

协调电压控制问题的准稳态模型及其间接动态优化算法

周荣林, 刘明波

(华南理工大学电力学院, 广东 广州 510640)

摘要: 针对长期电压稳定具有慢动态的特点, 在准稳态假设的基础上, 建立含连续-离散时间微分-代数方程约束的最优协调电压控制模型。并采用现代最优控制理论中的间接法求解该动态优化问题, 根据 Pontryagin 最大值原理建立一阶最优性条件, 将动态优化问题转化为两点边值问题, 采用多重打靶法求解。此外, 为考虑有载调压变压器变比、可投切电容器组和待切除负荷的离散特性, 还在控制模型中引入了离散变量的罚函数处理机制。从新英格兰 10 机 39 节点系统的仿真结果可看出, 所提出方法能有效地协调各种控制设备动作, 从而增强系统的长期电压稳定性。

关键词: 长期电压稳定; 协调电压控制; 动态优化; 间接法; 离散控制

Quasi-steady-state model of coordinated voltage control problem and its indirect dynamic optimization algorithm

ZHOU Rong-lin, LIU Ming-bo

(Electric Power College, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: Long-term voltage stability has slow dynamic characteristics, and hence an optimal coordinated voltage control model including continuous and discrete time differential-algebraic equations is established based on the quasi-steady-state approximation. The indirect method from modern optimal control theory can be adopted to solve this dynamic optimization problem. According to Pontryagin maximum value principle, this dynamic optimization problem is converted to a two-point boundary-value problem through establishing the first order optimality condition, which can be solved by the multiple shooting method. In order to consider discrete characteristics of transformer tap control, capacitor switching and load shedding, a penalty function mechanism for handling discrete controls is incorporated to this control model. The simulation results on New England 10-machine 39-bus system demonstrate that the proposed method can coordinate dissimilar control actions effectively and enhance long-term voltage stability in power systems.

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (50777021).

Key words: long-term voltage stability; coordinated voltage control; dynamic optimization; indirect method; discrete control

中图分类号: TM712 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)01-0006-08

0 引言

电压控制问题通常分为三个层次^[1,2]: 一次电压控制, 二次电压控制和三次电压控制。二次电压控制通过改变区域内各发电机自动电压调节器(AVR)的电压设定值, 以维持主导节点电压在预先设定的值。二次电压控制也能够以更慢的速度对变电站内的有载调压变压器和电容器组进行控制。在紧急情况下, 在变电站内切除负荷也可作为一种有效地阻止电压崩溃的手段。研究表明, 二次电压控制可增加系统电压稳定裕度, 可延缓系统电压的失稳过程,

从而给系统运行调度人员留有充分时间采取进一步措施制止系统发生电压失稳。然而, 当系统处于紧急状态时, 二次电压控制并不能保证阻止电压崩溃。因此, 以电力系统动态模型为基础, 进一步探讨协调的二次电压控制问题以阻止系统发生电压崩溃是十分必要的。这个问题本身具有高度的复杂性和非线性, 并且大多数控制具有内在的离散性质, 如有载调压变压器和电容器组通常都是按照一个固定的步长切换, 切除负荷经常是借助断开某些馈线来实现的。

在现有的文献中, 很多考虑控制系统动态的控制策略仅仅是针对单一的控制行为而设计的^[3-5], 如单独考虑控制发电机自动电压调节、有载调压变

基金项目: 国家自然科学基金项目(50777021)

器分接头调节、电容器组投切、负荷切除等。很少方法考虑了这些控制行为在紧急情况下的协调控制, 也很少考虑控制的离散特性。文献[6]定义从当前运行点到分岔边界的最小距离相对于控制参数的灵敏度为最优控制方向, 将协调各种具有不同的响应时间和动态特性的控制动作这样一个混合电压控制问题转化为多阶段约束优化模型, 再应用微动态规划方法求解。文献[7]在文献[6]的基础上, 应用轨迹灵敏度方法确定各个控制动作序列的最优切换时间, 从而弥补了文献[6]得到的静态结果的不足。文献[8]根据当前状态和所设计的控制动作, 应用模型预测控制方法预测系统未来的变化轨迹, 将确定最优控制动作问题转化为一个组合优化问题, 再用树搜索法求解。文献[9]在文献[8]的基础上, 提出了降低搜索树规模及计算复杂性的改进方法。文献[10]用伪梯度进化规划技术替代树搜索法求解复杂优化问题, 选择最优控制动作。

本文根据准稳态假设建立了含连续-离散时间的微分-代数方程约束的最优协调电压控制模型, 并采用现代控制理论中的间接法求解该动态优化问题。并以新英格兰 10 机 39 节点试验系统的计算结果来验证其正确性和有效性。

1 长期电压稳定仿真的系统模型

针对长期电压稳定具有慢动态的特点, 根据准稳态假设, 通过求取系统动态发展过程中的一系列暂态平衡点, 从而实现长期动态仿真, 在计算精度和计算效率之间达到一个良好的平衡, 这是较为现实的做法^[1, 11~13]。

1.1 发电机模型

考虑到在临界电压失稳过程中, 系统中相当一部分发电机的励磁绕组及励磁机的励磁绕组处于深度饱和状态, 一些发电机的过励限制和定子过流限制保护装置将动作, 同时, AVR 也将发生作用。因此, 需要考虑发电机的如下特性: 发电机励磁绕组和励磁机励磁绕组的饱和、过励限制、定子过流限制、AVR。

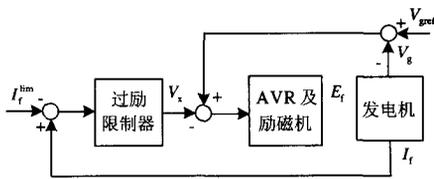


图 1 发电机励磁系统

Fig.1 Generator excitation system

a) 发电机的饱和情况用如下方程描述:

$$E_q - \{1 + m[(V_g + X_l I_q)^2 + (X_l I_p)^2]^n\} E_q^s = 0 \quad (1)$$

b) 采用如图 1 所示的发电机励磁系统。

若发电机过励限制装置没有动作, 采用以下方程:

$$E_q (K_L + S_E) - K_A (V_{gref} - V_g) = 0 \quad (2)$$

若发电机过励限制装置动作, 方程为:

$$E_q - \frac{K_A}{K_L + S_E + K_A K_P} (V_{gref} - V_g) - \frac{K_A K_P}{K_L + S_E + K_A K_P} E_q^{lim} = 0 \quad (3)$$

若定子过流限制装置动作, 还需要增加如下方程:

$$I_p^2 + I_q^2 - (I_{max})^2 = 0 \quad (4)$$

c) 频率控制:

$$P_g - P_0 + \frac{1}{R} (\omega_{sys} - \omega_0) = 0 \quad (5)$$

以上各式中, E_q^s 为空载电势 E_q 的饱和值; m 、 n 为正实数; I_p 、 I_q 分别为发电机的有功、无功电流; K_L 为励磁机的自并励系数; S_E 为励磁机的饱和系数; K_A 为 AVR 的放大倍数; V_{gref} 为 AVR 的电压参考值; K_P 为过励限制器的比例系数; R 为调速器调节系数; P_g 、 P_0 分别为发电机的实际有功功率和系统额定角频率下的有功功率; ω_{sys} 为系统角频率; ω_0 为系统额定角频率。

1.2 负荷模型

采用自恢复负荷的乘法模型描述负荷的动态特性为:

$$\begin{cases} T_p \dot{z}_p = (\frac{V}{V_0})^{\alpha_p} - z_p (\frac{V}{V_0})^{\alpha_p} \\ T_q \dot{z}_q = (\frac{V}{V_0})^{\alpha_q} - z_q (\frac{V}{V_0})^{\alpha_q} \end{cases} \quad (6)$$

负荷消耗的功率为:

$$\begin{cases} P_l = z_p P_0 (\frac{V}{V_0})^{\alpha_p} \\ Q_l = z_q Q_0 (\frac{V}{V_0})^{\alpha_q} \end{cases} \quad (7)$$

负荷切除用变量 k_l ($k_l \leq 1$) 模拟, 这样, 实际消耗的有功负荷 P_l 和无功负荷 Q_l 分别为:

$$\begin{cases} P_l = k_l P_l \\ Q_l = k_l Q_l \end{cases} \quad (8)$$

其中: z_p 、 z_q 为与负荷动态特性有关的无量纲的状

态变量; T_p 、 T_q 分别为有功、无功负荷的恢复时间常数; α_s 、 α_l 、 β_s 、 β_l 分别为有功和无功的静态和暂态电压特性指数。

1.3 系统准稳态模型

因此, 可用如下具有连续-离散时间的微分-代数方程组表示电力系统的动态过程:

$$0 = \mathbf{f}(\mathbf{x}(t), \mathbf{y}(t), \mathbf{z}_c(t), \mathbf{z}_d(t), \mathbf{u}(t)) \quad (9)$$

$$0 = \mathbf{g}(\mathbf{x}(t), \mathbf{y}(t), \mathbf{z}_c(t), \mathbf{z}_d(t), \mathbf{u}(t)) \quad (10)$$

$$\dot{\mathbf{z}}_c = \mathbf{h}_c(\mathbf{x}(t), \mathbf{y}(t), \mathbf{z}_c(t), \mathbf{z}_d(t), \mathbf{u}(t)) \quad (11)$$

$$\mathbf{z}_d(t_k^+) = \mathbf{h}_d(\mathbf{x}(t), \mathbf{y}(t), \mathbf{z}_c(t), \mathbf{z}_d(t_k^-), \mathbf{u}(t)) \quad (12)$$

其中: \mathbf{x} 为暂态变量列向量, 与发电机转子运动、AVR、励磁系统等相关; \mathbf{y} 为由节点电压幅值和相角代数变量构成的列向量; \mathbf{z}_c 为连续状态变量列向量, 与负荷自动恢复过程相关; \mathbf{z}_d 为离散状态变量列向量, 与发电机过励限制及定子过流限制相关; \mathbf{u} 为由各种不同的控制变量构成的列向量, 如发电机 AVR 的电压设定值、可投切电容器组的无功出力、有载调压变压器的变比、待切除负荷的有功和无功功率, 后三者均取离散值。在这个准稳态模型中, 方程(9)用来表示发电机转子运动、AVR 及励磁系统等的平衡方程; 方程(10)代表网络方程; 方程(11)描述慢速变化的连续动态过程, 如负荷自恢复过程; 方程(12)描述慢速变化的离散动态过程, 如发电机过励限制及定子过流限制动作。

2 最优协调电压控制模型

当系统受到扰动处于电压紧急状态时, 可以通过协调各种控制设备动作, 如改变发电机 AVR 的电压设定值、投切电容器组、调节有载调压变压器的分接头、甚至切除负荷, 以增强电力系统的长期电压稳定性。结合准稳态模型(9)~(12), 将协调电压控制问题表示为下述的最优控制模型:

$$\min J = \int_{t_0}^{t_f} [\Delta \mathbf{V}^T(t) \mathbf{Q} \Delta \mathbf{V}(t) + \mathbf{u}^T(t) \mathbf{R} \mathbf{u}(t)] dt \quad (13)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} 0 = \mathbf{f}(\mathbf{x}(t), \mathbf{y}(t), \mathbf{z}_c(t), \mathbf{z}_d(t), \mathbf{u}(t)) \\ 0 = \mathbf{g}(\mathbf{x}(t), \mathbf{y}(t), \mathbf{z}_c(t), \mathbf{z}_d(t), \mathbf{u}(t)) \\ \dot{\mathbf{z}}_c = \mathbf{h}_c(\mathbf{x}(t), \mathbf{y}(t), \mathbf{z}_c(t), \mathbf{z}_d(t), \mathbf{u}(t)) \\ \mathbf{z}_d(t_k^+) = \mathbf{h}_d(\mathbf{x}(t), \mathbf{y}(t), \mathbf{z}_c(t), \mathbf{z}_d(t_k^-), \mathbf{u}(t)) \\ \mathbf{u}_{\min} \leq \mathbf{u}(t) \leq \mathbf{u}_{\max} \end{cases} \quad (14)$$

其中: t_0 为故障发生时刻; t_f 为最终时间; $\Delta \mathbf{V}$ 为负荷节点电压偏离正常值的偏差列向量; \mathbf{u} 与式(9)~(12)中的定义一致; \mathbf{Q} 和 \mathbf{R} 为对角加权矩阵; J 为目标函数, 由负荷节点电压偏差和控制变量定义。

在研究时间区间 $[t_0, t_f]$ 内, 长期电压稳定的动态过程包括了由离散变量 \mathbf{z}_d 引发的若干次跳变。以

\mathbf{z}_d 的一次跳变为例, 定义:

$$\mathbf{Y}(t) = \begin{bmatrix} \mathbf{x}(t) \\ \mathbf{y}(t) \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{H}(\mathbf{Y}(t), \mathbf{z}_c(t), \mathbf{u}(t)) = \begin{bmatrix} \mathbf{f}(\mathbf{Y}(t), \mathbf{z}_c(t), \mathbf{u}(t)) \\ \mathbf{g}(\mathbf{Y}(t), \mathbf{z}_c(t), \mathbf{u}(t)) \end{bmatrix}$$

则电力系统准稳态近似模型可以转化为:

$$\begin{cases} 0 = \mathbf{H}_1(\mathbf{Y}(t), \mathbf{z}_c(t), \mathbf{u}(t)) \\ \dot{\mathbf{z}}_c = \mathbf{h}_{c1}(\mathbf{Y}(t), \mathbf{z}_c(t), \mathbf{u}(t)) \end{cases} \quad t \in [t_0, t_d] \quad (15)$$

$$\begin{cases} 0 = \mathbf{H}_2(\mathbf{Y}(t), \mathbf{z}_c(t), \mathbf{u}(t)) \\ \dot{\mathbf{z}}_c = \mathbf{h}_{c2}(\mathbf{Y}(t), \mathbf{z}_c(t), \mathbf{u}(t)) \end{cases} \quad t \in [t_d, t_f] \quad (16)$$

相应的最优协调电压控制模型可以写成:

$$\min J = \int_{t_0}^{t_f} [\Delta \mathbf{V}^T(t) \mathbf{Q} \Delta \mathbf{V}(t) + \mathbf{u}^T(t) \mathbf{R} \mathbf{u}(t)] dt \quad (17)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} 0 = \mathbf{H}_1(\mathbf{Y}(t), \mathbf{z}_c(t), \mathbf{u}(t)) \\ \dot{\mathbf{z}}_c = \mathbf{h}_{c1}(\mathbf{Y}(t), \mathbf{z}_c(t), \mathbf{u}(t)) \end{cases} \quad t \in [t_0, t_d] \\ \begin{cases} 0 = \mathbf{H}_2(\mathbf{Y}(t), \mathbf{z}_c(t), \mathbf{u}(t)) \\ \dot{\mathbf{z}}_c = \mathbf{h}_{c2}(\mathbf{Y}(t), \mathbf{z}_c(t), \mathbf{u}(t)) \end{cases} \quad t \in [t_d, t_f] \\ \mathbf{u}_{\min} \leq \mathbf{u}(t) \leq \mathbf{u}_{\max} \end{cases} \quad (18)$$

为计及有载调压变压器变比、可投切电容器组出力和待切除负荷功率的离散特性, 引入文献[14]提出的正曲率二次罚函数来处理这些离散变量, 如图 2 所示。 $\phi(u_b)$ 为二次罚函数, u_b 为离散变量。假设每一个离散变量的分级步长是均匀的, 则 u_{b0} 、 u_{b1} 、 u_{b2} 是 u_b 的离散取值中任意 3 个相邻值。

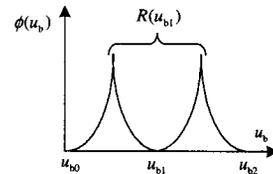


图 2 二次罚函数模型

Fig.2 Quadratic penalty function model

定义某离散取值 u_{b1} 的邻域 $R(u_{b1})$ 为如下区间:

$$R(u_{b1}) = \{u_b \mid u_{b1} - \frac{1}{2}S \leq u_b \leq u_{b1} + \frac{1}{2}S\} \quad (19)$$

式中: S 是离散变量 u_b 的分级步长; u_{b1} 为其邻域中心。

在优化过程中, 当 u_b 的值处于上述定义的邻域内时, 则应迫使其向邻域中心靠拢。由此可在该邻域内引入如下的二次罚函数:

$$\phi(u_b) = \frac{1}{2} u_b (u_b - u_{b1})^2 \quad (20)$$

式中: u_b 为罚因子, 这里所定义的 u_b 的邻域中心在优化过程中是动态变化的, 根据离散变量实际得到的值, 求出最为靠近的离散分级值即可获得。

将针对离散变量引入的罚函数增广到式(17)的目标函数中, 可得到:

$$J = \int_{t_0}^{t_f} [\Delta V^T(t) Q \Delta V(t) + \mathbf{u}^T(t) \mathbf{R} \mathbf{u}(t) + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^p v_i (u_i - u_{bi})^2] dt \quad (21)$$

式中: v_i 为罚因子, u_{bi} 为邻域中心。

将最优控制模型(21)和(18)转化为两点边值问题后, 在采用多重打靶法求解时, 把相邻两次迭代离散变量的变化小于其分级步长的 1/4 作为引入二次罚函数的条件。

3 最优协调电压控制问题的求解

3.1 基本原理

协调电压控制是一个复杂的动态优化问题, 我们采用间接法(或称变分法)求解该最优控制问题。其基本思路是: 根据 Pontryagin 最大值原理建立一阶最优性条件, 将动态优化问题转化为两点边值问题, 再用多重打靶法(multiple shooting method)求解两点边值问题^[15]。

多重打靶法的基本思想是: 将时间区间 $[t_0, t_f]$ 分为 M 段, $t_0 < t_1 < t_2 < \dots < t_M = t_f$, 对节点 t_i ($i = 0, 1, 2, \dots, M-1$) 处的值作初始估计, 然后在每个小时间段 $[t_i, t_{i+1}]$ 上求解初值问题, 得到该时间段末端的值, 并通过满足节点处的匹配条件, 使初始值在迭代过程中不断得到改善, 最终获得原问题的近似最优解。

根据泛函的无条件极值定理, 引入待定的拉格朗日乘子 $\lambda_1(t)$ 、 $\lambda_2(t)$ 、 $\varsigma_1(t)$ 、 $\varsigma_2(t)$, 将式(18)的等式约束和原有的性能指标泛函 J 结合成一个与 J 等价的新的泛函^[15-17]:

$$J_1 = \int_{t_0}^{t_d} [\lambda_1^T(t)(\mathbf{h}_{c1} - \dot{\mathbf{z}}_c) + \varsigma_1^T(t) \mathbf{H}_1 + L] dt + \int_{t_d}^{t_f} [\lambda_2^T(t)(\mathbf{h}_{c2} - \dot{\mathbf{z}}_c) + \varsigma_2^T(t) \mathbf{H}_2 + L] dt \quad (22)$$

式中:

$$L = \Delta V^T(t) Q \Delta V(t) + \mathbf{u}^T(t) \mathbf{R} \mathbf{u}(t) + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^p v_i (u_i - u_{bi})^2$$

将 J_1 中含有 $\dot{\mathbf{z}}_c$ 的项进行分部积分, 由 λ_1 、 λ_2 的任意性, 选择 $\lambda_1(t_d) = \lambda_2(t_d)$, 则性能指标泛函 J_1 化为:

$$J_1 = \lambda_1^T(t_0) \mathbf{z}_c(t_0) - \lambda_2^T(t_f) \mathbf{z}_c(t_f) + \int_{t_0}^{t_d} [\lambda_1^T(t) \mathbf{h}_{c1} + \dot{\lambda}_1^T(t) \mathbf{z}_c(t) + \varsigma_1^T(t) \mathbf{H}_1 + L] dt + \int_{t_d}^{t_f} [\lambda_2^T(t) \mathbf{h}_{c2} + \dot{\lambda}_2^T(t) \mathbf{z}_c(t) + \varsigma_2^T(t) \mathbf{H}_2 + L] dt \quad (23)$$

由最优控制原理可知, 该泛函取极值的必要条件为变分 $\delta J_1 = 0$ 。通过推导泛函 J_1 的变分, 可得到使 J_1 取极值的一阶最优性条件为:

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{\mathbf{z}}_c = \mathbf{h}_{c1} \\ \dot{\lambda}_1^T = -\lambda_1^T \cdot \frac{\partial \mathbf{h}_{c1}}{\partial \mathbf{z}_c} - \varsigma_1^T \cdot \frac{\partial \mathbf{H}_1}{\partial \mathbf{z}_c} \\ 0 = \mathbf{H}_1 \\ 0 = \lambda_1^T \cdot \frac{\partial \mathbf{h}_{c1}}{\partial \mathbf{Y}} + \varsigma_1^T \cdot \frac{\partial \mathbf{H}_1}{\partial \mathbf{Y}} + \left(\frac{\partial L}{\partial \mathbf{Y}} \right)^T \\ 0 = \lambda_1^T \cdot \frac{\partial \mathbf{h}_{c1}}{\partial \mathbf{u}} + \varsigma_1^T \cdot \frac{\partial \mathbf{H}_1}{\partial \mathbf{u}} + \left(\frac{\partial L}{\partial \mathbf{u}} \right)^T \end{array} \right. \quad t \in [t_0, t_d] \quad (24)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{\mathbf{z}}_c = \mathbf{h}_{c2} \\ \dot{\lambda}_2^T = -\lambda_2^T \cdot \frac{\partial \mathbf{h}_{c2}}{\partial \mathbf{z}_c} - \varsigma_2^T \cdot \frac{\partial \mathbf{H}_2}{\partial \mathbf{z}_c} \\ 0 = \mathbf{H}_2 \\ 0 = \lambda_2^T \cdot \frac{\partial \mathbf{h}_{c2}}{\partial \mathbf{Y}} + \varsigma_2^T \cdot \frac{\partial \mathbf{H}_2}{\partial \mathbf{Y}} + \left(\frac{\partial L}{\partial \mathbf{Y}} \right)^T \\ 0 = \lambda_2^T \cdot \frac{\partial \mathbf{h}_{c2}}{\partial \mathbf{u}} + \varsigma_2^T \cdot \frac{\partial \mathbf{H}_2}{\partial \mathbf{u}} + \left(\frac{\partial L}{\partial \mathbf{u}} \right)^T \end{array} \right. \quad t \in [t_d, t_f]$$

$$\mathbf{z}_c(t_0) = \mathbf{z}_{c0}$$

$$\lambda_2(t_f) = \mathbf{0}$$

这是一个含有微分-代数方程的非线性两点边值问题, 为书写方便, 记:

$$\bar{\mathbf{y}} = \begin{bmatrix} \mathbf{z}_c \\ \lambda \end{bmatrix}; \quad \bar{\mathbf{z}} = \begin{bmatrix} \mathbf{Y} \\ \varsigma \\ \mathbf{u} \end{bmatrix};$$

$$\bar{\mathbf{h}}(t, \bar{\mathbf{y}}, \bar{\mathbf{z}}) = \begin{bmatrix} \mathbf{h}_c \\ (-\lambda^T \cdot \frac{\partial \mathbf{h}_c}{\partial \mathbf{z}_c} - \varsigma^T \cdot \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial \mathbf{z}_c})^T \end{bmatrix};$$

$$\bar{\mathbf{g}}(t, \bar{\mathbf{y}}, \bar{\mathbf{z}}) = \begin{bmatrix} \mathbf{H} \\ [\lambda^T \cdot \frac{\partial \mathbf{h}_c}{\partial \mathbf{Y}} + \varsigma^T \cdot \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial \mathbf{Y}} + \left(\frac{\partial L}{\partial \mathbf{Y}} \right)^T]^T \\ [\lambda^T \cdot \frac{\partial \mathbf{h}_c}{\partial \mathbf{u}} + \varsigma^T \cdot \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial \mathbf{u}} + \left(\frac{\partial L}{\partial \mathbf{u}} \right)^T]^T \end{bmatrix}$$

式中: 当 $t \in [t_0, t_d]$ 时, λ 、 ς 、 \mathbf{h}_c 和 \mathbf{H} 分别代表 λ_1 、 ς_1 、 \mathbf{h}_{c1} 和 \mathbf{H}_1 ; 当 $t \in [t_d, t_f]$ 时, 它们分别代表 λ_2 、 ς_2 、 \mathbf{h}_{c2} 和 \mathbf{H}_2 。

3.2 算法步骤

运用上述算法求解最优控制问题的步骤为:

步骤 1: 初始化: 给定 M 、 t_0 、 t_1 、 \dots 、 t_M , 迭代计数 $k=0$, 最大迭代次数 50 及收敛精度 ε 。

步骤 2: 求解初值问题(26), 计算 $F(\bar{s}^k)$ 。

步骤 3: 如果 $\|F(\bar{s}^k)\| \leq \varepsilon$, 则判断控制变量是否越限: 若都在约束范围内, 则转到步骤 8; 若有控制变量越限, 则令其在界限上取值, 转到步骤 2。否则继续步骤 4。

步骤 4: 判断是否满足离散罚函数引入条件, 若满足, 则确定邻域中心, 引入罚函数, 否则置罚因子为零。

步骤 5: 求雅可比矩阵 $J(\bar{s}^k)$, 计算 $\Delta \bar{s}^k$ 。

步骤 6: 确定 α , 使 $\|F(\bar{s}^k + \alpha \Delta \bar{s}^k)\| < \|F(\bar{s}^k)\|$ 。在计算时, 对 $\alpha=1$ 、 $\alpha=1/2$ 、 $\alpha=1/4$ 、 \dots 逐一进行试验, 一旦 $\|F(\bar{s}^k + \alpha \Delta \bar{s}^k)\| < \|F(\bar{s}^k)\|$, 则选取此时的 α 作为本次迭代的松弛系数。

步骤 7: 修正变量: $\bar{s}^{k+1} = \bar{s}^k + \alpha \Delta \bar{s}^k$, 置 $k = k + 1$, 转到步骤 2。

步骤 8: 判断时间区间 $[t_0, t_f]$ 内是否有不同的过励限制或定子过流限制装置动作: 若没有, 则 \bar{s}^k 为最优解, 结束计算; 若有, 则在设备动作时刻采用相应的过励限制或定子过流限制模型, 转到步骤 2。

4 算例分析

为验证所提方法的正确性和有效性, 本文在如图 3 所示的新英格兰 10 机 39 节点系统上进行了协调电压控制。系统中所有负荷均采用动态负荷模型, 当负荷节点电压低于 0.9 (p.u.) 时, 允许切除负荷。假设: 系统中 10 台发电机的 AVR 电压设定值均可调节, 全部发电机均考虑过励限制和定子过流限制, 最大励磁电压和最大定子电流均为各自额定值的 1.08 倍; 变压器 12-11、12-13 和 19-20 为有载调压变压器, 调节步长为 0.0125; 节点 7、8、15、18 和 21 为无功补偿点, 补偿步长为 0.05; 节点 4、8、15、16 和 20 为负荷切除点, 切除步长为 0.05。当有载调压变压器一次侧电压低于 0.95 时, 闭锁有载调压变压器分接头, 以避免不利调节。目标函数中, 负荷节点电压偏差 ΔV 对应的权系数取为 50; 控制变量 u 对应的权系数取值如下: 发电机 AVR 电压设定值 V_{ref} 、投切电容器组 Q_c 和有载调压变压器变比 n 的权系数均取为 1, 切除负荷 k_l 的权系数取为 50。各控制变量的初值如表 1 所示。

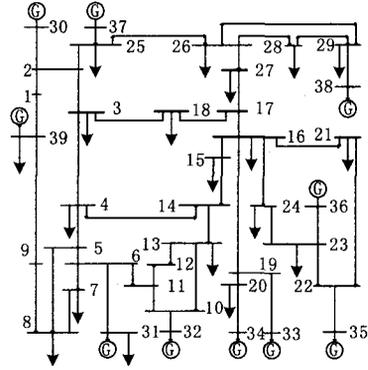


图 3 新英格兰 10 机 39 节点系统
Fig.3 New England 39-bus system

表 1 控制变量初值

Tab.1 Initial values of control variables

控制变量	初值
发电机 AVR 电压设定值	$V_{ref(30)} = 1.048, V_{ref(31)} = 0.982, V_{ref(32)} = 0.983,$
	$V_{ref(33)} = 0.997, V_{ref(34)} = 1.012, V_{ref(35)} = 1.049,$
	$V_{ref(36)} = 1.063, V_{ref(37)} = 1.027, V_{ref(38)} = 1.026,$
	$V_{ref(39)} = 1.03$
有载调压变压器变比	$n_{(12-11)} = 1.006, n_{(12-13)} = 1.006, n_{(19-20)} = 1.06$
可投切电容器组出力	$Q_{C(7)} = 0, Q_{C(8)} = 0, Q_{C(15)} = 0, Q_{C(18)} = 0,$ $Q_{C(21)} = 0$
待切除负荷量	$k_{l(4)} = 1, k_{l(8)} = 1, k_{l(15)} = 1, k_{l(16)} = 1, k_{l(20)} = 1$

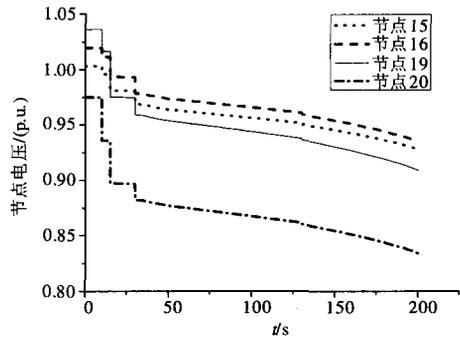


图 4 发生扰动后系统电压响应曲线(算例 1)
Fig.4 Response curve of the system voltage after disturbance (case 1)

算例 1: $t=10$ s 时, 切除发电机 34。发生扰动后, 靠近扰动处的节点 15、16、19 和 20 的电压如图 4 所示, 若不采取任何控制措施, 系统将在 200 s 左右发生电压崩溃。

用所提方法对该系统实施协调电压控制。假设控制在扰动发生后延迟 20 s (即 $t=30$ s 时) 投入, 并在研究时间区间内保持不变。各控制变量的上下限设置如下: 发电机 AVR 电压设定值 V_{ref} 的上下限分别取为 1.1 (p.u.) 和 0.9 (p.u.); 有载调压变压器

12-11 和 12-13 变比 n 的上下限分别取为 1.106 和 0.906, 变压器 19-20 变比 n 的上下限取为 1.16 和 0.96; 每个无功补偿点的最大无功出力为 0.3; 每个负荷切除点的最大切除量为该节点初始负荷的 15%。所求得的控制量如表 2 所示, 系统电压响应曲线如图 5 所示。

表 2 控制动作情况(算例 1)

Tab.2 Control actions (case 1)

控制变量	控制量
发电机 AVR 电压设定值	$V_{ref(30)} = 1.032, V_{ref(31)} = 0.977, V_{ref(32)} = 0.983,$ $V_{ref(33)} = 0.997, V_{ref(35)} = 1.035, V_{ref(36)} = 1.049,$ $V_{ref(37)} = 1.024, V_{ref(38)} = 1.042, V_{ref(39)} = 1.036$
有载调压变压器变比	$n_{(12-11)} = 1.006, n_{(12-13)} = 1.006, n_{(19-20)} = 1.035$
可投切电容器组出力	$Q_{C(7)} = 0.05, Q_{C(8)} = 0.1, Q_{C(15)} = 0.2, Q_{C(18)} = 0.2,$ $Q_{C(21)} = 0.25$
待切除负荷量	$k_{l(4)} = 1, k_{l(8)} = 1, k_{l(15)} = 1, k_{l(16)} = 0.95, k_{l(20)} = 0.9$

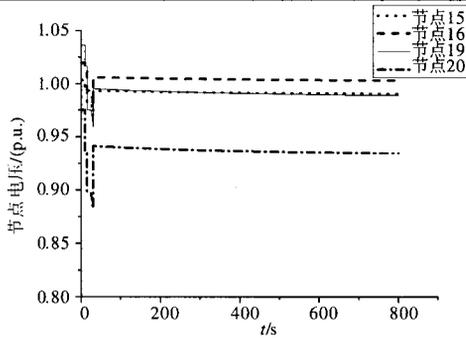


图 5 实施控制后系统电压响应曲线(算例 1)

Fig.5 Response curve of the system voltage after control (case 1)

算例 2: $t=10$ s 时, 节点 8 负荷由 $5.22+j1.76$ (p.u.) 变为 $10.44+j3.52$ (p.u.)。发生扰动后, 靠近扰动处的节点 5、7、8 和 9 的电压如图 6 所示。若不采取任何控制措施, 系统将在 285 s 左右发生电压崩溃。

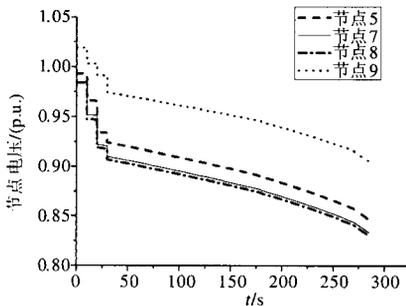


图 6 发生扰动后系统电压响应曲线(算例 2)

Fig.6 Response curve of the system voltage after disturbance(case 2)

实施协调电压控制后, 系统的电压响应曲线如图 7 所示。控制量如表 3 所示。

表 3 控制动作情况(算例 2)

Tab.3 Control actions (case 2)

控制变量	控制量
发电机 AVR 电压设定值	$V_{ref(30)} = 1.048, V_{ref(31)} = 0.982, V_{ref(32)} = 0.962,$ $V_{ref(33)} = 0.967, V_{ref(34)} = 0.995, V_{ref(35)} = 1.024,$ $V_{ref(36)} = 1.036, V_{ref(37)} = 1.011, V_{ref(38)} = 1.051,$ $V_{ref(39)} = 1.027$
有载调压变压器变比	$n_{(12-11)} = 1.031, n_{(12-13)} = 1.031, n_{(19-20)} = 1.0475$
可投切电容器组出力	$Q_{C(7)} = 0.1, Q_{C(8)} = 0.1, Q_{C(15)} = 0.15, Q_{C(18)} = 0.1,$ $Q_{C(21)} = 0.2$
待切除负荷量	$k_{l(4)} = 1, k_{l(8)} = 0.95, k_{l(15)} = 1, k_{l(16)} = 1, k_{l(20)} = 1$

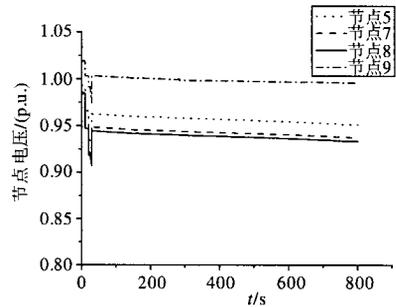


图 7 实施控制后系统电压响应曲线(算例 2)

Fig.7 Response curve of the system voltage after control (case 2)

从计算结果可看出, 实施协调电压控制后, 阻止了系统发生电压崩溃。该控制模型很好地协调了系统各种控制设备动作, 在保证电压水平得以维持的情况下, 使控制设备的控制调整量尽量小。

5 结论

根据本文研究, 我们得出如下结论:

(1) 所提出的最优协调电压控制模型考虑了控制设备在紧急情况下的协调控制以及其离散特性, 反映了电力系统的动态特性, 在保证系统长期电压稳定性的同时尽量减少控制成本。

(2) 间接动态优化算法是求解协调电压控制问题的一种较为有效和精确的方法, 多重打靶法在处理非线性两点边值问题时, 具有良好的稳定性。

(3) 在控制模型中引入离散变量的罚函数处理机制简单而且有效。

参考文献

[1] Cutsem T V, Vournas C. Voltage Stability of Electric Power Systems[M]. Norwell, MA: Kluwer Academic Publishers, 1998.

- [2] Sandro Corsi, Massimo Pozzi, Carlo Sabelli, et al. The Coordinated Automatic Voltage Control of the Italian Transmission Grid-part I: Reasons of the Choice and Overview of the Consolidated Hierarchical System[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2004, 19(4): 1723-1732.
- [3] Vargas L S, Canizares C A. Time Dependence of Controls to Avoid Voltage Vollapse[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2000, 15(4): 1367-1375.
- [4] FENG Zhi-hong, Ajarapu V, Maratukulam D J. A Comprehensive Approach for Preventive and Corrective Control to Mitigate Voltage Collapse[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2000, 15(2): 791-797.
- [5] Vournas C, Karystianos M. Load Tap Changers in Emergency and Preventive Voltage Stability Control[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2004, 19(1): 492-498.
- [6] WU Qiang, Popovic D H, Hill D J, et al. Voltage Security Enhancement Via Coordinated Control[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2001, 16(1): 127-135.
- [7] Popovic D H, Hill D J, WU Qiang. Optimal Voltage Security Control of Power Systems[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2002, 24: 305-320.
- [8] Larsson M, Karlsson D. Coordinated System Protection Scheme Against Voltage Collapse Using Heuristic Search and Predictive Control[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2003, 18(3): 1001-1006.
- [9] Larsson M, Hill D J, Olsson G. Emergency Voltage Control Using Search and Predictive Control[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2002, 24: 121-130.
- [10] Wen J Y, Wu Q H, Turner D R, et al. Optimal Coordinated Voltage Control for Power System Voltage Stability[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2004, 19(2): 1115-1122.
- [11] 周双喜, 朱凌志, 郭锡玖, 等. 电力系统电压稳定性及其控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2003.
ZHOU Shuang-xi, ZHU Ling-zhi, GUO Xi-jiu, et al. Power System Voltage Stability and Its Control[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2003.
- [12] 顾群, 徐泰山, 陈怡, 等. 中期电压稳定的建模和快速仿真[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(21): 25-28.
- GU Qun, XU Tai-shan, CHEN Yi, et al. Modeling and Fast Simulation Method of Mid-term Voltage Stability[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(21): 25-28.
- [13] Vournas C D, Manos G A, Sauer P W, et al. Effect of Overexcitation Limiters on Power System Long-term Modeling[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 1999, 14(4): 1529-1536.
- [14] 赵晋泉, 侯志俭, 吴际舜. 牛顿最优潮流算法中离散控制量的新处理方法[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(23): 37-40.
ZHAO Jin-quan, HOU Zhi-jian, WU Ji-shun. A Novel Quadratic Penalty Function Based Discretization Algorithm for Newton Optimal Power Flow[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(23): 37-40.
- [15] Agrawal S K, Fabien B C. Optimization of Dynamic Systems[M]. Norwell, MA: Kluwer Academic Publishers, 1999.
- [16] 房大中, 孙景强. 基于最优控制原理的暂态稳定预防控制模型[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(1): 18-21.
FANG Da-zhong, SUN Jing-qiang. Transient Stability Preventive Control Model Based on Optimal Control in Power System[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(1): 18-21.
- [17] 张芳, 房大中, 陈家荣, 等. 最优协调电压紧急控制新模型研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(10): 35-41.
ZHANG Fang, FANG Da-zhong, CHEN Jia-rong, et al. Study on Novel Model for Optimal Coordinated Voltage Emergency Control[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(10): 35-41.

收稿日期: 2008-02-29; 修回日期: 2008-03-28

作者简介:

周荣林(1981-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统长期电压稳定性分析与控制; E-mail: ronglinzhou@sohu.com.

刘明波(1964-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统优化、运行与控制。

许继干式变压器在核电领域实现重大市场突破

12月16日, 许继通用销售公司顺利签订广核集团建设的第二核电基地—广东阳江核电站和福建宁德核电项目的干式变压器供货合同。在与ABB、施耐德等国际知名公司的同台竞争中, 许继凭借雄厚的技术实力和强大的市场支持一举拿下了该项目的全部四台机组的干式变压器合同。此次成功中标, 标志着许继干式变压器在核电领域实现了重大市场突破, 不仅为许继树立了良好的品牌形象, 更对干式变压器在核电领域的市场开拓具有开创性的重要意义。