

暂态电压安全预防控制优化的轨迹灵敏度法

林舜江^{1,2}, 刘明波^{1,2}

(1. 华南理工大学电力学院, 广东省广州市 510640; 2. 广东省绿色能源技术重点实验室, 广东省广州市 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, 并提出求解其预防控制优化问题的暂态电压安全约束最优潮流模型。在该模型中, 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 2 个方面; 目标函数为系统运行费用最小; 控制变量为发电机的有功输出、无功输出、有载调压变压器变比和并联电容器组投入电纳。基于轨迹灵敏度法, 得到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非线性规划模型。引入二次罚函数处理变压器变比和并联电容器组电纳等离散控制变量, 并采用非线性原对偶内点法求得优化模型的解。对 IEEE 39 节点系统的分析计算验证了所提出的优化模型和算法的正确性和有效性。

关键词: 预防控制; 暂态电压安全; 最优潮流; 轨迹灵敏度; 电力系统

0 引言

近年来, 电力系统暂态电压失稳和暂态电压延时恢复等不安全事故日益增多^[1-4]。由于系统故障引起了系统中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先减小后不断地恢复, 其吸收的无功不断增大; 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大量的无功, 这些快速动态特性造成了系统中一些母线出现暂态电压延时恢复, 甚至快速的暂态电压失稳。特别是在天气炎热条件下, 系统中含有大量容易堵转的低转动惯量电动机的负荷, 如空调、冰箱等, 此时系统更容易发生暂态电压不安全事故^[1-5]。

暂态电压安全预防控制是通过改变系统当前运行点, 使系统在出现暂态电压不安全的故障后, 仍能保持暂态电压安全。虽然预防控制的代价较低, 但不管故障是否发生, 它都会付出代价, 因而一般是针对一些发生概率较大的故障进行控制^[6-7]。暂态电压安全预防控制优化可通过暂态电压安全约束最优潮流 (transient voltage security constrained optimal power flow, TVSC-OPF) 模型进行求解。文献[8]通过调整发电机有功和无功出力以使暂态过程中的母线电压轨迹符合安全要求, 但没有考虑对系统暂态电压安全有很大影响的负荷动态特性。文献[9]建立了暂态电压安全预防控制优化的数学模型, 通过调整各节点的无功注入来提高系统暂态电压安全性, 但没有考虑发电机有功输出调整、有载

调压变压器分接头调整等控制手段对提高系统暂态电压安全性的作用。

轨迹灵敏度分析通过将系统数学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^[10]。轨迹灵敏度法是以时域仿真法得到的系统轨迹为基础进行计算的, 能够方便地应用于微分代数方程组 (differential and algebraic equations, DAE) 描述的电力系统, 因此, 与暂态稳定分析的直接法相比, 其在系统元件模型的适应性上有着明显的优势。轨迹灵敏度法已广泛应用于电力系统暂态功角稳定分析、暂态功角稳定预防控制等领域^[11-14]。而将轨迹灵敏度分析方法应用于暂态电压安全控制中, 通过实施控制来改变系统的初始条件或参数, 即可使系统故障后的轨迹符合暂态电压安全的要求。

本文建立电力系统暂态电压安全分析的 DAE 模型, 并提出求解其预防控制优化问题的 TVSC-OPF 模型。基于轨迹灵敏度方法, 将暂态电压安全约束转化为关于控制变量的线性不等式约束, 从而将优化控制模型转化为非线性规划 (nonlinear programming, NLP) 模型。并采用内嵌二次罚函数处理离散变量的非线性原对偶内点法求得 NLP 模型的近似最优解。

1 暂态电压安全分析的数学模型

用于电力系统暂态电压安全分析的 DAE 模型如下所示:

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

收稿日期: 2009-10-18; 修回日期: 2009-12-02。

国家自然科学基金资助项目 (50777021)。

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

式中: $\mathbf{x}$ 为系统状态变量; $\mathbf{y}$ 为母线电压; $\mathbf{u}$ 为控制变量。

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。其中,发电机采用3阶实用模型^[15],负荷采用文献[15]中的3阶机电暂态感应电动机并联恒阻抗模型,励磁系统采用文献[16]中的模型,具体表达式见附录A。

式(2)为描述网络各个节点电压、电流关系的代数方程,具体表达式见附录A。

2 轨迹灵敏度分析

将系统 DAE 模型(式(1)和式(2))等号两边对控制变量求导,得到灵敏度的轨迹方程如下:

$$\frac{d\mathbf{x}_u}{dt} = \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{x}} \mathbf{x}_u + \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{y}} \mathbf{y}_u + \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{u}} \quad (3)$$

$$\frac{\partial \mathbf{g}}{\partial \mathbf{x}} \mathbf{x}_u + \frac{\partial \mathbf{g}}{\partial \mathbf{y}} \mathbf{y}_u + \frac{\partial \mathbf{g}}{\partial \mathbf{u}} = \mathbf{0} \quad (4)$$

式中: $\mathbf{x}_u$ 和 $\mathbf{y}_u$ 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;偏导数矩阵 $\partial \mathbf{f} / \partial \mathbf{x}, \partial \mathbf{f} / \partial \mathbf{y}, \partial \mathbf{f} / \partial \mathbf{u}, \partial \mathbf{g} / \partial \mathbf{x}, \partial \mathbf{g} / \partial \mathbf{y}, \partial \mathbf{g} / \partial \mathbf{u}$ 为可由系统轨迹计算得到的时变矩阵。

对于轨迹灵敏度的计算,预防控制的实施相当于改变了系统的初始运行点,首先由潮流方程可求得母线电压对控制变量的灵敏度初值;再由系统 DAE 模型的稳态方程求得状态变量对控制变量的灵敏度初值和导出参数对控制变量的灵敏度;进而采用数值积分法求解灵敏度的轨迹方程(式(3)和式(4)),就可计算后面各个时刻系统状态变量和母线电压对控制变量的轨迹灵敏度。

轨迹灵敏度可用于建立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 $\Delta \mathbf{u}$ 引起的某一时刻 t 状态变量变化量 $\Delta \mathbf{x}(t)$ 和母线电压变化量 $\Delta \mathbf{V}(t)$ 就可近似为:

$$\Delta \mathbf{x}(t) = \mathbf{x}_u(t) \Delta \mathbf{u} \quad (5)$$

$$\Delta \mathbf{V}(t) = \mathbf{y}_u(t) \Delta \mathbf{u} \quad (6)$$

3 暂态电压安全预防控制优化模型和算法

3.1 暂态电压安全约束及基于轨迹灵敏度线性化

在暂态电压安全预防控制优化模型中,暂态电压安全约束包括防止故障后系统发生暂态电压失稳和暂态电压延时恢复2个方面。文献[17]指出暂态电压失稳的判据为:如果感应电动机在其节点电压达到最小值时仍然加速,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最大值时仍然减速,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最大值时,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最小值时电动机能够继续加速,可表示为:

$$P_{elf}(t_{vm}) - P_{mlf}(t_{vm}) \geq \epsilon_1 \quad (7)$$

式中: P_{elf} 和 P_{mlf} 分别为故障 f 的主导负荷母线 l 处感应电动机的电磁转矩和机械转矩; t_{vm} 为主导负荷母线电压达到最大值对应的时间;可取 $\epsilon_1 = 0.1$ (标么值),主导负荷母线的物理意义见文献[18]。

防止暂态电压延时恢复就是保证暂态电压跌落可接受^[17],按中国目前标准是保持故障清除后1s时负荷母线电压恢复到0.75(标么值)以上^[19],可表示为:

$$V_{lf}(t_c + t_{lim}) \geq V_{lim} + \epsilon_2 \quad (8)$$

式中: V_{lf} 为故障 f 的主导负荷母线 l 的电压幅值; t_c 为故障清除时间; $t_{lim} = 1$ s; $V_{lim} = 0.75$ (标么值);可取 ϵ_2 为 0.01~0.02 (标么值)。

由于轨迹灵敏度是对系统轨迹与控制变量之间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,但此解已离满足原来的暂态电压安全约束比较接近,所以,可在此解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(式(7)和式(8))转化为:

$$P_{elf,k-1}(t_{vm}) - P_{mlf,k-1}(t_{vm}) + \left. \frac{\partial (P_{elf} - P_{mlf})}{\partial \mathbf{u}} \right|_{t=t_{vm}} (\mathbf{u}_k - \mathbf{u}_{k-1}) \geq \epsilon_1 \quad (9)$$

$$V_{lf,k-1}(t_c + t_{lim}) + \left. \frac{\partial V_{lf}}{\partial \mathbf{u}} \right|_{t=t_c + t_{lim}} (\mathbf{u}_k - \mathbf{u}_{k-1}) \geq V_{lim} + \epsilon_2 \quad (10)$$

式中: $\left. \frac{\partial (P_{elf} - P_{mlf})}{\partial \mathbf{u}} \right|_{t=t_{vm}}$ 和 $\left. \frac{\partial V_{lf}}{\partial \mathbf{u}} \right|_{t=t_c + t_{lim}}$ 分别由 t_{vm} 时刻和 $t_c + t_{lim}$ 时刻的轨迹灵敏度 $\mathbf{x}_u$ 和 $\mathbf{y}_u$ 算出; k 为外层迭代次数。

3.2 预防控制优化模型和算法

将暂态电压安全约束转化为关于控制变量的线性不等式约束后,暂态电压安全预防控制优化可表

示为如下 TVSC-OPF 模型:

$$\min c(\mathbf{u}_k) \quad (11)$$

$$\text{s. t. } \mathbf{G}(\mathbf{u}_k, \mathbf{y}_{0,k}) = \mathbf{0} \quad (12)$$

$$\underline{\mathbf{u}} \leq \mathbf{u}_k \leq \bar{\mathbf{u}} \quad (13)$$

$$\underline{\mathbf{h}}_1 \leq \mathbf{h}_1(\mathbf{y}_{0,k}) \leq \bar{\mathbf{h}}_1 \quad (14)$$

$$-\bar{\mathbf{h}}_2 \leq \mathbf{h}_2(\mathbf{u}_k, \mathbf{y}_{0,k}) \leq \bar{\mathbf{h}}_2 \quad (15)$$

$$\left. \frac{\partial(P_{\text{elf}} - P_{\text{mlf}})}{\partial \mathbf{u}} \right|_{t=t_{\text{vm}}} \mathbf{u}_k \geq \varepsilon_1 - (P_{\text{elf},k-1}(t_{\text{vm}}) - P_{\text{mlf},k-1}(t_{\text{vm}})) + \left. \frac{\partial(P_{\text{elf}} - P_{\text{mlf}})}{\partial \mathbf{u}} \right|_{t=t_{\text{vm}}} \mathbf{u}_{k-1} \quad (16)$$

$$\left. \frac{\partial V_{lf}}{\partial \mathbf{u}} \right|_{t=t_c+t_{\text{lim}}} \mathbf{u}_k \geq V_{\text{lim}} + \varepsilon_2 - V_{lf,k-1}(t_c + t_{\text{lim}}) + \left. \frac{\partial V_{lf}}{\partial \mathbf{u}} \right|_{t=t_c+t_{\text{lim}}} \mathbf{u}_{k-1} \quad (17)$$

式中: $f=1, 2, \dots, F, f \in A_f$; A_f 为预想故障集; F 为其故障总数; $c(\cdot)$ 为系统运行费用; $\mathbf{G}(\cdot)$ 为故障前系统潮流方程; $\bar{\mathbf{u}}$ 和 $\underline{\mathbf{u}}$ 为控制变量上下限, $\bar{\mathbf{h}}_1$ 和 $\underline{\mathbf{h}}_1$ 为故障前电压幅值上下限, $\bar{\mathbf{h}}_2$ 为故障前线路潮流约束限值。

对每一个故障需写 2 个暂态电压安全约束(式(16)、式(17))。这是一个 NLP 模型,可采用非线性原对偶内点法进行求解。通过引入松弛变量将不等式约束转化为等式约束,再引入对数壁垒函数消去松弛变量的非负性约束,并采用二次罚函数处理变压器变比和并联电容器组电纳等离散控制变量^[20],则得到 Lagrange 函数如下:

$$\begin{aligned} L = & c(\mathbf{u}_k) - \mathbf{y}_l^T \mathbf{G}(\mathbf{u}_k, \mathbf{y}_{0,k}) - \\ & \mathbf{z}_l^T (\mathbf{H}(\mathbf{u}_k, \mathbf{y}_{0,k}) - \mathbf{l} - \underline{\mathbf{H}}) - \\ & \mathbf{w}_l^T (\mathbf{H}(\mathbf{u}_k, \mathbf{y}_{0,k}) + \mathbf{\gamma} - \bar{\mathbf{H}}) - \\ & \mathbf{z}_v^T (\mathbf{S}(\mathbf{u}_k) - \mathbf{l}_v - \underline{\mathbf{S}}) - \\ & \mu \sum_{j=1}^m \ln l_j - \mu \sum_{j=1}^m \ln \gamma_j - \mu \sum_{j=1}^{2F} \ln l_{vj} + \\ & \frac{1}{2} \sum_{j=1}^p v_{kj} (K_{vj} - K_{vjb})^2 + \frac{1}{2} \sum_{j=1}^q v_{cj} (B_{cj} - B_{cjb})^2 \end{aligned} \quad (18)$$

式中: $\mathbf{S}(\cdot)$ 为暂态电压安全约束(式(16)和式(17)); $\mathbf{H}(\cdot)$ 为其他的不等式约束(式(13)和式(15)),共有 m 个; $\mathbf{y}_l, \mathbf{z}_l, \mathbf{w}_l, \mathbf{z}_v$ 为 Lagrange 乘子向量,且 $\mathbf{w}_l \leq \mathbf{0}, \mathbf{z}_l \geq \mathbf{0}, \mathbf{z}_v \geq \mathbf{0}$; μ 为壁垒参数,且 $\mu \geq 0$; K_{vj} 和 K_{vjb} 分别为有载调压变压器 j 变比及其邻域中心; B_{cj} 和 B_{cjb} 分别为并联电容器组 j 电纳及其邻域中心; v_{kj} 和 v_{cj} 分别为离散变量 K_{vj} 和 B_{cj} 的罚因子; p 和 q 分别为有载调压变压器总数和可调并联电容器组总数。

根据 Karush-Kuhn-Tucker (KKT) 最优性条件,并采用牛顿法迭代求解最优性条件对应的代数方程组,即可得到优化模型的解 $\mathbf{u}_k$ 。因此,多故障暂态电压安全预防控制优化的求解流程可用图 1 描述。

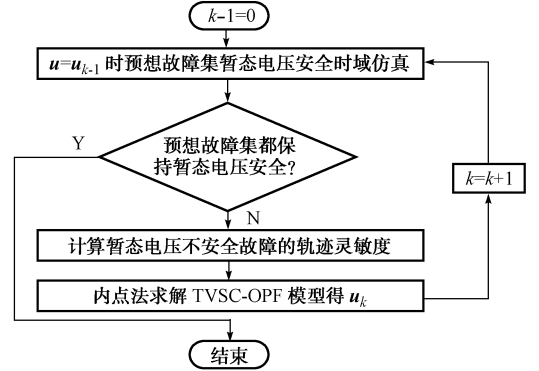


图 1 预防控制优化的计算流程
Fig. 1 Flow chart of preventive control optimization

4 算例分析

算例采用 IEEE 39 节点系统(见附录 B 图 B1),系统容量基准为 100 MVA,系统线路和变压器参数见文献[21]。变压器 11-12、13-12、20-19 设置为有载调压变压器,母线 5 和 13 安装有可投切并联电容器组,控制参数见附录 B 表 B1;发电机有功出力上下限和费用函数取自 MATPOWER 数据^[22],见附录 B 表 B2,表中还列出无功出力的上下限,支路的最大传输功率都为 50(标么值),母线电压上下限分别为 1.06 和 0.94。暂态电压安全约束中取 $\varepsilon_1 = 0.1, \varepsilon_2 = 0.02$;内点法优化的收敛判据为补偿间隙小于 10^{-6} 同时最大潮流偏差小于 10^{-3} 。发电机参数见附录 B 表 B3,其励磁调节系统参数都为: $T_E = 0.02$ s, $K_A = 15$ 。除发电机端的负荷 31 和 39 采用静态恒阻抗模型外,其他各负荷都采用 3 阶感应电动机并联恒阻抗动态模型,模型参数都采用附录 B 表 B4 中的值。系统初始运行方式在文献[21]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 3 个故障情况。

故障 1:线路 4-14 距离母线 4 侧 1% 位置发生三相短路接地故障,经过 0.20 s 后切除线路;

故障 2:线路 5-8 距离母线 8 侧 1% 位置发生三相短路接地故障,经过 0.22 s 后切除线路;

故障 3:线路 10-13 距离母线 13 侧 1% 位置发生三相短路接地故障,经过 0.20 s 后切除线路。

由于故障 1 的短路点位置与母线 4 的距离远小于其与其他负荷母线的距离,因而在故障 1 发生后

母线 4 最先出现暂态电压不安全,故母线 4 为故障 1 的主导负荷母线;同样,由短路点位置可知,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 所示。由图 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 0.725 8。

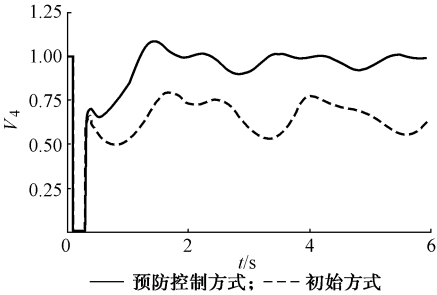


图 2 对故障 1 优化前后方式的母线 4 电压曲线
Fig. 2 Bus-4 voltage under fault-1 in initial and optimal mode

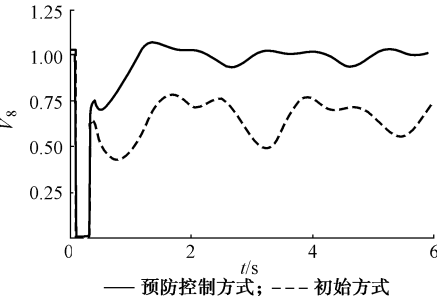


图 3 对故障 2 优化前后方式的母线 8 电压曲线
Fig. 3 Bus-8 voltage under fault-2 in initial and optimal mode

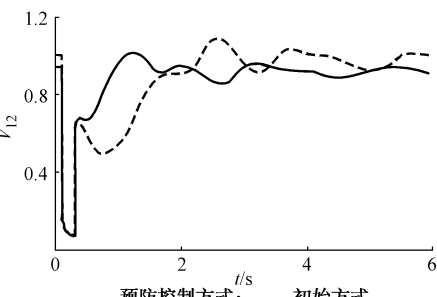


图 4 对故障 3 优化前后方式的母线 12 电压曲线
Fig. 4 Bus-12 voltage under fault-3 in initial and optimal mode

通过求解含单个故障约束的 TVSC-OPF 模型,分别得到这 3 个故障各自约束下系统运行方式如表 1 所示。优化后运行方式在相应故障下主导负荷母线电压见图 2~图 4。由图 2 可见,优化后运行方式发生故障 1,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 1.055 6;由图 3 可见,优化后运行方式发生故障 2,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 1.075 7;由图 4 可见,优化后运行方式发生故障 3,母线 12 电压在故障清除后 1.0 s 恢复到 1.011 0。可见,各个故障预防控制优化后运行方式在发生相应故障时,系统都能保持暂态电压安全。

表 1 暂态电压安全约束最优潮流结果
Table 1 Results of TVSC-OPF

故障	P_{30}	Q_{30}	P_{31}	Q_{31}	P_{32}	
1	3.5	-0.529 4	5.482 9	4.282 1	5.585 0	
2	3.5	0.881 5	4.810 0	3.684 4	5.394 0	
3	3.5	-0.545 6	5.643 6	3.468 3	5.613 0	
1,2,3	3.5	0.374 9	4.482 7	3.907 6	5.407 3	
无	3.5	-0.545 6	5.643 6	3.468 3	5.613 0	
故障	Q_{32}	P_{33}	Q_{33}	P_{34}	Q_{34}	
1	4.316 0	5.569 2	1.050 8	5.572 1	1.271 7	
2	2.772 8	5.778 3	1.004 8	5.680 4	1.475 4	
3	1.456 9	5.502 9	1.316 8	5.504 6	1.000 5	
1,2,3	3.954 1	5.880 6	1.119 9	5.763 7	1.443 6	
无	1.456 9	5.502 9	1.316 8	5.504 6	1.000 5	
故障	P_{35}	Q_{35}	P_{36}	Q_{36}	P_{37}	
1	5.622 8	1.746 9	5.572 4	1.124 6	5.385 4	
2	5.885 3	2.113 0	5.763 8	0.586 2	5.456 5	
3	5.544 9	1.910 7	5.516 5	0.535 4	5.407 6	
1,2,3	6.005 8	2.061 7	5.826 7	0.940 0	5.432 8	
无	5.544 9	1.910 7	5.516 5	0.535 4	5.407 6	
故障	Q_{37}	P_{38}	Q_{38}	P_{39}	Q_{39}	
1	-0.791 9	9.3	1.825 8	11	-0.783 4	
2	0.329 6	9.3	0.582 1	11	-0.971 6	
3	0.476 0	9.3	0.567 6	11	0.605 5	
1,2,3	-0.376 9	9.3	1.177 7	11	-1.180 4	
无	0.476 0	9.3	0.567 6	11	0.605 5	
故障	K_{t11-12}	K_{t13-12}	K_{t20-19}	B_{c5}	B_{c13}	费用/ (美元·h ⁻¹)
1	0.912 5	0.912 5	0.975 0	0.4	0	241 568
2	0.900 0	0.912 5	1.012 5	0	0	242 098
3	0.900 0	0.900 0	1.000 0	0.4	0.4	240 937
1,2,3	0.912 5	0.912 5	1.000 0	0	0	243 249
无	0.900 0	0.900 0	1.000 0	0.4	0.4	240 937

通过求解 3 个故障共同约束下的 TVSC-OPF 模型,得到系统运行方式见表 1。该运行方式在 3 个故障下各对应主导负荷母线电压见图 5。可以看到,该运行方式在这 3 个故障下都能够保持暂态电压稳定;并且,发生故障 1 后,母线 4 电压在故障清除后 1.0 s 恢复到 1.093 7;发生故障 2 后,母线 8 电压在故障清除后 1.0 s 恢复到 1.060 6;发生故障 3 后,母线 12 电压在故障清除后 1.0 s 恢复到 1.005 6,暂态电压跌落都可接受。因此,TVSC-OPF 模型(式(11)~式(17))能够协调系统中多个不同的故障,得到同时满足多个故障的暂态电压安

全要求的运行方式。

可见,求解 TVSC-OPF 模型得到的运行方式既能消除系统的暂态电压失稳问题,又能消除暂态电压延时恢复问题。与普通最优潮流(OPF)模型(式(11)~式(15))得到的运行方式相比,仅考虑故障 3 单个约束的 TVSC-OPF 模型得到的运行方式和该方式相同,这是由于该方式能够满足故障 3 的暂态电压安全约束;而在其他情况下,TVSC-OPF 模型得到的运行方式的费用都有所提升,这是为满足相应故障下系统暂态电压安全要求而牺牲的经济代价。

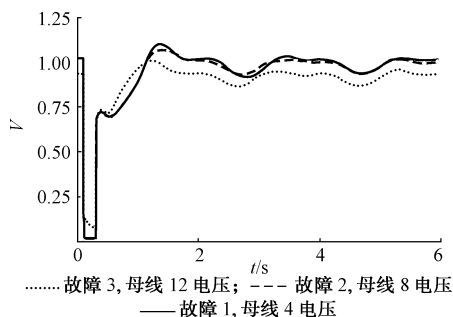


图 5 3 个故障共同约束优化的方式在各故障下主导负荷母线的电压曲线

Fig. 5 Controlling load buses voltage of the 3 faults in optimal mode with all 3 faults constrain

由表 1 可以看出,加入故障 1 和故障 2 的电压安全约束后,TVSC-OPF 模型得到的运行方式中故障 1 和故障 2 附近发电机 31,32(线路 10-11、11-6、6-5、6-7 的阻抗都比较小)的无功出力增大,较远处发电机 37,39(线路 39-9、8-9、2-3、3-4 的阻抗都比较大)的无功出力减小,进而提高了主导负荷母线 4 和 8 的电压水平,减小故障中大量无功功率从远方传输到负荷所造成的电压降落,进而加快主导负荷母线的电压恢复。而故障 3 安全约束的 TVSC-OPF 模型得到的运行方式主要通过减小有载调压变压器 11-12 和 13-12 的变比(非标准变比都在母线 12 侧),进而增大负荷 12 等效到网络侧的阻抗,提高故障中变压器网络侧的电压,加快主导负荷母线 12 的电压恢复。

5 结语

本文提出了电力系统暂态电压安全预防控制优化的 TVSC-OPF 模型,并基于轨迹灵敏度法建立优化模型转化的 NLP 模型,采用内嵌二次罚函数处理离散变量的非线性原对偶内点法求得 TVSC-OPF 模型的最优解。算例分析表明,所提出的 TVSC-OPF 模型和算法能够协调系统中多个不同故障,得

到同时满足多个故障的暂态电压安全要求的运行方式;通过增大故障附近发电机的无功出力,减小离故障较远处发电机的无功出力,有利于故障后主导负荷母线的电压恢复。

轨迹灵敏度最早应用于暂态功角稳定的预防控制,证明是有效的。与暂态功角稳定相比,暂态电压安全预防控制的复杂性之一表现为变压器变比和电容器组电纳这些离散控制变量参与调控,特别是有电容器组,它们均是分级变化的,因此,采用系统轨迹对离散控制变量的灵敏度进行计算可能会造成偏大的控制量或偏小的控制量。如何对离散变量的轨迹灵敏度值进行一定的补偿以得到更加准确的优化控制量,还有待展开进一步研究。

附录见本刊网络版(<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>)。

参考文献

- [1] DIAZ DE LEON J A II, TAYLOR C W. Understanding and solving short-term voltage stability problem// Proceedings of IEEE Power Engineering Society Summer Meeting; Vol 2, July 22-26, 2002, Chicago, IL, USA; 742-752.
- [2] POTAMIANAKIS E G, VOURNAS C D. Short-term voltage instability: effects on synchronous and induction machines. 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. 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. IEEE Trans on Power Systems, 2008, 23(3): 1211-1216.
- [5] TAYLOR C W. Power system voltage stability. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 1994.
- [6] 薛禹胜. 暂态稳定预防控制和紧急控制的协调. 电力系统自动化, 2002, 26(4): 1-4.
XUE Yusheng. Coordinations of preventive control and emergency control for transient stability. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(4): 1-4.
- [7] 杨新林, 孙元章. 电力系统动态安全调度新算法. 电力系统自动化, 2002, 26(6): 1-5.
YANG Xinlin, SUN Yuanzhang. A novel dynamic security dispatching method for power systems. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(6): 1-5.
- [8] DE TUGLIE E, LA SCAKA M, SCARPELLINI P. Real-time preventive actions for the enhancement of voltage-degraded trajectories. IEEE Trans on Power Systems, 1999, 14(2): 561-568.
- [9] 薛禹胜, 王正风. 暂态电压安全预防控制的优化. 电力系统自动化, 2006, 30(9): 1-4.

- XUE Yusheng, WANG Zhengfeng. Optimization of preventive control for transient voltage security. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(9): 1-4.
- [10] HISKENS I A, PAI M A. Trajectory sensitivity analysis of hybrid systems. IEEE Trans on Circuits and Systems: Part I Fundamental Theory and Applications, 2000, 47(2): 204-220.
- [11] LAUFENBERG M J, PAI M A. A new approach to dynamic security assessment using trajectory sensitivities. IEEE Trans on Power Systems, 1998, 13(3): 953-958.
- [12] NGUYEN T B, PAI M A. Dynamic security-constrained rescheduling of power systems using trajectory sensitivities. IEEE Trans on Power Systems, 2003, 18(2): 848-854.
- [13] 常乃超,郭志忠. EEAC 解析灵敏度分析的研究. 电力系统自动化, 2004, 28 (11): 38-40.
- CHANG Naichao, GUO Zhizhong. Research on analytical sensitivity analysis of extended equal-area criterion (EEAC). Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(11): 38-40.
- [14] 李贻凯,刘明波. 多故障暂态稳定约束最优潮流的轨迹灵敏度法. 中国电机工程学报, 2009, 29(16): 42-48.
- LI Yikai, LIU Mingbo. Trajectory sensitivity method for transient stability constrained optimal power flow under multi-contingency condition. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(16): 42-48.
- [15] 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. 北京:水利电力出版社,1978.
- [16] DE MELLO F P, FELTES J W. Voltage oscillatory instability caused by induction motor loads. IEEE Trans on Power Systems, 1996, 11(3): 1279-1285.
- [17] 薛禹胜,徐泰山,刘兵. 暂态电压稳定性及电压跌落可接受性. 电力系统自动化, 1999, 23(14): 4-8.
- XUE Yusheng, XU Taishan, LIU Bing. Quantitative assessments for transient voltage security. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(14): 4-8.
- [18] 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. 中国电机工程学报, 2009, 29(4): 14-20.
- LIN Shunjiang, LI Xinran, LIU Yanghua, et al. Method for transient voltage stability quick judgment considering load dynamic model. Proceedings of the CSEE, 2009, 29 (4): 14-20.
- [19] 马世英,印永华,汤涌,等. 短期和中长期电压稳定仿真及评价. 电网技术, 2006, 30(19): 14-20.
- MA Shiyong, YIN Yonghua, TANG Yong, et al. Simulation and evaluation for short term and mid/long term voltage stability. Power System Technology, 2006, 30(19): 14-20.
- [20] LIU Mingbo, TSO S K, CHENG Ying. An extended nonlinear primal-dual interior-point algorithm for reactive-power optimization of large-scale power systems with discrete control variables. IEEE Trans on Power Systems, 2002, 17 (4): 982-991.
- [21] 周双喜,朱凌志,郭锡钦,等. 电力系统电压稳定性及其控制. 北京:中国电力出版社, 2004.
- [22] ZIMMERAMAN R D, GAN D. MATPOWER: A MATLAB power system simulation package. Ithaca, NY, USA: Cornell University Press, 1997.

林舜江(1980—),男,通信作者,在站博士后研究人员,主要研究方向: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:电力系统优化、运行与控制. E-mail: epmbliu@scut.edu.cn

Using Trajectory Sensitivity Method for Transient Voltage Security Preventive Control Optimization

LIN Shunjiang^{1,2}, LIU Mingbo^{1,2}

(1. South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;

2. Guangdong Key Laboratory of Clean Energy Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: The differential and algebraic equations based power system model is established for analyzing power system transient voltage security problem first; and the transient voltage security constrained optimal power flow model is then presented to solve the preventive control optimization problem. In this model, Transient voltage security constrains include two aspects of avoiding transient voltage instability and transient delayed voltage recovery. The objective function is the operation cost of the systems, and the control variables include active power output, reactive power output of generators, ratio of on-load tap changing transformers, and switching susceptance of shunt capacitors. Based on the trajectory sensitivity method, the approximate linear relationship between transient voltage security constrained functions and control variables is found, and then the optimisation model is transformed to static nonlinear programming model. The nonlinear primal-dual interior-point algorithm is used to get the solution of the optimisation model, which incorporates a quadratic penalty function to deal with discrete control variables of transformer ratio and shunt capacitor switching susceptance in the optimization process. Case studies using the IEEE 39-bus system validate the proposed optimisation model and algorithm.

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

Key words: preventive control; transient voltage security; optimal power flow; trajectory sensitivity; power system

附录 A 数学模型的具体表达式

1)发电机的实用模型

$$\frac{d\delta}{dt} = (\omega - 1)\omega_0 \quad (A1)$$

$$T_J \frac{d\omega}{dt} = P_m - [E'_q i_q - (X'_d - X_q) i_d i_q] - D(\omega - 1) \quad (A2)$$

$$T'_{d0} \frac{dE'_q}{dt} = E_{fd} - E'_q - (X_d - X'_d) i_d \quad (A3)$$

式中： i_d 和 i_q 可由状态变量 δ ， E'_q 以及发电机的端电压和内阻抗参数表示，具体表达式变量含义说明见文献[15]。

励磁系统采用文献[16]中的模型，如下所示：

$$T_E \frac{dE_{fd}}{dt} = -E_{fd} + K_A(V_{ref} - V_{gt}) \quad (A4)$$

负荷则采用文献[15]中的 3 阶机电暂态感应电动机并联恒阻抗模型，如下所示：

$$\frac{de'_x}{dt} = s\omega_0 e'_y - \frac{1}{T'_{d0l}} e'_x - \frac{x-x'}{T'_{d0l}(r_1^2 + x'^2)} [\eta_1(V_y - e'_y) - x'(V_x - e'_x)] \quad (A5)$$

$$\frac{de'_y}{dt} = -s\omega_0 e'_x - \frac{1}{T'_{d0l}} e'_y + \frac{x-x'}{T'_{d0l}(r_1^2 + x'^2)} [\eta_1(V_x - e'_x) + x'(V_y - e'_y)] \quad (A6)$$

$$\frac{ds}{dt} = \frac{K_L[a + (1-a)(1-s)^n]}{T_{jl}} - \frac{(\eta_1 e'_y + x' e'_x)(V_y - e'_y) + (\eta_1 e'_x - x' e'_y)(V_x - e'_x)}{T_{jl}(r_1^2 + x'^2)} \quad (A7)$$

2)网络各个节点电压电流关系的代数方程

式(2)所示代数方程如下所示：

$$\mathbf{I} = (\mathbf{Y}_0 + \mathbf{Y}')\mathbf{V} \quad (A8)$$

式中： n 为系统节点数； $\mathbf{V}=[V_{x1} \ V_{y1} \ V_{x2} \ V_{y2} \ \dots \ V_{xi} \ V_{yi} \ \dots \ V_{xn} \ V_{yn}]^T$ ，为节点电压向量； $\mathbf{Y}_0$ 为网络节点导纳矩阵， $\mathbf{Y}'=\text{diag}(\mathbf{Y}'_1, \mathbf{Y}'_2, \dots, \mathbf{Y}'_i, \dots, \mathbf{Y}'_n)$ ，为由发电机和负荷并入网络的导纳构成的矩阵； $\mathbf{I}=[I_{x1} \ I_{y1} \ I_{x2} \ I_{y2} \ \dots \ I_{xi} \ I_{yi} \ \dots \ I_{xn} \ I_{yn}]^T$ ，为节点注入电流向量。

若节点 i 为发电机节点，则

$$\mathbf{Y}'_i = \begin{bmatrix} G_{xi} & B_{xi} \\ B_{yi} & G_{yi} \end{bmatrix} \quad (A9)$$

$$\begin{cases} I_{xi} = E'_{qi}(G_{xi} \cos \delta_i + B_{xi} \sin \delta_i) \\ I_{yi} = E'_{qi}(B_{yi} \cos \delta_i + G_{yi} \sin \delta_i) \end{cases} \quad (A10)$$

若节点 i 为负荷节点，则

$$\mathbf{Y}'_i = \begin{bmatrix} G_i + \frac{r_{li}}{K_{Hi}(r_{li}^2 + x_i'^2)} & -B_i + \frac{x'_i}{K_{Hi}(r_{li}^2 + x_i'^2)} \\ B_i - \frac{x'_i}{K_{Hi}(r_{li}^2 + x_i'^2)} & G_i + \frac{r_{li}}{K_{Hi}(r_{li}^2 + x_i'^2)} \end{bmatrix} \quad (A11)$$

$$\begin{cases} I_{xi} = \frac{r_{li}e'_{xi} + x'_i e'_{yi}}{K_{Hi}(r_{li}^2 + x_i'^2)} \\ I_{yi} = \frac{r_{li}e'_{yi} - x'_i e'_{xi}}{K_{Hi}(r_{li}^2 + x_i'^2)} \end{cases} \quad (A12)$$

若节点*i*为网络联络节点，则

$$\mathbf{Y}'_i = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (A13)$$

$$\begin{cases} I_{xi} = 0 \\ I_{yi} = 0 \end{cases} \quad (A14)$$

式(A9)、式(A10)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 δ_i 的函数；式(A12)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*模型中感应电动机容量基值之比；其他各个量的物理意义参见文献[15]。

附录 B IEEE 39 节点系统结构图和参数

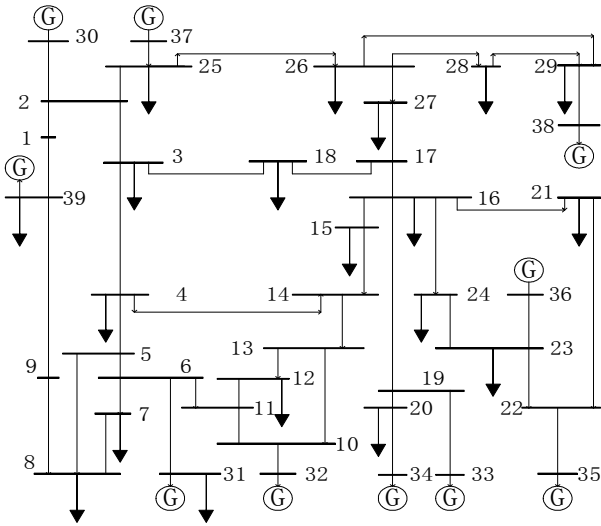


图 B1 IEEE 39 节点系统结构
Fig.B1 Structure of the IEEE 39 buses system

表 B1 有载调变变压器和可投切并联电容器组控制参数
Table B1 Control parameters of on-load tap changing transformers and shunt capacitors

控制量	初始值	调节步长	最小值	最大值
K_{l11-12}	1.0	1.25%	0.9	1.1
K_{l13-12}	1.0	1.25%	0.9	1.1
K_{l20-19}	1.0625	1.25%	0.9	1.1
$B_{cs}/\text{p.u.}$	0	0.05	0	0.4
$B_{cl3}/\text{p.u.}$	0	0.05	0	0.4

表 B2 发电机的运行数据
Table B2 Operational data of generators

发电机	有功上限/p.u.	有功下限/p.u.	无功上限/p.u.	无功下限/p.u.	费用函数/(\$·h ⁻¹)
30	3.5	0	3.15	-2.8	$1000P^2+30P+0.2$
31	11.46	0	10.3	-9.17	$1000P^2+30P+0.2$
32	7.5	0	6.75	-6.0	$1000P^2+30P+0.2$
33	7.32	0	6.59	-5.86	$1000P^2+30P+0.2$
34	6.08	0	5.47	-4.86	$1000P^2+30P+0.2$
35	7.5	0	6.75	-6.0	$1000P^2+30P+0.2$
36	6.6	0	5.94	-5.28	$1000P^2+30P+0.2$
37	6.4	0	5.76	-5.12	$1000P^2+30P+0.2$
38	9.3	0	8.37	-7.44	$60P^2+30P+0.2$
39	11	0	9.9	-8.8	$60P^2+30P+0.2$

表 B3 发电机的参数值
Table B3 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	0.0697	0.282	6.56	60	10
32	0	0.2495	0.0531	0.237	5.7	71.6	10
33	0	0.262	0.0436	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	0.2106	0.057	0.205	4.79	69	10
39	0	0.02	0.006	0.019	7	1000	10

表 B4 负荷动态模型的参数值
Table B4 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_{iL}	a	n	s_0	k_d
2	0.15	2	0.0116	0.65