

# 暂态电压安全紧急切负荷控制优化研究

林舜江, 刘明波, 周欣, 潮铸

(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:** 建立电力系统暂态电压安全分析的微分代数方程组模型, 并推导出负荷采用三阶感应电动机并联恒阻抗模型时切负荷控制的表示方法。提出暂态电压安全紧急控制优化的数学模型: 暂态电压安全约束包括防止系统发生暂态电压失稳和暂态电压延时恢复两个方面, 目标函数为控制费用最小, 控制变量为切负荷比例。采用轨迹灵敏度描述暂态电压安全约束函数与控制变量之间的近似线性增量关系, 从而将优化控制模型转化为线性整数规划模型。并采用一种启发式优化算法求得模型的近似最优解。对 IEEE 39 节点系统的仿真计算验证了所提出模型和算法的正确有效性。

**关键词:** 电力系统; 暂态电压安全; 紧急控制优化; 切负荷; 轨迹灵敏度

## Emergency load shedding control optimization for transient voltage security

LIN Shun-jiang, LIU Ming-bo, ZHOU Xin, CHAO Zhu

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

**Abstract:** The differential and algebraic equations model of analyzing power system transient voltage security is established. And representation of load shedding in terms of three order induction motor paralleled with constant impedance load model is deduced. The mathematical model of transient voltage security emergency control optimization is presented: transient voltage security constraints include two aspects of avoiding transient voltage instability and transient delayed voltage recovery, objective function is the minimum of control cost, and control variable is the load shedding proportion. The approximate linear relationship between transient voltage security constraint functions and control variables is represented using trajectory sensitivity, and the optimal model is transformed into static linear integer programming model. A heuristic optimal algorithm is used to get the solution of the optimal model. Simulation result of the IEEE 39 bus system validates the correctness and effectiveness of the optimal model and algorithm.

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

**Key words:** power system; transient voltage security; optimal emergency control; load shedding; trajectory sensitivity

中图分类号: TM712 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)11-0018-07

## 0 引言

近些年来, 实际电力系统在发生故障后, 系统中出现暂态电压失稳、暂态电压延时恢复等暂态电压不安全事故日益增多<sup>[1-4]</sup>。由于故障引起了系统中某些负荷母线的电压跌落, 负荷中的感应电动机在电压下降条件下吸收的有功功率先减小后不断恢复、吸收的无功功率反而增大, 感应电动机在其端电压低于某限定值下会发生堵转并从电网吸收的无功功率急剧增大, 这些快速动态特性造成了系统某些母线出现暂态电压延时恢复、甚至快速的暂态电

压失稳。

20 世纪 90 年代初, 电力系统电压稳定性研究在我国处于刚起步阶段, 由于感应电动机快速动态负荷堵转引起的暂态电压失稳通过时域仿真可清晰地看到, 暂态电压稳定的研究就随着兴起<sup>[5-6]</sup>。暂态电压安全指的是电力系统同时保持暂态电压稳定和暂态电压跌落可接受性<sup>[7]</sup>。暂态电压安全控制有预防控制和紧急控制两种<sup>[8-9]</sup>。暂态电压安全紧急控制在检测到系统中发生故障后实施, 将故障后本来会出现暂态电压不安全的系统, 校正到暂态电压安全状态。暂态电压安全紧急控制措施主要是快速切负荷, 对于切负荷控制的动作时间, 一般情况下动作得越早, 控制效果越好, 考虑到信息传递、控制动

基金项目: 国家自然科学基金项目 (50777021)

作所需的时间, 可假定为故障发生后 0.5 s 时动作; 而切负荷地点和切负荷量则与具体故障有关, 必须在保证系统故障后暂态电压安全前提下使控制费用最小化, 这可通过求解优化问题来确定。文献[10]研究了暂态安全紧急切负荷控制优化, 通过在目标函数中迭加一项母线电压偏差, 使暂态过程中的母线电压符合要求, 然而, 该文没有考虑对系统暂态电压行为有很大影响的负荷动态特性, 并且也没有考虑电网中切负荷控制的离散特性。

本文在推导出负荷采用三阶感应电动机并联恒阻抗模型时切负荷控制的表示方法基础上, 提出电力系统暂态电压安全紧急控制优化的数学模型, 模型中考虑了切负荷比例是离散变量的实际情况。基于轨迹灵敏度法将优化控制模型转化为静态的线性整数规划模型, 并采用一种启发式优化算法求得模型的近似最优解。对 IEEE 39 节点系统的仿真计算验证了所提出模型和算法的正确有效。

## 1 暂态电压安全分析的数学模型

电力系统暂态电压安全问题的动态过程可用如式(1)和式(2)的微分代数方程组(DAE)模型描述, 其中:  $\mathbf{x}$  为系统状态变量;  $\mathbf{y}$  为母线电压;  $\mathbf{u}$  为控制变量。

$$\frac{d\mathbf{x}}{dt} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{u}) \quad (1)$$

$$\mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{u}) = 0 \quad (2)$$

式(1)为描述系统各元件动态的微分方程, 包括对暂态电压安全影响很大的发电机及其励磁系统的动态和负荷的动态。

发电机采用三阶实用模型, 如式(3)~式(5):

$$\frac{d\delta}{dt} = (\omega - 1)\omega_0 \quad (3)$$

$$T_j \frac{d\omega}{dt} = P_m - [E_q' i_q - (X_d' - X_q) i_d i_q] - D(\omega - 1) \quad (4)$$

$$T_{d0}' \frac{dE_q'}{dt} = E_{fd} - E_q' - (X_d - X_d') i_d \quad (5)$$

其中:  $i_d$  和  $i_q$  可由状态变量  $\delta$ 、 $E_q'$  以及发电机的端电压和内阻抗参数表示, 具体表达式见文献[11]。

励磁系统采用文献[12]中的模型, 如式(6):

$$T_E \frac{dE_{fd}}{dt} = -E_{fd} + K_A (V_{ref} - V_{gt}) \quad (6)$$

负荷则采用文献[11]中的三阶机电暂态感应电动机并联恒阻抗模型, 如式(7)~式(9):

$$\frac{de_x'}{dt} = s\omega_0 e_y' - \frac{1}{T_{d0}'} e_x' - \frac{x-x'}{T_{d0}'(r_1^2+x'^2)} [r_1(V_y - e_y') - x'(V_x - e_x')] \quad (7)$$

$$\frac{de_y'}{dt} = -s\omega_0 e_x' - \frac{1}{T_{d0}'} e_y' + \frac{x-x'}{T_{d0}'(r_1^2+x'^2)} [r_1(V_x - e_x') + x'(V_y - e_y')] \quad (8)$$

$$\frac{ds}{dt} = \frac{K_L [a + (1-a)(1-s)^n]}{T_{jl}} - \frac{(\eta e_y' + x' e_x')(V_y - e_y') + (\eta e_x' - x' e_y')(V_x - e_x')}{T_{jl}(r_1^2 + x'^2)} \quad (9)$$

式(2)为描述网络各个节点电压电流关系的代数方程, 如式(10), 假定系统含有  $n$  个节点。

$$\mathbf{Y}_{GL} \mathbf{E}_{GL} = (\mathbf{Y}_0 + \mathbf{Y}') \mathbf{V} \quad (10)$$

其中:  $\mathbf{V} = [V_{x1} \ V_{y1} \ \dots \ V_{xi} \ V_{yi} \ \dots \ V_{xn} \ V_{yn}]^T$  为节点电压向量;  $\mathbf{Y}_0$  为网络节点导纳矩阵;  $\mathbf{Y}' = \text{diag}(\mathbf{Y}_1', \dots, \mathbf{Y}_n')$ , 是由发电机和负荷并入网络的导纳所构成的矩阵;  $\mathbf{Y}_{GL} = \text{diag}(\mathbf{Y}_{GL1}, \dots, \mathbf{Y}_{GLi}, \dots, \mathbf{Y}_{GLn})$ ,  $\mathbf{E}_{GL} = [\mathbf{E}_{GL1}^T, \dots, \mathbf{E}_{GLi}^T, \dots, \mathbf{E}_{GLn}^T]^T$ 。

若节点  $i$  为发电机节点, 则

$$\mathbf{Y}_i' = \mathbf{Y}_{GLi} = \begin{bmatrix} G_{xi} & B_{xi} \\ B_{yi} & G_{yi} \end{bmatrix} \quad \mathbf{E}_{GLi} = \begin{bmatrix} E_{qi}' \cos \delta_i \\ E_{qi}' \sin \delta_i \end{bmatrix} \quad (11)$$

若节点  $i$  为负荷节点, 则

$$\mathbf{Y}_i' = \begin{bmatrix} G_i + \frac{r_i}{K_{Hi}(r_i^2 + x_i'^2)} & -B_i + \frac{x_i'}{K_{Hi}(r_i^2 + x_i'^2)} \\ B_i - \frac{x_i'}{K_{Hi}(r_i^2 + x_i'^2)} & G_i + \frac{r_i}{K_{Hi}(r_i^2 + x_i'^2)} \end{bmatrix} \quad \mathbf{Y}_{GLi} = \begin{bmatrix} \frac{r_i}{K_{Hi}(r_i^2 + x_i'^2)} & \frac{x_i'}{K_{Hi}(r_i^2 + x_i'^2)} \\ \frac{x_i'}{K_{Hi}(r_i^2 + x_i'^2)} & \frac{r_i}{K_{Hi}(r_i^2 + x_i'^2)} \end{bmatrix} \quad \mathbf{E}_{GLi} = \begin{bmatrix} e_{xi}' \\ e_{yi}' \end{bmatrix} \quad (12)$$

若节点  $i$  为网络联络节点, 则

$$\mathbf{Y}_i' = \mathbf{Y}_{GLi} = 0 \quad \mathbf{E}_{GLi} = 0 \quad (13)$$

式(11)中:  $G_{xi}$ 、 $B_{xi}$ 、 $B_{yi}$ 、 $G_{yi}$  为发电机  $i$  计及其凸极效应后并入网络的导纳, 它们都是其参数  $R_{ai}$ 、 $X_{di}'$ 、 $X_{qi}$  和功角  $\delta_i$  的函数; 式(12)中,  $G_i$  和  $B_i$  为负荷节点  $i$  静态部分的电导和电纳,  $K_{Hi}$  为负荷节点  $i$  的容量折算比, 即系统容量基值与负荷节点  $i$  的感应电动机容量基值之比; 其它各个量的物理意义则参见文献[11]。

## 2 切负荷的描述

负荷特性对电力系统切负荷控制决策是至关重要的, 不同的负荷模型对切负荷计算的结果有着重要的影响<sup>[13]</sup>。对于模型方程中显含有初始负荷功率的负荷模型, 如静态的幂函数和多项式模型、或者文献[14]和文献[15]中的功率恢复动态模型, 切负荷

控制的实施相当于直接减小初始负荷功率这个量即可。而三阶感应电动机并联恒阻抗动态负荷模型的方程中不显含有初始负荷功率,因而首先必须建立起这种负荷模型下切负荷控制的表示方法。

如果负荷切除的百分比为  $K_r$ ,并假定切除的负荷中静态部分和动态部分所占比例与原来一致,则负荷采用三阶感应电动机并联恒阻抗动态模型时切负荷控制的表示方法如下:

(1) 负荷中静态部分切除  $K_r$  相当于其导纳乘以  $(1-K_r)$ , 如式 (14):

$$\begin{cases} G' = (1-K_r)G \\ B' = (1-K_r)B \end{cases} \quad (14)$$

其中:  $G'$  和  $B'$  为切负荷后负荷中静态部分的电导和电纳。

(2) 负荷中感应电动机部分切除  $K_r$  相当于感应电动机的容量乘以  $(1-K_r)$ ,因而可通过改变容量折算比  $K_H$  加以体现,如式 (15):

$$K'_H = \frac{S_B}{S'_{BM}} = \frac{S_B}{(1-K_r)S_{BM}} = \frac{K_H}{1-K_r} \quad (15)$$

其中:  $K'_H$  为切负荷后的容量折算比;  $S_B$  为系统容量基值;  $S_{BM}$  和  $S'_{BM}$  为切负荷前和切负荷后感应电动机容量基值。

### 3 暂态电压安全紧急控制优化的数学模型

在暂态电压安全紧急控制优化模型中,暂态电压安全约束包括保证故障后系统暂态电压稳定和暂态电压跌落可接受性两方面。文献[7]指出暂态电压失稳的判据:如果感应电动机在其节点电压达到极小值时仍然加速,则认为转差率在这之后将继续减小,感应电动机保持稳定;如果感应电动机在其节点电压达到极大值时仍然减速,则认为转差率在这之后将继续增大,感应电动机失去稳定。因此,保证暂态电压稳定的约束可写为:在负荷母线电压达到极大值时,保持负荷中感应电动机加速,即保持感应电动机的电磁转矩大于机械转矩,并且留有一定的裕度,使得在负荷母线电压达到极小值时感应电动机仍然能够加速,可表示为:

$$P_{elf}(t_{vm}) - P_{mif}(t_{vm}) \geq \varepsilon_1 \quad (16)$$

其中:  $P_{elf}$  和  $P_{mif}$  为故障  $f$  的主导负荷母线  $l$  负荷中感应电动机部分的电磁转矩和机械转矩;  $t_{vm}$  为主导负荷母线电压达到极大值对应的的时间;可取  $\varepsilon_1 = 0.1 \text{ p.u.}$ ; 主导负荷母线的意义见文献[16]。

保证暂态电压跌落可接受性按照我国目前的标准是保持故障清除后 1 s 时负荷母线电压恢复到

0.75 p.u.以上<sup>[17]</sup>,可表示为:

$$V_{lf}(t_c + t_{lim}) \geq V_{lim} + \varepsilon_2 \quad (17)$$

其中:  $V_{lf}$  为故障  $f$  的主导负荷母线  $l$  的电压值;  $t_c$  为故障清除时间;  $t_{lim} = 1 \text{ s}$ ;  $V_{lim} = 0.75 \text{ p.u.}$ ; 可取  $\varepsilon_2 = 0.01 \sim 0.02 \text{ p.u.}$ 。

因此,以控制代价最小为目标函数,则暂态电压安全紧急控制优化决策的数学模型如下:

$$\min \sum_i c_i P_{i0} u_i \quad (18)$$

s.t. 式 (1) ~ 式 (2), 式 (16) ~ 式 (17)

$$\underline{u} \leq u \leq \bar{u} \quad \text{控制量上下限约束} \quad (19)$$

其中:  $u_i$  为负荷  $i$  的切负荷比例,为离散变量;  $P_{i0}$  为负荷  $i$  的初始有功;  $c_i$  为负荷  $i$  切除单位有功的费用,若负荷  $i$  的重要等级越高,则  $c_i$  取值越大。

## 4 紧急控制优化模型的求解方法

### 4.1 基于轨迹灵敏度的暂态电压安全约束的线性化

轨迹灵敏度分析通过将系统模型在系统轨迹的各个点上进行线性化,能够直接确定系统初始条件和参数发生微小变化时系统轨迹的变化<sup>[18]</sup>。轨迹灵敏度法是以时域仿真得到的系统轨迹为基础进行计算的,能够适应于采用详细模型描述系统元件的情况,并可方便地应用于 DAE 模型描述的电力系统。

将系统 DAE 模型式 (1) 和 (2) 两边对控制变量求导,得到灵敏度的轨迹方程:

$$\frac{dx_u}{dt} = \frac{\partial f}{\partial x} x_u + \frac{\partial f}{\partial y} y_u + \frac{\partial f}{\partial u} \quad (20)$$

$$\frac{\partial g}{\partial x} x_u + \frac{\partial g}{\partial y} y_u + \frac{\partial g}{\partial u} = 0 \quad (21)$$

其中:  $x_u$  和  $y_u$  分别为状态变量和母线电压(代数变量)对控制变量的轨迹灵敏度矩阵。

对于轨迹灵敏度的计算,紧急控制的实施相当于改变了系统代数方程组中负荷节点的自导纳参数,由紧急控制实施时刻系统状态变量不发生突变的性质可得该时刻状态变量关于控制变量的灵敏度为零,而该时刻代数变量关于控制变量的灵敏度可由式 (21) 求得;进而采用数值积分方法求解灵敏度的轨迹方程式 (20) 和 (21),即可计算控制实施后各个时刻系统状态变量和母线电压的轨迹灵敏度。

轨迹灵敏度反映了暂态电压安全约束函数与控制变量之间的近似线性增量关系,由控制变量变化  $\Delta u$  引起的某一时刻  $t$  状态变量变化量  $\Delta x(t)$  和母线电压变化量  $\Delta y(t)$  可近似为:

$$\Delta x(t) = x_u(t) \Delta u \quad (22)$$

$$\Delta \mathbf{y}(t) = \mathbf{y}_u(t) \Delta \mathbf{u} \quad (23)$$

进而由  $\Delta \mathbf{x}(t)$  和  $\Delta \mathbf{y}(t)$  可算出  $\Delta \mathbf{u}$  引起的暂态电压安全约束函数的变化量。

由于轨迹灵敏度是对系统轨迹与控制变量之间变化关系的一种线性近似, 所以采用轨迹灵敏度处理暂态电压安全约束后得到的优化问题的解有可能还不满足原来的暂态电压安全约束 (16) 和 (17), 但此解已离满足式 (16) 和式 (17) 比较接近, 所以, 可在此解的基础上再进行轨迹灵敏度计算并再次求解优化问题, 则得到的解会更接近满足或者已经满足原来的暂态电压安全约束, 这相当于在优化问题的外部再增加一层迭代, 以保证可靠地得到满足原来的暂态电压安全约束的解。通过轨迹灵敏度计算, 暂态电压安全约束转化为 ( $k$  为外层迭代次数):

$$[P_{elf}^{k-1}(t_{vm}) - P_{mif}^{k-1}(t_{vm})] + \left. \frac{\partial(P_{elf} - P_{mif})}{\partial \mathbf{u}} \right|_{t=t_{vm}} (\mathbf{u}^k - \mathbf{u}^{k-1}) \geq \varepsilon_1 \quad (24)$$

$$V_{lf}^{k-1}(t_c + t_{lim}) + \left. \frac{\partial V_{lf}}{\partial \mathbf{u}} \right|_{t=t_c + t_{lim}} (\mathbf{u}^k - \mathbf{u}^{k-1}) \geq V_{lim} + \varepsilon_2 \quad (25)$$

其中: 各负荷节点的初始切负荷比例  $u_i^0 = 0$ 。

#### 4.2 紧急控制优化模型的求解算法

将暂态电压安全约束函数对控制变量线性化后, 紧急控制优化决策的数学模型转化为:

$$\min \sum_i c_i P_{i0} (u_i^k - u_i^{k-1}) \quad (26)$$

$$\text{s.t. 式 (24) ~ 式 (25)}$$

$$\underline{\mathbf{u}} \leq \mathbf{u}^k \leq \bar{\mathbf{u}} \quad (27)$$

这是一个线性整数规划问题, 其控制变量即切负荷比例是离散变量, 使得无法采用线性连续规划的方法 (如单纯型法) 进行求解。因而, 根据该优化模型的特点, 采用如下的启发式优化算法进行求解。

基于暂态电压安全约束函数对控制变量的灵敏度值和控制变量的费用系数值, 定义指标:

$$L_{si} = \frac{\left. \frac{\partial(P_{elf} - P_{mif})}{\partial u_i} \right|_{t=t_{vm}} + \left. \frac{\partial V_{lf}}{\partial u_i} \right|_{t=t_c + t_{lim}}}{c_i P_{i0}} \quad (28)$$

可见, 指标  $L_{si}$  的分子反映了各负荷节点切除单位比例负荷后对于系统暂态电压安全的改善程度, 分母反映了各负荷节点切除单位比例负荷的控制费用, 因而其大小反映了在同样控制代价下不同负荷节点实施切负荷对于系统暂态电压安全的改善程度的大小。

因此, 可按照各负荷节点  $L_{si}$  值从大到小顺序依

次对各个负荷节点按式 (27) 给出的最大可切除比例  $\bar{u}_i$  进行切除, 直到式 (24) 和式 (25) 都满足;

当式 (24) 先满足时, 则令  $L_{si} = \left. \frac{\partial V_{lf}}{\partial u_i} \right|_{t=t_c + t_{lim}} / c_i P_{i0}$ ,

再按照各负荷节点新的  $L_{si}$  值从大到小顺序进行切负荷; 同理, 当式 (25) 先满足时, 则令

$$L_{si} = \left. \frac{\partial(P_{elf} - P_{mif})}{\partial u_i} \right|_{t=t_{vm}} / c_i P_{i0},$$

再按照各负荷节点新的  $L_{si}$  值从大到小顺序进行切负荷; 在式 (24) 和式 (25) 都满足后, 则对最后一个切负荷节点按其最小切负荷步长减小切负荷比例, 直到再减小将造成不满足式 (24) 或 (25) 为止。这样, 所得的解  $\mathbf{u}^k$  就是在保证满足系统线性化暂态电压安全约束 (24) 和 (25) 条件下尽量减小控制费用的近似最优解。显然, 和众多的迭代算法相比, 启发式算法的优点是计算简单, 且不存在收敛问题。

## 5 算例分析

IEEE 39 节点系统如图 1, 系统线路和变压器参数参见文献[19]。发电机参数见表 1, 其励磁调节系统参数都为  $T_E=0.02$ ,  $K_A=15$ 。除发电机端的负荷 31 和 39 采用静态恒阻抗模型外, 其它各负荷都采用三阶感应电动机并联恒阻抗动态模型, 模型参数都采用表 2 中的值。17 个切负荷点的费用系数  $c_i$  都设为 1 000 \$/h, 最小切负荷步长都为 5%, 最大可切负荷比例都为 30%。暂态电压安全约束中取  $\varepsilon_1=0.1$ ,  $\varepsilon_2=0.02$ 。系统初始运行方式在文献[19]初始方式的基础上增加负荷 12 的有功功率至 70 MW。考虑如下三个故障情况:

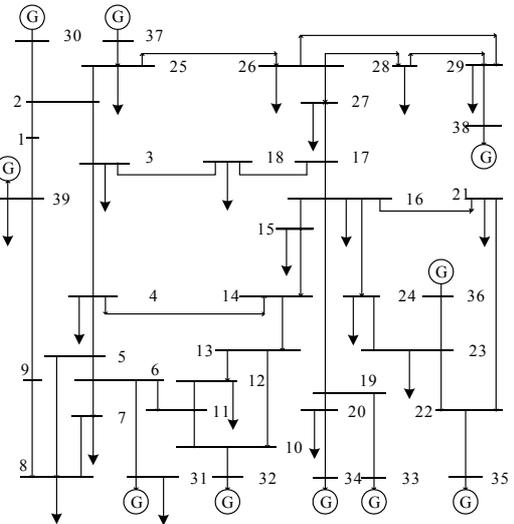


图 1 IEEE 39 节点系统结构

Fig.1 Structure of the IEEE 39-bus system

表 1 发电机的参数值

Tab.1 Parameters of generators

发电机	$R_a$	$X_d$	$X'_d$	$X_q$	$T'_{d0}$	$T_j$	$D$
30	0	0.1	0.031	0.069	10.2	84	10
31	0	0.295	0.069 7	0.282	6.56	60	10
32	0	0.249 5	0.053 1	0.237	5.7	71.6	10
33	0	0.262	0.043 6	0.258	5.69	57.2	10
34	0	0.67	0.132	0.62	5.4	52	10
35	0	0.254	0.05	0.241	7.3	69.6	10
36	0	0.295	0.049	0.292	5.66	52.8	10
37	0	0.29	0.057	0.28	6.7	48.6	10
38	0	0.210 6	0.057	0.205	4.79	69	10
39	0	0.02	0.006	0.019	7	1 000	10

表 2 负荷动态模型的参数值

Tab.2 Parameters of dynamic load model

$r_1$	$x_1$	$r_2$	$x_2$	$x_m$
0	0.295	0.02	0.12	3.5
$T_{jl}$	$a$	$n$	$s_0$	$k_d$
2	0.15	2	0.011 6	0.65

- (1)故障 1 为线路 4-14 距离母线 4 侧 1%位置发生三相接地短路, 经过 0.20 s 后清除线路;
- (2)故障 2 为线路 5-8 距离母线 8 侧 1%位置发生三相接地短路, 经过 0.22 s 后清除线路;
- (3)故障 3 为线路 10-13 距离母线 13 侧 1%位置发生三相接地短路, 经过 0.20 s 后清除线路。

由故障位置可断定母线 4 为故障 1 的主导负荷母线, 母线 8 为故障 2 的主导负荷母线, 母线 12 为故障 3 的主导负荷母线。各个故障下主导负荷母线电压如图 2~图 4, 可以看到, 故障 1 造成母线 4 发生暂态电压失稳, 故障 2 造成母线 8 发生暂态电压失稳, 而故障 3 造成母线 12 发生暂态电压延时恢复, 故障清除后 1.0 s 电压只恢复到 0.729 8。

通过采用启发式优化方法求解紧急控制优化模型, 得到这三个故障对应的切负荷方案如表 3。各个故障切负荷控制后主导负荷母线的电压如图 2~图 4。由图 2, 系统在发生故障 1 后实施切负荷, 母线 4 不仅能够保持暂态电压稳定, 而且故障清除后 1.0 s 电压恢复到 0.964 0; 由图 3, 系统在发生故障 2 后实施切负荷, 母线 8 不仅能够保持暂态电压稳定, 而且故障清除后 1.0 s 电压恢复到 0.897 6; 由图 4, 系统在发生故障 3 后实施切负荷, 母线 12 电压在故障清除后 1.0 s 恢复到 0.862 7; 可见, 在系统发生相应故障后按其优化控制结果实施切负荷, 系统都能够保持暂态电压安全, 这表明了上面紧急

控制优化模型的正确有效。

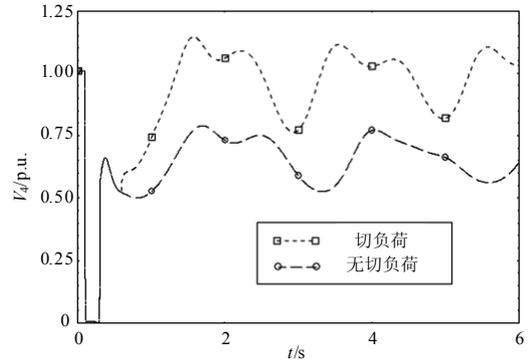


图 2 对故障 1 有无实施切负荷母线 4 电压曲线

Fig.2 Bus-4 voltage at fault-1 with and without load shedding

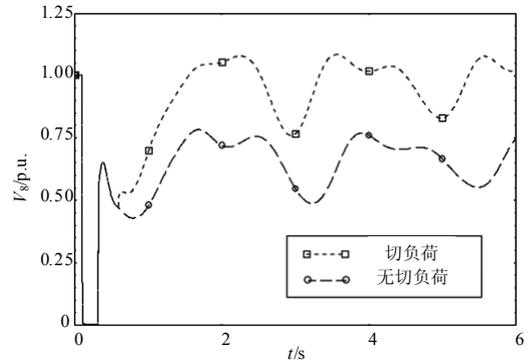


图 3 对故障 2 有无实施切负荷母线 8 电压曲线

Fig.3 Bus-8 voltage at fault-2 with and without load shedding

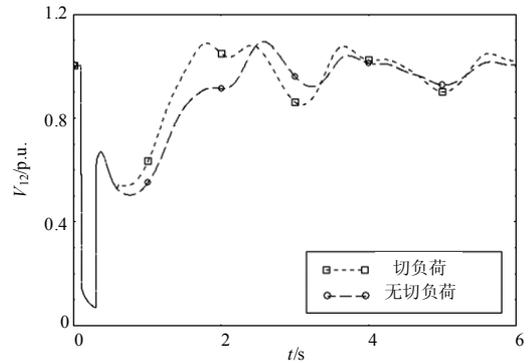


图 4 对故障 3 有无实施切负荷母线 12 电压曲线

Fig.4 Bus-12 voltage at fault-3 with and without load shedding

表 3 中还显示了把切负荷比例作为连续变量采用内点法优化得到的三个故障对应的切负荷方案, 与之比较可以看出, 考虑切负荷比例离散特性的启发式优化方法得到的方案都是在实施切负荷控制的节点中指标  $L_{si}$  值最小的节点, 其切负荷比例值等于比连续取值大的最接近连续取值的离散档位, 显然, 此方案很接近理想的连续最优解。因此, 本文的启

发式优化方法能够得到最优性很好的切负荷方案。

表 3 暂态电压安全紧急控制优化结果

Tab.3 Results of transient voltage security emergency control optimization

负荷母线	故障 1			故障 2			故障 3		
	$L_{si}$	$K_{ri}$ (启发式)	$K_{ri}$ (连续)	$L_{si}$	$K_{ri}$ (启发式)	$K_{ri}$ (连续)	$L_{si}$	$K_{ri}$ (启发式)	$K_{ri}$ (连续)
3	$3.038 \times 10^{-5}$	0.3	0.3	$1.317 \times 10^{-5}$	0	0	$4.586 \times 10^{-5}$	0	0
4	$1.016 \times 10^{-4}$	0.3	0.3	$4.071 \times 10^{-5}$	0.3	0.3	$1.349 \times 10^{-4}$	0.2	0.150 8
7	$5.251 \times 10^{-5}$	0.3	0.3	$8.534 \times 10^{-5}$	0.3	0.3	$1.252 \times 10^{-4}$	0	0
8	$5.092 \times 10^{-5}$	0.3	0.3	$9.565 \times 10^{-5}$	0.3	0.3	$1.211 \times 10^{-4}$	0	0
12	$5.959 \times 10^{-5}$	0.3	0.3	$5.694 \times 10^{-5}$	0.3	0.3	$4.582 \times 10^{-4}$	0.3	0.3
15	$2.746 \times 10^{-5}$	0.25	0.208 5	$1.916 \times 10^{-5}$	0.15	0.147 5	$7.617 \times 10^{-5}$	0	0
16	$1.582 \times 10^{-5}$	0	0	$1.057 \times 10^{-5}$	0	0	$3.994 \times 10^{-5}$	0	0
18	$2.730 \times 10^{-5}$	0	0	$1.392 \times 10^{-5}$	0	0	$4.930 \times 10^{-5}$	0	0
20	$9.187 \times 10^{-6}$	0	0	$7.577 \times 10^{-6}$	0	0	$2.499 \times 10^{-5}$	0	0
21	$1.595 \times 10^{-5}$	0	0	$1.165 \times 10^{-5}$	0	0	$4.131 \times 10^{-5}$	0	0
23	$8.572 \times 10^{-6}$	0	0	$8.351 \times 10^{-6}$	0	0	$2.680 \times 10^{-5}$	0	0
24	$8.467 \times 10^{-6}$	0	0	$6.123 \times 10^{-6}$	0	0	$2.399 \times 10^{-5}$	0	0
25	$1.343 \times 10^{-5}$	0	0	$7.592 \times 10^{-6}$	0	0	$2.652 \times 10^{-5}$	0	0
26	$1.450 \times 10^{-5}$	0	0	$8.493 \times 10^{-6}$	0	0	$3.008 \times 10^{-5}$	0	0
27	$2.136 \times 10^{-5}$	0	0	$1.191 \times 10^{-5}$	0	0	$4.234 \times 10^{-5}$	0	0
28	$9.753 \times 10^{-6}$	0	0	$6.639 \times 10^{-6}$	0	0	$2.284 \times 10^{-5}$	0	0
29	$6.958 \times 10^{-6}$	0	0	$5.627 \times 10^{-6}$	0	0	$1.869 \times 10^{-5}$	0	0
费用/( $\$ \cdot h^{-1}$ )	-	5 743.4	5 610.5	-	4 457.4	4 449.5	-	1 210.0	964.0

由表 3 还可看到, 优化后的切负荷方案中切除的都是主导负荷母线附近节点的负荷。这是因为主导负荷母线附近负荷的动态特性对其电压的恢复影响较大, 它们的  $L_{si}$  值都比较大, 在满足系统暂态电压安全条件下对其实施切负荷的控制费用会比较小。

## 6 结论

本文提出了电力系统暂态电压安全紧急控制优化的数学模型, 基于轨迹灵敏度法建立优化模型转化的线性整数规划模型, 并采用一种启发式优化算法求得模型的近似最优解。算例分析表明, 所提出的模型和算法能够得到系统在不同故障下满足其暂态电压安全要求的紧急切负荷控制方案, 并且切除故障对应的主导负荷母线附近的负荷能够减小切负荷控制的费用。

## 参考文献

[1] John A, Diaz de Leon II, Taylor C W. Understanding and solving short-term voltage stability problem[C].// Proceedings of IEEE Power Engineering Society Summer Meeting. Chicago(USA): 2002.

[2] Potamianakis E G, Vourmas C D. Short-term voltage

instability: effects on synchronous and induction machines[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2006, 21 (2): 791-798.

[3] Halpin S M, Jones R A, Taylor L Y. The MVA-volt index: a screening tool for predicting fault-induced low voltage problems on bulk transmission systems[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2008, 23 (3): 1205-1210.

[4] Halpin S M, Harley K A, Jones R A, et al. Slope-permissive under-voltage load shed relay for delayed voltage recovery mitigation[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2008, 23 (3): 1211-1216.

[5] 段献忠, 何仰赞, 陈德树. 电力系统暂态电压稳定的基本概念和仿真分析[J]. 华中理工大学学报, 1995, 23 (4): 21-24.

DUAN Xian-zhong, HE Yang-zan, CHEN De-shu. The basic concept and simulation analysis of the transient voltage stability in electric power system[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology, 1995, 23 (4): 21-24.

[6] 徐泰山, 薛禹胜, 韩祯祥. 暂态电压稳定的模型要求和快速判断[J]. 电力系统自动化, 1995, 19 (12): 11-15.

XU Tai-shan, XUE Yu-sheng, HAN Zhen-xiang. Modeling requirements and fast judgment of transient voltage stability[J]. Automation of Electric Power

- Systems, 1995, 19 (12): 11-15.
- [7] 薛禹胜, 徐泰山, 刘兵. 暂态电压稳定性及电压跌落可接受性[J]. 电力系统自动化, 1999, 23 (14): 4-8. XUE Yu-sheng, XU Tai-shan, LIU Bing. Quantitative assessments for transient voltage security[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23 (14): 4-8.
- [8] 薛禹胜, 王正风. 暂态电压安全预防控制的优化[J]. 电力系统自动化, 2006, 30 (9): 1-4. XUE Yu-sheng, WANG Zheng-feng. Optimization of preventive control for transient voltage security[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30 (9): 1-4.
- [9] 徐泰山, 牟宏, 邱夕兆, 等. 山东电网暂态低电压切负荷紧急控制的量化分析[J]. 电力系统自动化, 1999, 23 (21): 9-11. XU Tai-shan, MOU Hong, QIU Xi-zhao, et al. Quantitative analysis of under voltage load shedding system for Shandong power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23 (21): 9-11.
- [10] Enrico De Tuglie, Maria Dicorato, Massimo La Scala, et al. A corrective control for angle and voltage stability enhancement on the transient time-scale[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2000, 15 (4): 1345-1353.
- [11] 西安交通大学, 清华大学, 浙江大学, 等. 电子数字计算机的应用——电力系统计算[M]. 北京: 水利电力出版社, 1978.
- [12] de Mello F P, Feltes J W. Voltage oscillatory instability caused by induction motor loads[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1996, 11 (3): 1279-1285.
- [13] Stefan Arnborg, Goran Andersson, Hill D J, et al. On influence of load modeling for undervoltage load shedding studies[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1998, 13 (2): 395-40.
- [14] Pal M P. Assessment of corrective measures for voltage stability considering load dynamics[J]. Electrical Power & Energy Systems, 1995, 17 (5): 325-334.
- [15] Karisson D, Hill D J. Modelling and identification of nonlinear dynamic loads in power systems[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1994, 9 (1): 157-166.
- [16] 林舜江, 李欣然, 刘杨华, 等. 考虑负荷动态模型的暂态电压稳定快速判断方法[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29 (4): 14-20. LIN Shun-jiang, LI Xin-ran, LIU Yang-hua, et al. Method for transient voltage stability quick judgment considering load dynamic model[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29 (4): 14-20.
- [17] 马世英, 印永华, 汤涌, 等. 短期和中长期电压稳定仿真及评价[J]. 电网技术, 2006, 30 (19): 14-20. MA Shi-ying, YIN Yong-hua, TANG Yong, et al. Simulation and evaluation for short term and mid/long term voltage stability[J]. Power System Technology, 2006, 30 (19): 14-20.
- [18] Hiskens I A, Pai M A. Trajectory sensitivity analysis of hybrid systems[J]. IEEE Trans on Circuits and Systems—Part I: Fundamental Theory and Applications, 2000, 47 (2): 204-220.
- [19] 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, 2004.

收稿日期: 2009-10-12; 修回日期: 2009-12-07

作者简介:

林舜江(1980-), 男, 在站博士后研究人员, 主要研究方向为电力系统优化、运行与控制; E-mail: lsj19800918@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。

(上接第 17 页 continued from page 17)

## 参考文献

- [1] 施晓秋. BP 网络与 CMAC 用于非线性曲线拟合[J]. 温州大学学报, 2001(1): 46-49.
- [2] 李贵存, 刘万顺. 用于磁化曲线拟合的高精度混合型径向基函数神经网络[J]. 电网技术, 2001, 25(12).
- [3] Vapnik V N. The Nature of Statistical Learning Theory [M]. New York: Springer, 1995.
- [4] Drucker H, Burges C J C, Kaufman L. Support vector regression machines[C]//Advances in Neural Information Processing Systems. Cambridge: MIT Press, 1997: 155-161.
- [5] 赵春晖, 陈万海, 郭春燕. 多类支持向量机方法的研究现状与分析[J]. 智能系统学报, 2007, 2 (4): 11-17. ZHAO Chun-hui, CHEN Wan-hai, GUO Chun-yan. Research and analysis of methods formulticlass support vector machines[J]. CAAI Transa on Intellient Systems 2007, 2 (4): 11-17.
- [6] 阎威武, 邵惠鹤. 支持向量机和最小二乘支持向量机的比较及应用研究[J]. 控制与决策, 2003, 18 (3): 358-360.
- [7] 郑小霞, 钱锋. 高斯核支持向量机分类和模型参数选择研究[J]. 计算机工程与应用, 2006, 42 (1): 77-79.
- [8] Chapell O, Vapniketal V. Choseing multiple parameters for support vector machines[J]. Machine Learning, 2002, 46: 131-160.

收稿日期: 2009-07-27; 修回日期: 2009-08-25

作者简介:

尉军军(1984-), 男, 硕士研究生, 主要从事高压电能检测及计量的现场校验方法关键技术研究。E-mail: weijunjun3902@yahoo.com.cn