovative problem-oriented automatic distribution network planning method

GAO Chong¹, ZHAO Yiqi², TANG Junxi¹, ZHANG Junxiao¹

(1. Guangdong Power Grid Development Research Institute Co., Ltd., Guangzhou 510080, China;
2. Beijing Tsingsoft Innovation Technology Co., Ltd., Beijing 100085, China)

Abstract: To increase the scientificity of distribution network planning, an innovative problem-oriented automatic distribution grid planning method is proposed. Firstly, the power flow and feeder connection mode identification results are used to identify the typical network problems in the distribution grid to be planned. Then, strategies to automatically generate the solutions to the above problems are designed by quantifying both technical limitations such as line and transformer capacities limits, and practical engineering constraints such as feeder-connected transformer capacity limits, power supply path length limits, etc. Taking a mid-voltage line-overloading problem and two different types of the feeder reconstruction problems as examples, the proposed method is finally verified and explained in detail.

This work is supported by National High-tech R & D Program of China (863 Program) (No. 2014AA032705).

Key words: distribution network; automatic planning method; auxiliary decision-making; typical problems identification

0 引言

随着新型城镇化建设加快, 以及分布式电源、微电网、电动汽车的快速发展, 必然会带来配电网负荷的快速增长、网络功能和形态的新变化, 也对配电网规划提出了更高的要求。然而, 我国城市配电网规划目前仍主要依靠规划人员的经验完成, 造成规划方案主观性大, 不同方案间难以量化比较。从电网长远发展的角度, 这种规划方式也使得配电网规划无法做到系统统一、规划随意性较大, 难以保证电网投资的经济效益和社会效益。因此, 亟需对配电网的规划方法进行研究, 提高规划工作的科学性。

在现有的配电网规划领域的研究中, 一部分文献^[1-4]主要是对规划的流程及各环节的常用方法进行介绍, 并在此基础上进行某一地区的配电网规划实例分析。此类研究只能从理论层面上对规划工作进行原则性指导, 具有较大的局限性。另一类研究则着眼于配电网的优化规划^[5-11], 尤其是其中的网架优化规划或变电站选址定容问题, 通过建立配电网规划模型, 考虑网络技术及投资经济性约束, 采用各类优化算法从一系列备选规划方案中确定最终实施的方案。大部分研究的重点均放在规划模型的选取和优化算法的改进上, 而并未对备选方案的制定方法进行研究, 使得所提方法均必须建立在规划人员给出待选馈线走廊/变电站地址集合的基础上。文献[12]虽然基于就近原则提出了无需待选线路集合的配电网最优辐射网络规划方法, 并基于

此对馈线间联络位置进行了寻优, 但仅从经济性上进行了考虑, 使得所得方案的接线形式随意而非典型接线。同时, 利用优化算法对配电网进行规划时, 均难以避免“维数灾”的问题, 缺乏实际的工程价值。

基于上述研究现状, 本文提出了一种新型的以解决配电网问题为导向的配电网自动规划方法。从现状电网分析出发, 通过对实际规划中普适的边界条件进行抽象、量化, 同时借助各类电网计算结果, 设计并实现了配电网问题自动识别及各类电网问题解决方案自动生成的配电网自动规划体系。所提方法对于配电网规划辅助决策的发展具有开创性的意义。

1 配电网典型问题及一般解决思路

1.1 配电网典型问题分类及识别分析方法

目前配电网中的典型问题主要可以分为线路问题、台区问题及其他类别问题三大类。

1) 线路问题: 主要包括 10 kV 线路过载、10 kV 线路重载(包含潜在重载情况)、线路电压不合格、新增负荷供电需求待满足、线路存在安全隐患(包括对人身和设备存在重大威胁或一般性隐患)、网架待完善等。

2) 台区问题: 主要包括配电变压器过载、配电变压器重载(包含潜在重载情况)、台区电压不合格、新增负荷供电需求待满足、配电变压器存在安全隐患(包括对人身和设备存在重大威胁或一般性隐患)等。

3) 其他问题: 包括设备或线路残旧待更换, 例如电杆爆筋裂杆、线路及金具锈蚀严重, 设备已达运行年限等。

通过现状电网分析(本文主要考虑现状电网的潮流计算及接线模式识别的结果), 可根据各问题的定义对网络中上述各类问题进行识别。其中接线模式识别方法是在文献[14-15]上改进并实现的。

1.2 配电网典型问题的一般解决思路

对于以上配电网典型问题, 在实际规划工作中通常采用的解决思路如表 1 所示。在对配电网进行规划时, 需按照表中所提思路结合具体问题情况搜集有关数据, 以最终梳理并生成对应的配电网规划项目。

2 解决配电网典型问题的项目方案自动生成方法

基于上文所述配电网规划典型问题识别方法及规划时的相应总体指导解决思路, 本节将提出各类

表 1 配电网典型问题及一般解决思路
Table 1 Typical grid problems in distribution network planning and their general solutions

问题类别	问题描述	解决思路	项目类型	
线路问题	10 kV 线路过载	新建线路以转接过载线路部分负荷	新建	
		将过载线路部分负荷直接转接至已有线路	改造	
	10 kV 线路重载	新建线路以转接重载线路部分负荷	新建	
		将重载线路部分负荷直接转接至已有线路	改造	
	10 kV 线路预重载	新建线路以转接预重载线路部分负荷	新建	
		将预重载线路部分负荷直接转接至已有线路	改造	
	新增负荷供电	新建线路以满足新增负荷供电需求	新建	
		将新增负荷接至现有线路供电	改造	
	中压线路电压不合格	负荷转接	新建线路以转接电压不合格线路负荷	新建
			将电压不合格线路负荷转接至现有线路	改造
		改善网架	新建线路并与电压不合格线路间配合改善网架(运行方式)	新建
			将电压不合格线路与现有线路配合改善网架(运行方式)	改造
线路存在安全隐患		更换线路	改造	
网架待完善		新建线路以改善网架	新建	
	现有线路间调整连接方式改善网架	改造		
台区问题	配变过载	新增变压器以转接台区部分负荷	新建	
		将已有配变更换为大容量变压器	改造	
	配变重载	新增变压器以转接台区部分负荷	新建	
		将已有配变更换为大容量变压器	改造	
	配变预重载	新增变压器以转接台区部分负荷	新建	
		将已有配变更换为大容量变压器	改造	
	新增负荷供电	新增变压器及配套低压线路以转接台区部分负荷	新建	
		将已有配变更换为大容量变压器	改造	
台区改建		改造		
台区电压不合格	新增变压器以缩短线路供电半径	新建		
	台区改建	改造		
其他问题	设备或线路残旧老化	更换设备或线路	改造	

问题的具体解决项目方案自动生成方法。限于篇幅, 将仅对最复杂和具有代表性的中压线路重过载问题和网架改善问题的解决方案生成进行详细介绍。对于其他如电压不合格、新增负荷供电、配变重过载等问题, 考虑到其实质与线路重过载问题类似, 将仅对相应解决方案的生成原则在 2.3 节中进行概述。

2.1 中压线路重/过载问题的解决方案生成方法

由表 1 可见, 解决中压线路重/过载问题的两种思路实质上都是要解决如下问题: 1) 决定原重过载

线路何处的多少负荷将被转接; 2) 确定待改切的负荷的接入位置。

2.1.1 重/过载线路的负荷调整方式

根据配电网闭环设计开环运行的特点, 当交流线路 L_i 发生重过载, 可通过对 L_i 下游节点进行负荷下调解决, 从调整的总量上应满足

$$\Delta p(L_i) \geq p_{\text{lack}}(L_i) = p(L_i) - p_{\text{limit}}(L_i) \quad (1)$$

式中: $\Delta p(L_i)$ 为下游负荷调整总量; $p_{\text{lack}}(L_i)$ 为 L_i 的欠缺容量值, 等于该线路实际有功潮流 $p(L_i)$ 与允许最大有功 $p_{\text{limit}}(L_i)$ 的差值, 对于重过载线路此指标非负。考虑安全约束及负荷的未来发展 $p_{\text{limit}}(L_i)$ 在数值上可按照式(2)简化计算。

$$p_{\text{limit}}(L_i) = \alpha_L p_{\text{max}}(L_i) \quad (2)$$

式中: $p_{\text{max}}(L_i)$ 为线路的额定最大载流量; α_L 为线路裕量修正系数, 取值[0, 1]。

设参与负荷调整的备选节点集合为 Q , 对于任意节点 $N_i \in Q$, 应满足如下条件。

1) N_i 有负荷配出且自身非配变节点: 即 N_i 应为负荷配出等效节点, 从 N_i 可以配出多条线路连至配变。设 N_i 共连配变 m 个, 分别挂接负荷 P_{load_k} ($k=1, 2, \dots, m$), 则 N_i 处等效负荷为

$$P_{\text{load}}(N_i) = \sum_{k=1}^m P_{\text{load}_k} \quad (3)$$

2) N_i 处于 L_i 的下游: 基于配电网辐射状运行的特点, 同一馈线 T 上的节点间的上下游关系可以通过比较节点到电源的距离 disToS 来确定, 即

$$\forall N_i, N_j \in T, \text{若有 } \text{disToS}(N_i) > \text{disToS}(N_j),$$

则 N_i 处于 N_j 下游。

这里到达电源的距离 disToS 并非二者物理直线距离, 而等于从电源沿潮流流动方向向下搜索所经线路段数。

根据上述原则得到 $p_{\text{lack}}(L_i)$ 和 Q 的基础上, 则可将需改切的负荷总量在集合 Q 所含节点间进行分配。此时又可采用两种不同的分配思路, 如下所述。

1) 基于负荷分布均匀度的负荷调整方式

指以负荷调整后馈线各节点间的负荷分布情况尽量均匀为指导原则对负荷进行调整, 具体方式如下所述。

a) 计算下游负荷总量 P_{sum} 及切负荷后单节点负荷参考值 P_{ref} , 其中 n 为集合 Q 大小。

$$P_{\text{sum}} = \sum_{N_i \in Q} P_{\text{load}}(N_i) \quad (4)$$

$$P_{\text{ref}} = \frac{P_{\text{sum}} - p_{\text{lack}}(L_i)}{n} \quad (5)$$

b) 若 $\exists N_j \in Q, P_{\text{load}}(N_j) < P_{\text{ref}}$, 则从 Q 中剔除节点 N_j 。

c) 基于更新后的备选节点集合 Q , 再次利用式(4)、式(5)计算切负荷后的单点负荷参考值 P_{ref} 。

d) 根据 P_{ref} 调整各节点负荷, 使得各节点调整后的负荷值 $P_{\text{load}}(N_i)^{\text{new}}$ 满足: $P_{\text{ref}} - P_{\text{load}}(N_i)^{\text{new}} \geq 0$ 且尽可能小。

2) 基于负荷集中处理的负荷调整方式

指从问题线路的下游节点集合中最靠近供电电路径末端的负荷节点处开始调整, 且每次都尽可能多地减少负荷, 从而使得发生负荷调整的节点尽量集中在馈线末端。

a) 按照 disToS 值的大小对集合 Q 中的 n 个节点进行排序。

b) 从当前 disToS 值最大的节点 N_i^{farrest} 开始进行负荷调整, 直至负荷调整总量超过 $p_{\text{lack}}(L_i)$ 。

以上原则为线路重过载后负荷的调整提供了基本参考, 但在对单点负荷进行调整时(即调整方案中1的步骤d)和方案2中的步骤b), 由于负荷调整的最小单元为单一配变, 因而节点 N_i 不一定能够精准地按照计算所得的期望值 P_{ref} 进行调整, 而是受制于所接各配变的负荷值。因此应补充考虑等效负荷节点的实际负荷构成情况, 并根据节点实际调整量对下一待调整节点的参考值进行修正。

此外, 负荷调整方式的确定也需考虑问题线路段所在馈线的供电半径长短及负荷属性等因素的影响。例如, 若馈线的供电距离超过了允许最大供电半径, 则应直接对最大供电半径之外的等效负荷点的全部负荷改接; 若某等效负荷点所挂负荷中存在重要用户负荷, 则应尽量避免对该用户负荷进行变动, 而应在可能的情况下优先考虑调整其他负荷。

2.1.2 单个负荷转接位置的确定方法

在确定负荷调整方案后, 则应逐个确定相关负荷的接入位置, 即在满足一定约束条件的前提下搜索各负荷的接入节点。基于表1所示的线路重/过载问题的一般解决思路, 可将网络中的节点分为变电站节点和非变电站节点两类。当改接负荷接入节点为变电站节点则对应新出线的问题解决思路, 否则意味着采取利用现有线路对重/过载线路负荷进行转接的方法。

设配变节点 N_k 处的 P_{load_k} MW 负荷需被转接, R 为备选可接入节点集合, 则对于任意节点 $W_i \in R$, 应满足如下条件。

1) 距离约束: 考虑负荷应就近供电的原则, N_k

与 W_i 间距离应满足式(6)。

$$\beta \cdot \text{dist}(N_k, W_i) \leq D_{\max} \quad (6)$$

式中: $\text{dist}(N_k, W_i)$ 表示计算两点的欧氏距离; β 为距离修正系数, 旨在体现实际走径对直线距离的影响; D_{\max} 为负荷转接线路长度允许最大距离范围, 其值可由规划人员决定。

2) 接入馈线的负载能力约束: 接入点 W_i 的供电路径上的所有线路段均有足够裕量承担转接负荷。

$$\min \{-p_{\text{lack}}(L_i) | L_i \in U\} \geq P_{\text{load}_k} \quad (7)$$

式中: U 为 W_i 供电路径上的线路集合; $-p_{\text{lack}}(L_i)$ 亦保证了供电路径中不存在已重/过载线路。

3) 配变/变电站容量约束: 接入点 W_i 所在馈线 T_j 允许容量所带配变容量 $\text{ATC}(T_j)$ 及该线路所属变电站的容量 $\text{ASC}(T_j)$ 均充足, 即

$$C_{N_k} < \text{ATC}(T_j) = \text{ATC}(T_j)_{\max} - \sum_{N_i \in T_j} C_{N_i} \quad (8)$$

$$\frac{P_{\text{load}_k}}{pf} < \text{ASC}(T_j) = \text{ASC}(T_j)_{\text{rated}} - \sum_{i=1}^m S_{\text{load}}(T_i) \quad (9)$$

式中: C_{N_k} 为配变节点 N_k 的配变额定容量; $\text{ATC}(T_j)_{\max}$ 为 T_j 允许所带配变容量上限, 此值由规划人员决定; $\sum_{N_i \in T_j} C_{N_i}$ 为馈线 T_j 现已挂接配变的容量之和。式(9)中, $\text{ASC}(T_j)_{\text{rated}}$ 为 T_j 所出线的变电站额定容量; $\sum_{i=1}^m S_{\text{load}}(T_i)$ 为包含 T_j 在内的所有该变电站所出馈线已挂接负荷(视在功率)之和; pf 为待转接负荷的功率因数。

4) 出线间隔约束: 特别的, 当 W_i 为变电站节点时, 还应保证相应变电站尚有可用间隔数以新出线路。

2.1.3 线路重/过载解决方案总流程

基于上述分析, 本文在制定某一重/过载问题中所切负荷的再接入方案时, 也将采取两种不同的思路。

1) 对于所有负荷, 均选择指定距离范围内所有满足上节所述技术要求的接入点中提供可用线路容量裕量最大的节点进行接入。

2) 对于所有负荷, 均选择满足上节所述技术要求的接入点中距离最近的节点进行接入。

综合 2.1.1 节中的负荷调整方式, 可以得到线路重/过载问题的解决方案自动生成总流程, 如图 1。

此外, 当在确定的距离范围内未找到任何满足其他技术条件的可选接入点时, 可考虑对距离条件进行适当的放宽。

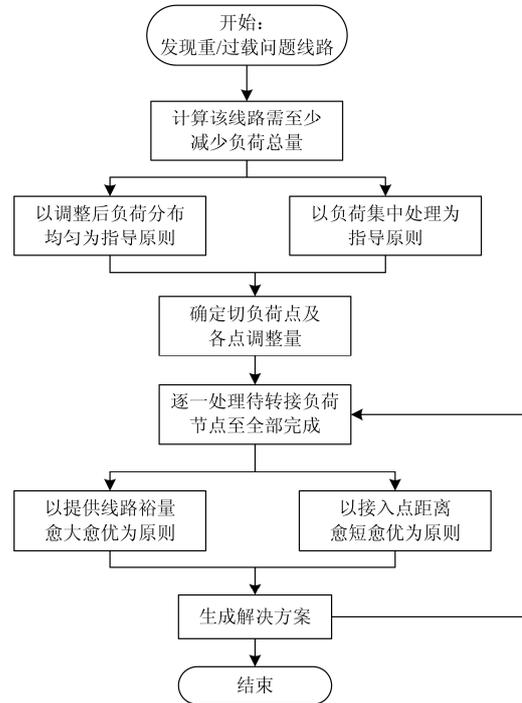


图 1 中压线路重/过载问题解决方案生成总流程
Fig. 1 Flow chart of solving line overloading problem

2.2 网架待改善问题的解决方案生成方法

在本文中主要考虑如下两种网架待改善问题的解决: 1) 单辐射线路的改造; 2) 首端环网接线改造。对于其他网架问题, 由于现实情况下的非典型结构千变万化, 难以确定应如何拆解/新建线路以将各类非典型结构转换成某种合适的典型接线, 因此暂不考虑解决方案的自动生成而交由人工处理。

2.2.1 单辐射线路改造问题的解决方案生成方法

对于网络中的单辐射线路, 一般考虑将其与其他单辐射线路建立联络形成单环网接线的改造方式。设有单辐射馈线 T_A 和 T_B , 若二者能够分别经末端环网节点 EN_A 和 EN_B 形成单环网则需满足如下约束。

1) 馈线负载能力约束: 与 2.1.2 节中负荷转接点确定时的负载能力校验方法一致, 此处即指 EN_A 和 EN_B 供电路径容量分别能承担 T_B 和 T_A 的负荷总量;

2) 变电站容量约束: 与 2.1.2 节中负荷转接点确定时对变电站容量校验的方法一致, 此处即指 T_A 和 T_B 出线的变电站可用裕量分别大于 T_B 和 T_A 的负荷总量;

3) 距离约束: 在满足上述容量检验的基础上, 期望 T_A 和 T_B 间的联络线长度尽可能短, 也即环网节点 EN_A 和 EN_B 间距离应满足规划人员允许的最大距离限制。

除形成单环网接线以外,亦可采用新增一条备用线路与两条单辐射馈线共同构成两供一备的接线模式对单辐射馈线进行改造。解决方案生成的实质即为在一定约束条件下,搜索配出备用线的变电站节点 N_S 。此时, N_S 、 T_A 和 T_B 应满足以下约束。

1) 负载匹配程度约束:由两供一备接线模式的结构特点可知,备用线的容量大小应能够满足单独转接其他两条单辐射线路中的任意一条的全部负荷的要求。因此从经济性出发,形成两供一备接线的两条单辐射馈线所带负荷量应尽可能接近,即

$$\frac{|P_{\text{load}}(T_A) - P_{\text{load}}(T_B)|}{\max\{P_{\text{load}}(T_A), P_{\text{load}}(T_B)\}} \leq \varepsilon \quad (10)$$

式中, ε 为馈线负荷量差异允许量限值,可由规划人员决定。

2) 变电站容量及间隔约束:出备用线变电站应仍有可用出线间隔,且容量裕量足以承担其他两条馈线中的最大负荷,即

$$\text{ASC}(T_S) \geq \max\{S_{\text{load}}(T_A), S_{\text{load}}(T_B)\} \quad (11)$$

3) 距离约束:即两条单辐射馈线间及新建备用线路与两条单辐射馈线间距离之和尽可能短。对于备用线与馈线距离的衡量,在本文将用变电站节点 N_S 与两单辐射馈线末端节点间的中间点的距离来简化表征。

两供一备这一接线形式一般是在单环网接线的负荷发展到一定程度而原环网馈线无法再满足转供容量需求时被建设。因此,在进行单辐射线路改造时仍采取优先考虑建设单环网,技术约束不达标时再进行两供一备方案的搜索。

2.2.2 首端环网改造问题的解决方案生成方法

首端环网接线实质是不合格的单环网接线,其联络线的位置被安置在不同变电站出线/同变电站不同母线出线后的第一个环网柜/杆塔之间,造成无法实现负荷转供的无效联络。

在本文中,对于首端环网接线的改造,将首先拆除原有无效联络。其次,优先考虑仍利用原始两馈线形成正确的单环网接线的解决方案。因此,应参照2.2.1节中的方法,对两条馈线进行容量检验。

当容量校验不通过时,则说明原有两条馈线不具备形成单环网的转供能力要求,进而考虑新建备用线路与其构成两供一备接线,并按照上文进行可行性校验。

当以上两种校验均无法满足,则将原有两条馈线按照两条独立的单辐射馈线进行处理。此时,首端环网问题被转化为2.2.1节中单辐射馈线的改造问题。

2.3 其他配电网典型问题的解决方案生成方法

2.3.1 新增负荷供电问题的解决方案生成

新增负荷供电问题本质上仍是解决确定一定量的新负荷接入当前电网的位置的问题。因此,可采用2.1.2节中所述单点负荷转接位置确定方法对此类问题进行处理。

2.3.2 电压不合格问题的方案生成方法

电压不合格问题可分为中压线路电压不合格问题和台区电压不合格问题两类。考虑到在实际电网中,台区电压评估测量点一般设于配变的10 kV侧接入点,在本文中只考虑10 kV中压线路的电压不合格问题。

由表1可见,电压不合格问题也是通过利用现有线路或新出馈线转接问题线路负荷解决的。因此,对于此类问题可以采用与2.1节中一致的解决方案生成方法,仅需将式(1)中负荷调整总量 Δp 的计算方法进行调整。设线路 L 两端节点分别为 N_i (上游侧,电压合格)和 N_j (下游侧,电压不合格),则为解决 N_j 电压不合格问题的下游负荷调整总量 Δp 计算方法为

$$\Delta p \approx (1 - (\frac{U_{N_i} - U_{N_j}^{\text{tag}}}{U_{N_i} - U_{N_j}})^2) P_{\text{load_sum}} \quad (12)$$

式中: U_{N_i} 和 U_{N_j} 分别为 N_i 和 N_j 经潮流计算所得实际电压; $U_{N_j}^{\text{tag}}$ 为 N_j 电压期望值; $P_{\text{load_sum}}$ 为 N_j 及其下游节点的负荷总量。

2.3.3 配变重过载问题的方案生成方法

如表1所示,配变重过载的问题可通过将原有配变更换为大变压器和新增配变两种方式解决。因此,解决方案生成将主要包含如下两步。

1) 新增/扩大配变容量确定

首先按计算重/过载配变所需额外容量 ΔS_T

$$\Delta S_T = \frac{P_{\text{load_T}}}{pf} - \alpha_T S_T \quad (13)$$

式中: $P_{\text{load_T}}$ 和 pf 分别为配变 T 当前有功负荷及其功率因数; S_T 为配变额定运行容量; α_T 为变压器容量修正系数,用于体现负荷发展及实际运行约束对变压器可用最大容量的修正,取值为[0,1]。

其次,根据 ΔS_T 或 $\Delta S_T + S_T$ 的大小,从相应规划技术指导原则的推荐配变型号中选择新增配变或更换大容量的配变。

2) 配变接入位置确定

在不考虑0.4 kV低压线路建模的前提下,配变的布点问题即为确定配变所属网络中哪条10 kV馈

线的问题。基于就近供电的原则，应选择将新增或更换的变压器仍接至原配变接入点附近，仍归属原配变所在馈线，此外应对新增/更换配变后的原馈线可带配变容量约束进行校核。

若校核不通过，则新增/更换的配变需接入网络其他节点，问题本质转为将问题配变的部分负荷切改至他处供电。因而此时配变重/过载的问题的解决方案可以依据 2.3.1 节中新增负荷供电问题的处理方法进行生成，等效新增负荷量即为 $\Delta p_T = \Delta S_T \cdot pf$ 。

3 算例分析

选取包含全部配电网各典型接线模式的某区域电网如图 2 所示：该电网含变电站 6 座，从各电源站出 10 kV 线路共 32 条。



图 2 测试配电网拓扑图

Fig. 2 Network topology of the test distribution grid

3.1 解决中压线路重过载问题的项目方案生成

经现状电网分析计算后，识别出该电网存在如表 2 重过载线路。

表 2 重过载线路表

Table 2 Table of overloading lines in the test network

线路名称	负载率/%	线路名称	负载率/%
1#线路段	113.470 7	521#线路段	90.998 4
457#线路段	103.409 4	522#线路段	89.378 3
458#线路段	103.225 1	27#线路段	80.574 6
26#线路段	96.873 0	—	—

现以其中问题最严重 1#线路段为例，对解决线路重过载问题的方案生成自动方法进行验证。

1#线路段(图 3 中 1#变电站至 1#环网柜)下游依次接有环网柜 1#环网柜、5#环网柜、2#环网柜、3#环网柜、6#环网柜、4#环网柜和 80#环网柜，各环网柜均挂接额定容量为 800 kVA 的配变四台，每台

配变配出负荷 0.4 MW，功率因数 0.95。

图 3 中圆圈及标记数字为各解决方案涉及的杆塔及其编号。



图 3 1#线路段及其附近局部电网图

Fig. 3 Topology of 1# line and its adjacent network

经计算，为解决 1#线路段问题，应至少削减线路下游负荷共 3.360 0 MW。设置单条馈线允许所带最大配变容量为 12 MVA，方案生成时允许搜索距离范围为 1 km。

采用 2.1 节中所提算法，可得在两种不同负荷改切策略下，分别以距离最近最优和裕量最大最优为原则得到的共四种解决方法，如表 3 所示。

对比表中不同原则下生成的方案可见在基于负荷分布均匀度的原则下 1#线路段下游的所有环网柜处均参与了负荷的改切，而在基于负荷集中处理的原则下则仅有馈线末端的三个环网柜进行了负荷调整。而无论在哪种切负荷原则下，基于距离最近最优生成的负荷转接方案所需总转接线路长度都远小于在容量裕量最优原则下生成方案所需线路总长度。

3.2 解决网架待改善问题的项目方案生成

3.2.1 单电源辐射线路改造

算例电网所含单电源辐射线路共四条，如图 4 中所示。其中馈线 1 为电缆单辐射，其余均为架空单辐射线路。

设最大允许联络线长度为 1.7 km，允许负载匹配度限制为 20%，根据 2.2.1 节中所提算法，得到网络中各单电源辐射线路处理方式如下所述。

a) 馈线 1: 由于网络中无其他电缆单辐射馈线，

因此类型不匹配的问题使得无法通过形成单环网/两供一备的方式解决此问题;

b) 馈线 2: 距离该馈线末端环网点 8#杆塔最近的同类型环网点为馈线 5 上的 51#杆塔, 二者距离约 4.086 7 km, 已超过了最大允许联络线长度, 因

此距离不匹配的问题使得无法通过形成单环网/两供一备的方式解决此问题;

c) 馈线 5: 将与馈线 12 构成不同电源站架空单环网接线, 环网点分别为馈线 5 上的 51#杆塔和馈线 12 上的 56#杆塔, 形成联络线距离 1.609 9 km。

表 3 不同原则下 1#线路段过载问题的解决方案

Table 3 Solutions to 1#line overloading problem obtained using different load shedding and reconnecting strategies

切负荷原则			负荷转接原则		切负荷原则			负荷转接原则	
基于负荷分布均匀度			距离最优	裕量最优	基于负荷集中处理			距离最优	裕量最优
环网柜名称	转接配变名称	应切负荷量	接入节点	接入节点	环网柜名称	转接配变名称	应切负荷量	接入节点	接入节点
2#环网柜	8#配变	0.4	18#杆塔	21#杆塔	80#环网柜	360#配变	0.4	27#杆塔	6#变电站
	5#配变	0.4	18#杆塔	13#杆塔		361#配变	0.4	27#杆塔	6#变电站
80#环网柜	360#配变	0.4	27#杆塔	6#变电站 新出线		362#配变	0.4	27#杆塔	6#变电站
	363#配变	0.4	27#杆塔	6#变电站 新出线		363#配变	0.4	27#杆塔	6#变电站
1#环网柜	1#配变	0.4	13#杆塔	1#变电站	4#环网柜	13#配变	0.4	28#杆塔	12#杆塔
3#环网柜	9#配变	0.4	22#杆塔	17#杆塔 新出线		14#配变	0.4	28#杆塔	12#杆塔
5#环网柜	17#配变	0.4	3#杆塔	1#变电站		15#配变	0.4	28#杆塔	12#杆塔
4#环网柜	13#配变	0.4	28#杆塔	12#杆塔		16#配变	0.4	28#杆塔	12#杆塔
6#环网柜	21#配变	0.4	8#杆塔	23#杆塔	6#环网柜	21#配变	0.4	8#杆塔	23#杆塔
切负荷后各点负荷量方差			总转接线路长度(km)		切负荷后各点负荷量方差			总转接线路长度/km	
0.180 7			4.608 60 7.055 93		0.699 85			4.442 89 6.982 69	



图 4 单电源辐射馈线及其附近局部电网图

Fig. 4 Topology of radial feeders and the adjacent network

3.2.2 首端环网线路改造

如图 5 所示, 馈线 34 和馈线 35 在接线模式识别中被识别为同站不同母线电缆单环网接线, 然而两环网点 81#环网柜、85#环网柜均为馈线出线的首个环网柜, 因此造成无效联络。



图 5 首端环网问题馈线及其附近局部电网图

Fig. 5 Topology of the incorrect ring connection and its adjacent network

根据 2.2.2 节中算法, 应首先考虑仅修正联络线位置, 而计算结果显示馈线 34 的上游线路可用容量仅为 3.216 2 MW, 不足以转接馈线 35 上的全部 4.8 MW 负荷, 同样馈线 35 的上游线路仅能提供 3.219 5 MW 的容量裕量, 小于馈线 34 的总负荷 4.8 MW, 因此无法通过形成正确电缆单环网的问题解决方案。

进而对两馈线的负荷匹配度进行校验, 负载偏差 0%满足匹配度 20%的约束, 因此最终生成首端环网的解决方案: 拆除原无效联络线 590#线路段, 从馈线 34 上的 83#环网柜及馈线 35 上的 86#环网柜

出线至二者中位坐标(80 149.472 5, -3 360.179 5), 备用线出自 5#变电站, 形成该两供一备接线形式共需电缆长度约 2.837 6 km。

4 结论与展望

本文提出了一种新型的以解决配电网问题为导向的配电网自动规划方法。首先对电网中存在的问题进行了分析和梳理, 其次在考虑实际规划边界条件的前提下针对各类问题提出了相应的解决方案自动生成原则, 并用 JAVA 语言进行了实现。与单纯利用数学优化算法进行配电网规划的方式相比, 本文所提方法具有计算效率高、无需预知备选方案、工程实用性强等优点。同时, 此方法也消除了单纯依靠规划者经验进行规划时主观性强、方案间可比性差、计算困难的问题。本文所提思路是在人机结合进行配电网辅助规划决策领域的一种全新的尝试, 在后续的工作中可以从以下角度对所提自动规划方法进一步完善:

1) 丰富规划方案生成的约束条件, 如增加线路路径走向、地形、管沟情况信息等, 使生成规划方案更贴近工程实际, 但此点亦要建立在相关信息完整且能够与所建电力模型结合的基础上;

2) 在处理网架待改善问题时, 增加新出线形成单环网的方案生成思路, 同时在形成单环网的基础上针对电缆线路可进一步增加在既定单环网结构上环网点优化的算法;

3) 对于同一问题生成的解决方案可能有多种, 因此可利用综合评价的系统学方法建立方案的综合评价指标体系, 实现方案间的量化评价与优选。

参考文献

[1] 么军. 城市配电网规划理论研究与应用[D]. 天津: 天津大学, 2012.

[2] 肖琼. 电网规划的方法和关键技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2013.

[3] 张丽君. 城市配电网规划及其技术评估方法研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2010.

[4] 何智祥. 配电网目标网架实施策略研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2010.

[5] 张彼德, 何嶝, 张强, 等. 含分布式电源的配电网双层扩展规划[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(2): 80-85. ZHANG Bide, HE Di, ZHANG Qiang, et al. Double distribution network expansion planning including distributed power[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(2): 80-85.

[6] 聂明林, 汪泓, 陈春, 等. 考虑可靠性的配电网网架多目标规划[J]. 电力系统及其自动化学报, 2016, 28(1): 10-16. NIE Minglin, WANG Feng, CHEN Chun, et al. Multi-objective distribution network planning considering reliability[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2016, 28(1): 10-16.

[7] 初壮, 李钊, 白望望. 计及不确定性和环境因素的多类型分布式电源选址定容[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(13): 34-41. CHU Zhuang, LI Zhao, BAI Wangwang. Optimal siting and sizing of distributed generations considering uncertainties and environmental factors[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(13): 34-41.

[8] 王方方. 基于改进遗传算法的配电网规划[D]. 上海: 上海交通大学, 2009.

[9] 苏海锋, 张建华, 梁志瑞, 等. 基于 LCC 和改进粒子群算法的配电网多阶段网架规划优化[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(4): 118-125. SU Haifeng, ZHANG Jianhua, LIANG Zhirui, et al. Multi-stage planning optimization for power distribution network based on LCC and improved[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(4): 118-125.

[10] 刘健, 杨文宇, 余建明, 等. 一种基于改进最小生成树算法的配电网架优化规划[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(10): 103-108. LIU Jian, YANG Wenyu, YU Jianming, et al. An improved minimum-cost spanning tree based optimal planning of distribution networks[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(10): 103-108.

[11] 王艳松, 孙桂龙, 曹明志. 基于动态规划法的配电网联络线优化规划研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(10): 30-36. WANG Yansong, SUN Guilong, CAO Mingzhi. Research on the optimization of the tie lines based on dynamic programming for distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(10): 30-36.

[12] 李游. 基于改进遗传算法的配电网网架规划及软件开发[D]. 北京: 华北电力大学, 2012.

[13] 章文俊, 程浩忠, 程正敏, 等. 配电网优化规划研究综述[J]. 电力系统及其自动化学报, 2008, 20(5): 16-23, 55. ZHANG Wenjun, CHENG Haozhong, CHENG Zhengmin, et al. Review of distribution network optimal planning[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2008, 20(5): 16-23, 55.

[14] 肖俊, 王跃强, 王成山. 城市中压配电网接线模式识别[J]. 电网技术, 2003, 27(10): 92-95. XIAO Jun, WANG Yueqiang, WANG Chengshan, et al. Automatic identification on connection modes of urban middle voltage distribution system[J]. Power System Technology, 2003, 27(10): 92-95.

[15] 王哲. 配电系统接线模式模型和模式识别的研究与实现[D]. 天津: 天津大学, 2009.

收稿日期: 2017-07-26; 修回日期: 2017-10-11

作者简介:

高 崇(1983—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统规划设计; E-mail: 25903257@qq.com

赵懿祺(1995—), 女, 通信作者, 硕士, 研究方向为智能电网与可再生能源; E-mail: ddzhaoyiqi@163.com

唐俊熙(1989—), 男, 硕士, 研究方向为电力系统规划设计、可靠性. E-mail: tangjunxi89@163.com

(编辑 姜新丽)