

配电网动态无功优化的两阶段解耦协调混合动态规划方法

颜伟, 田其生, 郑云耀

(重庆大学电气工程学院, 重庆 400044)

摘要: 配电网动态无功优化是提高供电质量、减少电能损耗的重要手段。本文建立了考虑离散控制设备动作成本分段特性的配电网动态无功优化模型, 提出了模型求解的两阶段解耦协调混合动态规划算法。模型方面, 通过所建的动作成本分段函数, 实现了离散设备的日动作次数同时满足尽可能少且尽量不越限的双重要求。算法方面, 第一阶段采用内点法求解原模型离散变量松弛连续化子问题, 以确定模型的连续最优解。第二阶段在连续解的邻域搜索基础上, 通过变电站动态无功优化的动态规划算法以及变电站之间的解耦协调策略, 实现了所建模型的高效求解。基于某 220kV 控制分区的实际高压配电网数据进行了大量的仿真分析, 所得结果验证了所建模型与所提算法的有效性。

关键词: 动态无功优化; 动作成本分段; 混合整数非线性规划; 混合算法; 动态规划法
中图分类号: TM7

Two-Stage Decoupling Coordination Hybrid Dynamic Programming Method for Dynamic Reactive Power Optimization in Distribution Network

YAN Wei, TIAN Qisheng, ZHENG Yunyao

(School of Electrical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044)

Abstract: Dynamic reactive power optimization of distribution network is an important means to improve the quality of power supply and reduce power loss. In this paper, a dynamic reactive power optimization model for distribution network considering the characteristics of discrete control equipment operation cost segment is established, and a two-stage decoupling coordination hybrid dynamic programming algorithm for solving the model is proposed. In the aspect of model, the daily action times of discrete equipment can be achieved by building the action cost segment function, which meets the dual requirements of minimizing and not exceeding the limit as far as possible. In terms of algorithm, the first stage uses the interior point method to solve the discrete variable continuous problem of the original model to determine the continuous optimal solution of the model. In the second stage, based on the neighborhood search of continuous solution, the dynamic programming algorithm of dynamic reactive power optimization of substation and the decoupling coordination strategy between substations are used to realize the efficient solution of the model. In the second stage, based on the neighborhood search of continuous solutions, the dynamic programming algorithm of dynamic reactive power optimization and decoupling coordination strategy between substations are used to achieve the efficient solution of the model. Based on the actual data of a 220 kV control zone, a large number of simulation analyses are carried out. The results show that the proposed model and the proposed algorithm are effective.

Key words: dynamic reactive power optimization; action cost segmentation; mixed integer nonlinear programming; mixed algorithms; dynamic programming

0 引言

配电网动态无功优化是提高供电质量、降低网损的重要手段。常规模型主要是以分组投

作者简介: 颜伟(1968-), 男, 教授、博导, 主要研究方法: 电力系统优化运行, AVC 系统运行状态的评估、策略的优化与无功规划. E-mail: cqyanwei@cqu.edu.cn

45 切的无功补偿装置和有载变压器等离散调压设备为控制对象，以全天的网损最小为优化目标，约束条件包括离散调压设备的日动作次数限制以及配网节点全天的电压质量约束等。然而在实际系统中，调压设备的日动作次数上限并没有严格的标准，也没有准确的限制值。为此，文献[1,2]将离散设备的动作次数转换为线性的调节代价代替动作次数的严格约束条件，
50 以实现动作次数尽可能少的目标要求。但是该方法采用同样的成本系数来处理每次的调节代价，没有区分调节次数是否越限其代价的差异，可能导致部分设备频繁动作的问题。

动态无功优化是一个多时段的大规模非线性混合整数规划问题，其高效求解一直是制约其实际应用的关键问题。现有研究主要包括：（1）离散变量罚函数内点法^[3]；（2）混合智能算法^[4]；（3）二阶锥松弛优化算法^{[5][6]}；（4）动态规划算法^[7,8]；（5）连续解的优化归整方法^[9,10]。然而这些方法却都相应存在实用范围窄、优化结果不稳定、限制条件苛刻、求解规模大效率低以及安全约束可能越限的问题。
55

针对现有研究无法合理限制离散设备动作次数的问题，本文构建了考虑设备动作成本分段特性的配电网动态无功优化模型，以实现离散设备的日动作次数尽可能少且尽量不越限。针对区域电网动态无功优化的高效求解问题，提出了一种两阶段解耦协调混合动态规划算法。第一阶段采用内点法求解原模型的连续化子问题。第二阶段在连续解基础上，通过站间以及调压和无功补偿设备的解耦协调和站内的动态规划计算以求解区域电网动态无功优化问题。通过连续解以及站间和设备的解耦，可以大幅度缩小动态规划算法的离散变量搜索空间，从而避免动态规划算法的组合爆炸问题。同时通过站间的协调迭代以提高解的可行性与最优性，最终实现区域电网动态无功优化问题的高效求解。基于某 220kV 控制分区的高压配电网实际数据的仿真结果验证了本文所提模型和算法的有效性。
60

65 1 配电网动态无功优化改进模型

地调电网 220kV 控制分区主要由一个 220kV 变电站及其下级多个 110kV 变电站和站间的输电线路构成，其拓扑结构如图 1 所示。图中，每一个圈均代表一个变电站，其中常常包括两台甚至 3 台有载调压变压器以及多组并联补偿电容器。只有在负载率低可靠性要求不高的特殊情况只含一台变压器。另外，图中的电源及其串联阻抗支路为戴维南等值电路。为了准确反映上级电网对 220kV 控制分区的影响，本文采用戴维南等值方法将 220kV 变电站的上级电网等值为保留进线对地充电电容的虚拟电源模型。其中的虚拟电源电压可以结合等值电路参数以及 220kV 变电站的进线功率和母线电压反算出来。本文假设虚拟电源节点为平衡节点，其电压为扰动变量，不可以调节。本文所研究的动态无功优化问题主要针对 220kV 控制分区。
70

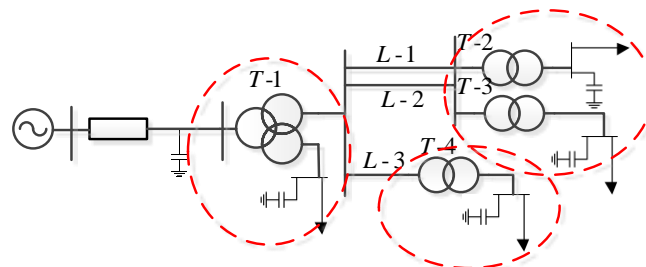


图 1 控制分区拓扑示意图

Fig. 1 Control Partition Topology Diagram

75

本文以补偿电容器和有载调压变压器分接头档位为控制变量，以配电网日电能损耗最小、负荷节点的逆调压偏差最小以及离散设备的日动作总成本最小为目标，考虑节点电压幅值的安全约束，构建动态无功优化模型，具体如下：

80

1) 目标函数

①网损目标

$$\min f_1 = \sum_{t=1}^T (P_{slack,t} - \sum_{i \in N_L} P_{L,i,t}) \quad (1)$$

式中， f_1 表示一个控制周期内的电网总有功损耗， T 为控制周期的时段数， $P_{slack,t}$ 为 t 时刻虚拟电源的有功功率， $P_{L,i,t}$ 为节点 i 处的有功负荷， N_L 为负荷节点集合。

85

②负荷节点的逆调压偏差目标

$$\min f_2 = \sum_{i=1}^T (\sum_{i \in S^{aim}} (V_{i,t} - V_{i,t}^{aim})^2) \quad (2)$$

式中， f_2 表示负荷节点的电压 $V_{i,t}$ 相对其逆调压目标值 $V_{i,t}^{aim}$ [11] 的偏差平方和； S^{aim} 为变电站的负荷节点集合。

90

③基于考虑分段特性的动作成本目标

文献[1,2]提出的动作成本目标是一个线性函数，具体为动作量与成本系数的乘积。为了避免部分设备动作次数过于频繁，还需要根据经验或者优化结果不断调整各控制设备的动作成本系数，操作较为复杂。本文所提出的动作成本目标是一个通过 *sigmoid* 函数表示的近似分段线性方程，采用该函数强调动作次数是否越限所对应的代价不同，希望实现尽可能不越限且尽可能动作次数少的双重要求。动作成本目标具体如下

95

$$\min f_3 = \sum_{i \in N_c} (\omega_{c,i,1} n_{c,i} + \frac{\omega_{c,i,2} (n_{c,i} - n_{c,i,M})}{1 + e^{-\mathfrak{I}(n_{c,i} - n_{c,i,M} - 1)}}) + \sum_{i \in N_T} (\omega_{T,i,1} n_{T,i} + \frac{\omega_{T,i,2} (n_{T,i} - n_{T,i,M})}{1 + e^{-\mathfrak{I}(n_{T,i} - n_{T,i,M} - 1)}}) \quad (3)$$

式中， f_3 表示一个控制周期内设备动作总成本， N_c 和 N_T 分别表示无功补偿点和有载调压变压器集合， \mathfrak{I} 为一个常数， $n_{T,i}$ 和 $n_{c,i}$ 分别表示第 i 台变压器或第 i 个无功补偿点补偿设备周期内动作总次数， $n_{T,i,M}$ 和 $n_{c,i,M}$ 则相应的表示它们的动作次数限制参考值， $\omega_{T,i,1}$ 和 $\omega_{T,i,2}$ 分别表示变压器分接头在限制参考值范围内的动作成本系数以及超出后额外增加的代价系数， $\omega_{c,i,1}$ 和 $\omega_{c,i,2}$ 表示无功补偿电容在限制参考值范围内的动作成本系数以及超出后额外增加的动作成本系数。

100

变压器分接头动作次数 $n_{T,i}$ 和无功补偿电容投切次数 $n_{c,i}$ 具体表达式为

$$n_{T,i} = \sum_{t=2}^T |T_{i,t} - T_{i,t-1}| \quad i \in N_T \quad (4)$$

$$n_{c,i} = \sum_{t=2}^T |C_{i,t} - C_{i,t-1}| \quad i \in N_c \quad (5)$$

105

式中 $T_{i,t}$ 和 $C_{i,t}$ 均为离散控制变量，分别表示变压器档位值和无功补偿设备投入数量。需要说明的是，变压器分接头档位值一次变化了 m 档或者无功补偿电容投入组数一次变化了 m 组，相应设备都是动作了 m 次。

设备动作成本 f_3 的简化形式为 $f_3' = \omega_1 n + \omega_2 (n - N_M) / (1 + e^{-\mathfrak{I}(n - N_M - 1)})$ ，函数图像如图 2 所示。

110

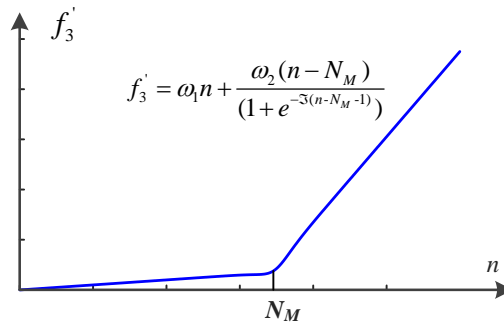


图2 设备动作成本曲线

Fig. 2 Equipment action cost curve

115 从设备动作成本曲线中可以看出,当设备动作总次数 n 小于动作次数限制参考值 N_M 时, $f'_3 \approx \omega_1 n$, 单次动作成本约为 ω_1 ; 当设备动作总次数 n 大于动作次数限制参考值 N_M 时, $f'_3 \approx \omega_1 n + \omega_2(n - N_M)$, 单次动作成本近似为 $(\omega_1 + \omega_2)$, 远高于参考限制范围内的单次动作成本。所以,通过添加该近似分段函数,可以在保证目标函数连续可导的前提下,从模型中保证控制设备尽量在参考限制范围内少动作,但也允许设备动作次数超过限制范围,不过需要承担更多的单次动作代价。

120 ④综合目标

本文采用加权法来处理多目标问题,其综合目标具体如下:

$$\min f = \alpha_1 f_1 + \alpha_2 f_2 + \alpha_3 f_3 \quad (6)$$

式中, α_1 、 α_2 和 α_3 分别表示三个子目标函数的权重因子,可以根据子目标相对重要程度进行调整。

125 2) 约束条件

①功率平衡方程

$$h(\mathbf{V}_t, \boldsymbol{\theta}_t, \mathbf{T}_t, \mathbf{C}_t) = 0 \quad (7)$$

②状态变量不等式约束

$$V_{\min,i} \leq V_{i,t} \leq V_{\max,i} \quad i \in N_b \quad (8)$$

130 ③控制变量不等式约束

$$T_{\min,i} \leq T_{i,t} \leq T_{\max,i} \quad i \in N_T \quad (9)$$

$$C_{\min,i,t} \leq C_{i,t} \leq C_{\max,i,t} \quad i \in N_c \quad (10)$$

④离散约束

$$T_{i,t} \in \mathbf{Z}, \quad C_{i,t} \in \mathbf{Z} \quad (11)$$

135 约束条件(7)-(11)中, $t = 1, 2, \dots, T$ 。其中,式(7)为节点功率平衡方程;式(8)为节点的电压幅值约束, $V_{\max,i}$ 和 $V_{\min,i}$ 分别为第 i 个节点的电压幅值上下限值, N_b 为节点集合;式(9)为变压器分接头档位上下限约束, $T_{\max,i}$ 和 $T_{\min,i}$ 为第 i 台有载调压变压器档位上下限值;式(10)为无功补偿电容投入组数上下限约束, $C_{\max,i}$ 和 $C_{\min,i}$ 为第 i 个无功补偿点的补偿电容投入组数上下限值。

140 **2 动态无功优化的两阶段混合算法**

第 1 节建立的配电网动态无功优化改进模型是一个含有绝对值约束的时空强耦合混合整数非线性规划问题, 本文提出了一种解耦协调混合动态规划方法分连续优化和离散优化两阶段进行求解。

2.1 连续优化阶段

145 忽略动态无功优化模型中的控制变量离散约束(11), 从而将离散控制变量 T_t 和 C_t 松弛为连续控制变量 \tilde{T}_t 和 \tilde{C}_t , 用 X_t 、 \tilde{X}_t 和 \tilde{Y}_t 分别表示离散控制变量、松弛离散控制变量以及状态变量, 即 $X_t = \{T_t, C_t\}$, $\tilde{X}_t = \{\tilde{T}_t, \tilde{C}_t\}$, $\tilde{Y}_t = \{P_{g,t}, Q_{g,t}, V_t, \theta_t\}$ 。离散变量松弛后的动态无功优化模型统一表示为

$$\begin{aligned}
 & obj \quad \min \quad f(\tilde{X}, \tilde{Y}) \\
 & s.t. \quad \begin{cases} \tilde{h}(\tilde{X}_t, \tilde{Y}_t) = 0 \\ \tilde{g}(\tilde{X}_t, \tilde{Y}_t) \leq 0 \\ X_{min} \leq \tilde{X}_t \leq X_{max} \\ \tilde{Y}_{min} \leq \tilde{Y}_t \leq \tilde{Y}_{max} \\ N = \sum_{t=2}^T |\tilde{X}_t - \tilde{X}_{t-1}| \end{cases} \quad (12)
 \end{aligned}$$

150 模型中 $t=1,2,\dots,T$, \tilde{h} 和 \tilde{g} 分别表示离散控制变量松弛后动态无功优化模型的等式约束和不等式约束, X_{min} 和 X_{max} 以及 \tilde{Y}_{min} 和 \tilde{Y}_{max} 分别表示控制变量和状态变量的上下限范围, N 则为变压器档位变化或补偿电容器投切的日动作总次数。该模型可通过文献[9]的方法构建含有平衡约束的数学规划模型(MPEC)消除绝对值, 并采用平衡约束松弛迭代的内点法求取连续最优解, 记为 \tilde{X}_0 。

155 **2.2 离散优化阶段**

第 1 阶段求得的原问题连续最优解通常情况下都不能满足变压器分接头档位值和无功补偿设备投入组数等离散控制变量为整数的要求。因此本文进一步采用动态规划法搜索原问题的离散最优解, 通过基于连续最优解的邻域搜索方法和空间解耦协调方法缩短搜索空间, 采用对离散控制设备动作成本的预测校正处理设备动作成本的时间耦合性, 保证解的可行性和最优性。

160

2.2.1 电压无功调节的站间解耦协调策略

实际电网中, 电压无功的调节顺序遵循以下原则: 电压调节从电源再到负荷, 优先调节电源电压, 最后调节终端负荷电压; 无功调节从负荷到电源, 逐渐实现无功的就地、就近和分区平衡。对本文所研究的 220kV 控制分区而言, 电压调节采用有载调压变压器的分接头, 调节顺序依次是 220kV 变电站、电气距离最近的 110kV 变电站、...、电气距离最远的 110kV 变电站。无功调节采用变电站的低压补偿无功, 调节顺序刚好与电压调节的顺序相反。

165

在实际进行离散优化过程中,首先采用动态规划算法进行各变电站的无功调节,然后再进行电压调节。一轮结束后,修改离散调压设备的动作邻域范围,再进行第二轮电压无功调节。若两轮调节的最优值满足收敛条件,则结束。反之,则开启新一轮电压无功优化。

170 **2.2.2 单个变电站离散设备调节的动态规划策略**

1) 动态规划算法的指标函数

离散设备动态规划过程中每一状态的最优指标函数如式(13)所示。

$$\begin{cases} f_{t,m}(X_{t,m}, \tilde{Y}_{t,m}) = OPT[f_{t-1,n}(X_{t-1,n}, \tilde{Y}_{t-1,n}) + \\ v_t(X_{t,m}, \tilde{Y}_{t,m}) + d(X_{t,m}, X_{t-1,n}) + p(X_{t,m}, \tilde{Y}_{t,m})] \\ X_{t-1,n} \in D_{t-1}, X_{t,m} \in D_t, t \geq 2 \end{cases} \quad (13)$$

175 式中, $v_t(X_{t,m}, \tilde{Y}_{t,m})$ 表示 t 时刻控制变量 X_t 和其对应的状态变量 \tilde{Y}_t 为第 m 个状态时对 $\alpha_1 f_1 + \alpha_2 f_2$ 贡献的大小; $d(X_{t,m}, X_{t-1,n})$ 表示离散控制变量从 $X_{t,m}$ 动作为 $X_{t-1,n}$ 产生的加权动作成本代价; $p(X_{t,m}, \tilde{Y}_{t,m})$ 表示该状态下约束越限产生的惩罚值; D_t 表示 t 时刻下控制变量的可选空间; OPT 的含义是选择 $(t-1)$ 时刻转移到 t 时刻第 m 个状态的最低转移成本及相应的转移路径; $f_{t,m}(X_{t,m}, \tilde{Y}_{t,m})$ 表示从第 1 时刻到 t 时刻第 m 个状态的最优指标值。

180 动态规划法的详细流程如文献[12]所示。容易得知, $\{f_{T,m}(X_{T,m}, \tilde{Y}_{T,m}), X_{T,m} \in D_T\}$ 中的最小值即该次优化最优值, 所对应的转移路径即是问题最优解。

2) 控制变量的邻域搜索及修正策略

由于进行空间和控制设备解耦后的动态规划算法每一时段的状态组合数仍然较多,所以本文采用邻域搜索及修正策略, 缩小整数变量的优化范围, 进一步提高算法计算效率。

185 例如, 某离散控制变量 x 的当前解为 x_0 , 则在当次搜索过程中的搜索范围为 $[x_{\min}, x_{\max}] \cap [x_0 - r_d, x_0 + r_d]$, r_d 为邻域大小参数, 最小值为 1。随着 r_d 取值的增加, 整数控制设备运行状态的组合数目增加, 优化问题的目标函数应当趋近原问题的最优解, 而计算效率将逐渐降低。

由于当前解 x_0 会在每一轮优化中不断更新, 搜索范围也能够得到修正, 使得当 r_d 取较小值时仍能保证每一次搜索都能够在较大范围内寻找更优解。

190 3) 单次动作成本的预测校正策略

使用动态规划法进行寻优过程中, 每一次状态转移所对应的动作成本 $d(X_{t,m}, X_{t-1,n})$ 与设备单次动作成本相关, 然而单次动作成本又受到设备动作总次数的影响, 在优化结束前难以准确计算状态转移动作成本。针对该问题, 本文采用预测校正策略加以解决, 图 3 为预测校正流程图, 具体步骤如下

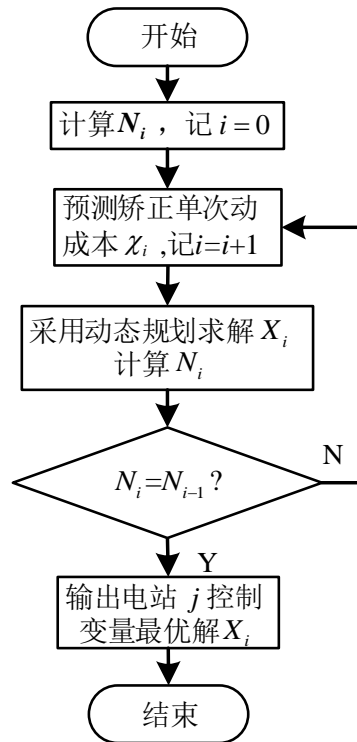


图3 预测修正流程图

Fig. 3 Prediction and correction flow chart

195

①记迭代次数 $i=0$ ，待优化控制变量集合当前值 \mathbf{X}_i 为之前优化最优解，计算当前动作总次数 N_i ，并根据式(14)预测设备平均动作成本 χ_i 。 m 表示待优化变量在集合 \mathbf{X}_i 中的编号。

200

$$\chi_{i,m} = \omega_{m,1} + \frac{\omega_{m,2}(N_{i,m} - N_{m,M})}{N_{i,m}(1 + e^{-\beta(N_{i,m} - N_{m,M})})} \quad (14)$$

②记 $i=i+1$ ，根据设备平均动作成本 $\chi_{k,i-1,j}$ 和指标函数(15)，采用动态规划法^[12]求取控制变量 \mathbf{X}_i ，并计算当前动作总次数 N_i 。如果 $N_i = N_{i-1}$ 则表示预测结果与实际结果一致，转至步骤③；否则需根据式(15)矫正设备单次动作成本为 χ_i ，并转至步骤②。

$$\begin{cases} \chi_{i,m} = (\omega_{m,1}N + \frac{\omega_{m,2}(N - N_{m,M})}{1 + e^{-\beta(N - N_{m,M})}}) / N \\ N = (N_{i,m} + N_{i-1,m}) / 2 \end{cases} \quad (15)$$

205

③输出离散最优解 \mathbf{X}_i ，退出当前循环。

2.2.3 离散优化阶段整体步骤

通过控制分区变电站空间解耦以及无功补偿设备和调压设备解耦，降低了控制变量状态组合数；通过预测矫正解决了单次动作成本未知的问题，接下来就可以进行离散变量优化。配电网控制分区空间解耦协调动态规划法的整体优化步骤如下，优化流程如图4所示。

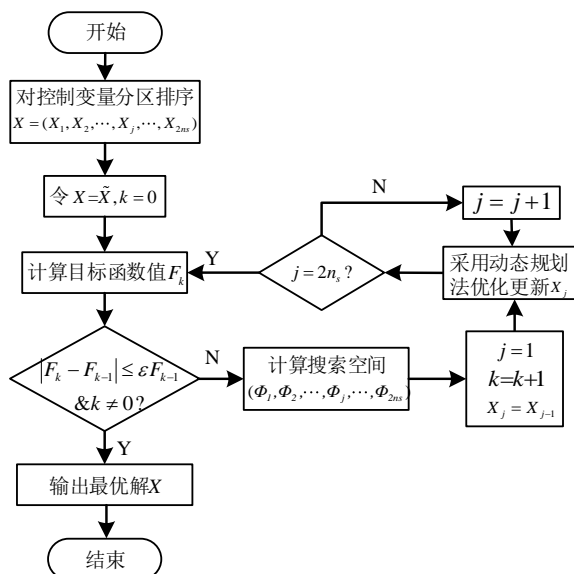


图 4 离散优化阶段整体流程图

Fig. 4 Flow chart for the discrete optimization stage

①根据控制分区拓扑结构图，将整个分区的优化控制变量 \mathbf{X} 按照设备类型和所在电站划分为 $(X_1, X_2, \dots, X_j, \dots, X_{2n_s})$ 。优化变量当前值为连续最优解 $\tilde{\mathbf{X}}_0$ ， n_s 为变电站数量。 (X_1, \dots, X_{n_s}) 为无功补偿电容投入组数，排列顺序为从低压到高压，电气距离为由远到近； $(X_{n_s+1}, \dots, X_{2n_s})$ 为变压器分接头档位值，排列顺序为从高压到低压，电气距离为由近到远（对高低压并联运行的两台或者多台变压器，假设其分接头相同，作为一个独立控制变量）。置当前调节次数 $k=0$ ，设置收敛误差为 ε 。

②计算控制变量 $(X_1, X_2, \dots, X_j, \dots, X_{2n_s})$ 在当前解情况下目标函数(6)的值并记为 F_k 。如果 $k \neq 0$ ，且模型目标函数 $|F_k - F_{k-1}| \leq \varepsilon F_{k-1}$ ，则转到第⑤步，否则转到第③步。

③计算第 k 次调节的优化变量 $(X_1, X_2, \dots, X_j, \dots, X_{2n_s})$ 的优化搜索空间 $(\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_j, \dots, \Phi_{2n_s})$ ，其中 $\Phi_j = [X_{j,min}, X_{j,max}] \cap [X_{k,j} - r_d, X_{k,j} + r_d]$ ， $X_{k,j}$ 为第 k 次调节第 j 组变量的当前解，并记 $j=1$ ， $k=k+1$ ，令 $X_j = X_{j-1}$ 。

④固定除 X_j 以外所有控制变量的值，采用动态规划法以及 2.2.2 中的离散控制设备单次动作成本预测矫正策略，在范围 Φ_{j-1} 内对第 j 个变电站的控制变量 X_j 进行优化，并根据离散优化结果更新 X_j 的当前优化值。记 $j=j+1$ 。如果 $j > 2n_s$ 则转第②步，否则转第④步。

⑤输出控制变量最优解 \mathbf{X} ，退出循环。

3 算例分析

本文以 CPU 为 core i5-6500，内存为 8G 的 PC 为计算平台，MATLAB 2014a 为仿真环境，采用广东省某实际控制分区数据对本文提出的模型与算法进行仿真分析。该控制分区拓扑结构如图 5 所示，含有 1 个 220kV 变电站和 6 个 110kV 变电站，共 26 个节点。其中包含 15 条电压控制母线，2 台三绕组有载调压变压器，13 台双绕组有载调压变压器以及 15 个补偿电容器投切点。一个周期内变压器分接头动作次数和无功补偿点电容器投切总次数参考限制值分别 8 次和 5 次。

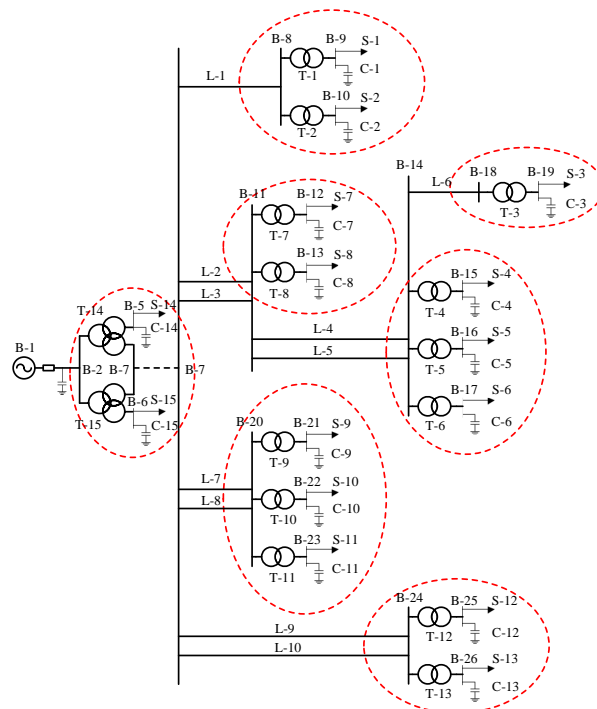


图 5 某控制分区拓扑结构图

Fig.5 Topological Map of a Control Zone

3.1 电站优化顺序对计算结果的影响分析

为分析所提方法在第二阶段空间解耦以后各电站优化顺序不同对最终结果的影响，本文对以下四种情景的优化结果进行了对比。

S1: 直接以连续优化结果作为最终结果。

S2: 变压器分接头和无功补偿电容按电站所在的位置同时进行优化。优化顺序为从高压到低压，距高压电站高压侧母线的电气距离从近到远。

S3: 变压器分接头和无功补偿电容按电站所在的位置同时进行优化。优化顺序为从低压到高压，距高压电站高压侧母线的电气距离从远到近。

S4: 变压器分接头和无功补偿电容按电站所在的位置按本文方法分开进行优化。分接头优化顺序为从高压到低压，距高压电站高压侧母线的电气距离从近到远；无功补偿电容优化顺序为从低压到高压，距高压电站高压侧母线的电气距离从远到近。

四种情形得到的优化结果如表 1 所示。容易得知 S1 中的连续最优解即是原混合整数规划问题解的下界，通过解耦动态规划法离散优化后的解则是上界，原问题的最优解一定存在于上界与下界之间。从表 1 中可以看出，电压调节从高压电站到低压电站，无功平衡从低压电站到高压电站的优化顺序 S4 既符合实际的控制规律，所得到的解又非常接近原问题下界（松弛间隙仅为 0.9%），可以将其近似作为原问题的离散最优解。

表 1 不同优化顺序结果对比

Table 1 Comparison of the results for different optimization orders

优化顺序	目标函数值	网络损耗 MW.h	逆调压跟踪率均值	离散设备动作成本
S1(连续)	8.167	97.39	99.10%	43.27
S2	8.854	108.46	99.20	53.89
S3	8.465	109.05	99.26%	51.89
S4	8.240	108.20	99.14%	44.89

3.2 解耦动态规划与优化归整方法对比分析

为验证所提出的解耦协调混合动态规划方法的计算效果，本文将与文献[9]中的优化归整方法进行对比分析。采用不同优化方法所得到的优化结果如表 2 所示。

表 2 不同方法优化结果对比

260

Table 2 Comparison of optimization results for different methods

优化方法	计算时间 min	目标函数值	电压幅值 越线次数	网络损耗 MW.h	逆调压跟踪 率均值	离散设备动 作成本
解耦动态规划法	5.46	8.240	0	108.20	99.14%	44.89
优化归整方法	4.53	12.19	3	109.03	98.89%	70.83

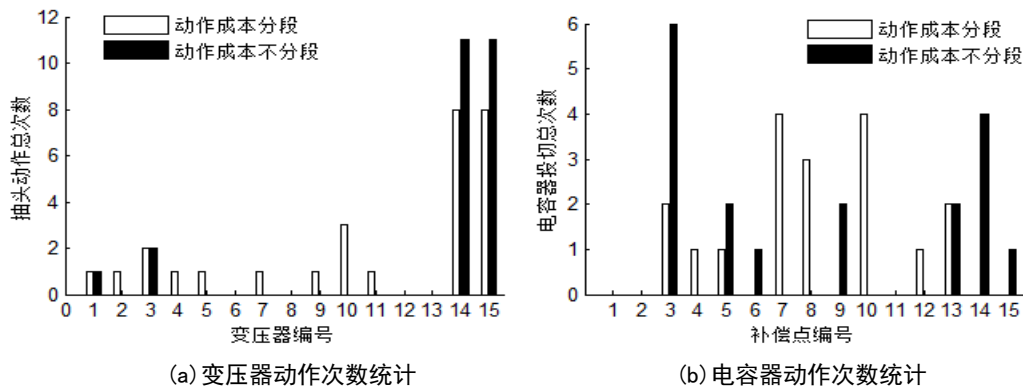
265

从表中可以看出，采用优化归整方法虽然能够在较短的时间内得到混合整数解，但由于变量规整的依据是距离原连续最优解的欧式距离之和最小，没有考虑离散控制变量的变化对原优化问题目标函数值以及状态变量的影响，最终导致在降低网络损耗、提高电压控制母线逆调压跟踪率均值以及降低离散设备动作成本三个方面都不容乐观，部分节点电压在一些时刻甚至还出现了幅值约束越限的情况。由此可以看出，采用本文所提出的解耦协调混合动态规划方法能够在满足网络安全约束的前提下，协调降低网路损耗、提高电压控制母线逆调压跟踪率并减少设备动作次数。

3.3 是否考虑设备动作成本分段特性对比分析

270

为比较考虑和不考虑设备动作成本分段特性的影响，本算例首先通过调整目标函数中权重系数 α 和成本系数 ω 的大小，使得两种情况下的网络损耗、控制母线逆调压跟踪率以及变压器分接头动作次数之和，补偿电容器投切次数之和都对应相近。在此基础上对离散设备动作情况进行了对比分析。考虑和不考虑设备动作成本分段特性两种情况下的各变压器和电容器的动作次数情况如图 6 所示。



275

图 6 设备动作次数统计

Fig.6 Statistics of equipment action times

从上图可以看出，一个周期内所有设备的动作次数总和基本相等，但是当不考虑离散设备动作成本分段特性时，220kV 电站的 14 和 15 号变压器分接头位置变动非常频繁，3 号补偿点电容投切总次数也较多，这三台设备的动作总次数都远远超过了限制参考值，这将严重影响设备的使用寿命。

280

当考虑了动作成本分段特性以后，如果离散设备动作次数超过限制参考值，其单次动作成本将大大增加。由于设备超过限制参考值动作带来的收益不能够大于陡增的动作成本，所以动作次数都被限制了参考范围以内。为了保证电网的安全性和经济性，此时就需要有更多的设备参与电压调节和无功平衡。因此，通过考虑离散设备动作次数分段特性，可以充分利

285 用分区中离散控制设备的电压调节能力和无功平衡能力,在满足整个配电网电压安全约束的前提下,协调降低网络损耗和提高供电质量,并确保设备动作总次数不过多超过参考值,以及尽量减少动作次数,在一定程度上保证各离散控制设备使用寿命。

4 结论

290 本文所构建的动态无功优化模型,通过在目标函数中考虑离散设备动作成本分段特性,使得在动态无功优化过程中可以充分利用控制设备的电压调节能力和无功平衡能力,实现尽量减少动作次数和保证各设备动作总次数尽量不越限的目标。

为高效求解动态无功优化模型,本文提出了一种解耦协调混合动态规划方法,通过连续非线性优化、空间和设备的解耦协调以及控制设备动作成本预测矫正的方式降低了动态规划的搜索空间,保证所得结果的可行性和最优性。

295 基于某控制分区实际数据的仿真分析表明,本文提出的配电网动态无功优化改进模型能够反应实际的运行需求,所提出的求解方法对求解该混合整数非线性规划问题也具有一定的可操作性。

[参考文献] (References)

- 300 [1] 周任军,段献忠,周晖. 计及调控成本和次数的配电网无功优化策略[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(9):23-28.
- [2] Zhang Y J, Ren Z. Optimal reactive power dispatch considering costs of adjusting the control devices[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20(3):1349-1356.
- 305 [3] 刘明波,朱春明,钱康龄,等. 计及控制设备动作次数约束的动态无功优化算法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(3):34-40.
- [4] 颜伟,田甜,张海兵,等. 考虑相邻时段投切次数约束的动态无功优化启发式策略[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(10):71-75.
- [5] 林少华,吴杰康,莫超,等. 基于二阶锥规划的含分布式电源配电网动态无功分区与优化方法[J]. 电网技术, 2018, 42(1):238-246.
- 310 [6] Farivar M, Low S H. Branch Flow Model: Relaxations and Convexification-Part I[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(3):2554-2564.
- [7] Lu F C, Hsu Y Y. Fuzzy Dynamic Programming Approach To Reactive Power/Voltage Control In A Distribution Substation[J]. IEEE Transactions on Power Systems Pwrs, 1997, 12(2):681 - 688.
- 315 [8] R. H. Liang and C. K. Cheng, "Dispatch of main transformer ULTC and capacitors in a distribution system," IEEE Trans. Power Del., vol. 16, no. 4, pp. 625-630, Oct. 2001.
- [9] 丁涛,郭庆来,柏瑞,等. 松弛 MPEC 和 MIQP 的启发-校正两阶段动态无功优化算法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(13):2100-2107.
- [10] 孙田,邹鹏,杨知方,等. 动态无功优化的多阶段求解方法[J]. 电网技术, 2016, 40(6):1804-1810.
- 320 [11] 颜伟,张海兵,田甜,等. 考虑虚拟电源电压特性的区域电网动态无功优化[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(11):29-32.
- [12] 王开荣. 最优化方法[M]. 北京: 科学出版社, 2012.