

# 考虑暂态电压安全的 STATCOM 安装地点选择和容量优化

李海琛, 刘明波, 林舜江

(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:** 建立考虑多故障暂态电压安全的静止同步补偿器 (STATCOM) 安装地点和容量优化的数学模型。通过特定故障后系统母线电压恢复到 0.75 pu 以上的时间确定敏感母线, 综合考虑敏感母线和系统区域平衡确定 STATCOM 的安装地点。STATCOM 容量优化模型以多台 STATCOM 容量之和最小为目标, 以故障切除后 1 s 母线电压恢复值不低于 0.75 pu 作为系统暂态电压安全约束, 通过计算节点电压分别对于各台 STATCOM 容量的轨迹灵敏度, 将暂态电压安全约束转化为关于 STATCOM 容量的线性不等式约束, 进而采用线性规划方法可解出满足多个故障下系统暂态电压安全要求的 STATCOM 容量。最后, 通过 IEEE9 节点和 39 节点系统的仿真计算验证了所提出 STATCOM 安装地点和容量优化方法的正确性。

**关键词:** 暂态电压安全; 静止同步补偿器; 轨迹灵敏度; 线性规划

## Selection of STATCOM's installation site and capacity optimization considering transient voltage security

LI Hai-chen, LIU Ming-bo, LIN Shun-jiang

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

**Abstract:** The mathematical model for installing sites and optimal capacity of STATCOM considering transient voltage security under multi-faults is established. By the time that the voltage magnitude of system recovers to 0.75 pu, we can ascertain sensitive buses, then ascertain installing sites of STATCOM considering both sensitive bus and region balance of system. In the optimization process of STATCOM capacity, we treat the minimum of total capacity of STATCOM as objective function. The constraint of transient voltage security is that the magnitude of bus voltages is not less than 0.75 pu within one second after the fault is cleared. By calculating the trajectory sensitivity of the magnitude of bus voltages to the capacity of each STATCOM, the transient voltage security constraints are transformed into linear inequality constraints of the capacity of STATCOM, then the optimal capacity of STATCOM can be gained by the way of solving linear programming model, which is suitable for transient voltage security under multi-faults. Through the instance of IEEE 9-bus and 39-bus systems, the rationality of the optimization model and algorithm are verified.

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

**Key words:** transient voltage security; STATCOM; trajectory sensitivity; linear programming

中图分类号: TM712 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2011)05-0069-08

## 0 引言

随着科技的飞速发展, 各种新器件新设备的不断出现, 尤其是计算机设备、微电子设备及电力电子设备等敏感负荷的不断增加, 对电力系统电能质量提出了更高要求<sup>[1-5]</sup>。电力系统发生短路、断线等大扰动后的暂态过程中, 系统电压和电流一般会发

生很大的偏移。在电压跌落过程中, 负荷中的感应电动机吸收的无功功率增大, 进一步加剧负荷母线电压跌落。而且, 电压跌落至某限定值将导致感应电动机堵转, 从系统吸收的无功功率急剧增大, 造成有关保护或者安全自动装置动作、电力电子设备不正常工作等现象的发生, 甚至导致系统暂态电压失稳。因此, 一般要求故障后系统能够保证负荷节点电压低于某个给定值的持续时间不超过预定时段, 否则认为电压是暂态不安全的<sup>[6]</sup>。

电力系统暂态安全包括暂态功角稳定和暂态电压安全两部分。而暂态电压安全包括暂态电压稳定

(TVS) 和暂态电压跌落可接受 (TVDA) 两个方面<sup>[3]</sup>。如果故障导致系统失去 TVS, 系统当然是不安全的, 但如果电压跌落太大或跌落持续时间过长, 也同样是不安全的。因此只有同时保证 TVS 和 TVDA, 系统暂态过程中的电压才是安全的。暂态电压安全控制有预防控制和紧急控制两种<sup>[7-8]</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。以静止同步补偿器为代表的动态无功补偿装置, 由于其具有快速可控的特点, 非常适合用于提高电力系统的暂态安全性。STATCOM 安装在系统负荷区域, 可在故障后对负荷节点快速地提供动态电压支撑, 防止因暂态电压崩溃导致的负荷损失和大面积停电事故。文献[9]分析了动态无功装置抑制暂态电压失稳的机理, 并提出了基于极限切除时间的动态无功优化配置算法, 但是以极限切除时间为优化目标的优化配置只能保证系统暂态电压稳定, 对于暂态电压跌落可接受方面考虑不足。

本文建立考虑多故障暂态电压安全的 STATCOM 安装地点和容量优化的数学模型。通过系统电压恢复到 0.75 pu 以上的时间确定敏感母线, 综合考虑敏感母线和系统区域平衡确定 STATCOM 的安装地点; STATCOM 容量优化模型以故障切除后 1 s 母线电压标幺值不小于 0.76 pu、故障切除后 5 s 母线电压标幺值不大于 1.1 pu 和 STATCOM 单机容量限制作为约束条件, 以多台 STATCOM 安装容量之和最小为目标函数。通过轨迹灵敏度计算将暂态电压安全约束转化为关于 STATCOM 容量的线性不等式约束, 进而采用线性规划方法求解。最后, 通过 IEEE 9 节点和 39 节点系统的仿真计算验证 STATCOM 安装地点和容量优化方法的正确性。

## 1 数学模型

电力系统暂态电压安全问题的动态过程可用如下式 (1) 和式 (2) 的模型描述,  $\mathbf{x}$  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, 包括发电机及其励磁系统的动态、负荷的动态和 STATCOM 的动态。

发电机采用三阶实用模型, 如式 (3) ~ (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  $i_q$  可由式 (6) 求出,

$$\begin{cases} i_d = \frac{(E'_q - U_{gq})X_q - U_{gd}R_a}{R_a^2 + X'_d X_q} \\ i_q = \frac{(E'_q - U_{gq})R_a + U_{gd}X'_d}{R_a^2 + X'_d X_q} \end{cases} \quad (6)$$

励磁系统采用文献[10]中的模型, 如式 (7),

$$T_E \frac{dE_{fd}}{dt} = -E_{fd} + K_A(U_{ref} - U_{gt}) \quad (7)$$

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, 该模型广泛应用在我国多个区域或省级电网调度中心的日常暂态稳定计算中, 其状态方程如式 (8) ~ (10)。

$$\frac{de'_x}{dt} = sa_0 e'_y - \frac{1}{T'_{d0}} e'_x - \frac{x-x'}{T_{d0}(r_1^2 + x^2)} [r_1(U_y - e'_y) - x'(U_x - e'_x)] \quad (8)$$

$$\frac{de'_y}{dt} = -sa_0 e'_x - \frac{1}{T'_{d0}} e'_y + \frac{x-x'}{T_{d0}(r_1^2 + x^2)} [r_1(U_x - e'_x) + x'(U_y - e'_y)] \quad (9)$$

$$\frac{ds}{dt} = \frac{K_L[a + (1-a)(1-s)^n]}{T_{jL}} - \frac{(r_1 e'_y + x' e'_x)(U_y - e'_y) + (r_1 e'_x - x' e'_y)(U_x - e'_x)}{T_{jL}(r_1^2 + x^2)} \quad (10)$$

STATCOM 采用文献[12]模型, 如图 1, 其状态方程如式 (11)。

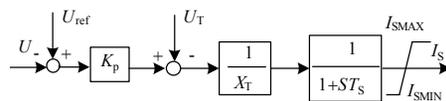


图 1 STATCOM 模型方框图

Fig.1 Diagram of STATCOM model

$$T_s \frac{dI_s}{dt} = -I_s + \frac{K_p}{X_T}(U_{ref} - U) - \frac{U_T}{X_T} \quad (11)$$

$$\mathbf{S} = \mathbf{U} \mathbf{I}_s \quad (12)$$

式 (11) 中,  $U_{ref}$  为 STATCOM 侧参考电压幅值;  $U$  为 STATCOM 侧实际电压幅值;  $U_T$  为控制节点实际电压幅值。式 (12) 中  $\mathbf{S}$  为 STATCOM 注入控制节点的视在功率,  $\mathbf{I}_s$  为 STATCOM 注入控制节点的电流幅值。

式 (2) 为描述网络各个节点电压电流关系的代数方程, 如式 (13), 假定系统含有  $n$  个节点。

$$\mathbf{I} = (\mathbf{Y}_0 + \mathbf{Y}') \mathbf{U} \quad (13)$$

其中,  $\mathbf{I}=[I_{x1} I_{y1} \cdots I_{xi} I_{yi} \cdots I_{xn} I_{yn}]^T$ , 为节点注入电流向量;  $\mathbf{U}=[U_{x1} U_{y1} \cdots U_{xi} U_{yi} \cdots U_{xn} U_{yn}]^T$ , 为节点电压向量;  $\mathbf{Y}_0$  为网络节点导纳矩阵,  $\mathbf{Y}'=\text{diag}(\mathbf{Y}'_1, \cdots, \mathbf{Y}'_i, \cdots, \mathbf{Y}'_n)$ , 是由发电机和负荷并入网络的导纳所构成的矩阵。

若节点  $i$  为发电机节点, 则

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

$$\begin{cases} I_{xi} = E'_{qi}(G_{xi} \cos \delta_i + B_{xi} \sin \delta_i) \\ I_{yi} = E'_{qi}(B_{yi} \cos \delta_i + G_{yi} \sin \delta_i) \end{cases} \quad (14)$$

若节点  $i$  为负荷节点<sup>[10]</sup>, 则

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

$$\begin{cases} I_{xi} = \frac{r_{li} e'_{xi} + x'_i e'_{yi}}{K_{Hi}(r_{li}^2 + x_i'^2)} \\ I_{yi} = \frac{r_{li} e'_{yi} - x'_i e'_{xi}}{K_{Hi}(r_{li}^2 + x_i'^2)} \end{cases} \quad (15)$$

若节点  $i$  为网络联络节点, 则

$$\mathbf{Y}'_i = \mathbf{0} \quad \mathbf{I} = \mathbf{0} \quad (16)$$

若节点  $i$  安装 STATCOM, 则该节点的注入电流为

$$\mathbf{I}' = \mathbf{I} + \mathbf{I}_S \quad (17)$$

其中  $\mathbf{I}_S$  用式 (18) 表示

$$\begin{cases} I_{sx} = \frac{V_y I_S}{\sqrt{V_x^2 + V_y^2}} \\ I_{sy} = -\frac{V_x I_S}{\sqrt{V_x^2 + V_y^2}} \end{cases} \quad (18)$$

式 (14) 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  $R_{ai}$ 、 $X_{di}$ 、 $X'_{di}$ 、 $X_{qi}$  和功角  $\delta_i$  的函数; 式 (15) 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; 其他各个量的物理意义则参见文献[11]。

## 2 STATCOM 安装地点确定

考虑电网中多种常见故障, 使故障地点覆盖电网多数区域。对电网发生每种故障情况分别进行仿真, 观察电网中联络节点、负荷节点的电压轨迹, 以确定 STATCOM 的安装地点, 具体步骤如下:

(1) 对电网发生多种常见故障的情况分别进行仿真, 仿真时间 10 s。

(2) 对于每种故障类型, 根据故障严重程度依次对母线排序: 优先排列发生电压失稳的故障母线, 对于电压失稳母线, 按母线最低电压、失稳速度等因素排序; 对于恢复稳定的故障, 比较系统中各母线的电压恢复到 0.75 p.u. 以上的时间  $T_r$  由大到小进行排序。

(3) 将每一母线在不同故障下的排序数值相加, 再由小到大排列, 从而得到电网的敏感母线排序。

(4) 综合考虑敏感母线和系统区域无功平衡确定 STATCOM 的安装地点。

## 3 STATCOM 容量优化

### 3.1 基于轨迹灵敏度的暂态电压安全约束线性化

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。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。分别对描述电力系统运行状态的微分方程和代数方程两边对控制变量 (STATCOM 容量) 的求导:

$$\frac{d\mathbf{x}_u}{dt} = \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{x}} \mathbf{x}_u + \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{y}} \mathbf{y}_u + \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{u}} \quad (19)$$

$$\frac{\partial \mathbf{g}}{\partial \mathbf{x}} \mathbf{x}_u + \frac{\partial \mathbf{g}}{\partial \mathbf{y}} \mathbf{y}_u + \frac{\partial \mathbf{g}}{\partial \mathbf{u}} = 0 \quad (20)$$

其中,  $\mathbf{x}_u$  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。

通过采用数值积分法交替求解式 (19) 和式 (20), 可得到故障发生后各个时刻状态变量、代数变量对于 STATCOM 容量的轨迹灵敏度。当 STATCOM 注入系统的功率达到其容量限值, 则该时刻 STATCOM 注入控制节点的视在功率  $S$  对于 STATCOM 容量的轨迹灵敏度为 1, 再由式 (20) 求得代数变量对于 STATCOM 容量的轨迹灵敏度, 接着就可计算出后面各个时刻状态变量、代数变量对于 STATCOM 容量的轨迹灵敏度。通过上述计算, 得到母线电压对于各台 STATCOM 容量的轨迹灵敏度, 即可将暂态电压安全约束转化为关于 STATCOM 容量的线性不等式约束, 进而采用线性规划方法求解出满足多个故障下系统暂态电压安全要求的 STATCOM 容量。

### 3.2 STATCOM 容量优化计算

保证电力系统暂态电压安全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>[14]</sup>, 可表示为:

$$U_{lf}(t_c + t_{lim}) \geq U_{lim} + \varepsilon_1 \quad (21)$$

其中： $U_{lf}$  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， $t_{lim} = 1$  s， $U_{lim} = 0.75$  p.u.，可取  $\varepsilon_1 = 0.01 \sim 0.02$ <sup>[15]</sup>。

系统故障后恢复稳态时，各节点电压不能高于预先设定的稳态电压上限值，以防止系统因过补偿而导致某些母线过电压，可表示为：

$$U_i(t_c + t_s) \leq U_s \quad (22)$$

其中： $t_s$  为系统故障切除后恢复至稳态的时间； $U_s$  为系统稳态电压上限，可取  $U_s = 1.1$  p.u.。

若系统装有  $n$  台 STATCOM 装置，则 STATCOM 容量  $S_c$  优化模型可用如下方程组表示：

$$\begin{aligned} & \min \sum_{i=1}^n S_{ci} \\ & \text{s.t. } \frac{dx}{dt} = f(x, y) \\ & \quad g(x, y) = 0 \\ & \quad U_{lf}(t_c + t_{lim}) \geq U_{lim} + \varepsilon_1 \\ & \quad U_i(t_c + t_s) \leq U_s \\ & \quad S_{ci\max} \geq S_{ci} \geq S_{ci\min} \end{aligned} \quad (23)$$

其中， $f \in A_f$ ， $A_f$  为预想故障集， $F$  为其故障总数。各约束条件依次为系统状态方程约束、代数方程约束、暂态电压安全约束、故障后稳态电压约束（防止过补偿导致节点电压偏高）和 STATCOM 单机容量约束。

经过 3.1 节介绍的轨迹灵敏度计算，暂态电压安全约束、稳态电压约束可以转换为式 (24)、(25)。

$$\sum_{i=1}^n \frac{\partial U}{\partial S_{ci}} \Big|_{t=t_c+t_{lim}} (S_{ci} - S'_{ci}) + U(t_c + t_{lim}) \geq U_{lim} + \varepsilon_1 \quad (24)$$

$$\sum_{i=1}^n \frac{\partial U}{\partial S_{ci}} \Big|_{t=t_c+t_s} (S_{ci} - S'_{ci}) + U(t_c + t_s) \leq U_s \quad (25)$$

此时，STATCOM 容量优化模型转换为如下线性优化模型：

$$\begin{aligned} & \min \sum_{i=1}^n S_{ci} \\ & \text{s.t. } \sum_{i=1}^n \frac{\partial U}{\partial S_{ci}} \Big|_{t=t_c+t_{lim}} (S_{ci} - S'_{ci}) + U(t_c + t_{lim}) \geq U_{lim} + \varepsilon_1 \\ & \quad \sum_{i=1}^n \frac{\partial U}{\partial S_{ci}} \Big|_{t=t_c+t_s} (S_{ci} - S'_{ci}) + U(t_c + t_s) \leq U_s \\ & \quad S_{ci\max} \geq S_{ci} \geq S_{ci\min} \end{aligned} \quad (26)$$

采用线性规划的方法，即可得到满足暂态电压安全等多个约束条件的 STATCOM 最优容量。

## 4 算例分析

本文通过对 IEEE9 节点和 39 节点系统的仿真，进一步说明上述优化方法的细节，并验证该方法的合理性。系统中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 1 中的值。

表 1 负荷动态模型的参数值

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

### 4.1 IEEE9 节点系统

IEEE9 节点系统如图 2，系统基准容量为 100 MVA。发电机参数见表 2，其励磁调节系统参数都为  $T_E = 0.05$  s， $K_A = 10$ 。考虑如下两种故障情况：

(1) 故障 1 为线路 4-5 中点发生三相短路接地，经过 0.20 s 后清除线路；

(2) 故障 2 为线路 4-9 中点发生三相短路接地，经过 0.10 s 后清除线路。

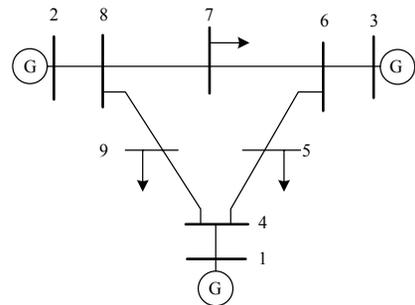


图 2 IEEE9 节点系统

Fig.2 IEEE 9-bus system

表 2 发电机的参数值

发电机	$R_a$	$X_d$	$X'_d$	$X_q$	$T'_{d0}(s)$	$T_f(s)$	$D$
1	0	0.146	0.060 8	0.096 9	8.96	27.28	10
2	0	0.895 8	0.119 8	0.864 5	6.0	12.8	10
3	0	1.312 5	0.181 3	1.257 8	8.59	6.02	10

对电网分别发生上述故障的情况进行仿真，得到敏感母线排序如表 3 所示。可以看出，敏感母线为母线 5、7、9，且在两种故障下母线 5、9 电压分别失稳，考虑到 IEEE 9 节点系统环网特点，并兼顾母线 7，将两台 STATCOM 分别安装在母线 6、8 处。

表 3 IEEE9 节点系统母线排序  
Tab.3 Bus sequence in IEEE 9-bus system

故障一			故障二			综合排序
母线	$T_r(s)$	排序	母线	$T_r(s)$	排序	母线
5	失稳	1	9	失稳	1	7
7	0.27	2	8	0.15	2	5
6	0.26	3	7	0.14	3	9
9	0.24	4	5	0.10	4	6
8	0.22	5	6	0.10	5	8
4	0.20	6	4	0.10	6	4

未安装 STATCOM 时, 发生故障 1 导致母线 5 暂态电压失稳, 发生故障 2 导致母线 9 暂态电压失稳, 图 3、4 给出了系统发生两种故障时的电压波形。

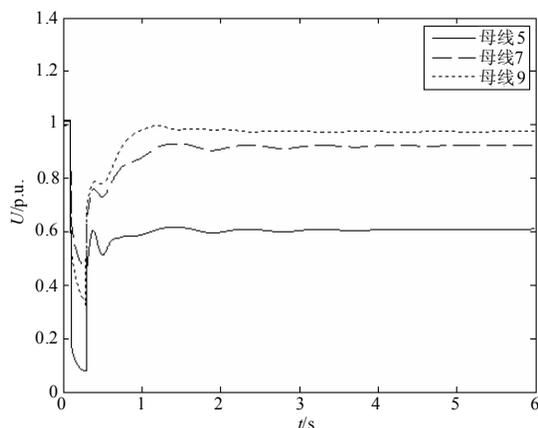


图 3 未安装 STATCOM 故障 1 电压曲线

Fig.3 Voltage curves at fault 1 without STATCOM

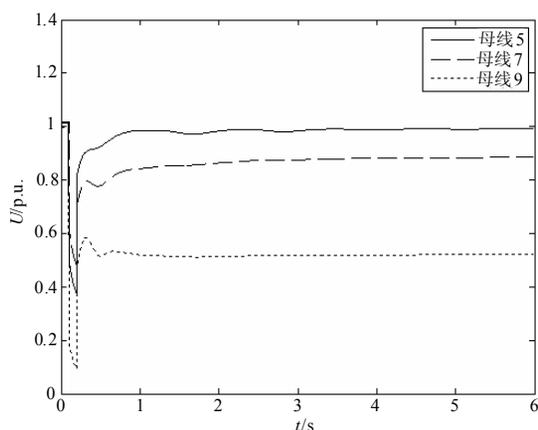


图 4 未安装 STATCOM 故障 2 电压曲线

Fig.4 Voltage curves at fault 2 without STATCOM

通过求解 STATCOM 容量优化模型式 (26), 得到安装在母线 6、8 处的 STATCOM 容量依次为 1.11 MVA、2.25 MVA。按优化容量安装 STATCOM 后, 再次对上述两种故障进行仿真, 系统均能达到

暂态电压安全要求。图 5、6 给出了安装 STATCOM 后系统发生两种故障时的电压波形。

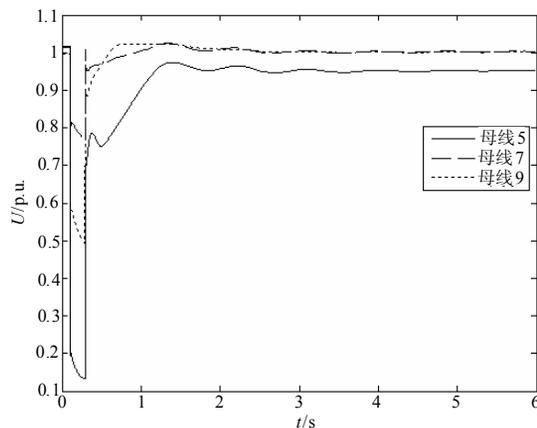


图 5 安装 STATCOM 后故障 1 电压曲线

Fig.5 Voltage curves at fault 1 with STATCOM

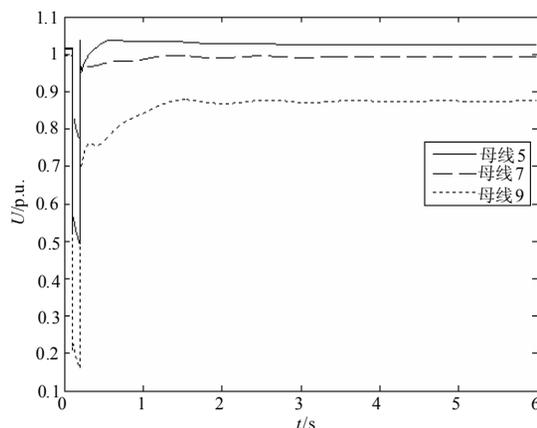


图 6 安装 STATCOM 后故障 2 电压曲线

Fig.6 Voltage curves at fault 2 with STATCOM

图 7 给出了系统发生故障 1 时, 两台 STATCOM 注入系统的无功电流曲线, 其中  $I_1$  为安装在母线 6 处 STATCOM 注入电流;  $I_2$  为安装在母线 8 处 STATCOM 注入电流。故障后, STATCOM 注入系统的无功电流迅速增大, 供给负荷 5、7、9 的无功需求, 减小离负荷较远的发电机的无功输出, 减小发电机无功传输到负荷造成的电压降落, 有利于故障后负荷母线的电压恢复。进而能够提高系统的暂态电压安全性。

#### 4.2 IEEE39 节点系统

IEEE39 节点系统如图 8, 系统基准容量为 100 MVA, 系统线路和变压器参数参见文献[16]。发电机参数见表 4, 其励磁调节系统参数都为  $T_E=0.02$  s,  $K_A=10$ 。考虑如下五种故障情况:

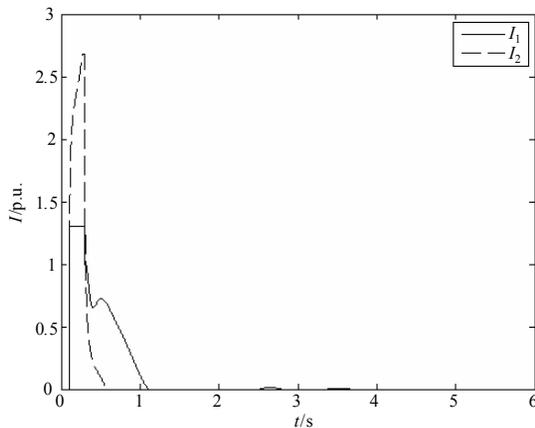


图 7 STATCOM 注入电流曲线

Fig.7 STATCOM injection current curve

- (1) 故障 1 为线路 16-15 距离母线 16 侧 10% 位置发生三相短路接地, 经过 0.15 s 后清除线路;
- (2) 故障 2 为线路 27-17 距离母线 27 侧 10% 位置发生三相短路接地, 经过 0.20 s 后清除线路;
- (3) 故障 3 为线路 15-14 距离母线 15 侧 10% 位置发生三相短路接地, 经过 0.20 s 后清除线路。
- (4) 故障 4 为线路 18-3 距离母线 18 侧 10% 位置发生三相短路接地, 经过 0.20 s 后清除线路;
- (5) 故障 5 为线路 24-23 距离母线 24 侧 10% 位置发生三相短路接地, 经过 0.20 s 后清除线路。

对电网分别发生上述故障的情况进行仿真, 得到敏感母线排序如表 5 所示。

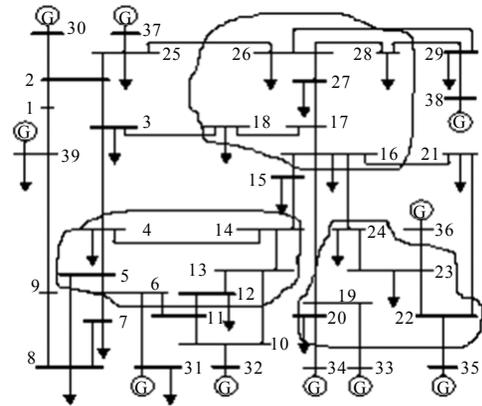


图 8 IEEE 39 节点系统

Fig.8 IEEE 39-bus system

表 4 发电机参数值

Tab.4 Parameters of generators

发电机	$R_a$	$X_d$	$X'_d$	$X_q$	$T'_{ao}(s)$	$T_f(s)$	$D$
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	0.0531	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	100 0	10

表 5 IEEE39 节点系统母线排序

Tab.5 Bus sequence in IEEE39-bus system

故障一		故障二		故障三		故障四		故障五		综合排序			
母线	$T_f(s)$	母线	排序	母线	排序								
26	失稳	27	失稳	4	失稳	28	失稳	8	失稳	26	1	15	9
27	失稳	26	失稳	27	失稳	29	失稳	7	失稳	27	2	7	10
15	失稳	28	失稳	26	失稳	26	失稳	4	失稳	28	3	14	11
28	失稳	29	失稳	15	失稳	27	失稳	26	失稳	17	4	19	12
17	失稳	38	4.11	19	失稳	18	失稳	27	失稳	18	5	5	13
18	失稳	15	0.97	14	失稳	17	失稳	18	失稳	4	6	8	14
7	失稳	17	0.94	28	失稳	16	失稳	17	失稳	16	7		
4	失稳	18	0.94	5	失稳	4	失稳	16	失稳	29	8		

将系统分为三个区域如图 8, 区域一包含母线 16、17、18、26、27、28; 区域二包含母线 4、5、6、12、13、14; 区域三包含母线 19、20、22、23、24。三个区域覆盖电网多数敏感母线。考虑与区域一相联发电机较少, 且包含敏感母线较多, 选择在

母线 16、26、28 处各安装一台 STATCOM; 区域二在母线 4 处安装一台 STATCOM; 区域三在母线 19 处安装一台 STATCOM。

未安装 STATCOM 时, 发生上述五种故障均会导致系统暂态电压失稳, 图 9、10、11 给出了系统发生故障 1、2、3 时的电压波形。

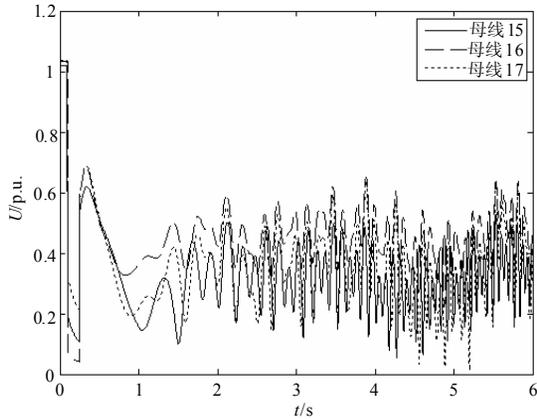


图 9 未安装 STATCOM 故障 1 电压曲线

Fig.9 Voltage curves at fault 1 without STATCOM

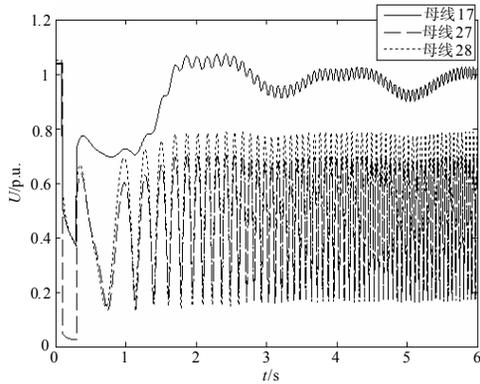


图 10 未安装 STATCOM 故障 2 电压曲线

Fig.10 Voltage curves at fault 2 without STATCOM

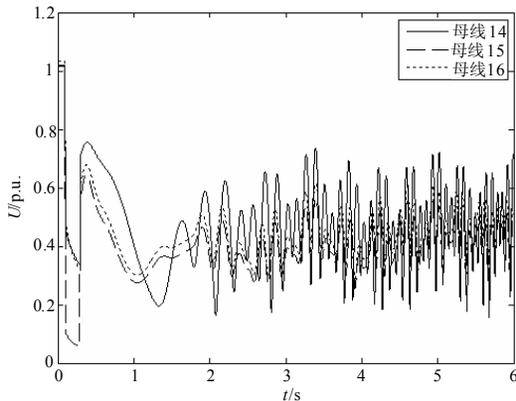


图 11 未安装 STATCOM 故障 3 电压曲线

Fig.11 Voltage curves at fault 3 without STATCOM

通过求解 STATCOM 容量优化模型式 (26), 得到安装在母线 4、16、19、26 和 28 处的 STATCOM 容量依次为 3.20 MVA、1.38 MVA、3.16 MVA、2.80 MVA、3.20 MVA。区域一配置 STATCOM 总容量为 7.38 MVA; 区域二配置 STATCOM 总容量为 3.20 MVA; 区域三配置 STATCOM 总容量为 3.16 MVA。

区域一包含母线均为敏感母线且排序靠前; 区域二中母线 4、5、14 为敏感母线; 区域三中仅母线 19 为敏感母线。因此, 区域一配置 STATCOM 容量大于区域二、三, 区域二配置 STATCOM 容量略大于区域三。可见, 各区域 STATCOM 优化容量与该区域所包含敏感母线数量及其排序一致。区域一配置 STATCOM 容量分别为 1.38 MVA(母线 16 处)、2.80 MVA(母线 26 处)、3.20 MVA(母线 28 处), 考虑到 STATCOM 单机容量限制, 为保证区域一暂态电压安全, 必须安装多台 STATCOM, 敏感母线 26、27、28 排序靠前且缺少发电机无功支撑, 故母线 26、28 处 STATCOM 优化容量较大。当系统发生故障一时, 母线 26、28 距母线 16 较近, 安装在母线 26、28 的 STATCOM 向系统注入无功支撑母线 16 电压, 减小了母线 16 的无功需求, 因此安装在母线 16 处的 STATCOM 优化容量较母线 26、28 处小。

按优化容量安装 STATCOM 后, 再次对上述五种故障进行仿真, 系统均能达到暂态电压安全要求。图 12、13、14 给出了安装 STATCOM, 后系统发生故障 1、2、3 时的电压波形。

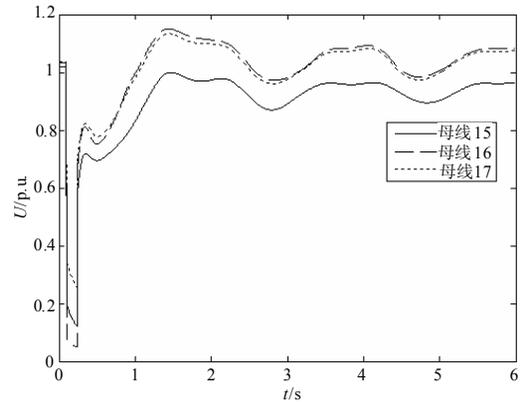


图 12 安装 STATCOM 后故障 1 电压曲线

Fig.12 Voltage curves at fault 1 with STATCOM

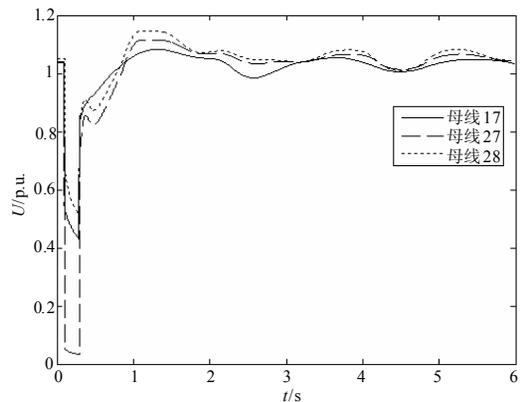


图 13 安装 STATCOM 后故障 2 电压曲线

Fig.13 Voltage curves at fault 2 with STATCOM

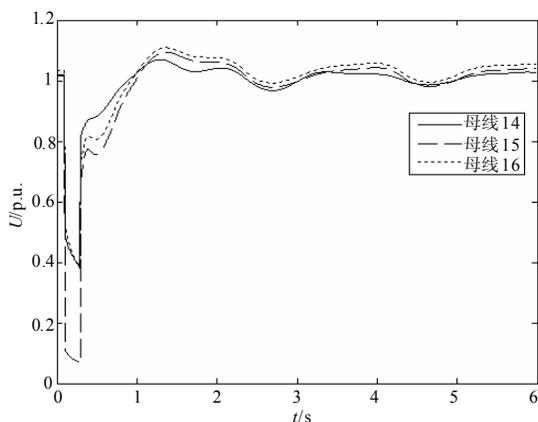


图 14 安装 STATCOM 后故障 3 电压曲线

Fig.14 Voltage curves at fault 3 with STATCOM

经对比可见, 安装 STATCOM 在故障后对负荷节点动态地提供无功支撑, 使故障后系统电压得以迅速恢复, 提高了系统的暂态电压安全性。

### 5 结论

本文提出了一种考虑暂态电压安全的 STATCOM 安装地点和容量的优化配置方案, 通过仿真查找系统敏感母线, 并考虑系统区域平衡确定 STATCOM 安装地点; 通过轨迹灵敏度计算, 将暂态电压安全约束转化为线性约束从而求解 STATCOM 最优容量。该方案充分利用 STATCOM 快速可控的特点, 为故障后电力系统负荷节点电压提供动态支撑, 使系统符合暂态电压安全要求。通过对 IEEE9 节点系统和 IEEE39 节点系统的仿真研究, 证明 STATCOM 能够使暂态电压失稳的系统恢复暂态电压安全, 验证了该方案的合理性。

### 参考文献

[1] 唐永红, 郑晓雨, 马进. 负荷建模中实测数据选取研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(3): 43-47.  
TANG Yong-hong, ZHENG Xiao-yu, MA Jin. Selection of the field data selection in measurement-based load modeling[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(3): 43-47.

[2] 林舜江, 刘明波, 周欣, 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, ZHOU Xin, et al. Emergency load shedding control optimization for transient voltage security[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(11): 18-24.

[3] 林焱, 吴丹岳, 章雪萌, 等. 电压暂降指标的探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(3): 147-152.  
LIN Yan, WU Dan-yue, ZHANG Xue-meng, et al. An

exploration on index about voltage sags[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(3): 147-152.

[4] De Tuglie E, la Scaka M, Scarpellini P. Real-time preventive actions for the enhancement of voltage-degraded trajectories[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1999, 14 (2) : 561-568.

[5] Taylor C W. Power system voltage stability[M]. New York: McGraw-Hill, 1994.

[6] 薛禹胜, 徐泰山, 刘兵, 等. 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.

[7] 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.

[8] 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.

[9] 袁志昌, 刘文华, 宋强. 基于暂态电压稳定指标的动态无功优化配置方法[J]. 电力系统自动化, 2009, 33 (14) : 17-22.  
YUANG Zhi-chang, LIU Wen-hua, SONG Qiang. Optimal allocation method of dynamic var compensation based on transient voltage stability index[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33 (14) : 17-22.

[10] de Mello F P, Feltes JW. Voltage oscillatory instability caused by induction motor loads[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1996, 11 (3) : 1279-1285.

[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.  
Xi'an Jiaotong University, Tsinghua University, Zhejiang University, et al. The application of electronic digital computer- Power system calculations[M]. Beijing: China Water Power Press, 1978.

[12] 中国电力科学研究院. PSD-BPA暂态稳定程序用户手册[S].  
China Electric Power Research Institute. PSD-BPA Transient stability program user manual[S].

[13] 林舜江. 负荷特性的建模及其对电压稳定的影响研究[D]. 湖南: 湖南大学, 2008.

XU Jing, WANG Jing, et al. Power equipment maintenance technology research[J]. Power System Technology, 2000, 24(8) : 48-52.

[3] 郭基伟, 谢敬东, 唐国庆. 电力设备管理中的寿命周期费用分析[J]. 高电压技术, 2003, 34(29): 13-15.

GUO Ji-wei, XIE Jing-dong, TANG Guo-qing. Analysis on electric power equipment management life cycle cost[J]. High Voltage Technology, 2003, 34(29): 13-15.

[4] 徐敏, 刘井萍, 左重华, 等. 变电设备状态检修中试验数据的处理方法探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(22): 91-93, 98.

XU Min, LIU Jing-ping, ZUO Chong-hua, et al. Researches on test data processing method in electric equipments maintenance[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(22) : 91-93, 98.

[5] Thurston M G. An open standard for web-based condition based maintenance system[C]. //IEEE Systems Readiness Technology Conference, 2001.

[6] 吴宏斌, 盛继光. 继电保护设备可靠性评估的数学模型及应用[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(9) : 65-68.

WU Hong-bin, SHENG Ji-guang. Mathematical model and its application of relaying protection device reliability assessment[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(9): 65-68.

[7] Guinic P. On-line monitoring and diagnosis : EDF practices and orientations[C]. //Cigre Symposium on Diagnostic and maintenance Techniques. Berlin, Germany: 1993.

[8] 宋人杰, 王晓东. 输变电设备状态检修评估分析系统的研究[J]. 继电器, 2008, 36(9): 54-57, 63.

SONG Ren-jie, WANG Xiao-dong. Research on assessment and analysis system of condition-based maintenance for power transmission and transformation equipment[J]. Relay, 2008, 36(9) : 54-57, 63.

[9] 方晴, 罗军川, 华永东. 输变电设备状态维修策略[J]. 四川电力技术, 2008, 30(2): 1-5.

FANG Qing, LUO Jun-chuan, HUA Yong-dong. Condition based maintenance strategy for power transmission and transformation equipment[J]. Sichuan Electric Power Technology, 2008, 30(2):1-5.

[10] 余绍峰, 胡文堂, 陈金法. 输变电设备风险评估与维修决策[J]. 浙江电力, 2009(3): 1-4, 64.

YU Shao-feng, HU Wen-tang, CHEN Jin-fa. Power transmission equipment risk assessment and maintenance decision[J]. Zhejiang Electric Power, 2009(3) : 1-4, 64

收稿日期: 2010-03-05; 修回日期: 2010-04-21

作者简介:

王佳明 (1985-), 男, 博士研究生, 研究方向为电力系统分析、运行与控制及电力系统智能调度技术; E-mail: wangjiaming138@163.com

刘文颖 (1955-), 女, 教授, 博士生导师, 从事电力系统分析、运行与控制及电力系统智能调度研究工作;

魏帆 (1984-), 男, 助理工程师, 从事配电运行管理工作。

(上接第 76 页 continued from page 76)

LIN Shun-jiang. Study on dynamic load characteristic modeling and its influence to voltage stability[D]. Changsha: Hunan University, 2008.

[14] 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.

[15] 林舜江, 刘明波. 暂态电压稳定仿真及其增强措施初探[C]. //中国高等学校电力系统及其自动化专业第二十四届学术年会, 2008: 414-418.

LIN Shun-jiang, LIU Ming-bo. Preliminary exploration of transient voltage stability simulation and the enhancements[C]. //China Universities Power System

and Automation 24th Session of the Annual Conference, 2008: 414-418.

[16] 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

ZHOU Shuang-xi, SONG Ling-zhi, GUO Xi-jiu, et al. Power system voltage stability and control[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004.

收稿日期: 2010-03-12; 修回日期: 2010-07-15

作者简介:

李海琛 (1987-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统优化、运行与控制; E-mail: lhc020@163.com

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

林舜江 (1980-), 男, 博士, 主要研究方向为电力系统优化、运行与控制。