

基于模糊聚类滚动筛选决策集的电电压协调控制

张 岩¹, 张 文¹, 王 亮²

(1. 山东大学 电气工程学院, 山东 济南 250061; 2. 山东电力调度中心, 山东 济南 250001)

摘要: 基于模型预测控制, 提出一种决策集滚动筛选(CDSRS)的电电压协调控制方法。通过求取预测周期内优化目标节点电压对控制变量的响应特性, 将电压协调控制模型的求解转化为混合整数规划问题。考虑电压控制的局部性特点, 以模型预测过程中求取的电压预测幅值和响应信息作为聚类特征指标, 采用模糊聚类方法确定故障后的优化目标节点, 在此基础上根据电压响应显著度滚动筛选决策集。仿真结果表明, 该方法在取得全局协调控制效果的前提下, 大幅降低了备选决策集规模, 显著减少了优化计算时间, 有效避免电压协调控制的决策集爆炸问题。

关键词: 电压控制; 模糊聚类; 决策集筛选; 优化; 模型预测控制; 模型

中图分类号: TM 761

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.08.005

0 引言

随着负荷中心负荷水平的不断增长, 大容量远距离输电不断增加, 由负荷恢复特性驱动的中长期电压稳定问题日益突出^[1-2], 相关系统呈现慢动态特性, 需要及时采取电压控制措施防止系统持续恶化。

模型预测控制 MPC(Model Predictive Control)是一种在线滚动的优化控制方法, 适用于动态特性和存在不确定因素的复杂系统^[3-8]。现有研究表明 MPC 方法可以有效地解决电压协调控制问题。文献[3]采用变分法将最优协调电压控制问题转化为二次规划进行求解; 文献[4-5]使用树搜索法求解由模型预测得到的组合优化问题; 文献[6]用伪梯度进化规划方法求解复杂优化问题; 文献[7-8]基于轨迹灵敏度方法使用线性 MPC 方案进行紧急电压控制。在 MPC 方法中优化决策集规模由优化目标节点和调压控制器的数目决定, 随着系统规模的增大, 优化求解计算量会随决策变量数目的增加大幅增长, 面临决策集爆炸的难题。与此同时, 电压控制具有局部性特点, 在系统故障场景中, 原始决策集中存在大量对故障区域节点电压影响微弱的控制变量, 这部分控制变量参与优化会导致大量冗余计算。与爆炸增长的原始决策变量相比, 优化解中的动作控制器数目始终维持在一个较小的规模, 因此对备选决策集进行筛选是必要的。文献[9]采用轨迹灵敏度方法对控制输入进行了筛选, 但忽略了对优化目标节点的筛选。

本文基于 MPC 思想, 提出一种采用模糊聚类滚

动筛选决策集的电电压协调控制方法。在控制周期初始时刻对系统进行线性化, 求取优化目标节点电压对于备选控制的阶跃响应, 根据比例和叠加性质^[4-8]将复杂最优电压协调控制模型的求解转化为混合整数规划问题。提取模型预测过程中求取的电压预测幅值以及响应信息, 基于模糊聚类方法确定优化目标节点, 并在此基础上根据电压响应特性滚动筛选决策集, 筛选后的决策集在保证全局控制效果的基础上提高优化效率, 可有效减少优化计算量。

1 基于 MPC 的电压协调控制模型

MPC 是一种有限时域滚动优化方法, 若初始控制施加于 t_0 时刻, 电压协调控制模型可以表示为:

$$\begin{aligned} \min & \left[\sum_{k=1}^N (\mathbf{U}_r - \hat{\mathbf{U}}(k))^T \mathbf{Q} (\mathbf{U}_r - \hat{\mathbf{U}}(k)) + \Delta \mathbf{u}^T \mathbf{R} \Delta \mathbf{u} \right] \quad (1) \\ \text{s.t.} & \quad 0 = \mathbf{f}(\mathbf{x}(t), \mathbf{y}(t), \mathbf{z}_c(t), \mathbf{z}_d(t), \mathbf{u}(t)) \\ & \quad 0 = \mathbf{g}(\mathbf{x}(t), \mathbf{y}(t), \mathbf{z}_c(t), \mathbf{z}_d(t), \mathbf{u}(t)) \\ & \quad \dot{\mathbf{z}}_c = \mathbf{h}_c(\mathbf{x}(t), \mathbf{y}(t), \mathbf{z}_c(t), \mathbf{z}_d(t), \mathbf{u}(t)) \\ & \quad \mathbf{z}_d(t_k^+) = \mathbf{h}_d(\mathbf{x}(t), \mathbf{y}(t), \mathbf{z}_c(t), \mathbf{z}_d(t_k^-), \mathbf{u}(t)) \quad (2) \\ & \quad \mathbf{y}_{\min} \leq \mathbf{y}(t) \leq \mathbf{y}_{\max} \quad t \in [t_0 + nt_c, t_0 + nt_c + t_p] \\ & \quad \mathbf{u}_{\min} \leq \mathbf{u}(t) \leq \mathbf{u}_{\max} \quad t \in [t_0 + nt_c, t_0 + (n+1)t_c] \\ & \quad \Delta \mathbf{u}_{\min} \leq \Delta \mathbf{u}(t_0 + nt_c) \leq \Delta \mathbf{u}_{\max} \\ & \quad \mathbf{u} \in S_c(\mathbf{u}) \end{aligned}$$

其中, N 为预测周期内的采样点数; $\mathbf{Q}$ 和 $\mathbf{R}$ 分别为节点电压偏移和控制代价的对角惩罚权重矩阵; $\mathbf{U}_r$ 为节点参考电压向量, $\hat{\mathbf{U}}(k)$ 为预测周期内第 k 个采样点处的目标节点电压预测幅值向量; $\Delta \mathbf{u}$ 为控制调节量向量, $\mathbf{u}$ 为系统控制输入, 包括发电机自动电压调节器 AVR(Automatic Voltage Regulator)设定值、有载调压变压器分接头 OLTC(On-Load Tap Changer)位置和切负荷量; $\mathbf{x}$ 为短期动态状态向量, 主要与发电机及其调节系统相关, 在电力系统准稳态 QSS(Quasi-

收稿日期: 2012-07-19; 修回日期: 2013-06-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51177093, 51207082); 教育部留学回国人员科研启动基金资助项目

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51177093, 51207082) and Scientific Research Foundation for Returned Overseas Researchers by Ministry of Education

Steady-State)模型中,其快速暂态动态过程已被忽略; $\mathbf{y}$ 为节点电压向量; $\mathbf{z}_c$ 为负荷恢复连续动态状态向量; $\mathbf{z}_d$ 为离散长期动态向量,主要与系统中控制器相关,如发电机过励限制器 OEL(OverExcitation Limiter)及定子过流限制器 ACL(Armature Current Limiter)动作; $\mathbf{y}_{\max}$ 和 $\mathbf{y}_{\min}$ 分别为输出电压上、下限; $\mathbf{u}_{\max}$ 和 $\mathbf{u}_{\min}$ 为控制输入上、下限; $\Delta\mathbf{u}_{\max}$ 和 $\Delta\mathbf{u}_{\min}$ 为单次控制调节量上、下限; t_c 为控制周期, t_p 为预测周期; n 为已滚动优化次数,为非负整数; $S_c(\mathbf{u})$ 为控制备选集; $\mathbf{f}$ 为 QSS 模型中的系统短期动态代数方程, $\mathbf{g}$ 为系统网络方程, $\mathbf{h}_c$ 为连续慢动态微分方程, $\mathbf{h}_d$ 为离散动态方程。式(2)中的等式约束为 QSS 模型^[2]。模型针对中长期电压稳定问题的慢动态特点,将电力系统短期动态用相应的平衡方程代替。

上述优化模型直接求解较为困难,非线性模型预测控制(NLMPC)计算量巨大,难以在线进行;而且随着系统规模的增大,存在决策集爆炸风险。为了降低决策集规模,现有许多相关研究直接选取部分关键决策量进行优化计算^[3,10],但并未给出选择依据。对此,本文提出一种结合决策集滚动筛选 CDSRS(Candidate Decision Set Rolling Selection)的电压协调控制方法。

2 基于模糊聚类滚动筛选决策集的电压协调控制

2.1 电压协调控制模型的转化

采用文献[5]提出的线性模型预测控制(LMPC)方法,在控制周期初始时刻对 QSS 模型进行线性化:

$$\begin{cases} \Delta\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\Delta\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}\Delta\mathbf{u} \\ \Delta\mathbf{y}(t) = \mathbf{C}\Delta\mathbf{x}(t) + \mathbf{D}\Delta\mathbf{u} \end{cases} \quad (3)$$

其中, $\mathbf{A}$ 、 $\mathbf{B}$ 、 $\mathbf{C}$ 、 $\mathbf{D}$ 为控制周期初始时刻系统的雅可比矩阵。

由式(3)可以得到优化目标节点 i 电压对于控制变量 j 的阶跃响应 $\Delta\hat{y}_{ij}(t)$ 。保持控制输入不变,通过时域仿真可求取预测周期内节点 i 的输出电压轨迹 $\hat{U}_i^*$ 。假设系统共有 n_j 个备选输入控制变量和 n_i 个优化目标节点,由比例和叠加性质,在采样时刻 t^* 处,系统施加控制后各目标节点电压预测幅值向量 $\hat{\mathbf{U}}$ 可表示为:

$$\hat{\mathbf{U}}(t^*) = \begin{bmatrix} \hat{U}_1^*(t^*) + \sum_{j=1}^{n_j} \Delta\hat{y}_{1j}(t^*)\Delta u_j \\ \hat{U}_2^*(t^*) + \sum_{j=1}^{n_j} \Delta\hat{y}_{2j}(t^*)\Delta u_j \\ \vdots \\ \hat{U}_{n_i}^*(t^*) + \sum_{j=1}^{n_j} \Delta\hat{y}_{n_i j}(t^*)\Delta u_j \end{bmatrix} \quad (4)$$

将式(4)代入式(1),非线性无穷维电压协调优化模型转化为以控制调节量 $\Delta\mathbf{u}$ 为独立变量的混合整数规划问题:

$$\min \left[\sum_{k=1}^N (\mathbf{U}_r - \hat{\mathbf{U}}(t_0 + nt_c + kt_s))^T \mathbf{Q} (\mathbf{U}_r - \hat{\mathbf{U}}(t_0 + nt_c + kt_s)) + \Delta\mathbf{u}(t_0 + nt_c)^T \mathbf{R} \Delta\mathbf{u}(t_0 + nt_c) \right] \quad (5)$$

$$\text{s.t. } \mathbf{u}(t_0 + nt_c) = \mathbf{u}_0 + \sum_{i=0}^{n-1} \Delta\mathbf{u}(t_0 + it_c)$$

$$\mathbf{y}_{\min} \leq \mathbf{y}(t) \leq \mathbf{y}_{\max} \quad t \in [t_0 + nt_c, t_0 + nt_c + t_p] \quad (6)$$

$$\mathbf{u}_{\min} \leq \mathbf{u}(t) \leq \mathbf{u}_{\max} \quad t \in [t_0 + nt_c, t_0 + (n+1)t_c]$$

$$\Delta\mathbf{u}_{\min} \leq \Delta\mathbf{u}(t_0 + nt_c) \leq \Delta\mathbf{u}_{\max} \quad \mathbf{u} \in S_c(\mathbf{u})$$

其中, t_s 为采样周期, $t_p = (N-1)t_s$ 。

2.2 基于模糊聚类分析的决策集筛选方法

电力系统发生故障后,各节点电压会出现不同程度的跌落。由于电压控制具有局部性特点,如果能够识别故障后系统电压薄弱区域,并根据目标节点电压对于备选控制的响应特性进行决策集筛选,可以有效地降低优化问题的复杂度。

本节针对中长期电压稳定问题,综合考虑 AVR 设定值、OLTC 和切负荷控制措施,将故障后电压预测幅值和阶跃响应信息作为电压薄弱区域节点聚类指标,提出了一种基于模糊聚类方法的决策集筛选方法。

模糊聚类是采用模糊数学方法,依据客观事物间的特征、亲疏程度和相似性,通过建立模糊相似关系对客观事物进行分类的一门多元技术^[11-12]。基于模糊聚类方法的决策集筛选步骤如下。

a. 原始数据准备。 LMPC 方法在控制周期初始时刻得到系统阶跃响应 $\Delta\hat{y}_{ij}(t)$,取预测周期结束时刻的响应值 $\Delta\hat{y}_{ij}(t_p)$,构成控制响应显著度矩阵 $\mathbf{S}$:

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} \Delta\hat{y}_{11}(t_p) & \Delta\hat{y}_{12}(t_p) & \cdots & \Delta\hat{y}_{1n_j}(t_p) \\ \Delta\hat{y}_{21}(t_p) & \Delta\hat{y}_{22}(t_p) & \cdots & \Delta\hat{y}_{2n_j}(t_p) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \Delta\hat{y}_{n_i 1}(t_p) & \Delta\hat{y}_{n_i 2}(t_p) & \cdots & \Delta\hat{y}_{n_i n_j}(t_p) \end{bmatrix} \quad (7)$$

$\mathbf{S}$ 为 $n_i \times n_j$ 阶矩阵,元素 $\Delta\hat{y}_{ij}(t_p)$ 的大小反映了控制对节点电压幅值的影响显著程度,体现了控制的动态响应特性。矩阵 $\mathbf{S}$ 通过提取 MPC 过程中的数据形成,无需任何额外计算时间。

b. 原始数据标准化。 数据标准化是为了使量纲和数量级不同的特性指标统一。采用均值标准化方法对 $\mathbf{S}$ 进行标准化处理:

$$x_{ij} = \frac{\Delta\hat{y}_{ij}(t_p)}{\bar{y}_j} \quad (8)$$

其中, x_{ij} 为标准化后的数据, $\bar{y}_j$ 为第 j 列数据的平均

值。标准化处理后,矩阵内元素统一在一个共同的数据特性范围内。

c. 建立模糊相似矩阵。采用绝对值减数法建立模糊相似矩阵:

$$r_{ij} = 1 - c \sum_{k=1}^m |x_{ik} - x_{jk}| \quad (9)$$

其中, r_{ij} 为节点间连线权数,体现负荷节点 i 与负荷节点 j 的相似或接近程度,适当选取 c , 使 $0 \leq r_{ij} \leq 1$ 。

d. 优化目标节点确定。滚动优化次数 $n=0$ 时,提取预测周期结束时刻各节点电压幅值 $\hat{U}_i^*(t_0+nt_c+t_p)$, 若节点 i 电压幅值低于阈值 U_{th} , 则将该节点和与其连线权数 r_{ij} 大于 λ 的节点确定为优化目标节点。模糊聚类参数 λ 可结合具体系统的模糊相似矩阵离线确定,优化目标区域的大小应适中,过大不易控制,过小则无实际意义,且会影响系统整体性能^[12]。

e. 控制输入筛选。若全部优化目标节点对于备选控制 i 的响应值 $\Delta \hat{y}_{ij}(t_p)$ 均小于响应阈值 τ , 则备选决策集移除该控制变量。

上述过程中,优化目标节点的聚类指标在故障后控制周期初始时刻求取,以低电压节点为中心扩展优化目标区域。因此,聚类筛选方法对不同故障有较好的适应性。

2.3 切负荷必要性判定条件

随着电压协调优化的滚动进行,系统各节点电压逐渐接近其优化参考值,由于切负荷动作具有较高的惩罚权重,在电压预测幅值距离参考值较近且持续恢复的情况下,部分切负荷控制措施虽参与优化但不会动作,造成冗余计算。因此当优化滚动次数 $n \geq 1$ 时,可以通过电压预测幅值 and 变化趋势判断切负荷控制的必要性,对决策集进行二次筛选,进一步降低优化问题规模,判定条件如下。

a. 电压幅值。保持第 $n-1$ 次控制输入,预测周期结束时刻各优化目标节点电压幅值满足:

$$\hat{U}_i^*(t_0+nt_c+t_p) \geq 0.9 \text{ p.u.} \quad (10)$$

b. 电压变化趋势。中长期电压在离散事件之间具有典型的单调性特点^[4],在此前提下,可以通过线性拟合预测电压轨迹来评价其发展趋势。在预测周期内线性拟合节点 i 的电压输出轨迹 $\hat{U}_i^*(t)$, 得到拟合曲线:

$$\hat{y}_i(t) = p_1 t + p_2 \quad (11)$$

其中, p_1 、 p_2 为拟合参数。若曲线斜率 $p_1 > 0$, 则可以认为电压在预测周期内处于恢复过程。

若全部输出节点电压同时满足幅值与变化趋势条件,则当前控制时域内备选决策集中可移除切负荷决策。

2.4 基于模糊聚类滚动筛选决策集的电压协调控制流程

本文提出的备选决策集筛选方法如图 1 所示。

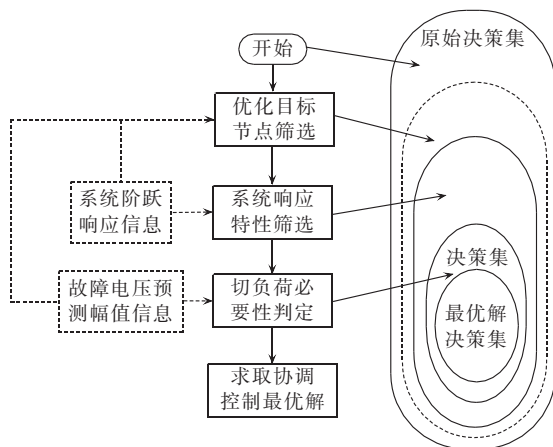


图 1 备选决策集筛选方法

Fig.1 Selection method of candidate decision set

在控制周期初始时刻求取电压预测幅值和系统响应信息,并据此逐步筛选决策集。该方法充分考虑了电压控制的局部性特点,可显著降低决策集规模。

基于模糊聚类滚动筛选决策集的电压协调控制流程如图 2 所示,在 t_0+nt_c 时刻求取预测周期内系统的电压预测轨迹和阶跃响应,并对决策集进行聚类筛选;根据式(4)~(6)转化电压协调优化模型并求解,所得最优解在 t_0+nt_c 时刻应用于系统。优化目标节点的确定仅在控制初始时刻进行;最优控制的求解和控制输入的筛选以 t_c 为周期滚动进行。

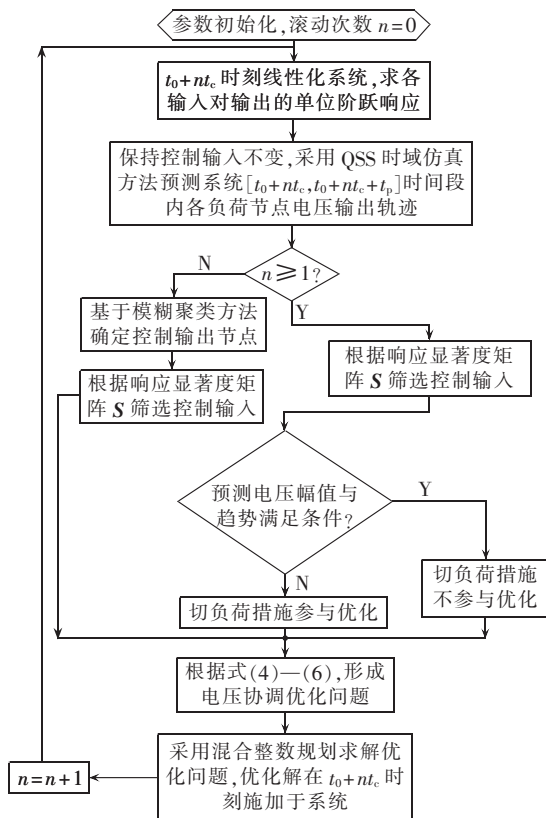


图 2 滚动筛选决策集的电压协调控制流程

Fig.2 Flowchart of coordinated voltage control with CDSRS

3 算例分析

3.1 算例系统

采用如图 3 所示的 Nordic32 系统^[13]进行仿真测试,该系统共有 52 个节点,20 台同步发电机,其中节点 4011 处发电机为平衡节点,其余发电机均考虑发电机过励限制,其中火力发电机(位于节点 1042、1043、4042、4047、4051、4062、4063)同时考虑定子过流限制,所有负荷均采用动态指数恢复模型^[14],稳态负荷指数 $\alpha_s=\beta_s=0.5$,暂态负荷指数 $\alpha_t=\beta_t=2$,有功功率和无功功率的时间恢复常数皆为 60。系统备选控制措施如下。

- a. 19 个发电机 AVR 设定点,在初始值 $\pm 15\%$ 的范围内连续可调,初值见表 1,表中 U_{ref} 为发电机 AVR 的电压参考值,文中电压数据均为标么值,计算阶跃响应所用步长为 2%。
- b. 11 个 OLTC,变比可在 0.8~1.2 p.u. 之间离散变化,步长为 1.67%。
- c. 22 个切负荷点,切负荷步长为 2.5%,最大切

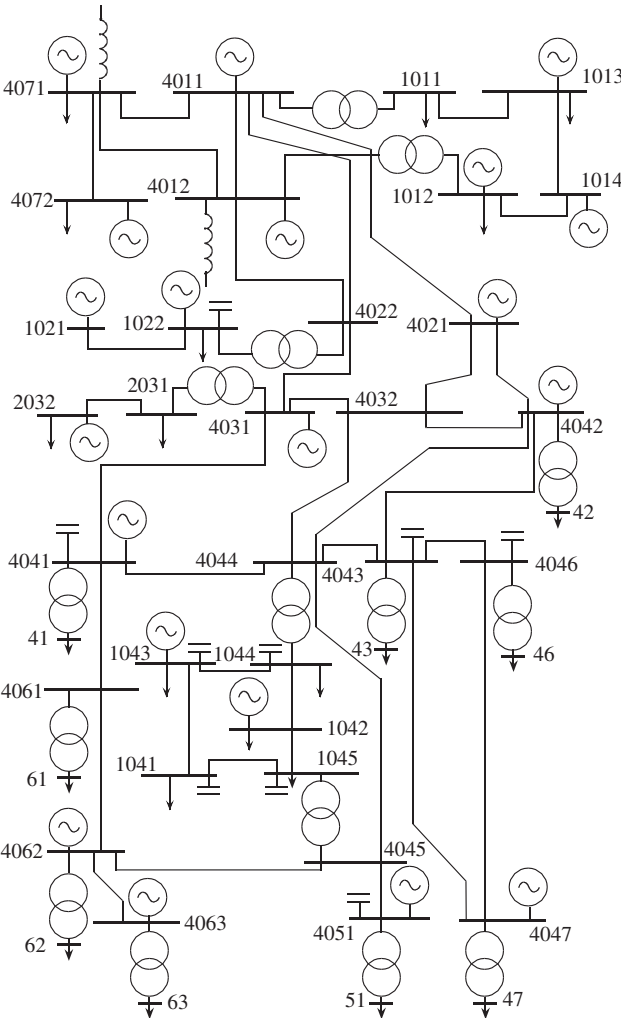


图 3 Nordic32 测试系统
Fig.3 Nordic32 test system

表 1 Nordic32 系统发电机 AVR 设定点参数
Tab.1 AVR set-point parameters of generators of Nordic32 system

控制参数	初值	上限	下限
$U_{ref,G1012}$	1.178 9	1.355 8	1.002 1
$U_{ref,G1013}$	1.184 9	1.362 7	1.007 2
$U_{ref,G1014}$	1.201 0	1.391 4	1.028 5
$U_{ref,G1021}$	1.141 8	1.313 0	0.970 5
$U_{ref,G1022}$	1.177 6	1.354 3	1.001 0
$U_{ref,G1042}$	1.042 9	1.199 4	0.886 5
$U_{ref,G1043}$	1.069 4	1.229 8	0.909 0
$U_{ref,G2032}$	1.162 5	1.336 9	0.988 1
$U_{ref,G4012}$	1.043 3	1.199 8	0.886 8
$U_{ref,G4021}$	1.027 8	1.182 0	0.873 6
$U_{ref,G4031}$	1.102 3	1.267 7	0.937 0
$U_{ref,G4041}$	1.014 5	1.166 6	0.862 2
$U_{ref,G4042}$	1.064 0	1.223 6	0.904 4
$U_{ref,G4047}$	1.069 5	1.230 0	0.909 1
$U_{ref,G4051}$	1.049 9	1.207 4	0.892 4
$U_{ref,G4062}$	1.022 8	1.176 2	0.869 4
$U_{ref,G4063}$	1.038 5	1.194 3	0.882 8
$U_{ref,G4071}$	1.065 8	1.226 0	0.905 9
$U_{ref,G4072}$	1.042 3	1.198 6	0.885 9
$U_{ref,G4011}$	1.010 0	1.161 5	0.858 5

负荷量是其初始负荷的 15%。
预测控制器参数选择为:采样周期 $t_s=10\text{ s}$,控制周期 $t_c=30\text{ s}$,预测时域 $t_p=60\text{ s}$ 。电压偏移权重为 10, AVR 设定值、OLTC 和切负荷的控制权重分别为 1、1、50;电压阈值 $U_{th}=0.95\text{ p.u.}$,响应阈值 $\tau=0.001\text{ p.u.}$,可以确保控制效果。

模型的仿真在 MATLAB7.9/Simulink 下实现,优化问题通过 GAMS 中的 minlp^[15]方法进行求解,计算机硬件条件 Pentium Dual-Core E5800 3.20 GHz、内存 2.00 GB。

3.2 算例

线路 4042-4043、4032-4044 在 10 s 时因故障跳闸,节点 1043、4042 处发电机定子电流限制器相继动作,若不采取紧急控制措施,系统将在 176 s 发生电压崩溃,系统电压响应见图 4。

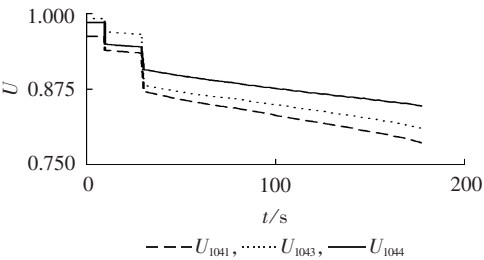


图 4 未施加控制情况下节点电压响应曲线
Fig.4 Curves of voltage response without control

取参数 $c=0.005, \lambda=0.8$,基于模糊聚类方法在控制初始时刻确定优化目标节点: {41,42,43,1041,1043,1044,1045};图 5 给出了结合 CDSRS 的 LMPC 方法进行控制的电压响应曲线,各控制周期筛选后

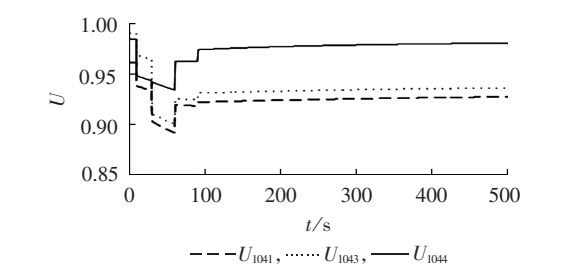


图 5 采用 CDSRS+LMPC 方法的电压响应曲线
Fig.5 Curves of voltage response with CDSRS+LMPC

的备选输入变量见表 2,具体动作策略见表 3,表中 n_t 为有载调压变压器变比, k_{load} 为切负荷系数。该紧急控制场景下故障后电压迅速跌落,较大的电压偏移会使目标函数式(5)显著增加,促使高代价切负荷措施在初始控制周期动作^[4-5,7],使电压尽快恢复,确保电力系统的安全性要求,防止系统电压进一步恶化发展。但由于切负荷措施在目标函数中具有最高的控制代价,仅在切负荷预测响应最为显著的节点 43 和 1041 处各切除 7.5% 的负荷,兼顾了安全性和经济性的要求。当 $t > 60$ s 时,预测周期内各节点电压均满足幅值要求且处于恢复过程中,根据切负荷必要性判定原则,备选决策集移除切负荷决策变量。由优化结果可以看出,通过协调不同地点和类型的控制措施,本文提出的控制方法可以使故障后系统电压渐近稳定。

在一个控制周期内,时域仿真和控制响应预测的平均时间分别为 4.34 s 和 1.43 s;控制初始时刻的模糊聚类与决策集筛选时间为 0.006 s;平均优化时间(包含优化模型形成与数据导入时间)为 0.44 s。从计算时间结果可以看出,在电压协调优化过程中决策集筛选的平均计算时间可近似忽略不计。

作为对比,本文采用未进行决策集筛选的 LMPC 和 NL MPC 方法求解该算例的最优控制。

在系统参数和优化工具不变的情况下,采用原始决策集的 LMPC 方法得到的电压响应曲线如图 6 所

表 2 筛选后的备选控制集
Tab.2 Candidate decision set after selection

t/s	备选控制集
30	$U_{ref,G2032}, U_{ref,G4021}, U_{ref,G4031}, U_{ref,G4041}, U_{ref,G4047}, U_{ref,G4051}, U_{ref,G4062}$ $n_{t(4042-42)}, n_{t(4063-63)}, n_{t(4062-62)}, n_{t(4061-61)}, n_{t(4051-51)}, n_{t(4047-47)}, n_{t(4046-46)},$ $n_{t(4043-43)}, n_{t(4044-1044)}$ $k_{load42}, k_{load46}, k_{load43}, k_{load41}, k_{load63}, k_{load62}, k_{load43}, k_{load1041}, k_{load61}, k_{load1043},$ $k_{load1045}, k_{load51}, k_{load1042}, k_{load1044}$
60	$U_{ref,G2032}, U_{ref,G4021}, U_{ref,G4031}, U_{ref,G4041}, U_{ref,G4047}, U_{ref,G4051}$ $n_{t(4042-42)}, n_{t(4061-61)}, n_{t(4051-51)}, n_{t(4047-47)}, n_{t(4046-46)}, n_{t(4043-43)}, n_{t(4044-1044)}$ $k_{load42}, k_{load46}, k_{load43}, k_{load41}, k_{load63}, k_{load62}, k_{load43}, k_{load1041}, k_{load61}, k_{load1043},$ $k_{load1045}, k_{load51}, k_{load1042}, k_{load1044}$
90	$U_{ref,G2032}, U_{ref,G4021}, U_{ref,G4031}, U_{ref,G4041}, U_{ref,G4047}, U_{ref,G4051}$ $n_{t(4042-42)}, n_{t(4061-61)}, n_{t(4051-51)}, n_{t(4047-47)}, n_{t(4046-46)}, n_{t(4043-43)}, n_{t(4044-1044)}$
120	$U_{ref,G2032}, U_{ref,G4021}, U_{ref,G4031}, U_{ref,G4041}, U_{ref,G4047}, U_{ref,G4051}$ $n_{t(4042-42)}, n_{t(4061-61)}, n_{t(4051-51)}, n_{t(4047-47)}, n_{t(4046-46)}, n_{t(4043-43)}, n_{t(4044-1044)}$

示。控制动作策略见表 3,在 $t = 30$ s 时分别在节点 43、1041、1044 处切除 10%、2.5%、2.5% 的负荷。系统参数不变,若不对系统 QSS 进行线性化处

表 3 控制策略对比
Tab.3 Comparison of control schemes

t/s	控制策略		
	CDSRS+LMPC	LMPC	NLMPC
30	$U_{ref,G4021}=1.088$	$U_{ref,G1022}=1.18$	$U_{ref,G1022}=1.186$
	$U_{ref,G4031}=1.162$	$U_{ref,G2032}=1.172$	$U_{ref,G1042}=1.044$
	$U_{ref,G4041}=1.074$	$U_{ref,G4021}=1.088$	$U_{ref,G2032}=1.175$
	$U_{ref,G4047}=1.13$	$U_{ref,G4031}=1.162$	$U_{ref,G4021}=1.088$
	$U_{ref,G4051}=1.1$	$U_{ref,G4041}=1.074$	$U_{ref,G4031}=1.162$
	$U_{ref,G4062}=1.083$	$U_{ref,G4047}=1.13$	$U_{ref,G4041}=1.074$
	$k_{load43}=0.925$	$U_{ref,G4051}=1.083$	$U_{ref,G4047}=1.13$
	$k_{load1041}=0.925$	$U_{ref,G4062}=1.083$	$U_{ref,G4051}=1.099$
	$n_{t(4042-42)}=1.0534$	$k_{load43}=0.90$	$U_{ref,G4062}=1.083$
	$n_{t(4063-63)}=0.9966$	$k_{load1041}=0.975$	$k_{load43}=0.95$
	$n_{t(4062-62)}=0.9866$	$k_{load1044}=0.975$	$k_{load1041}=0.90$
	$n_{t(4061-61)}=1.0233$	$n_{t(4042-42)}=1.0534$	$n_{t(4063-63)}=1.0133$
	$n_{t(4051-51)}=0.9666$	$n_{t(4063-63)}=1.0133$	$n_{t(4062-62)}=0.9866$
	$n_{t(4047-47)}=0.9666$	$n_{t(4062-62)}=0.9866$	$n_{t(4061-61)}=1.0233$
	$n_{t(4046-46)}=1.0133$	$n_{t(4051-51)}=1.0233$	$n_{t(4051-51)}=0.9666$
	$n_{t(4043-43)}=1.0133$	$n_{t(4047-47)}=0.9666$	$n_{t(4047-47)}=0.9666$
	$n_{t(4044-1044)}=1.0167$	$n_{t(4046-46)}=0.9966$	$n_{t(4046-46)}=0.9966$
60	$U_{ref,G4021}=1.148$	$U_{ref,G2032}=1.164$	$U_{ref,G2032}=1.19$
	$U_{ref,G4031}=1.222$	$U_{ref,G4021}=1.148$	$U_{ref,G4021}=1.148$
	$U_{ref,G4041}=1.134$	$U_{ref,G4031}=1.222$	$U_{ref,G4031}=1.222$
	$U_{ref,G4047}=1.17$	$U_{ref,G4041}=1.134$	$U_{ref,G4041}=1.134$
	$U_{ref,G4051}=1.156$	$U_{ref,G4047}=1.185$	$U_{ref,G4047}=1.186$
	$n_{t(4042-42)}=1.0868$	$U_{ref,G4051}=1.139$	$U_{ref,G4051}=1.135$
	$n_{t(4061-61)}=1.0066$	$n_{t(4042-42)}=1.0868$	$U_{ref,G4062}=1.093$
	$n_{t(4051-51)}=0.9499$	$n_{t(4061-61)}=1.0066$	$n_{t(4042-42)}=1.0701$
	$n_{t(4047-47)}=0.9332$	$n_{t(4051-51)}=0.9499$	$n_{t(4061-61)}=1.0066$
	$n_{t(4046-46)}=0.9966$	$n_{t(4047-47)}=0.9332$	$n_{t(4051-51)}=0.9499$
	$n_{t(4045-45)}=1.0167$	$n_{t(4046-46)}=0.9632$	$n_{t(4047-47)}=0.9332$
	$n_{t(4044-1044)}=1.0334$	$n_{t(4043-43)}=0.9799$	$n_{t(4046-46)}=0.9632$
		$n_{t(4045-1045)}=1.0167$	$n_{t(4043-43)}=0.9799$
		$n_{t(4044-1044)}=1.0167$	$n_{t(4044-1044)}=1.0334$
	$U_{ref,G4021}=1.162$	$U_{ref,G4021}=1.172$	$U_{ref,G4021}=1.176$
	$U_{ref,G4031}=1.236$	$U_{ref,G4041}=1.14$	$U_{ref,G4031}=1.195$
	$U_{ref,G4041}=1.148$	$U_{ref,G4047}=1.196$	$U_{ref,G4041}=1.154$
90	$U_{ref,G4051}=1.16$	$U_{ref,G4063}=1.039$	$U_{ref,G4051}=1.157$
	$n_{t(4042-42)}=1.1035$	$n_{t(4042-42)}=1.1035$	$U_{ref,G4063}=1.039$
	$n_{t(4051-51)}=0.9332$	$n_{t(4047-47)}=0.9165$	$n_{t(4042-42)}=1.1035$
	$n_{t(4041-41)}=0.9933$	$n_{t(4044-1044)}=1.0334$	$n_{t(4051-51)}=0.9332$
			$n_{t(4044-1044)}=1.0501$
120	$U_{ref,G4021}=1.168$	$n_{t(4042-42)}=1.1202$	$U_{ref,G4021}=1.179$
	$n_{t(4042-42)}=1.1202$		$U_{ref,G4031}=1.212$

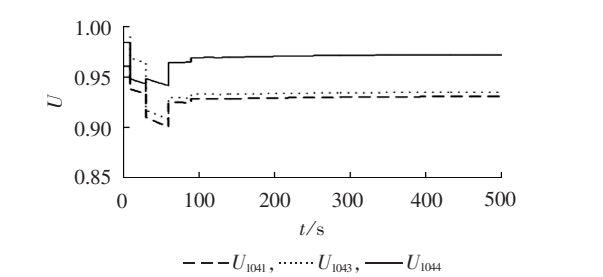


图 6 采用原始决策集 LMPC 方法的电压响应曲线
Fig.6 Curves of voltage response with LMPC using original decision set

理,采用 NLMPC^[4]方法直接对非线性模型进行优化,所得电压响应曲线如图 7 所示,寻优采用遗传算法^[16],群体规模 20,变异概率 0.1,交叉概率 0.8,遗传代数 100,积分步长 1 s。控制动作策略见表 3,在 $t=30$ s 时分别在节点 43、1041 处切除 5%、10% 的负荷。

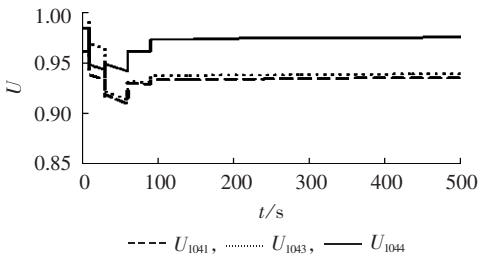


图 7 采用原始决策集 NLMPC 方法的电压响应曲线
Fig.7 Curves of voltage response with NLMPC using original decision set

引入电压偏移指标,系统中 22 个负荷节点电压偏移量由式(12)求得:

$$\Delta U_{sum} = \sum_{i=1}^{22} \left(\frac{1}{\Delta t} \int_t^{t+\Delta t} |U_{ri} - \hat{U}_i(t)| dt \right) \quad (12)$$

其中, U_{ri} 为第 i 个负荷节点处的电压参考值, $\hat{U}_i$ 为第 i 个负荷节点处的电压幅值,故障发生时刻 $t=10$ s,积分时间 Δt 选取为 500 s。电压偏移总量越小,则表明全局控制效果越好。CDSRS+LMPC 与采用原始决策集的 LMPC 和 NLMC 的控制性能对比见表 4,表中仅取平均优化时间(包含决策集筛选时间)进行对比。

表 4 控制性能对比
Tab.4 Comparison of control performance

控制方法	优化时间/s	电压偏移总量	总负荷切除/(MV·A)
CDSRS+LMPC	0.44	0.2143	112+j32.9
LMPC	2.28	0.2216	125+j36.4
NLMPC	2304.21	0.2017	105+j31.94

通过结果可见,筛选后的备选决策集规模得到显著降低,而且能够完全覆盖筛选前的最优决策集,确保了优化的全局性效果;通过仿真验证了提出方法的有效性,采用 CDSRS+LMPC 方法的电压偏移和切负荷指标与采用原始决策集的 NLMPC、LMPC 方法基本相同;决策集筛选所需的电压预测幅值与控制响应信息不额外消耗计算时间,在优化环节计算速度方面有突出优势,相比采用原始决策集的 LMPC 和 NLMPC 方法分别减少了 80.7% 和 99.9% 以上的优化时间,降低了电压协调优化问题的复杂度,有效避免了电压协调控制的决策集爆炸问题。

4 结论

本文提出了一种基于模糊聚类滚动筛选决策集的电压协调控制方法,能够有效协调不同地点和类型的控制措施,使故障后系统电压渐近稳定。该方

法主要具有以下优点。

- a. 通过计算控制变量对节点电压的预测响应,将最优协调电压控制模型的求解转化为以控制调节量为独立变量的混合整数规划问题,更加易于处理。
- b. 采用模糊聚类方法确定优化目标节点,并在此基础上进行备选决策筛选。所需的控制响应特性与电压预测幅值信息直接从模型预测过程中提取,计算时间在电压协调优化过程中可忽略不计,且优化目标节点的确定方法对故障具有良好的适应性。
- c. 聚类和筛选方法考虑了电压的动态响应过程,避免了采用静态指标可能带来的控制失效问题。
- d. 在确保全局控制效果的前提下能够显著降低优化问题规模,可以有效避免大规模电力系统电压协调控制中可能存在的决策集爆炸问题。

参考文献:

[1] FAIRLEY P. The unruly power grid[J]. IEEE Spectrum,2004, 41(8):16-21.

[2] CUTSEM T V,VOURNAS C D. Voltage stability of electric power systems[M]. Boston,MA,USA:Kluwer,1998:2-7.

[3] 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 Dazhong,CHAN Kawing,et al. Study on novel model for optimal coordinated voltage emergency control [J]. Proceedings of the CSEE,2007,27(10):35-41.

[4] 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.

[5] 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.

[6] 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.

[7] ZIMA M,KORBAP,ANDERSSON G. Power systems voltage emergency control approach using trajectory sensitivities[C]// Proceedings of 2003 conference on Control Applications. Istanbul, Turkey:IEEE,2003:189-194.

[8] HISKENS I A,GONG B. Voltage stability enhancement via model predictive control of load[J]. Intelligent Automation and Soft Computing,2006,12(1):117-124.

[9] 刘水平,刘明波,谢敏. 应用 MPC 和轨迹灵敏度技术实现最优协调电压控制[J]. 电力系统保护与控制,2011,39(1):1-6.

LIU Shuiping,LIU Mingbo,XIE Min. Optimal coordinated voltage control using MPC and trajectory sensitivity technique[J]. Power System Protection and Control,2011,39(1):1-6.

[10] JIN Licheng,KUMAR R. Security constrained coordinated dynamic voltage stabilization based on model predictive control [C]//Proceedings of 2009 IEEE Power and Energy Society General Meeting. Calgary,AB,Canada:[s.n.],2009:1-8.

[11] 杨纶标. 模糊数学原理及应用[M]. 广州:华南理工大学出版社,2005:70-77.

[12] 康勇,李华强,郑武,等. 基于能量灵敏度矩阵和模糊聚类分析

的电压控制分区[J]. 电力系统保护与控制,2011,39(12):69-73.

KANG Yong,LI Huaqiang,ZHENG Wu,et al. Voltage control partitioning based on energy sensitivity matrix and fuzzy clustering analysis[J]. Power System Protection and Control,2011,39(12):69-73.

[13] STUBBE M. Long term dynamics phase II [R]. Madrid,Spain: CIGRE Task Force,1995.

[14] KARLSSON D,HILL D J. Modeling and identification of nonlinear dynamic loads in power systems[J]. IEEE Trans on Power Systems,1994,9(1):157-163.

[15] RICHARD E. GAMS-A users guide[M]. Washington DC,USA:

GAMS Development Corporation,2010:15-16.

[16] 周明,孙树栋. 遗传算法原理及应用[M]. 北京:国防工业出版社,1995:32-64.

作者简介:

张 岩(1986-),男,山东泰安人,博士研究生,研究方向为电力系统电压稳定与控制(E-mail:zysol@126.com);

张 文(1966-),女,山东淄博人,教授,博士,研究方向为电力系统优化运行、智能算法及其在电力系统中应用;

王 亮(1979-),男,山东荣成人,高级工程师,博士,主要从事电力系统运行与控制方面的技术工作。

Coordinated voltage control with CDSRS based on fuzzy clustering analysis

ZHANG Yan¹,ZHANG Wen¹,WANG Liang²

(1. School of Electrical Engineering,Shandong University, Ji'nan 250061,China;

2. Shandong Electric Power Dispatch Center,Ji'nan 250001,China)

Abstract: Based on the model predictive control,a method of coordinated voltage control with CDSRS (Candidate Decision Set Rolling Selection) is proposed. By obtaining the response characteristic of optimal objective node voltage to control variable in the prediction period,the task to solve the coordinated voltage control model is converted into that to carry out the mixed-integer linear programming. According to the locality of voltage control and with the predicted voltage amplitude and response information obtained during the model prediction as the clustering feature indexes,the fuzzy clustering method is applied to determine the optimal objective node after fault,based on which,the CDSRS is carried out according to the significance degree of voltage response. Simulative results show that,under the premise of global coordinated control performance,the scale of candidate decision sets is significantly decreased and the time of optimization calculation is obviously reduced,effectively avoiding the problem of decision set explosion in coordinated voltage control.

Key words: voltage control; fuzzy clustering; decision set selection; optimization; model predictive control; models

(上接第 20 页 continued from page 20)

Analysis model of 10 kV backbone network in center area

GE Shaoyun¹,HAN Jun¹,LIU Hong¹,LIU Yang¹,WANG Saiyi²,

ZHU Yongwei²,CHENG Zhengmin²,LIANG Yichen²

(1. Key Laboratory of Smart Grid,Ministry of Education,Tianjin University,Tianjin 300072,China;

2. Urban Power Supply Company,SMEPC,Shanghai 200080,China)

Abstract: An analysis model of medium voltage distribution network is built for analyzing and generalizing the structure of 10 kV backbone network. Combined with the basic concept of layered and blocked medium distribution network,the concept of 10 kV backbone network and secondary network are defined to set the hierarchy and functional orientation of medium voltage distribution network,and combined with the requirements for high power supply ability and reliability of distribution network in center area,a contact model of typical power block and a binding analysis model of space distribution for substations and K-stations are constructed based on K-type power supply mode,which provides the theoretical basis for improving the power supply level of backbone network and properly planning the power service areas. To verify the rationality and validity of the proposed model,the parameter boundary conditions of a distribution network in center area are set according to its actual operational situation and the corresponding model analysis and calculation are carried out.

Key words: distribution network; layered and blocked; backbone network; electric substations; models; electric network analysis