

• 电气工程 •

DOI:10.15961/j.jsuese.201600269

基于功能单元的高压配电网负荷转供分层优化模型

金 勇^{1,2}, 刘俊勇¹, 张 曦¹, 李 阳¹, 刘友波¹, 左坤雨¹

(1. 四川大学 电气信息学院, 四川 成都 610065; 2. 国网成都供电公司, 四川 成都 610041)

摘 要:本文提出一种基于功能单元的高压配电网负荷转供分层优化模型以疏缓愈来愈复杂的城市电网阻塞, 即将城市电网抽象为上层 220 kV 供电通道和下层 110 kV 功能单元组的简化模型。上层模型中, 通过功能单元可达性矩阵定义“通道分配因子”引导单元组内负载在各供电通道的分配, 定义“容载协调比例”协调“容”“载”间的不平衡关系, 并将二者作为粒子编码, 利用算法初始化通道分配因子及容载协调比例, 生成网络负载预分布; 下层模型中, 事先枚举“有效供电路径矩阵”反映单元组内负载的实际分布, 定义贴近度反映单元组内负载的实际分配与通道分配因子的贴近程度, 根据上层模型生成的通道分配因子及容载协调比例, 引导下层各变电单元组的实际负载及协调量向上层贴近。将上下层目标函数之和作为粒子群算法的适应度函数, 即可形成上层全网有功负载预分布引导, 下层功能单元组交互执行的求解策略, 使负载分布逐渐趋于合理的均衡状态, 并在潮流校验的前提下利用算法的迭代更新使系统负载分布逐渐趋于均衡。以离散二进制编码代表每一种操作序列, 采用模糊综合评价方法评估网络从初态到终态不同过渡方案下系统的安全水平, 在优化方案确定后, 制定一个在连续操作下安全水平较优的操作序列, 以保证每一步操作都能使电网运行在控制阈值范围内。利用某城市电网局部系统验证了方法的有效性与在线分析的适用性。

关键词:高压配电网; 负荷转供; 功能单元; 粒子群算法; 模糊评价; 动作序列操作序列

中图分类号: TM732

文献标志码: A

文章编号: 2096-3246(2017)03-0179-12

Bi-level Model Based on Functional Units for Optimizing High-level Voltage Distribution Network

JIN Yong^{1,2}, LIU Junyong¹, ZHANG Xi¹, LI Yang¹, LIU Youbo¹, ZUO Kunyu¹

(1. School of Electrical Eng. and Info., Sichuan Univ., Chengdu 610065, China; 2. State Grid Chengdu Electrical Power Bureau, Chengdu 610016, China)

Abstract: In order to mitigate the complex congestion problem of urban power transmission network, a load transferring strategy for high-level voltage distribution network (HVDN) with a novel bi-level programming model based on functional units (group) was presented. In the bi-level model, the upper model was designed to guide the reasonable load allocation of the system and balance the transformer capacity and load, so the channel allocation factor and load-capacity coordination were both taken as the particle coding of PSO, and then the load pre-allocation of the system was determined by the channel allocation factor and load-capacity coordination; The lower model was established to reflect the closing degree of the channel allocation factor and the actual load distribution identified by available power supply matrix. Therefore, the actual load allocation and load-capacity coordination of the lower model should be close to those of the upper. The objective function for the whole model was the sum of the upper and lower, where the load pre-allocation and feedback were interactively executed and the optimal balance of the system load should be got under the power flow checking. At last, the transferring sequence was determined by fuzzy evaluation with discrete binary code to assess the operational security which is the best scheme of continuous operation. The proposed model can be efficiently solved for online analysis and was verified by using the practical HVDN of an urban power system.

Key words: high-voltage distribution network (HVDN); load transfer; functional units (group); PSO; fuzzy evaluation; transfer sequence

高压配电网是输电网(220 kV及以上)与中压配电网(10 kV及以下)之间的过渡电网和联系纽带配电网作为联系电力系统与终端电能用户的重要环节,

是保证城市电网供电质量、提高电网安全经济运行的关键环节之一。近年来,随着国民经济的发展,城市化进程的加快,城镇电力负荷发展迅猛,然而城市

收稿日期: 2016-03-22

基金项目: 国家高技术研究发展计划资助项目(2014AA051901)

作者简介: 金 勇(1978—),男,博士生。研究方向: 电力系统、智能配电网与电力市场。E-mail: junkcity78@163.com

<http://jsuese.ijournals.cn> <http://jsuese.scu.edu.cn>

110 kV高压配电网的建设却与实际发展产生了脱节。由于通道制约、落点不足等诸多内外部问题,220 kV变电站容量不足或负载分配不均的问题日益凸显,为缓解近年来城市电网高峰时段输电断面阻塞与变压器短期过载风险频繁发生的现象,调度员不得不面临进行大面积较大时空范围下的负荷转供操作的难题。由于缺乏有效的高压配电网在线分析工具,基于经验或人工试凑的转供策略已难以满足配网经济实时运行的要求,针对目前的现实情况,有必要就高压配电网转供特征提出一种快速解算模型。

负荷转供的本质是一种网络重构,而高压配电网的负荷转供更是一种有约束的多目标大规模非线性组合非凸组合优化问题,通常是以达到某项性能或指标最优的0-1混合整数规划模型,继而采用智能算法求解。但现有研究大多针对10~35 kV的中低压配电网重构求解问题,多是以降低网络损耗^[1]、保证供电可靠性^[2]、优化电压^[3]等作为求解目标,很少以网络负载均衡等城市电网安全评估作为优化方向。目前重构算法采用的方法一般有基于启发式规则的支路交换法,传统数学优化法及随机搜索算法等。以文献[4-7]为代表的支路交换法通过改变网络中环路断开开关的位置,计算各节点注入电流的差异,寻找最优重构状态,该方法计算快速,但只针对局部区域考量,缺乏整体的把握。以文献[8-9]的分支界定法为代表的数学优化方法将配网重构问题放在线性层面解答,但其计算方式为直流潮流,负荷等效为恒定有功负荷,虽然计算简单,但涉及到大规模潮流转移问题时会产生较大误差。目前研究较多的随机搜索算法^[10-14]借助现代计算机强大的计算能力在庞大的解空间中搜索令某一指标最优的重构方案,该方法能够有效处理带有复杂网络约束及强非线性的重构问题,但存在计算时间长,求解效率低,容易陷入局部最优等问题。

对于既存在220 kV环网结构,又存在110 kV辐射状结构的高压配电网,上述方法并不适用,且目前针对高压配电网特点的重构策略研究较少,为此本文通过分析高压配电网220 kV及110 kV网络的差异及联系,抽象出功能单元组的概念,并在此基础上提出一种基于功能单元的高压配电网负荷转供分层优化模型,通过上层模型形成网络负载预分布,引导下层功能单元组执行预分布方案,将下层执行结果反馈给上层,评估负载预分布方案的优劣,形成上层引导,下层执行的交互式求解策略,使负载分布逐渐趋于合理的均衡状态,同时采用模糊综合评价方法评估网络从初态到终态不同过渡方案下系统的安全水平。某城市110 kV系统算例仿真表明该方法能够有

效削减决策空间,适用于城市高压配电网负荷转供的在线分析。

1 高压配电网拓扑分析

在中国,根据电压等级将电网主要分为特高压电网(500 kV及以上)、输电网(220~500 kV)和配电网。其中,配电网又分为高压配电网(110、35 kV)、中压配电网(20、10 kV)和低压配电网(0.4 kV、380/220 V)。作者从最基本的110 kV高压配电网站内结构、站间联络关系出发,抽象出功能单元(组)的概念,并在此基础上设计策略解决输电网(220 kV)的阻塞控制难题。

1.1 基本功能单元

功能单元的作用是将电能从高压侧传送到低压侧。对于110 kV系统而言,传送电能的关键设备为110 kV变电站主变压器。根据站内设备功能,定义功能单元。

功能单元:110 kV系统中,将电能从高压侧传递至低压侧的设备组,包括110 kV主变、高压侧变压器刀闸及低压侧变压器刀闸,该设备组以字母U表示,见图1。

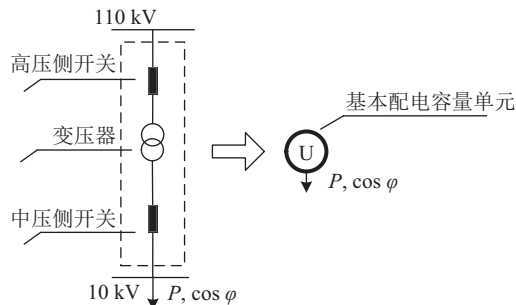


图1 基本功能单元

Fig.1 Functional units

图1中, P 表示该功能单元传递的有功功率。当变压器处于在线状态时, P 为有效功能单元。由于城市高压配电网无功补偿情况良好,为简化问题,只考虑有功负载的均衡问题。

1.1.1 基于功能单元的站内结构表达

城市高压配电网中,110 kV变电站主要由2~3卷容量为30~60 MVA的变压器组成,站内接线方式主要有单母分段、内桥及其与线变组的T接组合两种,分别如图2(a)、(b)所示。

以图2(a)所示接线方式为例,在实际运行中共有4种典型运行方式。由于功能单元更关注传输的有功功率及其联接的供电通道,因此功能单元的4种典型站内连接方式可表达为如图3所示结构。图3中, $U_1 \sim U_2$ 为110 kV变电站功能单元。

1.1.2 基于功能单元的站间联络表达

110 kV变电站通常至少配置一条备供线路,网

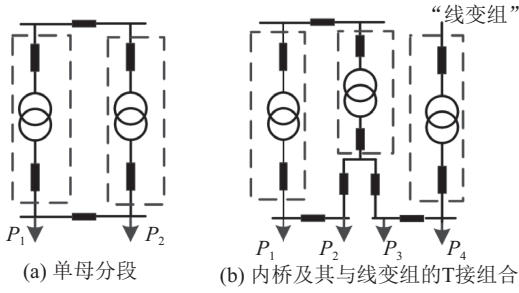


图2 110 kV变电站主要站内接线方式

Fig.2 Primary inner diagram of 110 kV substation

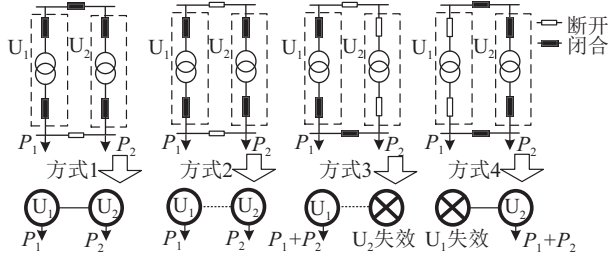


图3 功能单元站内结构表达方式

Fig.3 Illustration of inner connection based on functional units

络中存在大量的以站间联络形式为主的备供路径,运行方式极其多样。图4为某城市高压配电网局部拓扑结构。以功能单元为顶点,以站内母联开关及备供路径为边,则某城市局部高压配电网站间联络关系可表达为如图5所示。

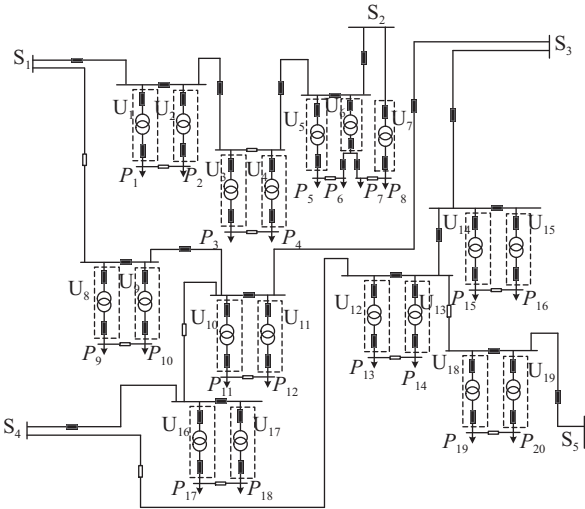


图4 城市高压配电网局部拓扑结构示意图

Fig.4 Functional diagram of urban network

图5中: U_i 表示功能单元, $U_1 \sim U_{19}$ 为110 kV变电站功能单元; S_i 表示电网中各个电源点, $S_1 \sim S_6$ 为220 kV变电站; 虚线表示该供电路径处于非连通状态。由于 U_7 为“线变组”, 在实际运行中与其他设备联络脆弱, 灵活性不高, 因此本文不予考虑。

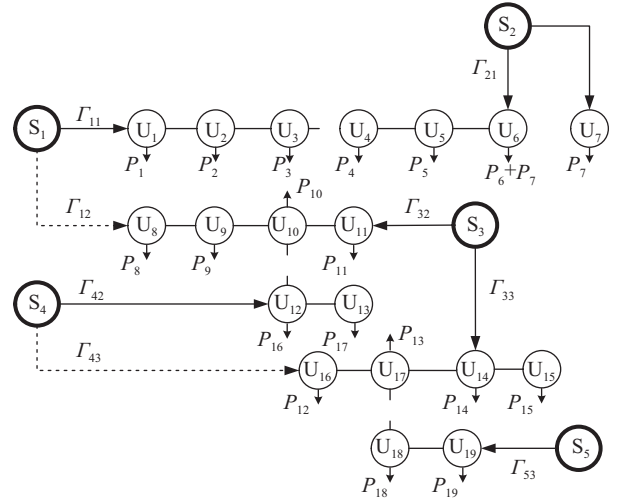


图5 基于功能单元的站间结构表达

Fig.5 Illustration of outside connection based on functional units

1.1.3 功能单元组

从图5可看出, 在110 kV系统中存在着一些相互之间有直接或潜在连接关系的功能单元, 它们由一个或多个220 kV站的110 kV出线供电, 将这些220 kV站的110 kV出线称为供电通道, 并据此推演出功能单元组的概念。

功能单元组: 假设网络中共有 n 个功能单元, 定义其可达性矩阵 A , 其中, A 为 $n \times n$ 阶方阵, A 中各元素定义为:

$$A_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{若 } U_i \text{ 到 } U_j \text{ 至少存在一条通路;} \\ 0, & \text{否则} \end{cases} \quad (1)$$

式中: A_{ij} 表示矩阵 A 第 i 行第 j 列元素; U_i 和 U_j 的连通可达性分析可采取文献[6]所提的基于邻接矩阵的可达性矩阵求法, 此处不再赘述。

将可达性矩阵 A 进行初等行列变换, 得到形如式(2)的方阵:

$$A' = \begin{bmatrix} A_\alpha & \cdots & O \\ \vdots & & \vdots \\ O & \cdots & A_\gamma \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中, O 表示全“0”矩阵, A_α 、 A_γ 分别表示 $\alpha \times \alpha$ 及 $\gamma \times \gamma$ 维全“1”方阵。该方阵表示与之关联的 α 或 γ 个功能单元是全连通的。取出 A_α 各列向量在 A 中对应的列序号, 记作 r_α 。其中, r_α 为包含 α 个元素的序列, r_α 中每一个元素分别对应了某个功能单元的序号。因此, 定义功能单元组 G_α 为:

$$G_\alpha = \{U_i | i \in r_\alpha\} \quad (3)$$

以图6所示的简单结构为例进行具体说明。图6中, $S_1 \sim S_3$ 为220 kV变电站, $U_1 \sim U_6$ 为110 kV变电站功能单元。

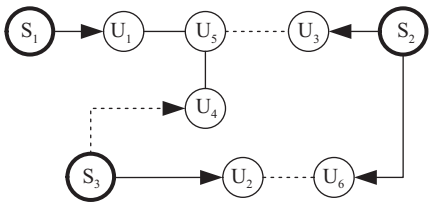


图 6 简单结构示意图

Fig.6 Schematic diagram of functional units

为体现一般性，特意将编号打乱。由图6易知关于 U_i 和 U_j 的可达性矩阵为：

$$A = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (4)$$

式中，矩阵最上面的数字1~6代表列编号，即是图6中功能单元编号。

将矩阵A进行行列变换，得到A'为：

$$A' = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 5 & 3 & 4 & 2 & 6 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (5)$$

式中， A_α 、 A_γ 分别为：

$$A_\alpha = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}, A_\gamma = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}.$$

由式(5)可知，该结构共有2个功能单元组，分别为 G_α 、 G_γ 。对比 A_α 、 A_γ 各列在A中对应的列序数，可得到 r_α 、 r_γ 为：

$$\begin{cases} r_\alpha = \{1, 3, 4, 5\}; \\ r_\gamma = \{2, 6\} \end{cases} \quad (6)$$

因此功能单元组 G_α 、 G_γ 所包含的设备表达为：

$$\begin{cases} G_\alpha = \{U_1, U_3, U_4, U_5\}; \\ G_\gamma = \{U_2, U_6\} \end{cases} \quad (7)$$

功能单元组是实现负荷转供的最小可操作单位，通过调整组内不同的拓扑结构，能够改变负荷在各供电通道的分配比例，从而实现负荷在各220 kV变电站间的转供，达到负载率均衡的目的。

1.1.4 单元组有效供电电路路径矩阵

在功能单元组内（以下简称单元组），各功能单元不能失电，且单元组内不能出现220 kV/110 kV电磁环网，因此采用有效供电电路路径模型描述单元组内

拓扑结构。

假设某一单元组内有功能单元的个数为 n ，供电通道数为 N 。定义第 i 个功能单元到第 j 个供电通道 的有效供电电路路径为 $n \times N$ 维矩阵 R_{us} ，有：

$$R_{us}(\xi_{ij}) = \begin{bmatrix} \xi_{11} & \cdots & \xi_{1N} \\ \vdots & & \vdots \\ \xi_{n1} & \cdots & \xi_{nN} \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中， ξ_{ij} 表示该功能单元可达的供电通道。若可达 到第 j 个供电通道，则 $\xi_{ij}=1$ ；否则， $\xi_{ij}=0$ 。由于不能出 现电磁环网，一个功能单元一次只能选择一条供电 电路路径，故第 i 行元素 $\xi_{i1}, \xi_{i2}, \dots, \xi_{iN}$ 中只有一个为“1”。对于某运行初始方式，通过采用基于堆栈操作的深度 搜索算法，可得到满足拓扑约束条件的初态供电 电路路径矩阵 $R_{us,initial}$ ，因为若为实际运行状态，该矩阵不 存在失电功能单元，不会形成电磁环网，且为常数矩 阵。

定义单元组负载向量 L_p 如下：

$$L_p = (P(U_1), P(U_2), \dots, P(U_n)) \quad (9)$$

式中， $P(U_i)$ 表示功能单元 U_i 所带负载的大小。由于 R_{us} 反映了 U_i 和 S_j 间的可达性关系，据此可定义负载 分配矩阵 D 如下：

$$D = L_p R_{us} \quad (10)$$

式中， D 为一个 $1 \times N$ 维行向量， D 中元素表示各供电 通道所带负载大小。由 D 即可算出某一供电通道在单 元组总负载中的分配比例为：

$$\rho_j = \frac{D_j}{\sum_j D_j} \times 100\% \quad (11)$$

式中， ρ_j 表示第 j 个供电通道中所带负载比例， D_j 表示 D 中第 j 个元素， $\sum_j D_j$ 表示对 D 中所有元素求和。

2 基于功能单元的分层优化模型

由于110 kV功能单元组不同的拓扑结构决定了 各220 kV变电站负载率及线路传输功率，为避免输 电阻塞、变电站负载分布不均，采用2层结构的优化 模型，并用粒子群算法求解：上层优化模型中，利用 算法生成通道分配因子及容载协调比例，根据这两 种参数生成网络负载预分布；下层优化模型中，根据 上层生成的通道分配因子及容载协调比例，引导下 层各110 kV功能单元组负载分布状态及协调比例不 断向上层确定的负载预分布贴近，最后进行潮流校 验。利用算法的迭代更新机制使负载分布逐渐趋于 均衡。其示意图如图7所示，其中， $S_1 \sim S_5$ 为220 kV 变电站。

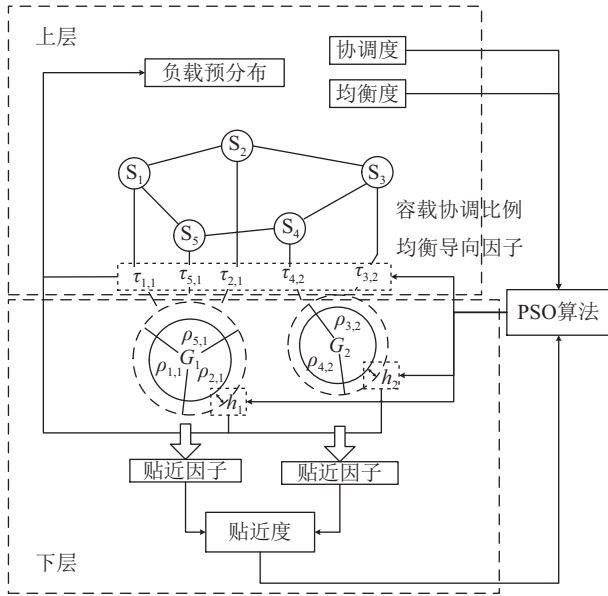


图7 模型求解示意图

Fig.7 Schematic diagram of model programming

图7中, τ_j^m 表示220 kV电源点 S_j 在功能单元组 G_m 的通道分配因子, h_m 表示功能单元组 G_m 的容载协调比例, 虚圆圈表示协调前单元组总负载, 实圆圈表示协调后单元组总负载, ρ_j^m 表示220 kV电源点 S_j 在功能单元组 G_m 所占负载实际比例。 τ_j^m 的作用是引导 ρ_j^m 向 τ_j^m 贴近, 最终实现220 kV变电站负载均衡。

2.1 上层优化模型

上层优化模型主要为满足220 kV变电站负载均衡, 同时避免输电通道阻塞。

2.1.1 通道分配因子和均衡度

以图5所示的网络结构为例, 图5中共有: 5个电源点, 即 $S_1, S_2, \dots, S_5$; 8个供电通道, 即 $\Gamma_{11}, \Gamma_{12}, \Gamma_{21}, \Gamma_{32}, \Gamma_{33}, \Gamma_{42}, \Gamma_{43}, \Gamma_{53}$, 其中, Γ_{jm} 表示电源点 S_j 与功能单元组 G_m 间的供电通道; 3个功能单元组, 即 $G_1=\{U_1, U_2, U_3, U_4, U_5, U_6\}$, $G_2=\{U_8, U_9, U_{10}, U_{11}, U_{12}, U_{13}\}$, $G_3=\{U_{14}, U_{15}, U_{16}, U_{17}, U_{18}, U_{19}\}$ 。据此定义通道分配因子: τ_j^m 表示220 kV电源点 S_j 通过供电通道 Γ_{jm}^m 向功能单元组 G_m 分割的负载比例, 且满足约束条件如下:

$$\sum_{j=1}^n \tau_j^m = 1 \quad (12)$$

式中, n 为系统内220 kV电源点 S_j 总数, τ_j^m 为与功能单元组 G_m 相关的全部通道分配因子。以图5所示的单元组 G_1 为例, 有 $\tau_1^1 + \tau_2^1 = 1$ 。

通道分配因子确定后, 各220 kV变电站 S_j 的负载率可由式(13)计算:

$$\kappa(S_j) = \sum_{m=1}^n (P_j^m)' \tau_j^m / P_{j(\max)} \quad (13)$$

式中, $\kappa(S_j)$ 为220 kV变电站 S_j 的负载率, τ_j^m 为与电源点 S_j 相关的通道分配因子, $(P_j^m)'$ 为与电源点 S_j 相关的功能单元组 G_m 协调后的总有功功率, $P_{j(\max)}$ 为电源点 S_j 的极限有功功率。

为满足负载率均衡, 以2-范数形式描述220 kV变电站负载均衡程度为:

$$K = \|\kappa(S_j) - k_0\|_2$$

其中, $k_0 = \frac{1}{N} \sum \kappa(S_j)$ 表示平均负载率。

2.1.2 容载协调比例和协调度

由于负载和容量之间有时存在量的不平衡关系, 导致无论采用何种分配方式都不合理, 因此在某约束条件下没有可行解。据此定义容载协调比例, 以协调容量和负载间量的不平衡关系。

容载协调比例: h_m 为单元组 G_m 切去的有功负荷占组内总负荷的比例, 有 $h_m \leq h_m^{\max}$ 。 P_m 为单元组 G_m 在协调前的总有功负荷, 则协调后单元组 G_m 的总负荷 P'_m , 计算如下:

$$P'_m = P_m(1 - h_m) \quad (14)$$

为保证供电可靠性, 组内被协调的负荷总量不能过多, 因此定义协调度, 反映协调后各单元组的负载总体水平。

协调度为全网络总的容载协调水平, 用 H 表示, 计算如下:

$$H = \sum_m h_m \quad (15)$$

在优化过程中, 应保证 H 尽可能小。 H 越大, 则容量与负载的关系越不和谐; 若 H 超过可接受的水平, 则应从规划层面考虑增加设备投资以提高电网的支撑能力, 满足供电需求。

2.1.3 上层优化模型

上层模型应保证全网变电站负载最均衡且协调度最小, 因此目标函数应为两者之和的最小值。其约束条件应分别满足式(12)的条件约束、容载协调比例的限额约束、线路传输功率约束以及节点电压约束, 则上层优化模型如下:

$$F = \min(\omega_1 K + \omega_2 H)$$

s.t.

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^n \tau_j^m &= 1, \\ 0 &\leq h_m \leq h_m^{\max}, \\ S_{il} &\leq S_{il}^{\max}, \\ \mu_j^{\min} &\leq \mu_j \leq \mu_j^{\max}, \\ \omega_1 + \omega_2 &= 1 \end{aligned} \quad (16)$$

式中: S_{il} 为电源点 S_i, S_l 间线路传输视在功率; μ_j 为220 kV电源点 S_j 电压; ω_1, ω_2 分别为 K, H 权重, 其和为1。

2.2 下层优化模型

下层优化模型通过调整各功能单元组拓扑结构,使单元组内负载分配向通道分配因子贴近,实现有功负载均衡。

2.2.1 贴近因子与贴近度

为描述单元组内负载实际分配比例与通道分配因子的贴近程度,定义贴近因子为单元组内负载实际分配比例关于通道分配因子的离差平方和的平方根,表达式如下:

$$c_m = \sqrt{\sum_{j=1}^{n_m} (\rho_j^m - \tau_j^m)^2} \quad (17)$$

式中, c_m 为功能单元组 G_m 的贴近因子, n_m 为向功能单元组 G_m 直接供电的 220 kV 电源点总数, τ_j^m 为与单元组 G_m 相关的通道分配因子, ρ_j^m 为所有与单元组 m 相连的供电通道 Γ_j^m 的实际负载分配比例。

c_m 表征了组内负载在各供电通道的实际分配状态与由通道分配因子产生的负载预分配状态的合同性。 c_m 越大,则与预分配状态差异越大,反之越小。

由于受单元组内拓扑约束的限制,组内负载分配比例不一定能够很好地贴近通道分配因子,即某种均衡方案受网络拓扑结构的影响,实现难度很大。为此定义贴近度来描述均衡方案对网络拓扑结构的适应性,表达式如下:

$$\chi = \sum_m c_m \quad (18)$$

式中, χ 为均衡方案的贴近程度,其值越小表明均衡方案对网络拓扑结构的适应性越强。

2.2.2 协调向量

由于上层确定了容载协调比例,则下层功能单元组应按照比例切去一定量的负荷。而组内各功能单元所带的负荷成分不尽相同,有些单元所含重要负荷比例很大,可切负荷比例小;有些单元所带负荷可切比例大。据此定义协调向量,反映组内各功能单元可协调的负载量大小。

协调向量:由组内各功能单元可协调的负载比例组成的向量,表达式如下:

$$\mathbf{X} = (x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (19)$$

式中: x_i 为功能单元 G_i 可协调的负载比例, $0 \leq x_i \leq 1$; n 为组内功能单元总数。则协调后各功能单元的负载大小计算如下:

$$P'_i = P_i - P_m h_m \times \frac{P_i x_i}{\sum_{i=1}^{n_i} P_i x_i} \quad (20)$$

式中, n_i 为功能单元组 G_m 中功能单元的个数, $P_i x_i$ 为功能单元 G_i 实际可协调的负载量, $\sum_{i=1}^{n_i} P_i x_i$ 为功能单元

组 G_m 总的实际可协调负载量, $P_m h_m$ 为由上层容载协调比例确定的单元组 G_m 的负载协调量, P_i 、 P'_i 分别为协调前后功能单元 G_i 的有功负荷。

2.2.3 开关动作次数

通过枚举单元组有效供电电路路径矩阵 $\mathbf{R}_{us}$,完成通道分配因子的贴近后,将 $\mathbf{R}_{us}$ 与初态供电电路路径矩阵 $\mathbf{R}_{us,initial}$ 进行对比,得到开关动作次数表达式如下:

$$O = \frac{\sum |R_{us}(i, j) - R_{us,initial}(i, j)|}{2} \quad (21)$$

式(21)表示将 $\mathbf{R}_{us}$ 与 $\mathbf{R}_{us,initial}$ 矩阵中所有对应元素求差,并取绝对值,再将结果求和,最后除以2得到开关动作次数。

2.2.4 下层优化模型

下层优化模型应保证与上层模型最贴近,且开关动作次数最小,因此其目标函数应为两者之和的最小值。其约束条件应分别满足有无功潮流等式约束、110 kV 网络节点电压约束以及线路传输功率约束,则下层优化模型如下:

$$f = \min(\omega_1 \chi + \omega_2 O)$$

s.t.

$$\begin{aligned} P_i &= u_i \sum_{j=1}^N u_j (g_{ij} \cos \theta_{ij} + b_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ Q_i &= u_i \sum_{j=1}^N u_j (g_{ij} \sin \theta_{ij} - b_{ij} \cos \theta_{ij}) \end{aligned} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} u_i^{\min} &\leq u_i \leq u_i^{\max} \\ S_{pq}^{\min} &\leq S_{pq} \leq S_{pq}^{\max} \\ \omega_3 + \omega_4 &= 1 \end{aligned}$$

式中: u_i 为 110 kV 节点电压; S_{pq} 为 110 kV 网络节点 p 、 q 间传输视在功率; P_i 、 Q_i 分别为 110 kV 节点有功无功约束; ω_3 、 ω_4 分别为 χ 和 O 的权重,其和应为 1。

2.3 基于粒子群优化算法的求解策略

粒子群优化算法具有实现简单,收敛速度快等特点,易于满足在线分析实时性的需求,因此采用粒子群优化算法求解该模型。

2.3.1 编码方式

以通道分配因子及容载协调比例为变量,编码为:

$$\begin{aligned} x_i &= \{\tau_1^1, \tau_1^2, \dots, \tau_2^1, \tau_2^2, \dots, h_1, \dots, h_{N'}\}; \\ \sum_{m=1}^{N'} \tau_j^m &= 1, \forall j = 1, 2, \dots, n. \end{aligned} \quad (23)$$

式中, x_i 为第 i 个粒子位置, n 为系统内 220 kV 电源点 S_j 总数, N' 为功能单元组数量。

2.3.2 适应度函数

粒子位置确定后,可根据式(16)确定 220 kV 变电站负载预分布,得到关于上层均衡度和协调度的

总和指标 F ;由式(22)确定功能单元组对通道分配因子的贴进度及动作次数,得到下层关于贴进度和动作次数权衡后的指标 f 。将 F 、 f 二者作为粒子群算法的适应度函数,综合反映上层均衡策略及下层功能单元组的贴近程度,其表达式如下:

$$F_{\text{obj}} = \min(F + f) \quad (24)$$

2.3.3 求解流程

采用粒子群优化算法求解该模型。首先,生成上层通道分配因子和容载协调比例,由式(16)形成网络负载预分布;然后,通过枚举下层功能单元组的有效供电路径矩阵 $\mathbf{R}_{\text{us}}$,根据式(22)计算贴进度,找到贴进度最小的有效供电路径矩阵,利用算法的迭代更新机制,使得 F 、 f 不断减小,最终使网络负载分布趋于合理的均衡状态。粒子位置和速度更新过程如下:

$$\mathbf{v}_{id}^{k+1} = \omega \mathbf{v}_{id}^k + c_1 r_1^k (pbest_{id}^k - \mathbf{x}_{id}^k) + c_2 r_2^k (gbest^k - \mathbf{x}_{id}^k) \quad (25)$$

$$\mathbf{x}_{id}^{k+1} = \mathbf{x}_{id}^k + \mathbf{v}_{id}^{k+1} \quad (26)$$

式中: $\mathbf{v}_{id}^k$ 为粒子 i 的第 d 维在第 k 次迭代时的速度; $\mathbf{x}_{id}^k$ 为粒子 i 的第 d 维在第 k 次迭代时的位置; ω 为惯性因子,反映了粒子保持原有速度的能力, ω 越大,则粒子的全局搜索能力越强,反之,粒子越倾向于局部搜索; c_1 、 c_2 为学习因子,反映了粒子追随自身历史最优位置和种群最优位置的能力; r_1^k 、 r_2^k 为 $[0, 1]$ 间的随机数。算法求解流程如下:

- 1) 随机初始化 m 个粒子位置,即通道分配因子及容载协调比例。
 - 2) 根据式(16)计算负载在220 kV网络中的预分布。
 - 3) 枚举各功能单元组有效供电矩阵 $\mathbf{R}_{\text{us}}$,按式(22)计算贴进度,并选择 χ 值最小的拓扑状态。
 - 4) 进行潮流校验,检验是否满足式(16)、(22)中的网络约束。
 - 5) 根据式(24)计算适应度函数。
 - 6) 判断是否满足退出条件。若“是”,则退出;若“否”,则转到步骤7)。
 - 7) 按式(25)、(26)更新粒子速度和位置,转到步骤2)。
- 算法求解流程如图8所示。

需要说明的是:在单元组贴进步骤中,各单元组的贴近过程是相互独立的,因此可采取分布式并行计算结构从而能够进一步提高求解速度。

3 基于模糊评价的操作序列判定

为解决断面阻塞与变压器过载风险,调度员需在长时间内操作多个开关,其重构过程是一个长时间动态过程。因此在确定了开关动作方案后,需要制定一个在连续控制下安全水平较优的操作序列,以保证系统能够安全的从初态过渡到终态。

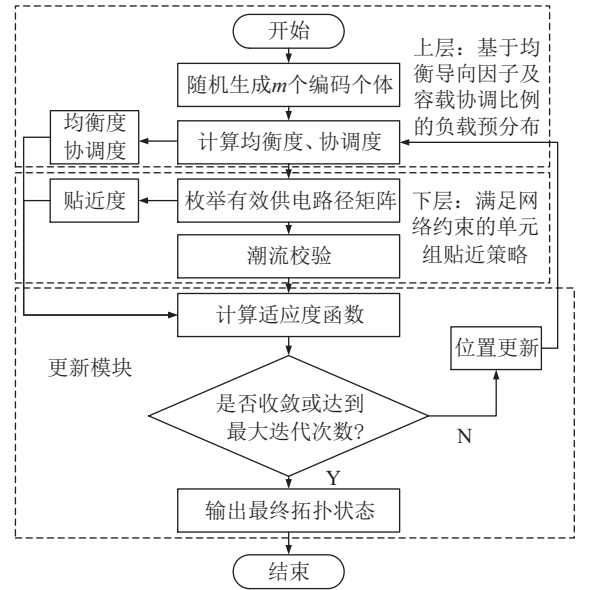


图8 粒子群算法流程图

Fig.8 Flow chart of BPSO

由于在倒闸操作过程中,不同的调度员侧重的安全指标有所不同,而衡量系统安全水平指标的优劣并未有明确的划分标准,因此,采用模糊评价的方法评估历次倒闸操作中系统的安全水平。将系统安全指标模糊化,以隶属度函数大小来反映安全指标的优劣。给不同的指标赋予不同的权重,从而满足调度员相应需求。

3.1 问题模型

在开关操作的每一步,都应保证系统的电压偏差、线路负载率及变压器负载率在可接受的水平内。定义第 i 步操作对系统的影响评估如下:

$$\varepsilon_i = \omega_5 \frac{1}{p} \sum_{j=1}^p \bar{v}_j^{(i)} + \omega_6 \frac{1}{q} \sum_{k=1}^q \bar{l}_k^{(i)} + \omega_7 \frac{1}{r} \sum_{m=1}^r \bar{s}_m^{(i)} \quad (27)$$

式中: $\bar{v}_j^{(i)}$ 为第 i 步操作后节点 j 的电压隶属度,计算式见式(28); $\bar{l}_k^{(i)}$ 为第 i 步操作后线路 k 的负载率隶属度,计算式见式(29); $\bar{s}_m^{(i)}$ 为第 i 步操作220 kV变电站 m 的负载率隶属度,计算式见式(30); ω_5 、 ω_6 、 ω_7 为3个指标的权重,且 $\omega_5 + \omega_6 + \omega_7 = 1$ 。式(28)~(30)中,3个指标的函数图像分别如图9(a)、(b)、(c)所示。

$$\bar{v}_j^{(i)} = \begin{cases} 0, & V_j^{(i)} < V_{\min}; \\ \frac{V_j^{(i)} - V_{\min}}{V_{\text{norm}} - V_{\min}}, & V_{\min} \leq V_j^{(i)} \leq V_{\text{norm}}; \\ \frac{V_{\max} - V_j^{(i)}}{V_{\max} - V_{\text{norm}}}, & V_{\text{norm}} \leq V_j^{(i)} \leq V_{\max}; \\ 0, & V_j^{(i)} \geq V_{\max} \end{cases} \quad (28)$$

式中: $V_j^{(i)}$ 为在第 i 步操作中节点 j 的电压幅值; $V_{\min}$ 、 $V_{\max}$ 分别为正常运行时电压的最大最小标么值,文中取0.95和1.05; V_{norm} 为基准电压标么值,文中取1。

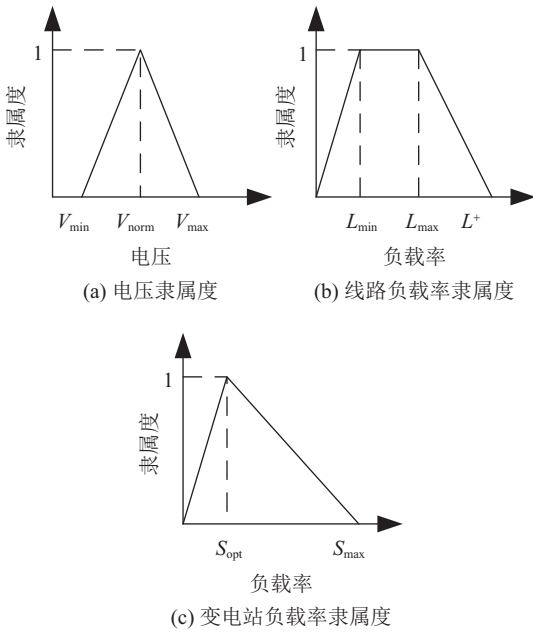


图 9 3种指标隶属度函数

Fig.9 Membership functions of three indices

$$\bar{l}_k^{(i)} = \begin{cases} \frac{l_k^{(i)}}{L_{\min}}, & 0 \leq l_k^{(i)} \leq L_{\min}; \\ 1, & L_{\min} \leq l_k^{(i)} \leq L_{\max}; \\ \frac{L^+ - l_k^{(i)}}{L^+ - L_{\max}}, & L_{\max} \leq l_k^{(i)} \leq L^+; \\ 0, & l_k^{(i)} > L^+ \end{cases} \quad (29)$$

式中: $l_k^{(i)}$ 为第 i 步倒闸操作线路 k 负载率; $L_{\min}$ 、 $L_{\max}$ 分别为正常运行时线路负载率最小、最大取值; L^+ 为线路所能承受的最大负载率, 文中取 1.5。

$$\bar{s}_m^{(i)} = \begin{cases} \frac{S_m^{(i)}}{S_{\text{opt}}}, & 0 \leq S_m^{(i)} \leq S_{\text{opt}}; \\ \frac{S_{\max} - S_m^{(i)}}{S_{\max} - S_{\text{opt}}}, & S_{\text{opt}} \leq S_m^{(i)} \leq S_{\max}; \\ 0, & S_m^{(i)} > S_{\max} \end{cases} \quad (30)$$

式中: $S_m^{(i)}$ 为第 i 步倒闸操作 220 kV 站 m 负载率; S_{opt} 为变电站最佳负载率, 文中取 0.8。

定义 n 步倒闸操作后总的适应度函数如下:

$$\Theta = \sum_{i=1}^n \varepsilon_i \quad (31)$$

3.2 基于二进制粒子群优化算法的求解流程

通过双层模型计算得到最优解后, 调度员需在长时间内操作多个开关, 才能从越限初态转移到最优终态。因此有必要制定一个安全水平最优的操作序列, 保证倒闸过程中系统始终运行在安全边界以内。采用二进制粒子群优化算法求解该模型。为排除不可行的编码方案, 提高编码效率, 将操作序列空间映射到二进制空间中, 以离散二进制编码表示每一

种操作序列, 具体过程如下:

将最优拓扑终态与越限初始状态对比, 得到动作开关集合 σ , 如下:

$$\sigma = \{a_1, a_2, \dots, a_n\} \quad (32)$$

式中: a_i 为需要动作的第 i 组开关对, 即闭合一个开关, 断开另一个开关; 集合的大小 n 就是开关总的操作次数。对集合中的元素进行全排列, 可得到 $n!$ 种操作序列, 构成操作序列判定问题的求解空间 ϕ 为:

$$\phi = [\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_N] \quad (33)$$

式中: $N=n!$; ϕ_i 为 $1 \times n$ 维操作序列向量, 每一个 ϕ_i 都对应了一种操作顺序。令 $N'=N-1$, 将 N' 转换为二进制码 N_B , 其位数为 N_{DP} , 至此可用不超过 N_B 的 N_{DP} 位二进制码来表示解空间 ϕ , 即粒子编码 ϕ_1 为 $\underbrace{000 \cdots 000}_{N_{\text{DP}}}$, ϕ_2 为 $\underbrace{000 \cdots 001}_{N_{\text{DP}}}$, 以此类推。

不同的粒子位置对应着不同的动作顺序, 利用算法的迭代更新机制搜索最优动作序列。粒子位置和速度的更新过程如式 (34)、(35)、(36), 公式的推导过程此处不再赘述。

$$v_{id}^{k+1} = \omega v_{id}^k + c_1 r_1^k (pbest_{id}^k - x_{id}^k) + c_2 r_2^k (gbest^k - x_{id}^k) \quad (34)$$

$$\text{sigmoid}(v_{id}^{k+1}) = 1 / (1 + \exp(-v_{id}^{k+1})) \quad (35)$$

$$\begin{cases} x_{id}^{k+1} = 1, \rho_{id}^{k+1} < \text{sigmoid}(v_{id}^{k+1}); \\ x_{id}^{k+1} = 0, \rho_{id}^{k+1} \geq \text{sigmoid}(v_{id}^{k+1}) \end{cases} \quad (36)$$

二进制粒子群算法与普通粒子群算法的主要差异在于粒子位置的更新过程是由式 (35) 所示的“S”函数决定, 它实际上反映了粒子“翻转”的概率。速度越大, 则越倾向“1”; 反之, 则越倾向“0”。

4 算例分析

4.1 算例说明

以某城市局部高压配电系统为例, 基于功能单元的拓扑结构示意图如图 10 所示。

图 10 中, 共有 6 个功能单元组, 转供路径、母联开关多达 44 个, 高峰时期总负荷 830 MW。

4.2 算例验证

初始状态下, 220 kV 变电站和线路负载的分布见表 1、2。

从表 1、2 可看出, 全网负载分布极不均衡, 部分变电站重载 (如 S_1 、 S_2 、 S_6), 而部分变电站轻载 (如 S_3 、 S_5)。线路负载率超标的线路有 S_3 – S_5 , 已经严重超限额。以第 2.2.3 节所述流程进行负载均衡, 将变电站负载率控制在不同水平下, 首先不考虑动作次数限制, 对所提出的方案进行测试, 得到结果如图 11 所示。

由图 11(a)、(b) 可知: 当变电站负载率约束逐渐降低时, 均衡度数值有了明显降低, 但贴近度数值有

所增大,说明为了实现全网负载更均衡,下层模型贴近上层策略的难度越来越大,但有一定的均衡效果。负载率控制在90%和80%以下时,都没有出现减负荷情况,只是动作次数有了明显升高(由3次增加为8次)。当约束进一步降低时,如图11(c)所示,将负载率控制在70%以下时已没有可行方案,必须采取协调措施来协调容量和负载间量的关系(切负荷比例为8%),在新的状态下实现负载均衡,尽管均衡化效果相较于图11(a)、(b)最优,但付出了减负荷代价,且贴近效果并非最佳,变电站实际负载率和动作次数均有所上升。

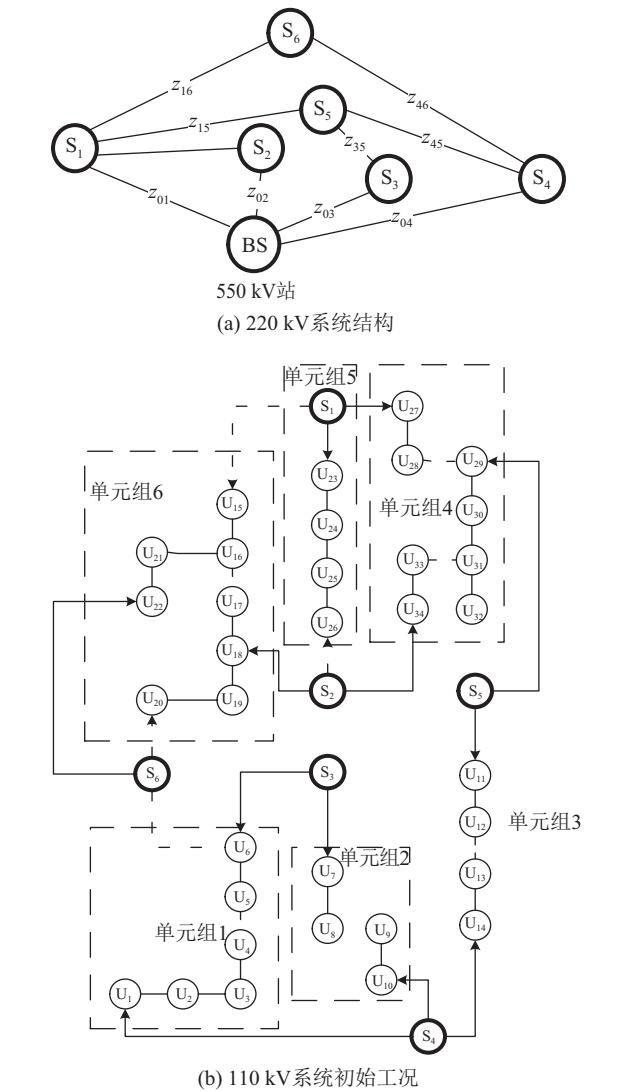


图 10 基于功能单元的某城市局部高压配电系统拓扑结构示意图

Fig.10 Functional structure of a local urban HVDN based on functional unit

表 1 变电站负载率初始工况

变电站	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	S ₆
负载率/%	94.9	87.5	30	47.2	16.9	95.2

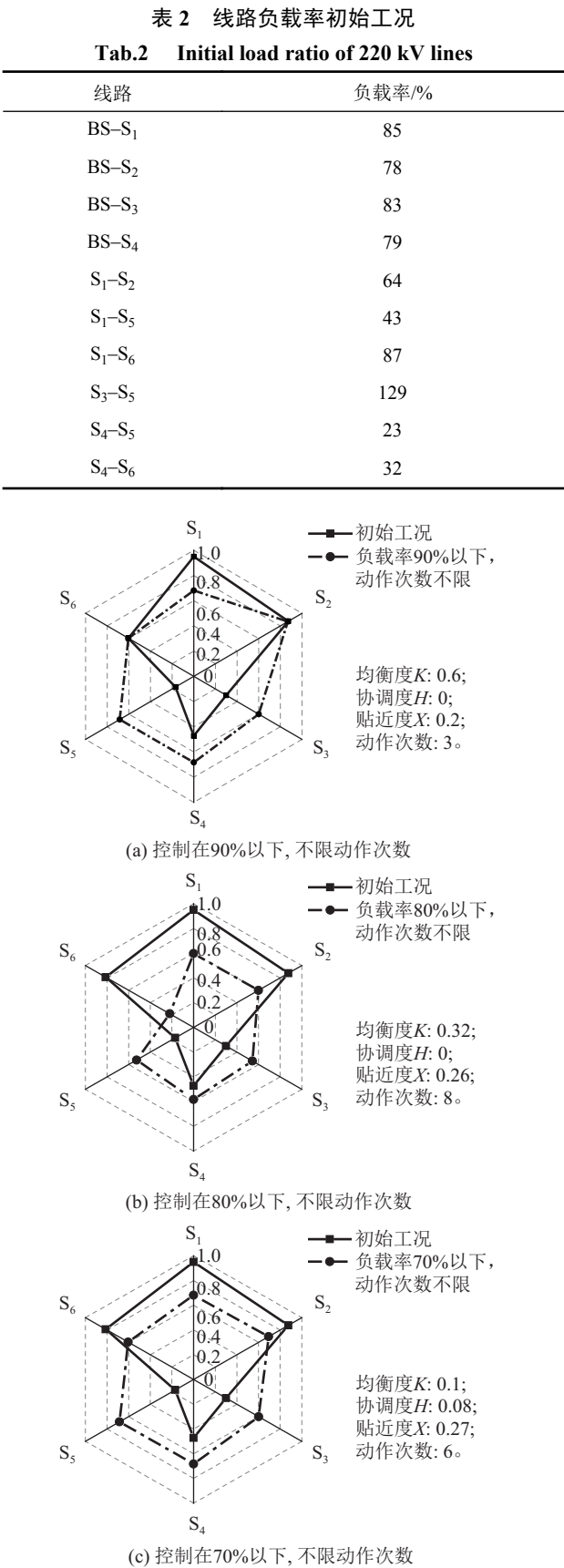


图 11 不同负载率水平下的均衡性控制效果

Fig.11 Balancing effects of substation under different load controls

所提出的方案对220 kV线路传输功率的控制效果如图12所示。

初始工况下, 220 kV输电线路 S_3 - S_5 严重超热稳定极限运行, 通过算法重构后极大缓解。

考虑到实际操作过程中, 倒闸操作次数不宜过多, 因此在适应度函数中加入动作次数约束。比如, 考虑负载率水平控制在70%下的均衡场景, 将动作次数控制在5次以下的均衡结果与不限动作次数的图

11(c)做对比, 得到结果如图13所示。

从图13可知, 加入了动作次数约束后, 均衡方案的实现难度增加, 均衡度较图11(c)不考虑动作次数约束的结果而言, 其形状略微畸形, 均衡度 K 数值偏大, 说明均衡效果下降; 更重要一点是由于限制了动作次数, 使得“容”“载”协调力度加大, 负载量由8%上升并超过了27%, 这说明了均衡性、协调度和动作次数优化在一定运行空间下的矛盾性。

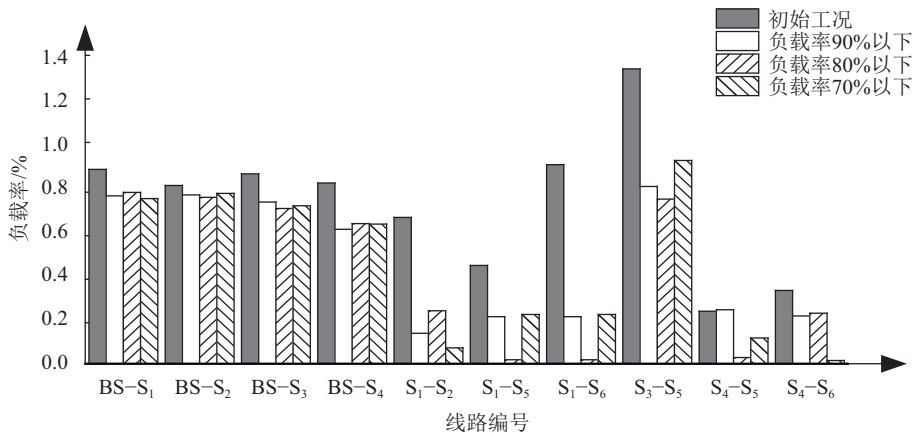


图 12 不同负载率水平下的220 kV线路控制效果

Fig.12 Balancing effects of 220 kV lines under different load controls

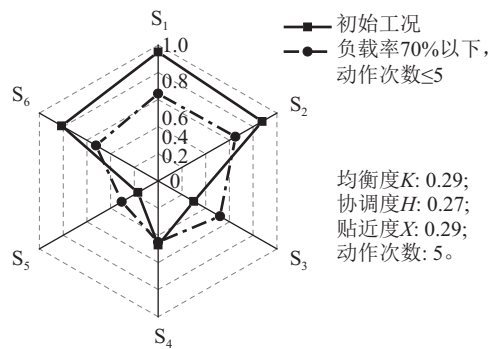


图 13 负载率控制在70%以下，动作次数限制在5次以下

Fig.13 Balancing effects of substation under 70% load control and five transferring actions

4.3 性能比较

将本文提出的方案与文献[15]所述的基于环路编码方案进行比较, 求解本文第4.1节所述算例, 得到不同网络规模下的计算时间, 对比结果见图14。

由图14可知, 本文方法较文献[15]方法而言, 计算时间明显降低, 且随网络规模的增加, 本文方法优越性更加明显。这是因为文献[15]采用环路编码的策略, 由于高压配电网多环态非深度的特点, 会造成网络中存在大量的环, 导致文献[15]所述方案控制变量激增, 并且网络中会存在多条支路共环的情况, 因此, 在解环的过程中还需要花费额外的计算时间处理, 导致计算时间大大增加。

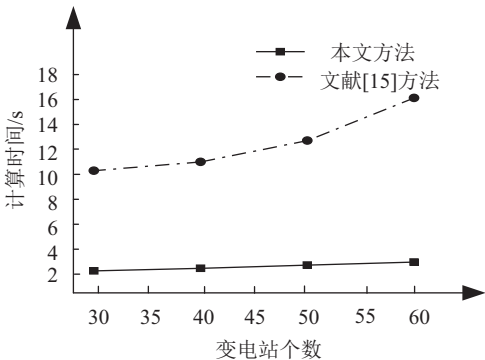


图 14 不同算法的计算时间对比

Fig.14 Comparison of computation time under different methods

4.4 开关动作序列判定

由于配电网中开关的闭合、断开行为总是成对出现, 以保证辐射性结构, 因此可将动作行为成对出现的2个开关组合成一个动作组。为满足动作次数限制, 以负载率控制在90%水平下为例进行分析。对比网络初态和终态, 得到开关动作组如表3所示。

采用第3节所述动作序列判定方法, 采取第3.1节中不同的权重(ω_5 、 ω_6 、 ω_7)分配方案, 得到的可行动作序列如表4所示。

3种不同权重取值对系统安全水平的影响分别如图15(a)、(b)、(c)所示。

从图15可看出, 不同权重对系统安全水平的影响

表 3 开关动作组

组编号	开关状态	
	断开	闭合
①	U ₄ –U ₅	U ₃ –U ₄
②	U ₈ –U ₉	U ₉ –U ₁₀
③	U ₁₆ –U ₁₇	U ₁₇ –U ₁₈
④	U ₂₆ –S ₂	U ₂₅ –U ₂₆

表 4 3种权重动作序列

方案	ω_5	ω_6	ω_7	动作序列
方案1	0.5	0.25	0.25	④①③②
方案2	0.25	0.5	0.25	②①③④
方案3	0.25	0.25	0.5	②④①③

响。例如,图15(a)中的方案1更加侧重电压偏差($\omega_5 > \omega_6、\omega_7$),则在倒闸操作过程中,其最低节点电压比另外两种方案明显高一些,即电压偏差最小。图15(b)中的方案2更侧重线路负载率($\omega_6 > \omega_5、\omega_7$),则在倒闸操作过程中,其最大线路负载率比另外两种方案明显低很多。

5 结 论

城市电网普遍面临尖峰时期大功率潮流转移难题。这种大范围、大规模的负荷转供操作,传统配网重构方法并不适用,且也缺乏相关优化运行模型支撑。本文的研究弥补了高压配电网负荷转供在线分析工具的不足,为调度员实施大范围负荷转供提供在线决策依据。所提方法具有以下特点:

1)分析了110 kV高压配电网的站内和站间拓扑结构,提出了功能单元组及供电通道的物理模型,有效规避了采用传统“0-1开关状态模型+智能算法”方案在计算负担重、不可行解多和稳定性差等方面的劣势。

2)构建双层优化模型,通过上层引导、下层贴近的交互式求解方式有效降低了变量维度,提高了计算速度,适用于城市高压配电网负荷转供问题的在线分析。

3)在双层优化策略确定后,采用模糊综合评价方法评估网络从初态到终态不同过渡方案下系统的安全水平,并分析不同权重取值对系统安全水平的影响,为调度员优化倒闸操作顺序提供定量判据,有效提高系统安全水平。

本文尚未考虑分布式能源消纳、充电负荷支撑下的高压配电网安全保障目标,还需进一步研究连续时间内高压配电网运行拓扑的自适应调整策略及其快速求解算法。未来研究应重点探讨计及快速工况变化下,关口无功倒送、短路电流越限等复杂约束,形成更全面的高压配电网弹性运行理论和方法。

参考文献:

[1] Sarma N D R,Rao K S P.A new 0-1 integer programming method of feeder reconfiguration for loss minimization in distribution systems[J].Electric Power Systems Research, 1995,33(2):125-131.

[2] Yin Xiaogen,He Junjia,Bai Zhaodong.Reconfiguration of distribution network based on reliability analysis[J].Huazhong University of Science & Technology(Nature Science Edition),2003,31(1):86-88.[尹小根,何俊佳,白照东.考虑供电可靠性的配电网重构[J].华中科技大学学报(自

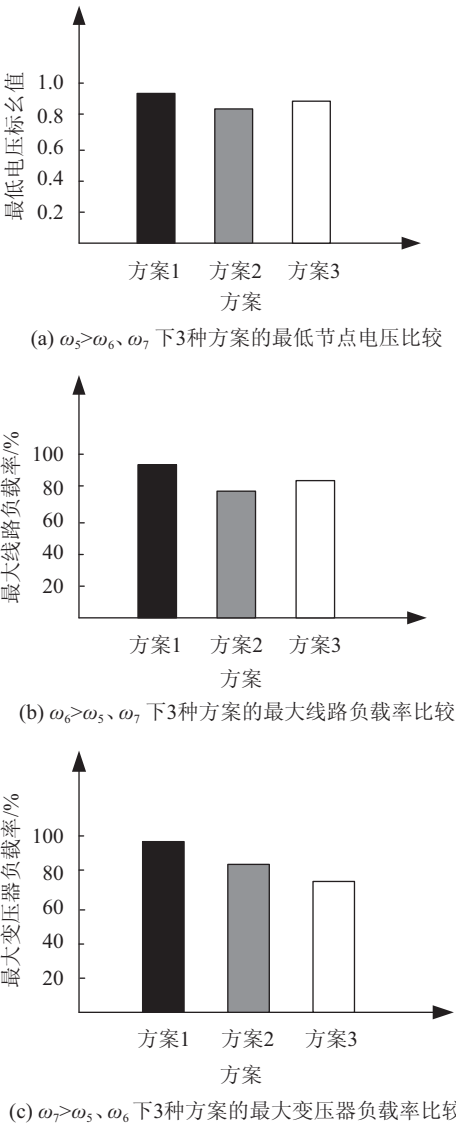


图 15 3种权重动作序列的指标对比

Fig.15 Comparison of three action weights

- 然科学版),2003,31(1):86–88.]
- [3] Tapia-Juárez R, Espinosa-Juárez E. Multi-objective reconfiguration of radial distribution networks considering voltage sags[C]//Proceedings of the 2013 IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC). Piscataway: IEEE, 2013: 1–6.
- [4] Gupta N, Swarnkar A, Niazi K R. A modified branch-exchange heuristic algorithm for large-scale distribution networks reconfiguration[C]//Proceedings of the 2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting. Piscataway: IEEE, 2012: 1–7.
- [5] Sun Jian, Jiang Daozhuo. A new multi-objective algorithm for distribution network reconfiguration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(20): 57–61. [孙健, 江道灼. 一种多目标配电网重构新算法[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(20): 57–61.]
- [6] Zhang Bingda, Liu Yang. A distribution network reconfiguration algorithm based on evolutionary programming mutation operator[J]. Power System Technology, 2012, 36(4): 202–206. [张炳达, 刘洋. 应用进化规划变异算子的配电网重构算法[J]. 电网技术, 2012, 36(4): 202–206.]
- [7] Li Peng, Jiang Hui, Sun Qian, et al. Distribution network reconfiguration based on group search optimizer[J]. Power System Technology, 2010, 34(12): 114–118. [李鹏, 江辉, 孙芊, 等. 基于群搜索优化算法的配电网重构[J]. 电网技术, 2010, 34(12): 114–118.]
- [8] Huang Wei, Ji Shuangquan. A distribution network reconfiguration method via rapid network loss reduction based on dual feeders[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(5): 75–80. [黄伟, 纪双全. 基于馈线偶的配电网快速减小网损重构方法[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(5): 75–80.]
- [9] Wang Chun, Cheng Haozhong. Reconfiguration of distribution network based on plant growth simulation algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(19): 50–55. [王淳, 程浩忠. 基于模拟植物生长算法的配电网重构[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(19): 50–55.]
- [10] Lu Lin, Luo Qi, Liu Junyong, et al. A hierarchical structure poly-particle swarm optimization algorithm[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2008, 40(5): 171–176. [吕林, 罗琦, 刘俊勇, 等. 一种基于多种群分层的粒子群优化算法[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2008, 40(5): 171–176.]
- [11] Li Zhenkun, Chen Xingying, Yu Kun, et al. Hybrid particle swarm optimization for distribution network reconfiguration[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(31): 35–41. [李振坤, 陈星莺, 余昆, 等. 配电网重构的混合粒子群算法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(31): 35–41.]
- [12] Li Chuanjian, Liu Qianjin. A distribution network reconfiguration algorithm based on Multi-agent system and minimum spanning tree led by particle swarm optimization[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(6): 24–28. [李传健, 刘前进. 基于Multi-agent和粒子群引导最小生成树的配电网重构算法[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(6): 24–28.]
- [13] Cárcamo-Gallardo A, García-Santander L, Pezoa J E. Greedy reconfiguration algorithms for medium-voltage distribution networks[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2009, 24(1): 328–337.
- [14] Li Zhenkun, Chen Xingying, Yu Kun, et al. A hybrid particle swarm optimization approach for distribution network reconfiguration problem[C]//Proceedings of the 2008 IEEE Power and Energy Society General Meeting—Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century. Piscataway: IEEE, 2008: 1–7.
- [15] Wang Chun, Cheng Haozhong. Reconfiguration of distribution network based on plant growth simulation algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(19): 50–55. [王淳, 程浩忠. 基于模拟植物生长算法的配电网重构[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(19): 50–55.]

(编辑 赵 婧)

引用格式: Jin Yong, Liu Junyong, Zhang Xi, et al. Bi-level model based on functional units for optimizing high-level voltage distribution network[J]. Advanced Engineering Sciences, 2017, 49(3): 179–190. [金勇, 刘俊勇, 张曦, 等. 基于功能单元的高压配电网负荷转供分层优化模型[J]. 工程科学与技术, 2017, 49(3): 179–190.]