

# 基于暂态电压严重性评估的受端电网 STATCOM 选址及容量优化

杨韵<sup>1</sup>, 涂炼<sup>1</sup>, 郭恒道<sup>2,3</sup>, 左剑<sup>1</sup>, 朱益华<sup>2,3</sup>, 张水平<sup>1</sup>, 付聪<sup>1</sup>, 陈奕兴<sup>1</sup>, 常东旭<sup>2,3</sup>

(1. 广东电网有限责任公司电力调度控制中心, 广州 510220; 2. 直流输电技术全国重点实验室(南方电网科学研究院), 广州 510663; 3. 广东省新能源电力系统智能运行与控制企业重点实验室, 广州 510663)

**摘要:** 当前受端电网电压支撑能力下降, 亟需针对系统暂态电压安全问题进行动态无功功率优化配置。首先给出了 STATCOM 配置用受端电网预想场景集和故障集的生成方法; 然后, 构建基于暂态电压严重性的灵敏度指标进行 STATCOM 的优化选址; 其次, 构建了以配置成本为目标函数、计及暂态电压稳定约束的容量优化模型, 并使用粒子群优化算法进行求解得到配置结果。通过对广东电网应用案例开展 STATCOM 优化配置, 结果证明了所提方法的有效性。

**关键词:** 多直流馈入负荷密集电网; STATCOM; 优化配置; 暂态电压严重性

## Location Selection and Capacity Optimization of STATCOM for Receiving-End Power Grid Based on Transient Voltage Severity Assessment

YANG Yun<sup>1</sup>, TU Lian<sup>1</sup>, GUO Hengdao<sup>2,3</sup>, ZUO Jian<sup>1</sup>, ZHU Yihua<sup>2,3</sup>, ZHANG Shuiping<sup>1</sup>, FU Cong<sup>1</sup>,  
CHEN Yixing<sup>1</sup>, CHANG Dongxu<sup>2,3</sup>

(1. Power Dispatching and Control Center of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510220, China; 2. State Key Laboratory of HVDC, Electric Power Research Institute, CSG, Guangzhou 510663, China; 3. Guangdong Provincial Key Laboratory of Intelligent Operation and Control for New Energy Power System, Guangzhou 510663, China)

**Abstract:** At present, the voltage support capability of receiving-end power grid is decreasing, so it is urgent to optimize the dynamic reactive power configuration for the security of the transient voltage of the system. Firstly, the generation method for the scene and fault set of the receiving-end power grid for STATCOM configuration is provided. Secondly, a sensitivity index based on the transient voltage severity is constructed to optimize the location of the STATCOM. Thirdly, a capacity optimization model with configuration cost as the objective function and considering transient voltage stability constraints is constructed. Then, the optimal configuration scheme is obtained by using particle swarm optimization algorithm. Finally, through the simulation calculation of STATCOM optimization configuration of Guangdong power grid, the results show that the proposed method is effective.

**Key words:** multi-infeed LCC-HVDC; STATCOM; optimal configuration; transient voltage severity

## 0 引言

随着高压直流工程的大力发展, 广东电网逐渐

呈现出强直弱交的特性<sup>[1-2]</sup>。而且多数直流的落点密集且位于负荷密集区域, 电气距离较近, 单一交流故障通常会引引起多回直流的同时换相失败。针对电网的短路电流超标问题, “十四五”初期南方电网计划在广东建设中、南通道柔直背靠背工程<sup>[3-4]</sup>, 这导致部分区域与主网联系减弱, 面对严重交流故障时出现暂态电压失稳问题<sup>[5-7]</sup>。

静止同步补偿器(static synchronous compensator, STATCOM)作为一种并联无功补偿设备, 其

**基金项目:** 国家重点研发计划资助项目(2021YFB2400900); 中国南方电网有限责任公司科技项目(GDKJXM20220147)。

**Foundation item:** Supported by the National Key Research and Development Program of China (2021YFB2400900); the Science and Technology Project of China Southern Power Grid Co., Ltd. (GDKJXM20220147).

可以通过适当的控制方法来提高系统电压稳定性, 并且面对暂态电压失稳时补偿响应速度快。对于多直流馈入受端电网, 安装并利用 STATCOM 可以提升区域的电压稳定性<sup>[8-11]</sup>。而其优化配置也是目前研究的热点, 一般包括选址及定容两个步骤。

目前, 针对优化选址的研究, 通常根据节点间的电气距离或节点暂态电压表现指标进行分区, 并基于暂态电压稳定评估指标以及灵敏度计算来构建 STATCOM 的选址指标。文献[12]利用多馈入交互作用因子对配置区域进行初步评估及筛选, 再构造基于无功功率-电压灵敏度的换相失败灵敏度因子以获得候选配置节点。文献[13]根据动态无功功率补偿装置的无功功率响应特性构建了改进的轨迹灵敏度指标, 作为 STATCOM 的筛选标准。对于优化定容问题, 有学者先根据综合评价方法进行定容, 再利用配置评估指标对配置方案分析得出最优方案<sup>[14]</sup>。另外的方法通常将其转化成数学模型表达的优化问题, 文献[15]所构建的目标函数为 STATCOM 投资费用、暂态电压稳定的鲁棒性指标最小, 其优化模型考虑了故障清除时间、最大动态负荷占比以及 STATCOM 实际容量与额定容量间偏差等不确定因素。文献[16]考虑了发电机和风机的动态无功功率支撑作用, 构建了大规模风电接入电力系统的以总投资成本最小为目标的优化配置模型。相比之下, 后种配置方法的具有全局最优性, 其配置结果更加具有真实性及准确性。

对于优化模型的求解方法包括传统优化算法<sup>[17-18]</sup>和现代智能优化算法<sup>[16, 19-20]</sup>两大类, 由于现代智能优化算法的模型适用性较强, 目前多数文献采用此类算法, 例如粒子群优化算法<sup>[16]</sup>、遗传进化算法<sup>[19]</sup>、免疫多目标优化算法<sup>[20]</sup>等, 相比之下, 粒子群优化算法的特点有收敛速度较快、实现简单等。

为此, 本文提出一种基于暂态电压严重性评估的 STATCOM 优化配置方法。首先给出了 STATCOM 配置的预想场景集和故障集的生成方法; 然后基于暂态电压严重性及其灵敏度指标进行了 STATCOM 优化选址; 构建了以 STATCOM 配置成本最小为目标, 考虑了暂态电压稳定性约束的 STATCOM 容量优化模型, 利用粒子群优化算法求解。对广东电网的案例应用验证了所提配置方法的有效性。

## 1 STATCOM 选址优化配置

### 1.1 预想场景集和预想故障集

对于多直流馈入负荷密集电网的 STATCOM 优化配置需要将各个预想场景、故障下系统的暂态电压稳定均纳入考虑。

场景集的生成主要需要考虑系统中负荷的随机性, 一般而言, 可以通过构建负荷的概率模型, 对其进行离散化后, 随机选择和组合各离散区间来获得各负荷的大小<sup>[21-24]</sup>。在构建整体电力系统运行状态前, 需要考虑负荷需求及新能源出力, 以及确定各常规机组的有功出力, 可以通过建立并求解以发电成本最小为目标, 包括节点电压约束、支路潮流约束等优化潮流问题来获得, 最终的场景集  $\Omega_l = \{l | l = 1, 2, \dots, N_l\}$ ,  $l$ 、 $N_l$  分别为场景编号和场景数量。

故障集的生成主要需要考虑发生后暂态电压失稳严重的故障, 一般主要考虑交流系统电压中枢点处发生三相短路故障, 直流换相失败及闭锁故障等, 据此生成故障集  $\Omega_f = \{j | j = 1, 2, \dots, N_f\}$ ,  $j$ 、 $N_f$  分别为故障编号和故障数量。

### 1.2 选址优化指标

为了提升选址效率, 本节基于节点暂态电压严重性及其灵敏度指标对 STATCOM 进行二阶段的优化选址。

1) 基于节点暂态电压严重性指标的暂态电压薄弱节点集与 STATCOM 初步配置节点集生成。

针对低电压单二元表  $[V_{cr}, T_{cr}]$ , 即电压  $V$  低于门槛值  $V_{cr}$  的时间不超过规定时间  $T_{cr}$ , 其中  $V_{cr} < V_N$ ,  $V_N$  为额定电压值, 定义场景  $l$ 、故障  $j$  下节点  $i$  的暂态电压严重性指标  $\Lambda_{i,j,l}$  如式(1)<sup>[25]</sup>所示。

$$\Lambda_{i,j,l} = \frac{S}{S_{cr}} = \frac{\int_t^{t'} [V_N - V_i(t)] dt}{(V_N - V_{cr})T_{cr}} \quad (1)$$

式中:  $t$  和  $t'$  分别为电压降落过程中低于和恢复过程中越过门槛值  $V_{cr}$  的时刻;  $S$  为对应电压降水平的子区域面积;  $S_{cr}$  为对应临界区域面积;  $V_i(t)$  为仿真电压值; 指标示意图如图 1 所示。

判断暂态电压安全的判据为  $\Lambda_{i,j,l} < 1$ , 即当  $\Lambda_{i,j,l} \geq 1$  时, 将该节点判定为暂态电压薄弱节点。综合考虑系统中所有节点的影响, 定义场景  $l$ 、故障  $j$  下代表性暂态电压严重性指标为:

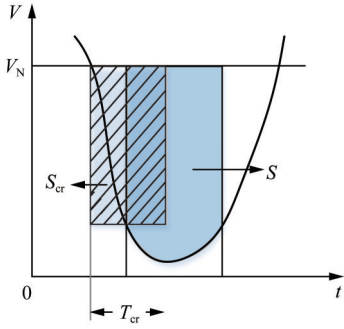


图 1 暂态电压严重性指标示意图

Fig. 1 Schematic diagram of transient voltage severity index

$$\Lambda_{m,j,l} = \max \{ \Lambda_{i,j,l} | i = 1, 2, \dots, N_s \} \quad (2)$$

式中:  $N_s$  为系统的节点数量;  $m$  为所有场景下的故障编号。  $\Lambda_{m,j,l}$  与  $\Lambda_{i,j,l}$  的作用相似, 相比之下前者更适合于描述整个系统的暂态电压稳定性, 及比较相应的系统受扰程度和故障影响程度。

定义场景集  $\Omega_r$ 、故障集  $\Omega_f$  下的系统暂态电压严重性指标  $\Lambda_s$  为:

$$\Lambda_s = \sum_{m=1}^{N_f} \Lambda_{m,j,l}, j = 1, 2, \dots, N_f, l = 1, 2, \dots, N_r \quad (3)$$

式中  $N_{fr}$  为所有场景下的总故障数量,  $N_{fr} = N_f \times N_r$ 。  $\Lambda_s$  指标考虑了所有场景及故障下的各节点后, 分析了系统的暂态电压失稳程度, 其值越大表示系统的暂态电压稳定性越差。

为抑制负荷密集受端系统故障后的暂态低电压问题, 提高系统的暂态电压稳定性, STATCOM 应配置在系统中的暂态电压薄弱节点处。节点暂态电压严重性指标值  $\Lambda_{i,j,l}$  较大的节点为暂态电压薄弱节点, 本文选取  $\Lambda_{i,j,l} \geq 1$  的节点作为薄弱节点, 共同构成系统暂态电压薄弱节点集  $\Omega_w$ , 这些节点同样也作为初步配置节点, 形成初步配置节点集  $\Omega_p$ 。

2) 基于系统暂态电压严重性灵敏度指标的 STATCOM 最终配置节点集生成。

为降低 STATCOM 配置的冗余度, 需对于上述  $\Omega_p$  中节点进行进一步的筛选。STATCOM 的配置地点应优先选那些能够明显提升系统暂态低电压的节点, 结合灵敏度法思想, 定义系统暂态电压严重性灵敏度指标  $S_{Ci}$  如式(4)所示。

$$S_{Ci} = \frac{\Lambda_s - \Lambda_s(Q_{st,i})}{Q_{st,i}} \quad (4)$$

式中:  $\Lambda_s$  和  $\Lambda_s(Q_{st,i})$  分别为在节点  $i$  处配置  $Q_{st}$  容量的 STATCOM 前后的系统暂态电压严重性指标;

$Q_{st,i}$  为在节点  $i$  处配置的 STATCOM 容量。

当节点  $i$  配置了 STATCOM 后  $S_{Ci}$  指标值越大, 代表对受端电网暂态电压稳定的提升效果越好, 说明在配置相同容量的 STATCOM 的情况下, 在节点  $i$  处配置可以更大程度地改善系统故障后的暂态电压跌落, 降低系统重负荷造成的电压失稳风险。据此, 对于初步配置节点集  $\Omega_p$ , 将节点  $i (i \in \Omega_p)$  按照  $S_{Ci}$  指标值进行排序, 取其中的前 50% 确认为最终配置节点集  $\Omega_0$ 。

## 2 STATCOM 容量优化配置模型

### 2.1 目标函数

STATCOM 配置成本  $C_{OST}$  由购置成本构成, 如式(5)所示。

$$\min C_{OST} = \sum_{i \in \Omega_0} (N_{st,i} \times c_1) \quad (5)$$

式中:  $\Omega_0$  为根据 1.2 节中方法选出的 STATCOM 最终候选配置节点集;  $N_{st,i}$  为节点  $i$  处配置的 STATCOM 的数量;  $c_1$  为 STATCOM 的购买综合费用, 万元/台。

### 2.2 约束条件

#### 1) 各场景下潮流及运行约束

系统的潮流方程表示如式(6)~(7)所示。

$$P_{G,i,l} - P_{DC,i,l} - P_{L,i,l} = V_{i,l} \sum_{m=1}^{N_i} V_{m,l} (G_{im,l} \cos \theta_{im,l} + B_{im,l} \sin \theta_{im,l}) \quad (6)$$

$$Q_{G,i,l} + Q_{st,i,l} - Q_{DC,i,l} - Q_{L,i,l} = V_{i,l} \sum_{m \in \Omega_i} V_{m,l} (G_{im,l} \sin \theta_{im,l} - B_{im,l} \cos \theta_{im,l}) \quad (7)$$

式中: 下标  $i$ 、 $m$ 、 $l$  分别表示节点  $i$  和  $m$ 、场景  $l$ ,  $i, m \in \Omega_s$ ;  $P_{G,i,l}$ 、 $Q_{G,i,l}$  分别为发电机的有功功率和无功功率;  $Q_{st,i,l}$  为 STATCOM 的无功功率;  $P_{DC,i,l}$ 、 $Q_{DC,i,l}$  分别为直流有功功率和无功功率;  $P_{L,i,l}$ 、 $Q_{L,i,l}$  分别为负荷的有功功率和无功功率;  $V_{i,l}$ 、 $V_{m,l}$  为节点电压幅值;  $G_{im,l}$ 、 $B_{im,l}$  和  $\theta_{im,l}$  分别为支路  $i-m$  的电导、电纳和首末节点电压相角差。

稳态运行约束条件包括节点电压幅值约束、发电机无功约束和 STATCOM 出力约束, 表示如式(8)~(11)所示。

$$V_{i,\min} \leq V_{i,l} \leq V_{i,\max}, i \in \Omega_s, l \in \Omega_r \quad (8)$$

$$Q_{G,i,\min} \leq Q_{G,i,l} \leq Q_{G,i,\max}, i \in \Omega_g, l \in \Omega_r \quad (9)$$

$$N_{st,i} Q_{st,i,\min} \leq Q_{st,i,l} \leq N_{st,i} Q_{st,i,\max}, i \in \Omega_0, l \in \Omega_r \quad (10)$$

$$N_{st,i} \leq N_{st,\max}, i \in \Omega_0 \quad (11)$$

式中:  $N_{st,i}$  为节点  $i$  所配置 STATCOM 的数量;  $\Omega_g$  为发电机节点集合; 下标 max、min 分别表示各物理量的上限值和下限值。

### 2) 暂态电压稳定性约束

根据上文所定义的节点暂态电压严重性指标  $\Delta\lambda_{i,j,l}$  小于 1 时表明暂态电压稳定的原理, 因此, 暂态电压稳定性约束如式(12)所示。

$$\Delta\lambda_{i,j,l} < 1, i \in \Omega_0, j \in \Omega_f, l \in \Omega_r \quad (12)$$

## 3 优化求解方法

本文所构建的优化数学模型, 是复杂的大规模非线性微分代数混合约束优化问题, 目前从求解技术上看主要分为联立求解和分解迭代求解两种, 前者是将问题中的微分方程代数差分化后再加入模型中求解, 但其求解难度随故障增多、系统规模增大而指数上升; 后者一般将问题拆分为暂态电压稳定分析、灵敏度分析和最优潮流模型 3 个子问题进行交替迭代求解。本文采用了后者所述的方法, 因为将复杂问题分解成几个子问题, 在求解难度上大大缩减, 且求解收敛性较好。如图 2—3 所示, 本文将该优化问题分成优化主问题和暂态电压稳定约束子问题。这是因为 STATCOM 容量优化求解中的决策变量为离散变量, 对该变量计算灵敏度时不具备良好的线性特性, 不宜采用运算速度较慢的分支定界算法。

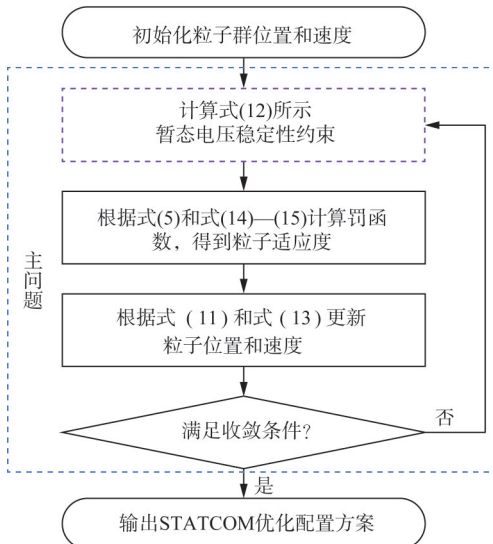


图 2 STATCOM 容量优化主问题流程图

Fig. 2 Flow chart of the main problem of STATCOM capacity optimization

根据粒子群优化算法的原理和特点, 系统微分-代数方程的求解可以单独实现, 同时可以将暂态电压稳定性约束处理为罚函数加入优化目标, 即:

$$\begin{cases} v_i^{k+1} = \omega v_i^k + p_1 r_1 (u_i^{\text{Pbest}} - u_i^k) + p_2 r_2 (u_g^{\text{Gbest}} - u_i^k) \\ u_i^{k+1} = u_i^k + v_i^k \end{cases} \quad (13)$$

$$\min \Phi = C_{\text{OST}} + \sum_{i \in \Omega_0} \sum_{j \in \Omega_f} \sum_{l \in \Omega_r} \xi \cdot \Delta\lambda_{i,j,l} \quad (14)$$

$$\Delta\lambda_{i,j,l} = \begin{cases} \Delta\lambda_{i,j,l} - 1 & , \Delta\lambda_{i,j,l} \geq 1 \\ 0 & , \Delta\lambda_{i,j,l} < 1 \end{cases} \quad (15)$$

式中:  $v_i^k$  和  $u_i^k$  分别为粒子  $i$  在第  $k$  次迭代中的速度和位置;  $u_i^{\text{Pbest}}$  和  $u_g^{\text{Gbest}}$  分别为个体最优位置和群体最优位置;  $\omega$  为惯性权重系数;  $p_1$  和  $p_2$  为学习因子, 分别表示粒子向个体最优和群体最优方向调整的权重;  $r_1$  和  $r_2$  为  $[0, 1]$  范围内的随机数, 表示引入搜索的随机性; 罚因子  $\xi$  为极大正数, 当电压越限时, 罚函数的值会变得极大, 从而排除此时获得的解为最优解的可能性。

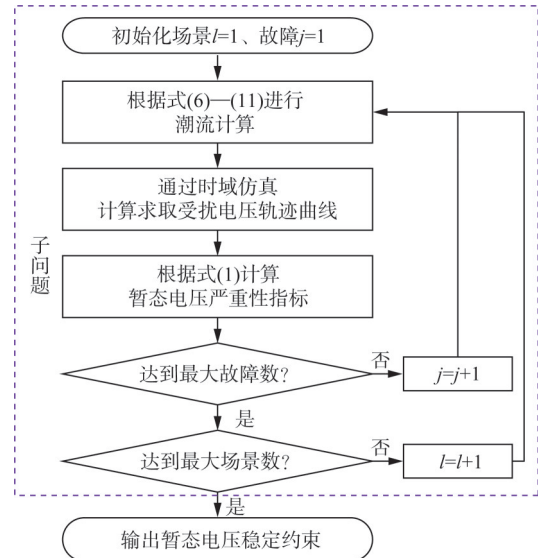


图 3 暂态电压稳定约束子问题流程图

Fig. 3 Flow chart of transient voltage stability constraint sub-problem

图 2 所示的子问题利用时域仿真软件遍历了各个场景及故障下的受扰轨迹曲线计算, 再计算对应的暂态电压严重性指标作为暂态电压稳定约束加入主问题的模型中, 使优化配置时更加准确且直观。

得到暂态电压稳定约束后, 根据目标函数及式(14)—(15)得到罚函数值, 随后计算式(13)得到粒

子下一步的迭代位置向量，即节点配置的 STATCOM 数量及其数量优化的方向和数值。在  $K$  次迭代后 STATCOM 的总容量保持不变，代表了迭代结果已经满足了收敛条件。因此输出最后的 STATCOM 优化配置方案。

#### 4 应用案例

本文针对多直流馈入受端广东电网开展研究，根据广东电网工程经验设立 3 个场景：将 2024 年夏季大方式数据作为场景 1，将区内负荷和发电同时增大 10 % 作为场景 2，在此基础上将禔崇甲乙线+博福甲乙线同停作为场景 3，这 3 个场景下系统暂态电压稳定问题比较突出。广东电网包含了 8 条常规直流线路以及 2 条柔性直流线路，其内部还包含 2 条柔直背靠背通道，是一个多直流馈入受端电网。将全网的 500 kV 电压等级的母线作为监视母线。出于对电网实际运行要求的考虑<sup>[26-28]</sup>，本文设置的单二元表为 [0.9 p. u. , 10 s]。

初始故障集包括直流换相失败及闭锁故障和 500 kV 线路交流故障，经过故障扫描发现仅有 2 个交流故障存在暂态电压稳定问题，直流故障并未出现暂态电压失稳。同时也为了减小优化配置的计算工作量，本文后续仅考虑上述 2 个严重故障，且对场景 3 的仿真结果进行优化配置，再对场景 1、2 进行暂态电压稳定验证。严重交流故障说明如下。

故障 1：博罗 500 kV 母线至龙门 500 kV 母线的一端母线处发生三相短路故障，5 周波 (0.1 s) 后切除故障线路。

故障 2：东方 500 kV 母线至紫荆 500 kV 母线的一端母线处发生三相短路故障，5 周波 (0.1 s) 后切除故障线路。

表 1 和表 2 统计各故障下 500 kV 交流母线节点的暂态电压严重指标的不合格情况，可以看出面对上述的两个严重交流故障时，节点暂态电压失稳严重。

根据故障 1 和故障 2 关于 500 kV 电压等级的暂态电压严重性指标  $A_{i,j,l}$  的计算值，将表 1 和表 2 中的不合格指标节点作为 STATCOM 初步配置节点集  $\Omega_p$  中的节点。

##### 4.1 STATCOM 选址

可得系统暂态电压严重性指标  $A_s$  值为 8.049 9。进一步，在上述 STATCOM 初步候选配置节点上增

表 1 故障 1 的暂态电压严重性指标仿真结果

Tab. 1 Simulation results of transient voltage severity index for

| fault 1 |             |
|---------|-------------|
| 薄弱节点    | $A_{i,j,3}$ |
| 博罗      | 4.975 4     |
| 横沥      | 3.457 6     |
| 鹅城      | 3.672 8     |
| 龙门      | 4.348 5     |
| 穗东      | 2.327 4     |
| 水乡      | 2.124 8     |
| 从西      | 1.985 2     |

表 2 故障 2 的暂态电压严重性指标仿真结果

Tab. 2 Simulation results of transient voltage severity index for

| fault 2 |             |
|---------|-------------|
| 薄弱节点    | $A_{i,j,3}$ |
| 东方      | 3.074 5     |
| 紫荆      | 2.947 2     |
| 鹏城      | 2.685 9     |
| 宝安      | 1.967 1     |
| 纵江      | 1.507 3     |
| 莞城      | 1.244 3     |

加接入一台 10 Mvar 的 STATCOM，计算各节点的 STATCOM 系统暂态电压严重性灵敏度指标值  $S_{C_i}$  的结果如表 3 所示。为了更好显示计算结果，在表 3 中将指标值乘以 10。

表 3 各节点的系统暂态电压严重性灵敏度指标计算值

Tab. 3 System transient voltage severity sensitivity index calculation values of each node

| 故障 1 |                     | 故障 2 |                     |
|------|---------------------|------|---------------------|
| 母线   | $S_{C_i} \times 10$ | 母线   | $S_{C_i} \times 10$ |
| 博罗   | 0.133 2             | 东方   | 0.124 1             |
| 龙门   | 0.125 8             | 紫荆   | 0.110 4             |
| 横沥   | 0.114 4             | 鹏城   | 0.091 0             |
| 鹅城   | 0.103 1             | 东莞   | 0.071 9             |
| 从西   | 0.080 1             | 纵江   | 0.057 7             |
| 水乡   | 0.077 3             | 莞城   | 0.059 8             |
| 穗东   | 0.059 4             |      |                     |

根据表 3，取其中的前 50 % 作为 STATCOM 最终配置节点集  $\Omega_0$ ，其中故障 1 共 4 个节点，故障 2 共 3 个节点。

##### 4.2 STATCOM 定容

现取 STATCOM 配置的单台容量为 100 Mvar，STATCOM 单台的价格为 3 500 万元/台。单个节点

所能安装上限为 2 台。STATCOM 无功功率的上下限分别为  $Q_u$  和  $-Q_u$ 。

对粒子群算法的设置参数如下: 种群规模取为 30 个, 惯性权重  $\omega$  为 0.9, 迭代次数  $K$  为 50 次, 学习因子  $p_1$ 、 $p_2$  均为 0.346 4。图 4 展示了优化计算中全局极值的变化曲线情况。可知当迭代次数为 6 次时, 纵坐标的全局极值迅速下降且慢速趋向于 0 值, 表征该优化计算逐渐收敛。

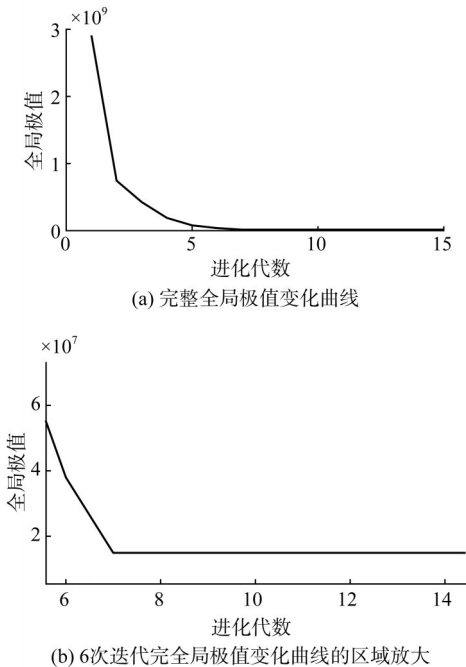


图 4 全局极值变化曲线  
Fig. 4 Global extreme value change curves

最终得到 STATCOM 优化配置方案如表 4 所示。其中, 增加了一个不进行优化配置处理的对比配置方案。按照上述两个方案配置 STATCOM 后, 得到了该场景、两个严重交流故障下部分节点的暂态电压响应曲线, 如图 5 所示。

对比图 5 的 STATCOM 配置前与两套配置方案的母线暂态电压响应曲线可知, 两套配置方案均能够满足暂态电压稳定性约束, 并且能够较大程度改善系统在遭遇严重交流故障后的暂态电压失稳情况。相较于对比配置方案, 本文提出的优化配置方案在暂态电压快速恢复上更具优势, 且所配置的台数更少, 经济性更好。最后将该配置方案应用于场景 1、2 后系统均未出现暂态电压失稳现象。因此本文所提的 STATCOM 优化配置方法具有有效性。

表 4 STATCOM 优化配置结果  
Tab. 4 STATCOM optimization configuration results

| 母线<br>35 kV | 本文优化配置方案      |            | 对比配置方案        |            |
|-------------|---------------|------------|---------------|------------|
|             | 配置容量/<br>Mvar | 总费用<br>/万元 | 配置容量/<br>Mvar | 总费用<br>/万元 |
| 博罗          | 2×100         | 7 000      | 1×100         | 3 500      |
| 龙门          | 1×100         | 3 500      | 1×100         | 3 500      |
| 横沥          | 1×100         | 3 500      | 1×100         | 3 500      |
| 东方          | 1×100         | 3 500      | 1×100         | 3 500      |
| 紫荆          | 1×100         | 3 500      | 1×100         | 3 500      |
| 鹏城          | 0             | 0          | 1×100         | 3 500      |
| 鹅城          | 0             | 0          | 1×100         | 3 500      |
| 合计          | 6×100         | 21 000     | 7×100         | 24 500     |

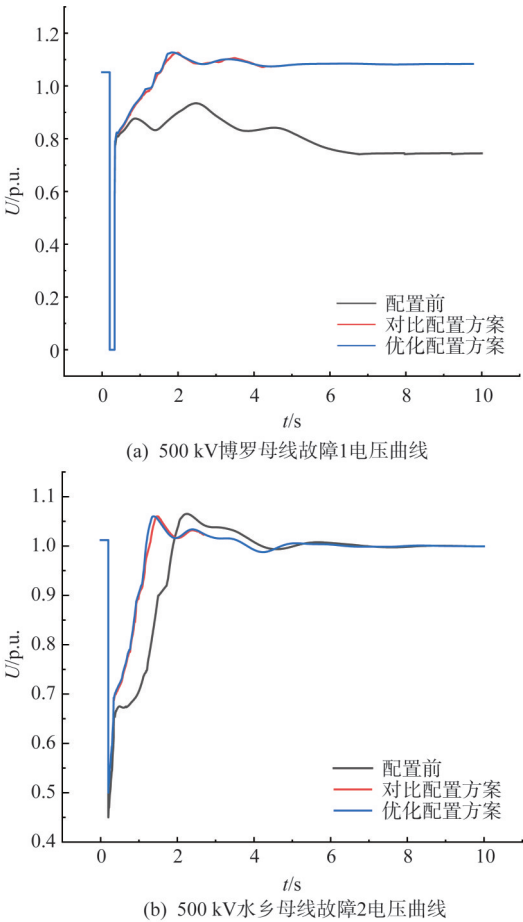


图 5 两个 STATCOM 优化配置方案下暂态电压响应曲线比较

Fig. 5 Bus transient voltage response curves under two STATCOM optimized configuration scenarios

5 结论

本文针对多直流馈入大电网存在的暂态电压失

稳问题研究了 STATCOM 的优化配置, 提出了系统暂态电压严重性灵敏度指标用于 STATCOM 优化选址, 最后利用粒子群算法对 STATCOM 的选址及定容问题进行了组合优化, 并通过广东电网的实际数据的应用案例得出以下结论。

1) 采用 STATCOM 对区域进行无功功率补偿能够有效提高电压水平。

2) 采用粒子群算法得到的 STATCOM 选址及定容优化配置结果对于改善区域电压稳定是有效的。

3) 所提 STATCOM 选址方法、容量优化模型求解采用的算法均有启发性, 且因控制变量具有离散性, 优化结果受粒子初值和算法参数设定影响较大, STATCOM 配置方案的全局最优性可进一步提高。

## 参考文献

- [1] 廖梦君, 郭琦, 李鹏, 等. 基于 RTDS 的云南电网与南方电网主网异步联网运行控制特性分析[J]. 南方电网技术, 2016, (7): 40 - 44.  
LIAO Mengjun, GUO Qi, LI Peng, et al. RTDS based analysis on operation-control characteristics of asynchronously interconnected yunnan power grid and main grid of China Southern Power Grid[J]. Southern Power System Technology, 2016, 10(7): 40 - 44.
- [2] 饶宏, 冷祥彪, 潘雅娟, 等. 全球直流输电发展分析及国际化拓展建议[J]. 南方电网技术, 2019, 13(10): 1 - 7.  
RAO Hong, LENG Xiangbiao, PAN Yaxian, et al. Analysis of the global HVDC power transmission development and the suggestion of the HVDC export[J]. Southern Power System Technology, 2019, 13(10): 1 - 7.
- [3] 蔡万通, 洪潮, 周保荣, 等. 广东电网内外双环网架结构向组团网架结构的转变研究[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(20): 162 - 174.  
CAI Wantong, HONG Chao, ZHOU Baorong, et al. Research on structure change from double-ring to cluster of Guangdong power grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(20): 162 - 174.
- [4] 谢惠藩, 常东旭, 刘涛, 等. 提升电网暂态电压稳定特性的直流自适应 VDCOL 切换策略[J]. 南方电网技术, 2023, 17(6): 1 - 10.  
XIE Huifan, CHANG Dongxu, LIU Tao, et al. Adaptive HVDC VDCOL switching strategy to improve the stability characteristics of transient voltage in power grid[J]. Southern Power System Technology, 2023, 17(6): 1 - 10.
- [5] 张文朝, 张博, 潘捷, 等. 基于感应电动机网荷互馈特性的暂态电压失稳机理探析[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(7): 8 - 14.  
ZHANG Wenchao, ZHANG Bo, PAN Jie, et al. Mechanism analysis for transient voltage instability based on cross-feed characteristics between power network and load of induction motor[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(7): 8 - 14.
- [6] 陈倩, 王国腾, 徐政, 等. 含混合级联直流系统的多馈入直流系统换相失败恢复协调控制策略[J]. 南方电网技术, 2022, 16(2): 41 - 49.  
CHEN Qian, WANG Guoteng, XU Zheng, et al. Coordinated control strategy for commutation failure recovery of multi-infeed DC systems with hybrid cascade DC system[J]. Southern Power System Technology, 2022, 16(2): 41 - 49.
- [7] 刘振亚, 张启平, 王雅婷, 等. 提高西北新甘青 750 kV 送端电网安全稳定水平的无功补偿措施研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(5): 1015 - 1022.  
LIU Zhenya, ZHANG Qiping, WANG Yating, et al. Research on reactive compensation strategies for improving stability level of sending-end of 750 kV grid in Northwest China[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(5): 1015 - 1022.
- [8] 叶萌, 胡云, 刘婷, 等. 大容量 STATCOM 与弱受端直流 VDCOL 协调控制策略优化研究[J]. 南方电网技术, 2024, 18(4): 1 - 9.  
YE Meng, HU Yun, LIU Ting, et al. Study on the optimization of large capacity statcom and weak receiving-end VDCOL coordinated control strategy in HVDC[J]. Southern Power System Technology, 2024, 18(4): 1 - 9.
- [9] 吕哲, 葛怀畅, 郭庆来, 等. 面向受端电网暂态电压稳定的高压直流系统主动控制研究[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(22): 8041 - 8053.  
LÜ Zhe, GE Huaichang, GUO Qinglai, et al. Research on active control of HVDC system for transient voltage stability of receiving-end grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(22): 8041 - 8053.
- [10] 马骞, 邓卓明, 吴云亮, 等. 受端电网 STATCOM 布点及容量规划的凸松弛方法[J]. 南方电网技术, 2021, 15(6): 64 - 70.  
MA Qian, DENG Zhuoming, WU Yunliang, et al. Convex relaxation method of STATCOM location and capacity planning in receiving-end power grid[J]. Southern Power System Technology, 2021, 15(6): 64 - 70.
- [11] 戴朝波, 于弘洋, 赵国亮, 等. STATCOM 和同步调相机响应时间的仿真分析和比较[J]. 南方电网技术, 2023, 17(10): 85 - 93.  
DAI Chaobo, YU Hongyang, ZHAO Guoliang, et al. Simulation analysis and comparison of response times of STATCOM and synchronous condensers[J]. Southern Power System Technology, 2023, 17(10): 85 - 93.
- [12] 张红丽, 刘福锁, 李威. 动态无功补偿装置提高多馈入直流恢复的布点方法[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(5): 133 - 138.  
ZHANG Hongli, LIU Fusuo, LI Wei. Site selection for dynamic reactive power compensation and improvement of recovery from commutation failures in multi-infeed HVDC system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(5): 133 - 138.
- [13] 黄弘扬, 杨汾艳, 徐政, 等. 基于改进轨迹灵敏度指标的动态无功优化配置方法[J]. 电网技术, 2012, 36(2): 88 - 94.  
HUANG Hongyang, YANG Fenyan, XU Zheng, et al. A dynamic VAR configuration method based on improved trajectory sensitivity index[J]. Power System Technology, 2012, 36(2): 88 - 94.
- [14] GUAN L, WU L, LI F, et al. Heuristic planning for dynamic var compensation using zoning approach[J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2017, 11(11): 2852 - 2861.
- [15] HAN T, CHEN Y, MA J. Multi-objective robust dynamic var

- planning in power transmission grids for improving short-term voltage stability under uncertainties [J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2018, 12(8): 1929 – 1940.
- [16] RATHER Z H, CHEN Z, THOGERSEN P, et al. Dynamic reactive power compensation of large-scale wind integrated power system [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(5): 2516 – 2526.
- [17] WU L, GUAN L. Integer quadratic programming model for dynamic var compensation considering short-term voltage stability [J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2019, 13(5): 652 – 661.
- [18] PARAMASIVAM M, SALLOUM A, AJJARAPU V, et al. Dynamic optimization based reactive power planning to mitigate slow voltage recovery and short-term voltage instability [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(4): 3865 – 3873.
- [19] 郑宽, 沈沉, 刘锋. 降低多回HVDC同时换相失败风险的交直流混联受端系统STATCOM配置方案[J]. 电网技术, 2018, 42(2): 564 – 570.
- ZHENG Kuan, SHEN Chen, LIU Feng. Configuration scheme of STATCOM for mitigating simultaneous commutation failure risk of multi-infeed HVDC links [J]. Power System Technology, 2018, 42(2): 564 – 570.
- [20] 杨堤, 程浩忠, 马则良, 等. 考虑静态和暂态电压稳定的交直流混联系统综合无功规划方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(11): 3078 – 3086, 3363.
- YANG Di, CHENG Haozhong, MA Zeliang, et al. Integrated reactive power planning methodology considering static and transient voltage stability for AC-DC hybrid system [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(11): 3078 – 3086, 3363.
- [21] 陈凡, 刘海涛, 黄正, 等. 基于改进 $k$ -均值聚类的负荷概率模型[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(22): 128 – 133.
- CHEN Fan, LIU Haitao, HUANG Zheng, et al. Probabilistic load model based on improved  $k$ -means clustering algorithm [J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(22): 128 – 133.
- [22] 周艳, 赵晋泉, 胡晓飞, 等. 基于场景分区的半不变量法概率电压稳定评估[J]. 电网技术, 2020, 44(7): 2617 – 2623.
- ZHOU Yan, ZHAO Jinquan, HU Xiaofei, et al. Probabilistic voltage stability assessment using scenario partition based cumulant method [J]. Power System Technology, 2020, 44(7): 2617 – 2623.
- [23] 卢纯颢, 周春丽, 林溪桥, 等. 基于车辆行为模拟的加氢站氢负荷概率建模方法[J]. 中国电力, 2024, 57(8): 46 – 54, 66.
- LU Chunhao, ZHOU Chunli, LIN Xiqiao, et al. Probabilistic modeling method of hydrogen load of hydrogen refueling station based on vehicle behavior simulation [J]. Electric Power, 2024, 57(8): 46 – 54, 66.
- [24] 姚伟, 刘彦彦, 张玉良. 基于序电流的三相负荷不平衡度数学建模与度量分析[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(14): 34 – 42.
- YAO Wei, LIU Yanyan, ZHANG Yuliang. Mathematical modeling and measurement analysis of three-phase load imbalance degree based on sequence current [J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(14): 34 – 42.
- [25] 赵泽麟, 赵晋泉, 单瑞卿, 等. 高压直流受端电网暂态电压安全预防控制方法[J]. 南方电网技术, 2023, 17(3): 1 – 9.
- ZHAO Zelin, ZHAO Jinquan, SHAN Ruiqing, et al. Transient voltage security preventive control method for HVDC receiving-end power grid [J]. Southern Power System Technology, 2023, 17(3): 1 – 9.
- [26] 中国电力科学研究院. PSD-ST暂态稳定程序用户手册5.3版[Z]. 北京: 中国电力科学研究院有限公司, 2019.
- [27] 中国南方电网电力调度通信中心. 南方电网安全稳定计算分析导则: Q/CSG 11004—2009[S]. 广州: 南方电网有限责任公司, 2009.
- [28] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 电力系统安全稳定计算规范: GB/T 40581—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.

收稿日期: 2024-01-16; 网络首发日期: 2024-06-25

作者简介:

杨韵(1989), 女, 高级工程师, 硕士, 研究方向为电力市场分析与电力供应风险评估, 768512457@qq.com;

涂炼(1989), 男, 工程师, 硕士, 研究方向电网运行策划;

郭恒道(1989), 男, 高级工程师, 博士, 研究方向为电力系统分析。