

计及控制设备动作次数约束的三阶段动态无功优化算法

章海¹, 姬源¹, 周川梅¹, 陈胜¹, 黄锦波², 郑杰辉², 李志刚²

(1. 贵州电网有限责任公司 电力调度控制中心, 贵州 贵阳 550002; 2. 华南理工大学 电力学院, 广东 广州 510640)

摘要: 为了避免控制设备频繁操作, 动态无功优化模型需考虑无功补偿装置投切开关及变压器抽头的允许动作次数约束。但是, 动态无功优化属于大规模、多时段、强耦合的混合整数非线性规划问题, 对其直接求解是困难的。建立了以有功网损最小为目标函数的动态无功优化模型, 并提出一种实用的三阶段动态无功优化算法, 该算法的核心是一种具有多项式计算复杂度的前推-回推式动态规划算法。将计及控制设备动作次数约束的动态无功优化问题的求解分解为多个时间断面的连续无功优化计算、理想无功补偿装置无功补偿功率曲线和变压器变比曲线的阶梯化以及在确定各个时段的无功补偿容量和变压器变比情况下的连续无功优化计算 3 个阶段。对 IEEE 30 节点系统和某实际区域电网进行测试, 结果验证了所提算法的合理性和实用性。

关键词: 动态无功优化; 动作次数约束; 三阶段算法; 离散化; 混合整数非线性规划; 模型

中图分类号: TM 761

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2018.09.026

0 引言

为了保证电网的安全、经济运行和优质供电, 可以通过对有载调压变压器抽头、无功补偿装置和发电机无功输出的调度, 达到提高电压质量和降低网损的目的, 这是电力系统无功优化的意义^[1-6]。传统的静态无功优化是针对某个时刻的负荷, 一般以有功损耗最小为目标并考虑电压等约束进行一个时间断面的无功优化。但是, 由于一天 24 h 负荷是不断波动的, 简单地进行静态无功优化将可能导致无功补偿设备和变压器抽头的频繁调整和投切, 这会大幅缩短这些控制设备的使用寿命, 在实际运行中是不允许这种情况出现的^[7]。

因此, 需要在无功优化模型中考虑控制设备动作次数约束, 进行动态无功优化。动态无功优化问题是指在网络结构参数、未来一天各负荷母线的有功和无功变化曲线以及有功电源出力给定的情况下, 通过调节发电机和无功补偿设备(主要是并联电容器组)的无功出力以及有载调压变压器的分接头, 在满足各种物理和运行约束的条件下, 使整个电网的全天电能损耗最小^[8]。

在计及控制设备动作次数约束的动态无功优化中, 除了各个时段的无功优化调度存在强耦合之外, 变压器变比和电容器组的无功出力还是离散的, 因此电力系统无功优化调度问题实际上是一个混合整数非线性规划 MINLP (Mix-Integer Non-Linear Programming) 优化问题。严格而言, 这个问题属于一类非确定性多项式 NP (Non-deterministic Polynomial) 难问题^[8-12], 其求解非常困难。虽然动态无功优化问题难以求解, 但是针对单个时间断面进行的静态无功优化是无法满足实际运行需要的, 所以必须进

行动态无功优化, 为网络运行方式的调整提供参考。

对于动态无功优化问题而言, 快速地求出其全局最优解是非常困难的, 目前已经有很多学者在这方面进行了研究。第一类方法是直接将控制设备全天动作次数的约束利用数学不等式表达, 直接采用数学优化方法进行求解^[13]。文献[14]通过对离散变量构造罚函数并将其嵌入非线性原对偶内点法中, 以实现离散变量在优化过程中的逐次归整。第二类方法^[15]是简化动态负荷, 对日负荷曲线进行合理的分段, 令负荷的分段数目等于控制设备动作次数的上限, 然后对每个分段进行简单的静态无功优化, 使动态优化的结果自动满足动态优化的约束条件。这类方法要求无功控制设备的动作具有同时性, 即只能在负荷曲线分段处切换状态, 而且需要人为分段时不便于运行人员进行使用。文献[16]则是依据有功网损曲线并人为给出分段数进行时间段的划分, 然后对每个时间分段进行静态无功优化, 从而将动态无功优化问题解耦成多个静态无功优化问题。而文献[17]认为, 变压器可调抽头和无功补偿装置投切开关的允许操作次数表征的是设备的使用寿命, 本质上是对经济性的考虑, 所以将无功优化设备的动作次数约束转化为经济成本, 构成目标函数的一部分, 进而消除了每个时段之间的耦合约束。第三类方法是将动态无功优化问题分解成多个阶段进行求解。文献[18]提出了一种启发-校正两阶段动态无功优化算法, 该方法没有考虑实际动态无功优化的最优解可能不需要无功控制设备按照其动作次数上限进行调节。文献[19]提出了动态无功优化模型的多阶段求解方法, 将复杂的 MINLP 问题转化为非线性规划和混合整数规划 2 个子问题, 分阶段进行求解。文献[20-21]利用二次锥规划方法将动态无功优化问题简化为凸的二次锥规划模型, 从

而大幅降低了求解的复杂度。此外,还有学者将调节效果最优、调节费用最低和调节设备最少^[22]或调节设备动作次数最少^[23]作为动态无功优化的目标函数,对其进行求解从而达到限制设备调节次数的效果。

综上所述,因为离散控制变量和连续控制变量共同存在,单个时段无功优化的求解也是相当复杂的,如果不考虑其中存在的离散变量问题,静态无功优化问题只是一般的非线性规划问题,可以用内点法进行求解。而相较于静态无功优化,动态无功优化还必须考虑控制设备动作次数约束,由于设备动作次数约束破坏了各个时段的独立性,使各个时段的无功调度和电压控制存在强耦合,令动态无功优化问题的求解非常困难。动态无功优化问题的复杂性和难度集中在如何高效处理离散变量和无功控制设备的动作次数约束 2 个方面,因此迫切需要提出一种快速、有效、实用的方法运用于工程实际中的动态无功优化问题。为此,本文借鉴文献[24]中考虑离散化发电调节约束的在线滚动调度的三阶段算法,并将此算法应用于求解动态无功优化问题,有效地处理离散控制变量和无功控制设备的动作次数约束等问题。

首先,给出静态的无功优化模型和考虑控制设备动作次数约束的动态无功优化模型;然后,详细介绍了三阶段动态无功优化算法,其核心是一种具有多项式计算复杂度的前推-回推式动态无功规划算法;最后,以 IEEE 30 节点系统和某实际区域电网为例,验证了本文所提算法的实用性和正确性。

1 计及控制设备动作次数约束的动态无功优化模型

1.1 静态无功优化模型

建立数学模型是处理优化问题的基础,对于每个单一的时段而言,可以认为其负荷保持不变,所以单一时段内的无功优化就相当于一般意义上的静态无功优化。选取发电机无功出力、无功补偿设备的无功补偿容量、有载调压变压器变比为无功控制手段,以节点电压和松弛节点的有功出力为状态变量,不等式约束包括发电机所发无功、电容器和电抗器无功补偿容量、变压器变比的上限和下限约束等,以此建立的静态无功优化模型具体如下,其中无功补偿容量和变压器变比都是离散变量。

假设系统有 N_B 个节点、 N_T 台有载调压变压器、 N_C 台可调发电机,有 N_C 个节点装设可投切电容器组,全天总时段数为 T 。静态无功优化模型如下:以系统全天有功网损最小为目标函数,如式(1)所示;式(2)和式(3)为功率平衡约束,式(4)和式(5)为状态变量的不等式约束,式(6)—(8)为控制变量的

不等式约束。

$$\min P_{\text{loss}} = \sum_{t=1}^T p_{\text{loss},t} \quad (1)$$

$$\sum_{g \in \Psi_C(i)} P_{Gg,t} - P_{Di,t} - U_{i,t} \sum_{j=1}^{N_B} U_{j,t} (G_{ij} \cos \theta_{ij,t} + B_{ij} \sin \theta_{ij,t}) = 0 \quad i = 1, 2, \dots, N_B \quad (2)$$

$$\sum_{g \in \Psi_C(i)} Q_{Gg,t} - Q_{Di,t} - U_{i,t} \sum_{j=1}^{N_B} U_{j,t} (G_{ij} \sin \theta_{ij,t} - B_{ij} \cos \theta_{ij,t}) + \sum_{c \in \Psi_C(i)} Q_{Cc,t} = 0 \quad i = 1, 2, \dots, N_B \quad (3)$$

$$U_{i,t} \leq U_{i,t} \leq \bar{U}_{i,t} \quad i = 1, 2, \dots, N_B \quad (4)$$

$$P_{Gg,t} \leq P_{Gg,t} \leq \bar{P}_{Gg,t} \quad g = 1, 2, \dots, N_C \quad (5)$$

$$Q_{Gg,t} \leq Q_{Gg,t} \leq \bar{Q}_{Gg,t} \quad g = 1, 2, \dots, N_C \quad (6)$$

$$Q_{Cc,t} \leq Q_{Cc,t} \leq \bar{Q}_{Cc,t} \quad c = 1, 2, \dots, N_C \quad (7)$$

$$k_{Ti,t} \leq k_{Ti,t} \leq \bar{k}_{Ti,t} \quad i = 1, 2, \dots, N_T \quad (8)$$

其中, P_{loss} 为系统全天有功网损; $p_{\text{loss},t}$ 为时段 t 系统的有功网损; $P_{Gg,t}$ 和 $Q_{Gg,t}$ 分别为时段 t 机组 g 的有功和无功出力; $\Psi_C(i)$ 为连接在节点 i 的发电机组集合; $P_{Di,t}$ 和 $Q_{Di,t}$ 分别为时段 t 节点 i 的有功和无功负荷; $Q_{Cc,t}$ 为时段 t 可投切电容器组 c 的注入无功功率; $\Psi_C(i)$ 为连接在节点 i 的可投切电容器组集合; $U_{i,t}$ 为时段 t 节点 i 的电压幅值; $\theta_{ij,t}$ 为时段 t 线路 $i-j$ 首末两端电压的相角差; G_{ij} 和 B_{ij} 分别为节点导纳矩阵中第 i 行第 j 列的电导和电纳值; $\underline{U}_{i,t}$ 和 $\bar{U}_{i,t}$ 分别为时段 t 节点 i 电压幅值的最小值和最大值; $\underline{P}_{Gg,t}$ 和 $\bar{P}_{Gg,t}$ 分别为时段 t 机组 g 有功出力的最小值和最大值; $\underline{Q}_{Gg,t}$ 和 $\bar{Q}_{Gg,t}$ 分别为时段 t 机组 g 无功出力的最小和最大值; $\underline{Q}_{Cc,t}$ 和 $\bar{Q}_{Cc,t}$ 分别为时段 t 可投切电容器组 c 补偿无功的最小值和最大值; $k_{Ti,t}$ 为时段 t 第 i 台有载调压变压器的变比; $\underline{k}_{Ti,t}$ 和 $\bar{k}_{Ti,t}$ 分别为时段 t 第 i 台有载调压变压器变比的最小值和最大值。

1.2 动态无功优化模型

动态无功优化的目标函数为一天多个时段的有功网损之和最小,同式(1);约束条件除了各个时段系统自身的运行约束(式(2)—(8))之外,还要考虑无功调节设备的最大调节次数约束,假设实际系统中可投切电容器组 c 在一天内允许的最大投切次数为 M_{Cc}^{adj} ($c = 1, 2, \dots, N_C$),第 i 台有载调压变压器分接头档位在一天内允许的最大调节次数为 M_{Ti}^{adj} ($i = 1, 2, \dots, N_T$)。需要注意的是,若某个时段投切 n 组电容器或调节 n 档变压器分接头,本文中只记为动作 1 次。

$$\sum_{t=1}^T u_{Cc,t} \leq M_{Cc}^{\text{adj}} \quad c = 1, 2, \dots, N_C \quad (9)$$

$$\sum_{t=1}^T u_{Ti,t} \leq M_{Ti}^{\text{adj}} \quad i = 1, 2, \dots, N_T \quad (10)$$

式(9)和式(10)分别为电容器组和变压器分接头调节最大次数约束,其中, $u_{C_c,t}$ 和 $u_{T_i,t}$ 为0-1决策变量,分别描述第 c 台可投切电容器组和第 i 台有载调压变压器在时段 t 的动作状态,为1表示动作,为0表示未动作。

2 三阶段动态无功优化算法

严格而言,动态无功优化问题属于一类NP难问题,其求解非常困难。如何快速求解动态无功优化问题,获得一个相对满意的次优解,在实际工程应用中则显得更有价值。为此,本文提出一种三阶段算法,将动态无功优化问题分解成3个阶段进行求解。下文将对该算法进行详细的说明。

2.1 阶段1:不考虑调节约束的静态无功优化

在阶段1不考虑可投切电容器组和有载调压变压器的调节次数约束,将可投切电容器组数、有载调压变压器分接头档位等离散变量松弛为连续变量,这样在此阶段的无功优化问题只是一个非线性规划问题,可借助一些成熟的算法进行求解,如内点法。

求解全天多个时间断面的无功优化问题,得到系统在不考虑设备调节次数约束的情况下理想的可投切电容器组无功补偿容量曲线 $Q_{C_c}^*$ 和理想的有载调压变压器变比曲线 $k_{T_i}^*$ 。

2.2 阶段2:阶段化理想曲线

在阶段2,将理想的曲线 Y^* (理想的可投切电容器组无功补偿容量曲线 $Q_{C_c}^*$ 和理想的有载调压变压器变比曲线 $k_{T_i}^*$)阶梯化,得到相对应的阶梯曲线 \tilde{Y} (包括可投切电容器组无功补偿容量阶梯曲线 \tilde{Q}_{C_c} 和有载调压变压器变比阶梯曲线 \tilde{k}_{T_i}),使其满足控制设备调节次数约束。由于理想曲线体现了最优性,所以每条阶梯曲线 \tilde{Y} 越接近 Y^* ,表明系统无功优化调度计划越接近于最优运行状态。

将一条理想曲线 Y^* 记为点列 $Y^* = \{y_1^*, y_2^*, \dots, y_T^*\}$,同时将各个时段记为下标集 $I_0 = \{0, 1, \dots, T\}$,需要说明的是,下标集中的时段0是为了确定离散变量的初始量。将控制设备的调节次数上限记为 M^{adj} 。

阶梯化理想曲线可以看作是用一个含有 $M^{\text{adj}}+1$ 个分段的阶梯曲线函数 $\tilde{Y} = \{\tilde{y}_1, \tilde{y}_2, \dots, \tilde{y}_{M^{\text{adj}}+1}\}$ 来对理想曲线 Y^* 进行最小二乘拟合,而且 \tilde{Y} 要满足相对应变量的上下限约束。这个问题可以描述为一个优化问题,决策变量为阶梯曲线各分段首端点的下标集 $I = \{i_1, i_2, \dots, i_{M^{\text{adj}}}\}$ 和各个分段内的变量值 $\tilde{Y}^I = \{\tilde{y}_1^I, \tilde{y}_2^I, \dots, \tilde{y}_{M^{\text{adj}}+1}^I\}$,如式(11)所示。

$$\begin{cases} \min_{I, \tilde{Y}^I} \sum_{j=1}^{i_1-1} (y_0 - y_j^*)^2 + \sum_{m=1}^{M^{\text{adj}}} \sum_{k=i_m}^{i_{m+1}-1} (\tilde{y}_m^I - y_k^*)^2 \\ \text{s.t. } (I, \tilde{Y}^I) \in S \\ i_{M^{\text{adj}}+1} = T \end{cases} \quad (11)$$

其中, y_0 为变量在初始时段($t=0$)的值,为一个给定的数值; S 为满足变量上下限约束的可行集合。

对于优化问题式(11),可以采用一种前推-回推式动态规划算法进行求解。

假设阶梯曲线中某个分段的首、末端分别为 a 、 b ,定义该分段与理想曲线 Y^* 对应子段的最小欧氏距离为:

$$d(a, b) = \min_{\underline{Y} \leq y \leq \bar{Y}} \left\{ \sum_{i=a}^b (y - y_i^*)^2 \right\} \quad (12)$$

其中, \underline{Y} 和 \bar{Y} 分别为理想曲线 Y^* 对应变量的下限和上限值。

可以得到:

$$d(a, b) = \sum_{i=a}^b (\bar{y}_{a,b} - y_i^*)^2 \quad (13)$$

$$\bar{y}_{a,b} = \begin{cases} y_0 & a = 0 \\ \min \left\{ \max \left\{ \frac{1}{b-a+1} \sum_{i=a}^b y_i^*, \underline{Y} \right\}, \bar{Y} \right\} & 1 \leq a \leq b \leq T \end{cases} \quad (14)$$

其中, $\bar{y}_{a,b}$ 为理想曲线 Y^* 在 $[a, b]$ 上的平均值(当 $a \geq 2$ 时)或者等于初始时段的值 y_0 。

式(12)~(14)在变量是连续的情况下才成立,如果考虑可投切电容器组数和有载调压变压器分接头档位是离散变量的情况,需要对上述公式进行修改。

假设离散变量值为 Δ^{disc} 的整数倍,那么有:

$$d(a, b) = \min_{\underline{Y} \leq y = \underline{Y} + n\Delta^{\text{disc}} \leq \bar{Y}, n \in \mathbf{Z}} \left\{ \sum_{i=a}^b (y - y_i^*)^2 \right\} = \sum_{i=a}^b (\hat{y}_{a,b} - y_i^*)^2 \quad (15)$$

其中, \mathbf{Z} 为整数集; $\hat{y}_{a,b}$ 为辅助变量,可由式(16)计算得到。

如果 $\bar{y}_{a,b}$ 能整除 Δ^{disc} ,则 $\hat{y}_{a,b} = \bar{y}_{a,b}$;否则,假设 $\bar{n}\Delta^{\text{disc}} \leq \bar{y}_{a,b} \leq (\bar{n}+1)\Delta^{\text{disc}}$, $\bar{n} \in \mathbf{Z}$,则根据二次函数的性质有式(16)成立。

$$\hat{y}_{a,b} = \begin{cases} \bar{n}\Delta^{\text{disc}} & \bar{y}_{a,b} \leq (\bar{n}+0.5)\Delta^{\text{disc}} \\ (\bar{n}+1)\Delta^{\text{disc}} & \text{其他} \end{cases} \quad (16)$$

当第 m 个分段的首端点为 $i_m = k$ 时,记第 $m-1$ 到 M^{adj} 个分段与理想曲线 Y^* 的欧氏距离之和的最小值为 $f(m, k)$,即:

$$f(m, k) = \min_{i_m = k \leq i_{m+1} \leq \dots \leq i_{M^{\text{adj}}+1} = T} \left\{ \sum_{l=m}^{M^{\text{adj}}} d(i_l, i_{l+1} - 1) \right\} \quad (17)$$

根据贝尔曼最优性原理,有:

$$f(m, k) = \min_{k \leq i_{m+1} \leq T} \{ d(k, i_{m+1} - 1) + f(m+1, i_{m+1}) \} = d(k, i_{m+1}^* - 1) + f(m+1, i_{m+1}^*) \quad (18)$$

求解式(11)所示的优化问题与计算 $f(0, 1)$ 是等价的。记 $\text{nex}(m, k) = i_{m+1}^*$,那么阶梯化理想曲线

的前推-回推式算法的步骤如下。

- a. 对所有的 $0 \leq a \leq b \leq T$, 计算 $d(a, b)$ 。
- b. 令 $f(M^{\text{adj}}, k) = d(k, T)$ ($k = 1, 2, \dots, T$)。
- c. 令 $m = M^{\text{adj}} - 1$ 。
- d. 遍历 $k = 0, 1, \dots, T$, 计算式 (19)。

$$\begin{cases} f(m, k) = \min_{k \leq j \leq T} \{d(k, j-1) + f(m+1, j)\} \\ \text{next}(m, k) = \operatorname{argmin}_{k \leq j \leq T} \{d(k, j-1) + f(m+1, j)\} \end{cases} \quad (19)$$

e. 若 $m = 1$, 执行步骤 f; 否则, 令 $m = m - 1$, 并执行步骤 d。

f. 计算式 (20)。

$$\begin{cases} f(0, 1) = \min_{0 \leq j \leq T} \{d(0, j-1) + f(1, j)\} \\ \text{next}(0, 1) = \operatorname{argmin}_{1 \leq j \leq T} \{d(0, j-1) + f(1, j)\} \end{cases} \quad (20)$$

g. 令 $i_1 = \text{next}(0, 1)$; 遍历 $m = 2, 3, \dots, M^{\text{adj}}$, 令 $i_m = \text{next}(m-1, i_{m-1})$, 则 $I^* = \{i_1^*, i_2^*, \dots, i_{M^{\text{adj}}}^*\}$ 为最优下标集, 该下标集定义了一个最优分段。

h. 遍历 $m = 1, 2, \dots, M^{\text{adj}}$, 计算最优分段下第 m 个分段的最优出力, 即:

$$\tilde{y}_m = \hat{y}_{i_m, i_{m+1}-1} \quad (21)$$

上述算法中的步骤 d—f 属于回推过程, 步骤 g 和 h 为前推过程。容易得知该算法的计算复杂度为 $O(M^{\text{adj}} T^2)$, 属于多项式复杂度算法。该算法的计算效率高且易于实现, 能够快速实现理想的可投切电容器组无功补偿容量曲线和理想的有载调压变压器变比曲线的阶梯化, 具有工程实用性。

2.3 阶段 3: 分配失配功率

对理想的可投切电容器组无功补偿容量曲线和理想的有载调压变压器变比曲线进行阶梯化, 会破坏原有的潮流约束, 产生失配功率, 所以, 需要在已知的可投切电容器组无功补偿容量和有载调压变压器变比的情况下, 求解式 (22) 所示优化模型, 得到最终的发电机有功和无功出力值。

$$\begin{cases} \min \sum_{t=1}^T P_{\text{loss}, t} \\ \text{s.t.} \sum_{g \in \Psi_G(t)} P_{Gg, t} - P_{Dl, t} - U_{i, t} \sum_{j=1}^{N_B} U_{j, t} (G_{ij} \cos \theta_{ij, t} + B_{ij} \sin \theta_{ij, t}) = 0 \quad i = 1, 2, \dots, N_B \\ \sum_{g \in \Psi_G(t)} Q_{Gg, t} - Q_{Dl, t} - U_{i, t} \sum_{j=1}^{N_B} U_{j, t} (G_{ij} \sin \theta_{ij, t} - B_{ij} \cos \theta_{ij, t}) + \sum_{c \in \Psi_C(t)} Q_{Cc, t} = 0 \quad i = 1, 2, \dots, N_B \\ U_{i, t} \leq U_{i, t} \leq \bar{U}_{i, t} \quad i = 1, 2, \dots, N_B \\ P_{Gg, t} \leq P_{Gg, t} \leq \bar{P}_{Gg, t} \quad g = 1, 2, \dots, N_G \\ Q_{Gg, t} \leq Q_{Gg, t} \leq \bar{Q}_{Gg, t} \quad g = 1, 2, \dots, N_G \\ Q_{Cc, t} = \tilde{Q}_{Cc, t} \quad c = 1, 2, \dots, N_C \\ k_{Ti, t} = \tilde{k}_{Ti, t} \quad i = 1, 2, \dots, N_T \end{cases} \quad (22)$$

其中, $\tilde{Q}_{Cc, t}$ 为阶梯化后可投切电容器组 c 的无功补偿功率值; $\tilde{k}_{Ti, t}$ 为阶梯化后第 i 台有载调压变压器的变比值。

该优化模型是一个非线性规划模型, 可以采用阶段 1 的求解方法进行求解。

本文所提三阶段算法的具体求解流程图如图 1 所示。

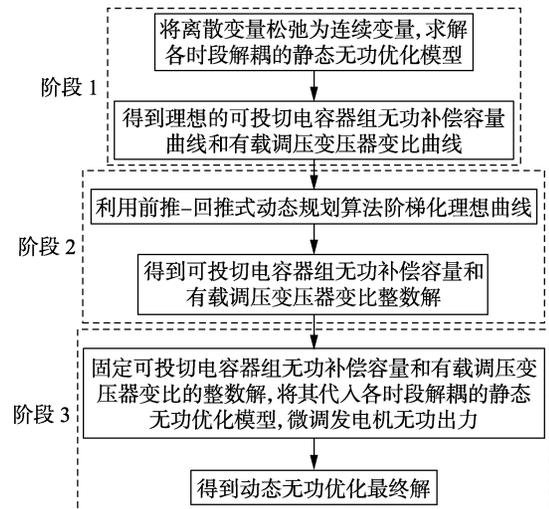


图 1 求解动态无功优化的三阶段算法流程

Fig.1 Flowchart of three-stage algorithm for solving dynamic reactive power optimization

3 算例分析

利用 Visual C++9.0 编程, 在主频为 3.1 GHz、内存为 4 GB 的计算机上对算例进行仿真实验。阶段 1 和阶段 3 的模型都是非线性规划模型, 可以直接调用 IPOPT 求解器^[25]进行求解。

3.1 IEEE 30 节点系统算例

首先以 IEEE 30 节点测试系统为例, 该系统有 4 条变压器支路、6 台发电机和 6 个无功补偿节点, 因此可以采用无功调节设备(投切电容器)、有载调压变压器和调节发电机无功出力 3 种方式实施无功调节, 从而达到降低网损的目的。其中有载调压变压器和电容器的参数分别如表 1 和表 2 所示(表 2 中容量上、下限和分级步长均为标么值)。

对某典型负荷曲线, 以一个断面的负荷值为基准值, 将各个时段的负荷预测量折算成基准值的比例, 可得到 00:00—24:00(分为 24 个时段, 各时段时

表 1 IEEE 30 节点系统中有载调压变压器参数

Table 1 Parameters of on-load tap changing transformers in IEEE 30-bus system

变压器编号	首端节点	末端节点	变比下限	变比上限	分级步长
1	6	9	0.9	1.1	0.012 5
2	6	10	0.9	1.1	0.012 5
3	4	12	0.9	1.1	0.012 5
4	28	27	0.9	1.1	0.012 5

表 2 IEEE 30 节点系统中电容器参数

Table 2 Parameters of capacitors in IEEE 30-bus system

电容器编号	所在节点	容量下限	容量上限	分级步长	档数
1	2	-0.06	0.24	0.06	5
2	4	-0.06	0.24	0.06	5
3	12	-0.06	0.24	0.06	5
4	18	-0.06	0.24	0.06	5
5	20	-0.06	0.24	0.06	5
6	24	-0.06	0.24	0.06	5

长 1 h) 的负荷比例因子如图 2 所示。

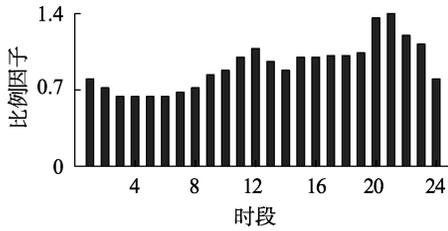


图 2 典型日负荷曲线

Fig.2 Typical daily load curve

首先,不考虑无功调节设备,只通过调节发电机无功出力 and 变压器变比(连续),计算 24 个时段的无功优化,系统总的网损为 33.54 MW,共耗时 2.8 s,结果如表 3 所示。

表 3 不同情景下无功优化结果对比

Table 3 Comparison of reactive power optimization results under different scenes

情景	网损/MW	计算时间/s	最大误差/%
静态无功优化 (无无功调节设备)	33.54	2.8	—
静态无功优化 (连续变量)	28.27	2.9	—
动态无功优化	28.94	5.0	2.3

采用本文所提方法,首先在阶段 1 将离散变量松弛为连续变量,不考虑无功调节设备和变压器分接头调节次数限制,进行 24 个时段的静态无功优化,得到系统总的网损为 28.27 MW,计算时间为 2.9 s。在阶段 1 得到的理想的变压器变比曲线和理想的无功调节设备无功补偿容量曲线分别如图 3、图 4 所示。然后在阶段 2 进行阶梯化理想曲线。规定无功调节设备和变压器分接头每天的最大调节次数为 4 次,假设在 00:00 时刻,变压器的初始变比值为 1,无功调节设备的初始无功补偿容量为 0。可以得到离散化后的变压器分接头调节和无功调节设备投切结果,分别如图 3、图 4 所示。固定离散变量的结果后,将其代入动态无功优化模型,进行阶段 3 的求解,重新校正连续变量(发电机有功和无功出力)的优化量。得到最终发电机无功出力如图 5 所示。阶段 3 的动态无功优化计算耗时 5.0 s,最终的网损为 28.94 MW,而实际的最优值应该介于 28.27~28.94 MW,因此,本文所提三阶段算法的最大误差率为 2.3%。

3.2 某实际区域电网算例

在本节利用本文所提三阶段动态无功优化算法对某实际区域电网进行仿真验证,其中某实际区域电网的参数如表 4 所示,发电机总容量为 23 647 MW,某时刻总负荷为 21 704 MW。该系统典型日的负荷曲线(标么值)如图 6 所示。

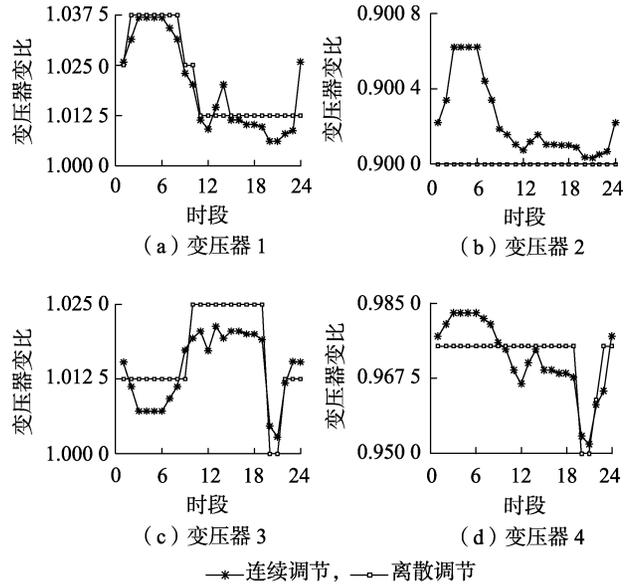


图 3 变压器变比的离散化结果

Fig.3 Discretization result of ratios of transformers

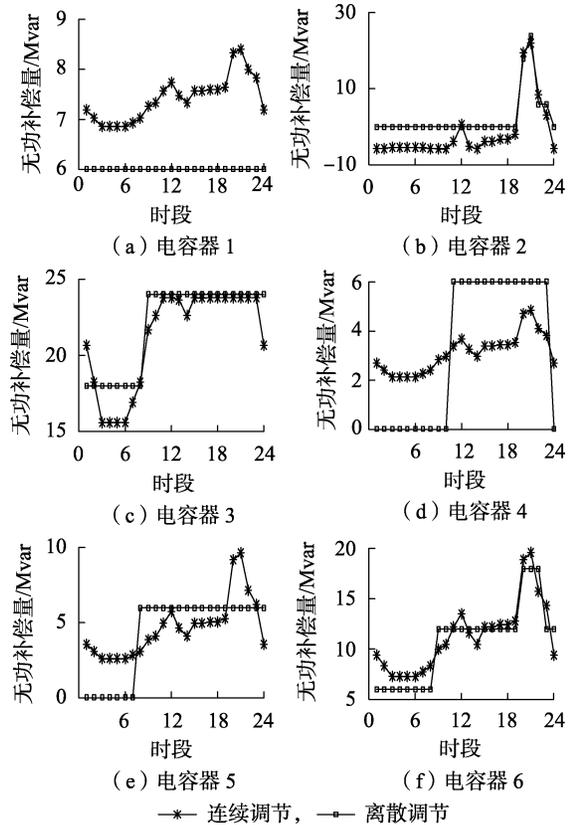


图 4 无功补偿量的离散化结果

Fig.4 Discretization result of reactive power compensation capacity

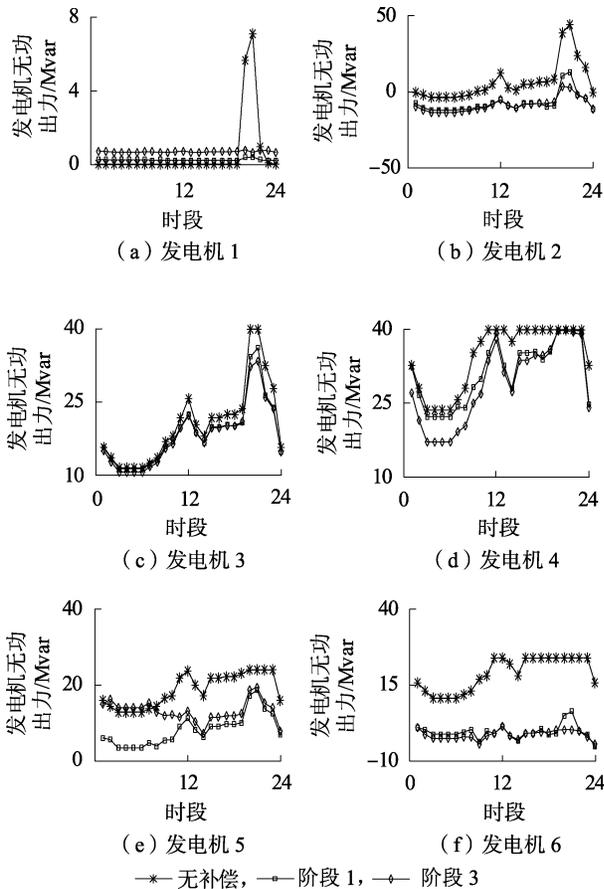


图 5 发电机的无功出力

Fig.5 Reactive power output of generators

表 4 某实际区域电网参数

Table 4 Parameters of an actual regional power grid

参数	数值	参数	数值
节点数目	1 209	变压器支路数目	896
支路数目	1 563	无功调节节点数目	135
发电机数目	95		

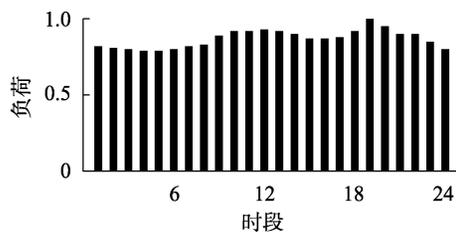


图 6 实际系统日负荷曲线

Fig.6 Daily load curve of an actual power grid

综合考虑系统运行的安全性与经济性的要求,将无功调节设备和变压器分接头每天的最大调节次数设为 8 次。利用本文所提算法计算一天 24 个时段的动态无功优化,结果如表 5 所示。可以看出,考虑无功调节设备的无功补偿时,系统有功网损更小。

由表 5 可以看出,对于实际系统而言,本文所提三阶段动态无功优化算法可以在满足控制设备动作次数约束的情况下,快速地求解无功优化问题。结果显示,某实际区域电网的动态无功优化结果与实

表 5 某实际区域电网在不同情景下无功优化结果对比
Table 5 Comparison of reactive power optimization results under different scenes for an actual regional power grid

情景	网损/MW	计算时间/s	最大误差/%
静态无功优化 (无功调节设备)	4 767.524	70.9	—
静态无功优化 (连续变量)	4 213.358	73.4	—
动态无功优化	4 452.442	89.3	5.7

际精确解之间的最大误差为 5.7%,验证了本文所提算法的正确性和适用性。

4 结论

为了高效地求解动态无功优化这一大规模、多时段、强耦合的非线性混合整数规划问题,本文提出了三阶段动态无功优化求解方法,将计及控制设备动作次数约束的动态无功优化问题的求解分解为多个时间断面的连续无功优化计算,理想的无功调节设备无功补偿容量曲线和变压器变比曲线的阶梯化以及在确定各个时段的无功补偿容量和变压器变比情况下的连续无功优化计算 3 个阶段。对 IEEE 30 节点系统和某实际区域电网进行测试分析,测试算例结果表明,本文所提算法能够在短时间内获得满足控制设备动作次数约束的次优解,验证了所提算法具备计算速度快、处理约束有效、优化效果好的特点,具有工程实用性。

参考文献:

- [1] EL-KADY M A, BELL B D, CARVALHO V F, et al. Assessment of real-time optimal voltage control[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1986, 1(2): 98-105.
- [2] QIU J, SHAHIDEHPOUR S M. A new approach for minimizing power losses and improving voltage profile[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1987, 2(2): 287-295.
- [3] 杨培宏, 刘连光, 刘春明, 等. 基于粒子群优化算法的电网 GIC-Q 多目标优化策略[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(3): 93-99. YANG Peihong, LIU Lianguang, LIU Chunming, et al. Multi-objective optimization strategy based on PSO algorithm for GIC-Q of power grid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(3): 93-99.
- [4] 黄小庆, 阮驰骋, 邹佳芯, 等. 考虑电网特性的动态无功优化配置方法[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(9): 127-133. HUANG Xiaqing, RUAN Chicheng, ZOU Jiaxin, et al. Optimal dynamic var configuration considering grid characteristics[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(9): 127-133.
- [5] 刘丽军, 李捷, 蔡金锭. 基于强引导粒子群与混沌优化的电力系统无功优化[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(4): 71-75. LIU Lijun, LI Jie, CAI Jinding. Reactive power optimization based on induction-enhanced particle swarm optimization and chaos search[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(4): 71-75.
- [6] 石韦, 韦化, 白晓清. 含离散变量的大规模电力系统无功优化[J]. 电力自动化设备, 2007, 27(3): 41-45. SHI Wei, WEI Hua, BAI Xiaqing. Reactive power optimization in large-scale power systems with discrete variables[J]. Electric

- Power Automation Equipment, 2007, 27(3):41-45.
- [7] 季玉琦, 耿光飞, 温渤婴, 等. 基于最优分割法的含 DG 配电网动态无功优化[J]. 电网技术, 2017, 41(8):2585-2592.
JI Yuqi, GENG Guangfei, WEN Boying, et al. Dynamic reactive power optimization in distribution network with DG based on optimal partition[J]. Power System Technology, 2017, 41(8):2585-2592.
- [8] 刘明波, 谢敏, 赵维星. 大电网最优潮流计算[M]. 北京: 科学出版社, 2010:378.
- [9] 李滨, 韦化, 李佩杰. 电力系统无功优化的内点非线性互补约束算法[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(2):53-58.
LI Bin, WEI Hua, LI Peijie. Interior-point nonlinear algorithm with complementarity constraints for reactive-power optimization[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(2):53-58.
- [10] 唐剑东, 熊信银, 吴耀武, 等. 基于改进 PSO 算法的电力系统无功优化[J]. 电力自动化设备, 2004, 24(7):81-84.
TANG Jiandong, XIONG Xinyin, WU Yaowu, et al. Power system reactive optimization based on modified particle swarm optimization algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24(7):81-84.
- [11] 张步涵, 杨超, 陶芬. 基于两层遗传算法的多时段无功优化方法[J]. 电力自动化设备, 2008, 28(3):36-40.
ZHANG Buhuan, YANG Chao, TAO Fen. Multi-period reactive power optimization based on two-layer genetic algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2008, 28(3):36-40.
- [12] 沈茂亚, 丁晓群, 王宽, 等. 自适应免疫粒子群算法在动态无功优化中应用[J]. 电力自动化设备, 2007, 27(1):31-35.
SHEN Maoya, DING Xiaojun, WANG Kuan, et al. Application of adaptive immune PSO in dynamic reactive power optimization[J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27(1):31-35.
- [13] LIU M, CANIZARES C A, HUANG W. Reactive power and voltage control in distribution system with limited switching operations[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2009, 24(2):889-899.
- [14] 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.
LIU Mingbo, ZHU Chunming, QIAN Kangling, et al. Dynamic reactive power optimization algorithm incorporating action number constraints of control devices[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(3):34-40.
- [15] 邓佑满, 张伯明, 田田. 虚拟负荷法及其在配电网动态优化中的应用[J]. 中国电机工程学报, 1996, 16(4):241-244.
DENG Youman, ZHANG Boming, TIAN Tian. A fictitious load algorithm and its applications to distribution network dynamic optimizations[J]. Proceedings of the CSEE, 1996, 16(4):241-244.
- [16] 吴文传, 张伯明. 能量损耗最小的无功补偿动态优化算法研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(4):68-73.
WU Wenchuan, ZHANG Boming. Study on the algorithm of dynamic reactive power optimization for minimal energy loss[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(4):68-73.
- [17] 张勇军, 俞悦, 任震, 等. 实时环境下动态无功优化建模研究[J]. 电网技术, 2004, 28(12):12-15.
ZHANG Yongjun, YU Yue, REN Zhen, et al. Research on dynamic modeling for reactive power optimization under real-time circumstance[J]. Power System Technology, 2004, 28(12):12-15.
- [18] 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.
DING Tao, GUO Qinglai, BAI Rui, et al. Two-stage heuristic-correction for dynamic reactive power optimization based on relaxation-MPEC and MIQP[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(13):2100-2107.
- [19] 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.
SUN Tian, ZOU Peng, YANG Zhifang, et al. A multi-stage solution approach for dynamic reactive power optimization[J]. Power System Technology, 2016, 40(6):1804-1810.
- [20] 赖晓文, 马晓伟, 白杨, 等. 基于混合整数二阶锥规划的动态无功优化方法[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(17):37-42.
LAI Xiaowen, MA Xiaowei, BAI Yang, et al. Dynamic reactive power optimization method based on mixed integer second-order cone programming[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(17):37-42.
- [21] 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.
LIN Shaohua, WU Jiekang, MO Chao, et al. Dynamic partition and optimization method for reactive power of distribution networks with distributed generation based on second-order cone programming[J]. Power System Technology, 2018, 42(1):238-246.
- [22] 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.
ZHOU Renjun, DUAN Xianzhong, ZHOU Hui. A strategy of reactive power optimization for distribution system considering control action cost and times[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(9):23-28.
- [23] 周鑫, 诸弘安, 马爱军. 基于多种群蚁群算法的多目标动态无功优化[J]. 电网技术, 2012, 36(7):231-236.
ZHOU Xin, ZHU Hongan, MA Aijun. Multi-objective dynamic reactive power optimization based on multi-population ant colony algorithm[J]. Power System Technology, 2012, 36(7):231-236.
- [24] 李志刚, 吴文传, 张伯明, 等. 计及风电考虑离散化发电调节约束的在线滚动调度方法[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(10):36-42.
LI Zhigang, WU Wenchuan, ZHANG Boming, et al. A look-ahead generation dispatch method considering discrete generation regulation constraints with large-scale wind power integration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(10):36-42.
- [25] IPOPT homepage[EB/OL]. [2018-06-29]. <https://projects.coinor.org/Ipopt>.

作者简介:



覃海

覃海(1985—),女,贵州都匀人,高级工程师,主要研究方向为电力系统自动电压控制与运行;

姬源(1979—),男,贵州开阳人,高级工程师,主要研究方向为电力系统自动化、智能电网;

周川梅(1978—),女,重庆人,高级工程师,主要研究方向为电网无功电压计算;

陈胜(1986—),男,贵州六盘水人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统及其自动化;

黄锦波(1994—),男,广东茂名,人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统优化运行与控制;

郑杰辉(1990—),男,广东茂名,人,博士,主要研究方向为电力系统优化调度与运行决策;

李志刚(1988—),男,广东广州人,副教授,博士,主要研究方向为电力系统运行与优化调度(E-mail: lizjlg6@scut.edu.cn)。

Three-stage dynamic reactive power optimization algorithm considering constraints of control device action times

QIN Hai¹,JI Yuan¹,ZHOU Chuanmei¹,CHEN Sheng¹,HUANG Jinbo²,ZHENG Jiehui²,LI Zhigang²

(1. Power Dispatch and Control Center, Guizhou Power Grid Co., Ltd., Guiyang 550002, China;

2. School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: In order to avoid the frequent operation of control devices, the allowable action time constraints of fling-cut switches of reactive power compensation devices and transformer tapping should be considered in the DRPO (Dynamic Reactive Power Optimization) model. However, DRPO is a large-scale, multi-period and strong coupling mixed integer nonlinear programming problem which is difficult to be solved directly. Therefore, the DRPO model is established with the minimum active power loss as its objective, and a practical three-stage DRPO algorithm is proposed, whose core is a forward-backward-pass dynamic programming approach with polynomial computational complexity. The solution of the proposed DRPO problem is divided into three stages, namely the continuous reactive power optimization calculation in multiple time sections, the stepwise approximation of the ideal reactive power compensation curves of reactive power compensation devices and ratio curves of transformers, and the continuous reactive power optimization calculation under the determined reactive power compensation capacity and transformer ratio in each period. The IEEE 30-bus system and an actual regional power grid are tested, and the results verify the effectiveness and applicability of the proposed algorithm.

Key words: dynamic reactive power optimization; constraint of action time; three-stage algorithm; discretization; mixed integer nonlinear programming; models