

应用 MPC 和轨迹灵敏度技术实现最优协调电压控制

刘水平, 刘明波, 谢敏

(华南理工大学电力学院, 广东省绿色能源技术重点实验室, 广东 广州 510640)

摘要: 基于模型预测控制的基本思想, 设计了一种紧急电压控制器, 协调各种不同类型和性质的控制手段来维持系统的长期电压稳定性。在预测控制模型的目标函数中, 考虑了控制实施代价和负荷节点电压偏差; 其等式约束条件为连续—离散时间微分—代数方程组。采用混合动力系统的轨迹灵敏度技术先将该模型线性化得到一个二次规划问题, 并采用 Matlab 中的二次规划函数来求解。在 IEEE 50 机 145 节点系统上的仿真结果表明, 所提方法具有数值稳定性好和计算速度快的优点。

关键词: 紧急电压控制器; 长期电压稳定; 模型预测控制; 轨迹灵敏度; 二次规划

Optimal coordinated voltage control using MPC and trajectory sensitivity technique

LIU Shui-ping, LIU Ming-bo, XIE Min

(Guangdong Key Laboratory of Clean Energy Technology, School of Electric Power Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: Based on the basic principle of model predictive control, an emergency voltage controller is designed. This controller can coordinate control means of different types and nature to maintain long-term voltage stability of power systems. In the objective function of this predictive control model, both control cost and voltage deviation at load buses are considered, and its equality constraints are expressed by continuous and discrete time differential-algebraic equations. The trajectory sensitivity technology of hybrid dynamic systems is applied to convert this original model to a quadratic programming problem through linearization, which can be solved by quadratic programming function in Matlab. The simulation results in IEEE 50-machine 145-bus system demonstrate that the proposed method has good numeric stability and fast computational speed.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China(NSFC)(No.50777021 and Mo.50907023).

Key words: emergency voltage controller; long-term voltage stability; model predictive control; trajectory sensitivities; quadratic programming

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2011)01-0001-06

0 引言

模型预测控制可以在各种实际约束条件下通过预测校正、滚动优化、滚动实施获得最佳的控制性能^[1], 但是当系统规模较大、控制的数目较多时, 其计算量巨大限制了模型预测控制 (Model Predictive Control, MPC) 的应用^[2]。因此在应用 MPC 来增强电力系统电压稳定性时, 主要集中在预测电压控制模型的建立和滚动优化求解上。

文献[3]在文献[4]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, 以降低在滚动优化中搜索树的规模和计算的复杂性。这两种方法将不

可避免地会随着控制动作数目和搜索深度的增加呈指数增长, 且不适合求解连续优化问题。文献[5]采用单阶段欧拉状态预测 (Single-stage Euler state predictor) 来预测系统输出, 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。文献[6]以系统载荷裕度最大为预测控制目标, 在滚动优化中采用梯度投影法进行变压器分接头最优调节方案的求解。文献[7-9]采用轨迹灵敏度法 (Trajectory Sensitivity)^[10-11]将电压控制的非线性动态优化问题转化为近似线性的优化问题来求解, 但其控制策略仅仅是针对单一的控制行为而设计的, 如电容器的投切、切负荷等。众多文献在应用 MPC 时, 主要是通过预测模型线性化及降低搜

基金项目: 国家自然科学基金项目 (50777021, 50907023)

索树规模来尽可能减少 MPC 计算的复杂性^[3-9], 从而在充分利用 MPC 的优势时又能改善 MPC 在电压稳定应用过程中的计算复杂性。

本文以准稳态假设为前提, 针对长期电压不稳定场景, 提出了基于轨迹灵敏度的模型预测协调电压控制。由于轨迹灵敏度能明确地反映系统参数变化对系统运行状态的影响^[12-13], 以此可粗选定各类控制变量和获得系统输出变量的运行轨迹, 既可提高各类控制变量的有效性、降低计算量、简化电压最优控制模型, 又提高了其计算效率。文中首先基于准稳态假设建立了综合考虑各类控制措施的实施代价和节点电压预测轨迹相对参考轨迹间的偏差的二次型性能指标最小为模型预测目标函数, 并考虑了控制的离散特性、负荷的内在动态特性及各类控制变量的协调性, 然后依据节点电压对各类控制变量的轨迹灵敏度初步选定各类控制变量, 并将模型预测目标函数简化为以控制变量增量为独立变量的二次规划模型。从而改善了模型预测在长期电压稳定中的实用性。

1 轨迹灵敏度计算

根据准稳态 (Quasi Steady State, QSS) 假设^[14], 可用式 (1) 具有连续-离散时间的微分-代数方程组分析长期电压稳定现象:

$$\begin{cases} 0 = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}_c, \mathbf{z}_d, \mathbf{u}) \\ 0 = \mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}_c, \mathbf{z}_d, \mathbf{u}) \\ \dot{\mathbf{z}}_c = \mathbf{h}_c(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}_c, \mathbf{z}_d, \mathbf{u}) \\ \mathbf{z}_d^+ = \mathbf{h}_d(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}_c, \mathbf{z}_d^-, \mathbf{u}) \end{cases} \quad (1)$$

式中: \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} 为控制变量列向量, 如发电机端电压设定值、可投切电容器组的无功出力、有载调压变压器分接头变比以及可切除负荷的有功和无功功率。在这个准稳态模型中, 式 (1) 中的四组方程分别为描述发电机和励磁调节系统等动态过程微分方程、网络方程、长期动态过程的连续和离散方程。

为了简便, 将式 (1) 写成如式 (2) 紧凑形式:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{z}} = \bar{\mathbf{f}}(\mathbf{z}, \bar{\mathbf{y}}) \\ 0 = \bar{\mathbf{g}}(\mathbf{z}, \bar{\mathbf{y}}) \\ \mathbf{z}^+ = \bar{\mathbf{h}}(\mathbf{z}^-, \bar{\mathbf{y}}^-), \mathbf{s}(\mathbf{z}, \bar{\mathbf{y}}) = 0 \end{cases} \quad (2)$$

且 $\mathbf{z}(t_0) = \mathbf{z}_0$, $\bar{\mathbf{y}}(t_0) = \bar{\mathbf{y}}_0$ 。

其中:

$$\mathbf{z} = \begin{bmatrix} \mathbf{z}_c \\ \mathbf{z}_d \\ \mathbf{u} \end{bmatrix}; \quad \bar{\mathbf{y}} = \begin{bmatrix} \mathbf{x} \\ \mathbf{y} \end{bmatrix}; \quad \bar{\mathbf{g}} = \begin{bmatrix} \mathbf{f} \\ \mathbf{g} \end{bmatrix}; \quad \bar{\mathbf{f}} = \begin{bmatrix} \mathbf{h}_c \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}; \quad \bar{\mathbf{h}} = \begin{bmatrix} \mathbf{z}_c \\ \mathbf{h}_d \\ \mathbf{u} \end{bmatrix};$$

$\mathbf{s}(\mathbf{z}, \bar{\mathbf{y}}) = 0$ 为触发条件超曲面。

将 \mathbf{z} 、 $\bar{\mathbf{y}}$ 分别围绕 $\mathbf{z} = \mathbf{z}_0$ 进行泰勒级数展开, 并忽略二阶及以上高阶项, 可得:

$$\begin{cases} \Delta \mathbf{z}(t) = \frac{\partial \mathbf{z}(t)}{\partial \mathbf{z}_0} (\mathbf{z} - \mathbf{z}_0) = \mathbf{z}_{z_0} \Delta \mathbf{z}_0 \\ \Delta \bar{\mathbf{y}}(t) = \frac{\partial \bar{\mathbf{y}}(t)}{\partial \mathbf{z}_0} (\mathbf{z} - \mathbf{z}_0) = \bar{\mathbf{y}}_{z_0} \Delta \mathbf{z}_0 \end{cases} \quad (3)$$

其中, \mathbf{z}_{z_0} 和 $\bar{\mathbf{y}}_{z_0}$ 即为轨迹灵敏度, 其实质上给出的是由于初始条件的变化而导致运动轨迹变化的一阶逼近^[15]。一旦轨迹灵敏度确定, 那么各种不同类型的控制变量对各节点电压的影响即可知道, 而当系统初始状态或参数的改变量为 $\Delta \mathbf{z}_0$ 时, 系统状态的变化轨迹也能估计得到^[16]。因此, 轨迹灵敏度 \mathbf{z}_{z_0} 和 $\bar{\mathbf{y}}_{z_0}$ 的计算是求取系统状态变化的关键。系统动态特性是否连续, 即是否发生离散事件, 也会导致轨迹灵敏度的求取方法有所不同^[10]。

在初始条件下, \mathbf{z}_{z_0} 和 $\bar{\mathbf{y}}_{z_0}$ 的轨迹灵敏度初值可由式 (2) 得:

$$\begin{cases} \mathbf{z}_{z_0}(t_0) = \mathbf{I} \\ \bar{\mathbf{y}}_{z_0}(t_0) = -[\bar{\mathbf{g}}_{\bar{\mathbf{y}}}(t_0)]^{-1} \bar{\mathbf{g}}_{\mathbf{z}}(t_0) \end{cases} \quad (4)$$

其中, \mathbf{I} 为单位矩阵。

1.1 在连续点的轨迹灵敏度计算

在没有离散事件发生的任意区间 (t_i, t_{i+1}) 内, 式

(2) 关于 \mathbf{z}_0 的导数为:

$$\begin{cases} \frac{\partial \dot{\mathbf{z}}}{\partial \mathbf{z}_0} = \bar{\mathbf{f}}_{\mathbf{z}}(t) \mathbf{z}_{z_0} + \bar{\mathbf{f}}_{\bar{\mathbf{y}}}(t) \bar{\mathbf{y}}_{z_0} \\ 0 = \bar{\mathbf{g}}_{\mathbf{z}}(t) \mathbf{z}_{z_0} + \bar{\mathbf{g}}_{\bar{\mathbf{y}}}(t) \bar{\mathbf{y}}_{z_0} \end{cases} \quad (5)$$

由式 (5) 可得某一连续区间 (t_i, t_{i+1}) 内的任意时刻的轨迹灵敏度:

$$\begin{cases} \bar{\mathbf{y}}_{z_0} = -(\bar{\mathbf{g}}_{\bar{\mathbf{y}}})^{-1} \bar{\mathbf{g}}_{\mathbf{z}} \mathbf{z}_{z_0} \\ \frac{\partial \dot{\mathbf{z}}}{\partial \mathbf{z}_0} = (\bar{\mathbf{f}}_{\mathbf{z}} - \bar{\mathbf{f}}_{\bar{\mathbf{y}}} (\bar{\mathbf{g}}_{\bar{\mathbf{y}}})^{-1} \bar{\mathbf{g}}_{\mathbf{z}}) \mathbf{z}_{z_0} \end{cases} \quad (6)$$

灵敏度初始值 $\mathbf{z}_{z_0}(t_i^+), \bar{\mathbf{y}}_{z_0}(t_i^+)$ 由跃变条件给出。

1.2 跃变时刻的轨迹灵敏度计算

在一个时间段内, 既有离散点又有连续点, 假设轨迹与触发超曲面相交于点 $\mathbf{z}(t_i), \bar{\mathbf{y}}_{z_0}(t_i)$, 相交时间为 t_i , 跃变时刻的灵敏度为:

$$\begin{cases} \mathbf{z}_{z_0}(t_i^+) = \bar{\mathbf{h}}_{\mathbf{z}}^* \mathbf{z}_{z_0}(t_i^-) - (\bar{\mathbf{f}}^+ - \bar{\mathbf{h}}_{\mathbf{z}}^* \bar{\mathbf{f}}^-) t_{iz_0} \\ \bar{\mathbf{y}}_{z_0}(t_i^+) = -[(\bar{\mathbf{g}}_{\bar{\mathbf{y}}}^+)^{-1} \bar{\mathbf{g}}_{\mathbf{z}}^+]_{t_i^+} \mathbf{z}_{z_0}(t_i^+) \end{cases} \quad (7)$$

其中:

$$\begin{cases} \bar{\mathbf{h}}_z^* = (\bar{\mathbf{h}}_z - \bar{\mathbf{h}}_y (\bar{\mathbf{g}}_y)^{-1} \bar{\mathbf{g}}_z^-) |_{t_i^-} \\ t_{i z_0} = - \frac{(s_z - s_y (\bar{\mathbf{g}}_y)^{-1} \bar{\mathbf{g}}_z^-) |_{t_i^-} z_{z_0}(t_i^-)}{(s_z - s_y (\bar{\mathbf{g}}_y)^{-1} \bar{\mathbf{g}}_z^-) |_{t_i^-} \bar{\mathbf{f}}^-} \end{cases}$$

跃变时刻的轨迹灵敏度计算详细步骤可见文献 [10]。

2 MPC 的基本思想与最优协调电压控制模型

MPC 通过在有限的时域里最小化目标函数来计算未来的控制动作序列, 但在每个预测周期只实施控制序列中的第一个控制, 到下一个预测周期重复前面的步骤, 重新计算控制动作序列。MPC 的框架可用图 1 来描述^[2]。

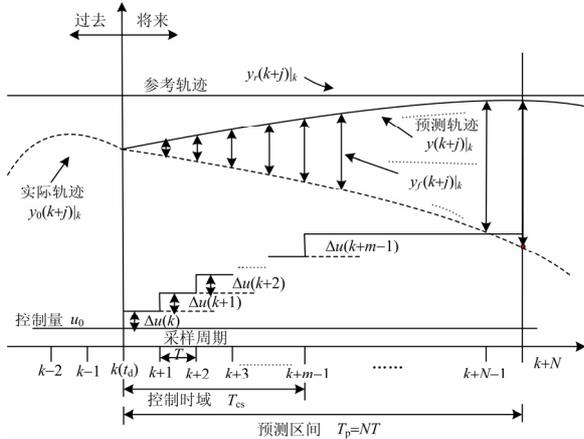


图 1 模型预测控制框架

Fig. 1 Framework of model predictive control

从当前时刻 $k(t_d)$ 开始的预测区间 NT 内, MPC 考虑系统未来 N 步的期望输出与实际输出之差和未来 m 步控制增量的二次型函数作为系统性能指标。非线性 MPC 最优协调电压控制模型描述如下:

$$J = \min_{\Delta U(k)} \left\{ \sum_{j=1}^N (\mathbf{y}(k+j) - \mathbf{y}_r(k+j))^T \mathbf{Q} (\mathbf{y}(k+j) - \mathbf{y}_r(k+j)) + \sum_{j=1}^m (\Delta \mathbf{u}(k+j-1))^T \mathbf{R} (\Delta \mathbf{u}(k+j-1)) \right\} \quad (8)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} 0 = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}_c, \mathbf{z}_d, \mathbf{u}) \\ 0 = \mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}_c, \mathbf{z}_d, \mathbf{u}) \\ \dot{\mathbf{z}}_c = \mathbf{h}_c(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}_c, \mathbf{z}_d, \mathbf{u}) \\ \mathbf{z}_d^+ = \mathbf{h}_d(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}_c, \mathbf{z}_d^-, \mathbf{u}) \\ \mathbf{y}^{\min} \leq \mathbf{y}(k+j)|_k \leq \mathbf{y}^{\max}, j=1, 2, \dots, N \\ \mathbf{u}^{\min} \leq \mathbf{u}(k+j-1)|_k \leq \mathbf{u}^{\max}, j=1, 2, \dots, m \\ \Delta \mathbf{u}^{\min} \leq \Delta \mathbf{u}(k+j-1)|_k \leq \Delta \mathbf{u}^{\max}, j=1, 2, \dots, m \end{cases} \quad (9)$$

其中: N 为预测区域中的采样个数; m 为控制变量

的取样个数; \mathbf{Q} 、 \mathbf{R} 分别为误差和控制对角系数矩阵。

在约束条件式 (9) 下, 对其性能指标极小化, 获得未来控制动作序列, 并将控制动作序列的第一个控制实施 T_{cs} 后重复上述优化过程。

3 将最优协调电压控制模型转化为二次规划问题

参照图 1, 给定参考轨迹 $\mathbf{y}_r(k+j)|_k$, 准稳态仿真获得在系统过去控制量 \mathbf{u}_0 确定下的轨迹 $\mathbf{y}_0(k+j)|_k$ 。基于轨迹灵敏度计算, 求取在各采样点的轨迹灵敏度 $\mathbf{h}_j = \frac{\partial \mathbf{y}_j}{\partial \mathbf{u}}$, 则由比例和叠加性质可得未来各步控制增量 $\Delta \mathbf{u}(k+j-1)$ 所产生的输出增量 $\mathbf{y}_f(k+j)|_k$ 为

$$\begin{bmatrix} \mathbf{y}_f(k+1)|_k \\ \mathbf{y}_f(k+2)|_k \\ \vdots \\ \mathbf{y}_f(k+m)|_k \\ \mathbf{y}_f(k+m+1)|_k \\ \vdots \\ \mathbf{y}_f(k+N)|_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{h}_1 & 0 & \dots & 0 \\ \mathbf{h}_2 & \mathbf{h}_1 & \dots & 0 \\ \vdots & \dots & \dots & 0 \\ \mathbf{h}_m & \dots & \dots & \mathbf{h}_1 \\ \mathbf{h}_{m+1} & \mathbf{h}_m & \dots & \mathbf{h}_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \mathbf{h}_N & \mathbf{h}_{N-1} & \dots & \mathbf{h}_{N-m+1} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{u}(k) \\ \Delta \mathbf{u}(k+1) \\ \vdots \\ \Delta \mathbf{u}(k+m-2) \\ \Delta \mathbf{u}(k+m-1) \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \Delta \mathbf{u}(k) \\ \Delta \mathbf{u}(k+1) \\ \vdots \\ \Delta \mathbf{u}(k+m-2) \\ \Delta \mathbf{u}(k+m-1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_1 \\ \mathbf{A}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{A}_m \\ \mathbf{A}_{m+1} \\ \vdots \\ \mathbf{A}_N \end{bmatrix} \cdot \Delta \mathbf{U}(k) \quad (10)$$

可见, 由未来待优化控制动作序列确定的预测输出轨迹为:

$$\mathbf{y}(k+j)|_k = \mathbf{y}_0(k+j)|_k + \mathbf{y}_f(k+j)|_k \quad (11)$$

将式 (10) 和式 (11) 代入式 (8) 和式 (9) 中, 非线性滚动优化模型式 (8) 和式 (9) 就可以转化为以控制变量增量为独立变量的二次规划模型:

$$J = \min_{\Delta U(k)} \left\{ \sum_{j=1}^N (\mathbf{y}_0(k+j) + \mathbf{y}_f(k+j) - \mathbf{y}_r(k+j))^T \mathbf{Q} (\mathbf{y}_0(k+j) + \mathbf{y}_f(k+j) - \mathbf{y}_r(k+j)) + \sum_{j=1}^m (\Delta \mathbf{u}(k+j-1))^T \mathbf{R} (\Delta \mathbf{u}(k+j-1)) \right\} \quad (12)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} \mathbf{y}_f(k+j)|_k = \mathbf{A}_j \Delta \mathbf{u}(k) \\ \mathbf{u}(k+j)|_k = \mathbf{u}_0 + \sum_{i=1}^{j-1} \Delta \mathbf{u}(k+i-1) \\ \mathbf{y}^{\min} \leq \mathbf{y}_0(k+j)|_k + \mathbf{y}_f(k+j)|_k \leq \mathbf{y}^{\max} \\ \mathbf{u}^{\min} \leq \mathbf{u}(k+j)|_k \leq \mathbf{u}^{\max} \\ \Delta \mathbf{u}(k+j)|_k \leq \Delta \mathbf{u}^{\max} \\ \sum_{i=0}^{i=n_{\text{opt}}-1} \Delta \mathbf{u}(k+i)|_{k+i} \leq \mathbf{u}^{\max} \\ \mathbf{u}(k+j)|_k, \Delta \mathbf{u}(k+j)|_k \in \mathbf{R}^{N_u} \\ \mathbf{y}(k+j)|_k \in \mathbf{R}^{N_y} \\ \mathbf{A}_j \in \mathbf{R}^{N_y \times N_u m} \end{cases} \quad (13)$$

其中： N_u 为各类控制变量的个数； N_y 为被控制量的个数； \mathbf{h}_j 为 $N_y \times N_u$ 的矩阵； $\Delta \mathbf{u}(k)|_{k+i}$ 为第 $k+i$ 次实施优化得到的控制序列 $\Delta \mathbf{u}(k)$ ； n_{opt} 为滚动优化次数。

结合轨迹灵敏度的 MPC 协调电压控制计算步骤如下：

- 1) 初始化。设置故障时间、切除故障时间、模型预测控制等参数及准稳态仿真参数。
- 2) 潮流计算。确定系统的运行状态。
- 3) 准稳态仿真。仿真开始时为 $t=0$ ， $t=t_0$ 时刻投入故障； t_d 为投入控制时刻；由此获得 $t=t_d, t_d+T, \dots, t_d+NT$ 时刻的系统轨迹 $x(j), y(j), z_c(j), z_d(j), u(j)|_{t=t_d}$ ，($j=1, 2, \dots, N$)。
- 4) 利用上述的系统轨迹，按照式 (6) 或式 (7) 获得节点电压幅值在各采样时刻的轨迹灵敏度。
- 5) 按式 (12) 构造的二次规划模型及式 (13) 的约束条件，解该模型得其优化的控制量。二次规划模型的求解现有成熟的商用软件可用，本文利用 Matlab 优化工具箱提供的二次规划 quadprog 函数进行求解。
- 6) 根据上述的优化序列，将其序列中的第一个优化控制量施加到系统中，对系统在 $[t_d, t_d+T_p]$ 内进行准稳态仿真。
- 7) 当经过 n_{opt} 次滚动优化且各节点电压幅值都 ≥ 0.85 时，计算结束；否则系统在准稳态仿真时间 $[t_d, t_d+T_{cs}]$ 后重复步骤 3) ~ 6) 的工作。

4 仿真算例

选择 IEEE 50 机 145 节点系统作为试验系统，该系统包括 50 台发电机、60 个负荷节点、52 台变压器，共 145 个节点。负荷均采用动态负荷恢复模型，参数设置为 $T_p = T_q = 300 \text{ s}$ ； $\alpha_s = \beta_s = 0.5$ 、 $\alpha_t = \beta_t = 2$ 。

全部发电机均考虑过励限制和定子过流限制，最大励磁电流为额定值的 1.05 倍，最大定子电流为额定值的 1.15 倍。由于可选的控制变量较多，为防止过多的控制变量而导致优化过程求解的计算量大幅度增加，可依据电压对各控制变量的轨迹灵敏度筛选出部分控制变量。根据这个思路，选择发电机 93、104、105、106、110 和 111 的 AVR 电压设定值可调；有载调压变压器 7-66、9-69、9-11 和 10-69 的变比可调，步长为 0.006 25，变比上下限取 1.1 p.u. 和 0.9 p.u.；节点 97、119、123、125 和 133 的并联电容器可自动投切，步长为 0.1，最大容量为 0.5；节点 69、92、97、111、119、128 和 131 的负荷可切除，步长 0.05，最多切除 20%，且有功与无功负荷按等比例切除；表 1 列出在 $t_d=47.5 \text{ s}$ 时刻节点 124 电压对 22 个控制变量的灵敏度 h 。上述控制变量的初值见表 2。所有仿真计算在一台配置为 Pentium 双核 CPU 1.60G，1 G 内存的 PC 机上进行。

表 1 $t_d=47.5 \text{ s}$ 时节点 124 的电压对控制变量的灵敏度
Tab.1 Sensitivities of 124 bus voltage with respect to control variables when $t_d=47.5 \text{ s}$

控制变量	灵敏度
V_{gref}	$h_{(93)}=0.0011, h_{(104)}=0.0809, h_{(105)}=0.0329,$ $h_{(106)}=0.0243, h_{(110)}=0.0369, h_{(111)}=0.0084$
n_t	$h_{(7-66)}=0.1938, h_{(9-69)}=0.9485,$ $h_{(9-11)}=1.0795, h_{(10-69)}=0.9485$
Q_C	$h_{(97)}=0.0003, h_{(119)}=0.0002, h_{(123)}=0.0012,$ $h_{(125)}=0.0014, h_{(133)}=0.0007$
k_l	$h_{(69)}=0.0051, h_{(92)}=0.0002, h_{(97)}=0.0054,$ $h_{(111)}=0.0323, h_{(119)}=0.0319, h_{(128)}=0.0372,$ $h_{(131)}=0.0218$

表 2 控制变量初值
Tab.2 Initial values of control variables

控制变量	初值
V_{gref}	$V_{\text{gref}(93)}=1.0082, V_{\text{gref}(104)}=1.0154, V_{\text{gref}(105)}=1.0096,$ $V_{\text{gref}(106)}=1.0067, V_{\text{gref}(110)}=1.0089, V_{\text{gref}(111)}=1.0099$
n_t	$n_{t(7-66)}=0.9716, n_{t(9-69)}=0.9166,$ $n_{t(9-11)}=0.9166, n_{t(10-69)}=0.9166$
Q_C	$Q_{C(97)}=0, Q_{C(119)}=0, Q_{C(123)}=0,$ $Q_{C(125)}=0, Q_{C(133)}=0$
k_l	$k_{l(69)}=0, k_{l(92)}=0, k_{l(97)}=0, k_{l(111)}=0,$ $k_{l(119)}=0, k_{l(128)}=0, k_{l(131)}=0$

作为对比，我们还采用文献[4]中提出的模型预测方法，即 ESP (Euler state prediction) 加树搜索的方法，求解与本文相同的问题。文献[4]将树搜索深度限制为四层。两种方法的滚动优化相关的参数均设置为：控制周期 $T_{cs}=10 \text{ s}$ ，采样周期 $T=2.5 \text{ s}$ ，

预测周期 $T_p = 50$ s, $N = T_p / T = 20$, $m = T_{cs} / T = 4$, $Q = 50I$, $R = 50I$ 。

系统扰动设置为: $t=1$ s 切除发电机 124; $t=5 \sim 10$ s 节点 124 的负荷以每秒 10% 的幅度增加。发生扰动后, 若不采取任何控制措施, 靠近扰动处节点 124 的电压幅值持续缓慢下降, 在 250 s 左右发生崩溃, 如图 2 所示。

两种方法都是在系统监测到节点电压最小值小于 0.85 时, 模型预测控制开始启动, 目标是保证所有节点电压在 0.85 pu 与 1.15 pu 之间。图 3 显示了文献[4]ESP 加树搜索法的控制结果, 其实施了四次滚动优化控制, 最后使节点电压保持在 0.85 pu 与 1.15 pu 之间。

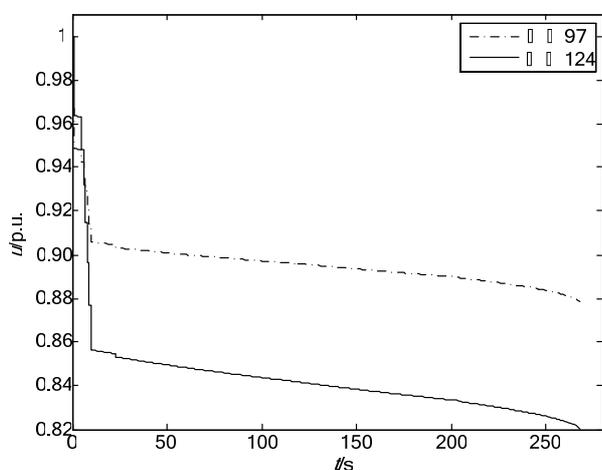


图 2 未加控制时节点 97 和 124 电压

Fig.2 Buses 97 and 124 voltage without any control

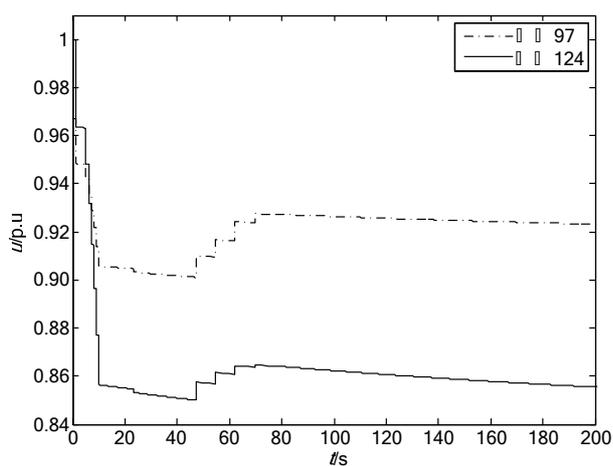


图 3 ESP+树搜索法的节点 97 和 124 电压

Fig.3 97- and 124-bus bus voltage with ESP and tree search

用本文方法实施控制, 如图 4 所示。系统也经

过四次滚动优化, 将表 3 所得四次优化的各控制变量序列 $u(k+i)|_{k+i}$ ($i=0,1,2,3$) 分别在时间 $t=47.5$ s、 $t=57.5$ s、 $t=67.5$ s 和 $t=77.5$ s 实施控制后, 节点 97、124 的电压都稳定在 0.85 pu 与 1.15 pu 之间。

表 3 由四次滚动优化获得控制量

Tab.3 Control quantity obtained from the fourth rolling optimization

控制变量	优化后的值
V_{gref}	$V_{\text{gref}(93)}=1.00132, V_{\text{gref}(104)}=1.0372,$
	$V_{\text{gref}(105)}=1.005741, V_{\text{gref}(106)}=1.003441,$
	$V_{\text{gref}(110)}=0.999841, V_{\text{gref}(111)}=1.009037$
n_t	$n_{t(7-66)}=0.97785, n_{t(9-69)}=0.9041,$
	$n_{t(9-11)}=0.9291, n_{t(10-69)}=0.92285$
Q_C	$Q_C(97)=0.1, Q_C(119)=0.1, Q_C(123)=0.1,$
	$Q_C(125)=0.1, Q_C(133)=0.1$
k_l	$k_{l(69)}=0.05, k_{l(92)}=0.05, k_{l(97)}=0.05, k_{l(111)}=0.05,$
	$k_{l(119)}=0.05, k_{l(128)}=0.05, k_{l(131)}=0.05$
V_{gref}	$V_{\text{gref}(93)}=0.98782, V_{\text{gref}(104)}=1.008158,$
	$V_{\text{gref}(105)}=1.008922, V_{\text{gref}(106)}=1.005735,$
	$V_{\text{gref}(110)}=1.011578, V_{\text{gref}(111)}=1.009451$
n_t	$n_{t(7-66)}=0.9841, n_{t(9-69)}=0.9041,$
	$n_{t(9-11)}=0.93535, n_{t(10-69)}=0.92285$
Q_C	$Q_C(97)=0.1, Q_C(119)=0.2, Q_C(123)=0.1,$
	$Q_C(125)=0.1, Q_C(133)=0.2$
k_l	$k_{l(69)}=0.1, k_{l(92)}=0.05, k_{l(97)}=0.1, k_{l(111)}=0.05,$
	$k_{l(119)}=0.1, k_{l(128)}=0.1, k_{l(131)}=0.1$
V_{gref}	$V_{\text{gref}(93)}=0.97546, V_{\text{gref}(104)}=1.030074,$
	$V_{\text{gref}(105)}=1.01312, V_{\text{gref}(106)}=1.012725,$
	$V_{\text{gref}(110)}=1.000784, V_{\text{gref}(111)}=0.994072$
n_t	$n_{t(7-66)}=0.97785, n_{t(9-69)}=0.9041,$
	$n_{t(9-11)}=0.9416, n_{t(10-69)}=0.9166$
Q_C	$Q_C(97)=0.1, Q_C(119)=0.3, Q_C(123)=0.1,$
	$Q_C(125)=0.1, Q_C(133)=0.3$
k_l	$k_{l(69)}=0.15, k_{l(92)}=0.05, k_{l(97)}=0.15, k_{l(111)}=0.05,$
	$k_{l(119)}=0.1, k_{l(128)}=0.15, k_{l(131)}=0.1$
V_{gref}	$V_{\text{gref}(93)}=0.96102, V_{\text{gref}(104)}=1.013679,$
	$V_{\text{gref}(105)}=1.018867, V_{\text{gref}(106)}=1.015829,$
	$V_{\text{gref}(110)}=1.011696, V_{\text{gref}(111)}=0.969451$
n_t	$n_{t(7-66)}=0.9716, n_{t(9-69)}=0.9041,$
	$n_{t(9-11)}=0.94785, n_{t(10-69)}=0.91035$
Q_C	$Q_C(97)=0.1, Q_C(119)=0.4, Q_C(123)=0.1,$
	$Q_C(125)=0.1, Q_C(133)=0.4$
k_l	$k_{l(69)}=0.2, k_{l(92)}=0.05, k_{l(97)}=0.2, k_{l(111)}=0.05,$
	$k_{l(119)}=0.1, k_{l(128)}=0.2, k_{l(131)}=0.1$

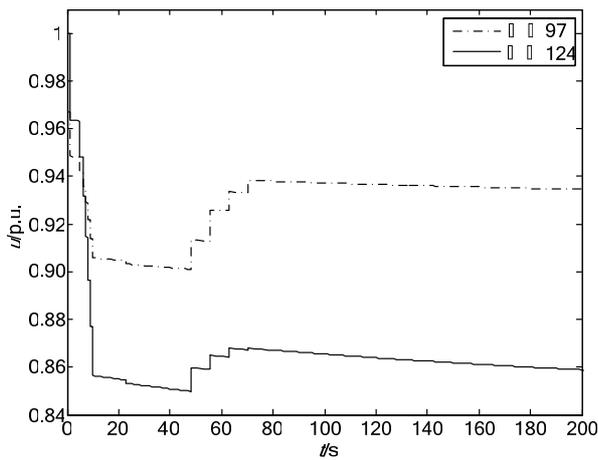


图 4 加入本文方法控制后节点 97 和 124 电压

Fig.4 97-bus and 124-bus voltage with MPC and trajectory sensitivities

从图 3 和图 4 可以看出，两种方法都能有效地阻止系统发生电压崩溃，经过控制实施后系统所有节点电压都稳定在 0.85 pu 与 1.15 pu 之间。文献[4]研究表明，当系统较大、控制变量较多时，由于存在组合爆炸问题，导致预测控制计算时间很长，并且限定优化搜索深度也会降低解的最优性。因此 4 次优化的时间分别为：45.35 s、46.43 s、43.18 s 和 44.56 s；而本文在利用轨迹灵敏度简化后 4 次优化的时间分别为 14.88 s、14.76 s、15.61 s 和 16.55 s。若将准稳态仿真、轨迹灵敏度和滚动优化计算加起来总共花费的计算时间平均约为 27.954 1 s，小于目前通常采用的二次电压控制器动作时间(约 1 min)。因此本文应用 MPC 和轨迹灵敏度技术实现最优协调的方法可大大提高其计算效率。

5 结论

本文提出的应用 MPC 和轨迹灵敏度技术所实现的最优协调电压控制，通过节点电压对控制变量的轨迹灵敏度可选定各类控制变量并建立简化的二次规划模型。该模型考虑了负荷的内在动态特性和控制变量的连续/离散特性，协调了不同类型的控制变量。所提控制方法具有以下优点：

(1) 计算效率高。利用节点电压对控制变量的轨迹灵敏度选定各类控制变量和建立以控制变量增量为独立变量的二次规划模型，可优化控制策略及简化其二次规划模型求解的复杂性。

(2) 实用性强。MPC 采用滚动优化而非全局一次优化、可方便地处理各种约束条件，且无需精确的数学模型，因此具有较强的实用性。

(3) 协调了各类控制变量。在保证最佳电压控

制水平及控制变量的连续/离散特性的前提下，获得最优的控制策略。

参考文献

- [1] Mayne D Q, Rawlings J R, Rao C V, et al. Constrained model predictive control: stability and optimality[J]. Automatica, 2000, 36(6): 789-814.
- [2] Rawlings J B. Tutorial overview of model predictive control[J]. IEEE Control Systems Magazine, 2000, 20(3): 38-52.
- [3] Mats Larsson, Daniel Karlsson. Coordinated system protection scheme against voltage collapse using heuristic search and predictive control[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2003, 18(3): 1001-1006.
- [4] Larsson Mats, Hill D J, Olsson Gustaf. Emergency voltage control using search and predictive control[J]. Electrical Power and Energy Systems, 2002, 24: 121-130.
- [5] 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.
- [6] Vournas C, Michael Karystianos. Load tap changers in emergency and preventive voltage stability control[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2004, 19(1): 492-498.
- [7] Lin L, Kumar R, et al. Application of model predictive control in voltage stability[C]. //Proceedings of the 2007 American Control Conference. New York(USA): 2007: 5916-5921.
- [8] Hiskens I A, Gong B. MPC-based load shedding for voltage stability enhancement[C]. //Proceedings of the 44th Conference on Decision and Control, and the European Control Conference. Seville(Spain): 2005: 4463-4468.
- [9] Zima M, Andersson G. Model predictive control employing trajectory sensitivities for power systems applications[C]. //Proceedings of the 44th Conference on Decision and Control, and the European Control Conference. Seville(Spain): 2005: 4452-4456.
- [10] Hiskens I A, Pai M A. Trajectory sensitivity analysis of hybrid systems[J]. IEEE Trans on Circuits and Systems-I: Fundamental Theory and Applications, 2000, 47(2): 204 - 220.
- [11] Hiskens I A, Pai M A. Power system applications of trajectory sensitivities[C]. //IEEE Power Engineering Society Winter. 2002, 2: 1200-1205.
- [12] Zima M, Korba P, Andersson G. Power systems voltage emergency control approach using trajectory sensitivities[C]. //Proceedings of 2003 IEEE Conference on Control Applications. 2003: 189-194.
- [13] Zima M, Andersson G. Stability assessment and emergency control method using trajectory sensitivities[C]. //IEEE Bologna Power Technology Conference. Italy: 2003: 7-13.

(下转第14页 continued on page 14)

[14] 姚建刚, 周启亮, 张佳启, 等. 基于期权理论的发电权交易模型[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25 (21): 76-81.
YAO Jian-gang, ZHOU Qi-liang, ZHANG Jia-qi, et al. Generation rights trade mode based on option theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25 (21): 76-81.

[15] 莫莉, 周建中, 李清清, 等. 基于委托代理模型的发电权交易模式[J]. 电力系统自动化, 2008, 32 (2): 30-34.
MO Li, ZHOU Jian-zhong, LI Qing-qing, et al. Mechanism of generation-rights trades based on principal-agent model[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32 (2): 30-34.

[16] 夏清, 孙正运. 考虑交易成本的区域市场撮合交易模型[J]. 电网技术, 2005, 29 (17): 1-4.
XIA Qing, SUN Zheng-yun. Application of high-low match methods to regional electricity market considering transaction costs[J]. Power System Technology, 2005, 29 (17): 1-4.

[17] Hogan W W. Contract networks for electric power transmission[S]. Harvard University, 1992.

[18] 李丽颖, 彭建春, 江辉, 等. 一种综合阻塞成本分摊与金融输电权的阻塞管理方法[J]. 继电器, 2005, 33 (3): 1-5.
LI Li-ying, PENG Jian-chun, JIANG Hui, et al. A congestion management method integrating the allocation of congestion costs with financial transmission rights[J]. Relay, 2005, 33 (3): 1-5.

[19] 李丽颖, 彭建春, 张喜铭. 一种改进型金融输电权与基金池相结合的阻塞风险规避方法[J]. 电力自动化设备, 2005, 33 (3): 1-5.
LI Li-ying, PENG Jian-chun, ZHANG Xi-ming. Method combining improved financial transmission rights with fund pool for hedging congestion risk[J]. Electric Power Automation Equipment, 2005, 33 (3): 1-5.

[20] 李敏强, 寇纪淞, 林丹, 等. 遗传算法的基本理论及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2002.

[21] 朱剑英. 智能系统非经典数学方法[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2001: 239-283.

[22] 雷英杰, 张善文, 李续武, 等. MTLAB遗传算法工具箱及应用[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2005: 1-61.

[23] 王小平, 曹立明. 遗传算法: 理论、应用与软件实现[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2002: 104-122.

收稿日期: 2010-03-24; 修回日期: 2010-08-23

作者简介:

艾东平 (1981-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为电力系统分析与控制; E-mail: dongping19810127@126.com

鲍海 (1968-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为电力系统分析与控制;

杨以涵 (1927-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为光学技术及其在电力系统中的应用以及电力系统分析与控制。

(上接第6页 continued from page 6)

[14] 周荣林, 刘明波. 协调电压控制问题的准稳态模型及其间接动态优化算法[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(1): 6-13.
ZHOU Rong-lin, LIU Ming-bo. Quasi-steady-state model of coordinated voltage control problem and its indirect dynamic optimization algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(1): 6-13.

[15] 苗峰显, 郭志忠. 灵敏度方法在电力系统分析与控制中的应用综述[J]. 继电器, 2007, 35(15): 72-76.
MIAO Feng-xian, GUO Zhi-zhong. A survey of sensitivity technique and its application in power systems analysis and control[J]. Relay, 2007, 35(15): 72-76.

[16] 林舜江, 刘明波, 等. 暂态电压安全紧急切负荷控制优化研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(11): 18-24.
LIN Shun-jiang, LIU Ming-bo, et al. Emergency load shedding control optimization for transient voltage security[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(11): 18-24.

收稿日期: 2010-05-12; 修回日期: 2010-07-09

作者简介:

刘水平 (1977-), 女, 博士研究生, 主要研究方向为电力系统优化、运行与控制; E-mail: liushuiping2000@yahoo.com.cn

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;

谢敏 (1978-), 女, 讲师, 博士, 主要研究方向为电力系统规划、运行与控制。