

DOI: 10.7667/PSPC170453

# 考虑降低暂态电压失稳风险的动态无功优化配置方法

周仕豪, 唐飞, 刘涤尘, 殷巧玲, 郑永乐

(武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉 430072)

**摘要:** 为了降低系统动态负荷尤其是电动机负荷比重越来越大带来的电网暂态电压失稳风险, 提出了一种考虑降低暂态电压失稳风险的动态无功优化配置方法。综合考虑动态无功补偿装置的安装地点和容量, 使得系统暂态电压失稳的风险最小和动态无功补偿的成本最小。该方法首先通过暂态电压失稳风险指标和灵敏度指标确定关键故障集合、动态无功补偿的候选节点, 然后将各个动态无功补偿装置的容量作为变量引入烟花优化算法中求解。为了减少优化过程的时间, 在优化算法中增加了一个火花筛选的环节。IEEE39节点算例仿真结果表明, 该方法与仅考虑动态无功补偿装置地点的优化方法相比, 在相同的无功补偿成本下能更好地降低暂态电压失稳风险。

**关键词:** 暂态电压稳定; 动态无功补偿优化; 烟花优化算法; 静止无功补偿器; 感应电动机负荷

## A dynamic VAR optimal configuration method for reducing the risk of transient voltage instability

ZHOU Shihao, TANG Fei, LIU Dichen, YIN Qiaoling, ZHENG Yongle

(School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

**Abstract:** To reduce the risk of transient voltage instability caused by the dynamic load of the system, especially the increase of the proportion of the motor load, a dynamic reactive power optimal configuration method is proposed. In order to obtain the smallest risk of transient voltage instability and the smallest dynamic reactive compensation cost, the algorithm takes the dynamic reactive compensation device capacity and installation position into overall plan and consideration. The critical fault set and the candidate buses of dynamic reactive power compensation are determined by the transient voltage instability risk index and sensitivity index. The capacity of each dynamic reactive power compensation device as variables into the fireworks optimization algorithm to solve. A spark screening link is added in the optimization algorithm for reducing the optimization process time. The simulation results of IEEE39-bus system show that the proposed method can better reduce the transient voltage instability risk under the same reactive power compensation cost compared with the optimization method only considering the dynamic reactive power compensation device installation position.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51507116).

**Key words:** transient voltage stability; dynamic reactive power optimization; fireworks optimization algorithm; static var compensator (SVC); induction motor load

## 0 引言

随着人们生活水平的提高, 空调、洗衣机等具有电动机特性的负荷<sup>[1]</sup>占电力系统负荷的比例日益增高, 电力系统暂态电压失稳的风险更大, 暂态电压稳定<sup>[2-3]</sup>问题受到了越来越多的关注。动态无功补

偿装置<sup>[4-5]</sup>能够在故障发生后迅速响应, 提高系统的暂态电压, 从而避免系统暂态电压失稳。选择合适的动态无功补偿装置的安装地点并且确定安装容量是充分发挥动态无功补偿装置作用的前提条件, 具有重要的实际意义。

目前, 对动态无功补偿优化配置的研究主要集中在选择合理的安装地点, 采用的方法一般是静态电压稳定的分析方法, 如先导节点法<sup>[6]</sup>、 $U-Q$ 曲线法和参与因子法<sup>[7]</sup>等。但是动态无功补偿装置的主要目的应该是改善系统的暂态电压稳定性, 而不是

**基金项目:** 国家自然科学基金项目资助(51507116); 国家电网公司科技项目“特高压直流连续换相失败、再启动工况下安全稳定控制技术研究”

提高静态电压稳定裕度, 因此采用暂态电压稳定的分析方法确定动态无功补偿装置的安装地点和容量更加合适。文献[8]通过时域仿真, 以极限切除时间最长为目标函数, 确定无功补偿的安装地点, 但是由于需要计算极限切除时间, 适用的故障形式有限且计算量较大。文献[9-10]以电压-时间面积增量为优化目标确定无功补偿的安装地点, 与计算极限切除时间相比减少了工作量, 但是该方法只考虑了动态无功补偿装置的安装地点, 简单地认为所有安装地点的安装容量都相同。文献[11]采用多准则选取动态无功补偿装置的安装地点, 随机分配各个安装地点的补偿容量产生多个无功配置方案, 从中选择最好的一个配置方案, 该方法并不能按照一定的原则确定各个地点的动态无功补偿容量。考虑动态无功补偿装置的容量优化是当今研究的热点。文献[12]以电压暂降损失、线路有功损耗和动态无功补偿装置费用最小为优化目标, 确定单个动态无功补偿装置的安装容量, 这种方法不能同时考虑多个动态无功补偿装置安装容量的优化。为了同时对多个动态无功补偿装置的安装容量优化, 文献[13]通过一种启发式算法确定多个动态无功补偿装置的安装容量, 但是对于动态无功补偿装置的安装地点没有提出选择的方法。综上所述, 采用暂态电压稳定分析的方法同时确定多个动态无功补偿装置的安装地点和安装容量, 是解决本文问题的关键。

本文提出了一种考虑降低暂态电压失稳风险的动态无功补偿配置优化方法。该方法以暂态电压失稳风险最小和动态无功补偿成本最小为优化目标, 考虑多个动态无功补偿装置的安装地点和安装容量, 采用烟花算法对多个补偿点的安装容量进行优化。通过在烟花算法中增加一个火花筛选环节, 减少了时域仿真的次数, 缩短优化过程所需的时间。在 IEEE39 节点测试系统中, 验证了本文所提方法的准确性和有效性。

## 1 动态无功配置指标

### 1.1 暂态电压失稳风险指标

动态无功补偿装置能够改善故障恢复期间的暂态电压, 从而解决系统暂态电压的稳定问题。文献[14]以故障极限切除时间衡量故障的严重性, 故障极限切除时间越小, 故障越严重。但是故障极限切除时间计算过程复杂。为了可以量化评价动态无功补偿对于暂态电压的改善作用, 文献[15]提出一种故障严重性指标, 数值上等于恢复期间电压与正常运行时电压偏差量的最大值与故障恢复时间的乘

积。该指标没有充分考虑故障期间电压的恢复特性, 也没有考虑到无功补偿过度情况下可能造成暂态电压超调的情况。文献[16]提出的故障严重性指标只考虑电压偏差幅度超过 20%的时间区间, 所考虑的时间区间太短, 没有考虑电压的恢复特性。为此本文提出暂态电压失稳风险指标(Transient Voltage Instability Risk Index, TVRI), 更准确地衡量动态无功补偿对于抑制暂态电压失稳的作用, 如图 1 所示。

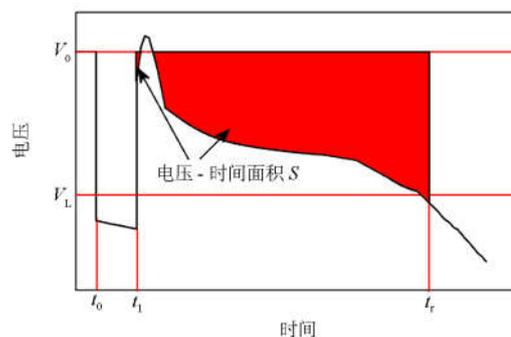


图 1 TVRI 的示意图

Fig. 1 Illustration of TVRI

文献[17]提出了暂态电压稳定判断实用标准: 三相永久接地短路, 0.1 s 后切除故障, 故障切除后 1 s 时母线电压恢复到 0.75 p.u. 以上。因此本文电压的下限  $V_L=0.75$  p.u., 电压的上限定义为节点的正常运行时电压  $V_0$ 。  $t_0$  时刻发生故障,  $t_1$  时刻故障切除,  $t_r$  时刻电压如果仍低于 0.75 p.u., 则认为暂态电压失稳。当恢复过程中的电压超过正常运行时电压时, 则认为此时的电压等于正常运行时的电压, 避免过补偿时对指标计算的影响。对于一个有  $m$  个节点的系统, 故障  $k$  发生后, 所有节点的电压-时间面积的平均值定义为

$$S_k = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \int_{t_1}^{t_r} V_{i,0} - V_{i,t}^k dt \quad (1)$$

$$V_{i,t}^k = \begin{cases} V_{i,t}^k, & V_{i,t}^k \leq V_{i,0} \\ V_{i,0}, & V_{i,t}^k > V_{i,0} \end{cases} \quad \forall t \in [t_1, t_r] \quad (2)$$

式中:  $V_{i,0}$  表示节点  $i$  正常运行时的电压;  $V_{i,t}^k$  表示故障  $k$  发生后  $t$  时刻节点  $i$  的电压。

考虑到故障恢复期间电压的波动性, 不能简单地用电压偏差量的最大值与恢复时间的乘积衡量电压-时间面积。本文根据积分的定义, 将区间  $[t_1, t_r]$  等分为  $r$  个长度很小的  $\Delta t$  区间, 上式可以改写为

$$S_k = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \sum_{c=1}^r (V_{i,0} - V_{i,t_c}^k) \Delta t \quad (3)$$

$D_k$  表示故障  $k$  是否造成了暂态电压失稳, 造成暂态电压失稳, 则  $D_k=1$ , 否则  $D_k=0$ 。

$$D_k = \begin{cases} 1, & V_{i,t_r}^k < 0.75 \\ 0, & V_{i,t_r}^k \geq 0.75 \end{cases} \quad (4)$$

不同故障造成的暂态电压失稳风险不同,有的故障即使发生也不会造成暂态电压失稳,有的故障有可能造成严重的暂态电压失稳,因此需要定义故障严重性指标(Contingency Severity Index, CSI)衡量故障造成的暂态电压失稳风险。

$$CSI_k = D_k \times S_k \quad (5)$$

$CSI_k$  越大,说明故障  $k$  发生时引起系统暂态电压失稳的风险越大,这个故障应着重考虑。通过选择  $CSI$  较大的故障可以确定关键故障集合。

所有关键故障造成的暂态电压失稳风险之和即为系统的暂态电压失稳风险 TVRI。

$$TVRI = \sum_{k=1}^N (CSI_k \times \rho_k) \quad (6)$$

式中:  $N$  为关键故障集合;  $\rho_k$  为故障  $k$  发生的概率,本文认为所有故障发生的概率均相等,都为  $1/N$ 。 $TVRI$  越大说明系统存在暂态电压失稳的风险越大,安装动态无功补偿装置可以加快故障后电压的恢复,抑制暂态电压失稳的现象发生,使  $TVRI$  减小。

## 1.2 灵敏度指标

动态无功补偿装置的布点和定容问题是个混合整数非线性规划(Mixed-integer Nonlinear Programming, MINLP)问题,为了减小问题的求解规模和计算量需要首先选择候选安装节点。无功补偿装置应该优选安装在那些能够更明显改善系统暂态电压特性的节点。因此本文提出了一种灵敏度指标(Sensitivity Index, SI)衡量在不同无功补偿点安装等容量的动态无功补偿对于降低暂态电压失稳风险的效果,如式(7)所示。

$$SI_i = \frac{TVRI - TVRI(\Delta Q_i)}{\Delta Q_i} \quad (7)$$

式中:  $TVRI$  是不安装动态无功补偿装置时的暂态电压风险指标;  $TVRI(\Delta Q_i)$  是在节点  $i$  安装容量为  $\Delta Q$  的动态无功补偿后,根据式(6)计算的暂态电压失稳风险指标,  $\Delta Q$  本文取为定值 100 Mvar。需要注意的是,式(6)、式(7)都需要根据时域仿真的结果才能计算。

$SI$  越大,表征相同动态无功补偿安装容量下,在该点进行无功补偿可以最大程度降低暂态电压失稳风险,因此选择  $SI$  较大的节点作为无功补偿的候选安装节点。

## 2 考虑降低暂态电压失稳风险的动态无功补偿优化模型

### 2.1 目标函数

保障电力系统安全稳定运行是研究动态无功补

偿优化的首要目标。本文研究的目的是在最少的动态无功补偿成本下实现系统暂态电压失稳风险最小。因此可以将暂态电压失稳风险作为罚函数,优化目标为无功补偿的成本最小。动态无功补偿的成本如式(8)所示。

$$C = \sum_{i=1}^d \delta_i (C_{ins} + C_{pur} Q_i) \quad (8)$$

式中:  $\delta_i=1$  或  $0$ , 表示节点  $i$  是否安装无功补偿装置;  $C_{ins}$  为动态无功补偿装置的安装费用;  $C_{pur}$  为动态无功补偿单价;  $Q_i$  为动态无功补偿的安装容量;  $d$  是动态无功补偿候选节点集合。

在优化过程中,坚持以下优先原则:当满足暂态电压失稳风险约束时,优先选择无功补偿成本更小的解;当不满足暂态电压失稳风险约束时,优先选择暂态电压失稳风险更小的解。根据上述优先原则,可以构造本文的目标函数:

$$\min f = \sum_{i=1}^d \delta_i (C_{ins} + C_{pur} Q_i) + TVRI \times \eta \quad (9)$$

式中,  $\eta$  为罚函数因子,是一个极大值,只要能满足  $TVRI$  不等于 0 时的目标函数值大于  $TVRI$  等于 0 时的目标函数值即可,本文取  $\eta=10000$ 。

### 2.2 约束条件

#### 1) 功率平衡约束

$$\begin{cases} P_{gi} - P_{di} - U_i \sum_{j \in i} U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) = 0 \\ Q_{gi} - Q_{di} - U_i \sum_{j \in i} U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) = 0 \end{cases} \quad (10)$$

式中:  $P_{gi}$ 、 $Q_{gi}$ 、 $P_{di}$ 、 $Q_{di}$ 、 $U_i$  分别表示节点  $i$  的有功输出、无功输入、有功负荷、无功负荷和节点电压;  $G_{ij}$ 、 $B_{ij}$ 、 $\theta_{ij}$  分别表示支路  $i-j$  的电导、电纳和相角差。

#### 2) 变量约束

变量约束包括状态变量约束和控制变量约束。状态变量包括发电机的有功出力  $P_G$ 、无功出力  $Q_G$ 、稳态时节点电压幅值  $U$  等;控制变量包括无功补偿装置的安装容量  $Q$ 。

状态变量约束为

$$\begin{cases} P_{Gi}^{\min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi}^{\max}, & i=1, 2, \dots, N_G \\ Q_{Gi}^{\min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi}^{\max}, & i=1, 2, \dots, N_G \\ U_i^{\min} \leq P_i \leq P_i^{\max}, & i=1, 2, \dots, N_G \end{cases} \quad (11)$$

控制变量约束为

$$Q_i^{\min} \leq Q_i \leq Q_i^{\max}, \quad i=1, 2, \dots, d \quad (12)$$

式中:  $N_G$ 、 $N$ 、 $d$  分别表示发电机节点数目,系统

节点数目、无功补偿候选节点数目;  $\max$  和  $\min$  分别表示变量的上、下限。

### 2.3 数学模型

综上, 考虑降低暂态电压失稳风险的动态无功优化配置数学模型为

$$\begin{cases} \min f \\ \text{s.t. } h_j(\mathbf{u}, \mathbf{x}) = 0, & j=1, \dots, p \\ g_j(\mathbf{u}, \mathbf{x}) \leq 0, & j=1, \dots, q \\ u_{i,\min} \leq u_i \leq u_{i,\max}, & i=1, \dots, d \end{cases} \quad (13)$$

式中:  $f$  为目标函数;  $\mathbf{u}$ 、 $\mathbf{x}$  分别为控制变量和状态变量构成的向量;  $h$ 、 $g$  分别定义了  $p$  个等式约束和  $q$  个由状态变量构成的不等式约束;  $d$  为控制向量的维数。

## 3 模型求解

### 3.1 烟花算法

近年来, 集群智能算法被广泛应用在优化问题的研究中。烟花算法<sup>[18]</sup>作为一种新提出的优化算法, 在集中速度和解决全局准确度方面都比粒子群算法好。该算法主要包括四个步骤: 初始化、爆炸、变异和选择。

1) 初始化。设定算法的参数, 在初始空间中, 随机选择  $n$  个位置的烟花。

2) 爆炸。引爆  $n$  个位置的烟花, 计算每个烟花爆炸产生的火花数目和爆炸后的降落半径。烟花  $x_i$  产生的火花数目和降落半径为

$$S_i = m \cdot \frac{y_{\max} - f(x_i) + \xi}{\sum_{i=1}^n (y_{\max} - f(x_i)) + \xi} \quad (14)$$

$$A_i = A^* \cdot \frac{f(x_i) - y_{\min} + \xi}{\sum_{i=1}^n (f(x_i) - y_{\min}) + \xi} \quad (15)$$

式中:  $m$ 、 $A^*$  分别是常数, 表征火花个数和降落半径;  $f(x_i)$  是目标函数在位置  $x=x_i$  的值;  $y_{\max}$  和  $y_{\min}$  分别表示第  $n$  次迭代中目标函数最大值和最小值;  $\xi$  表示一个极小值, 大小为计算机常量的最小值, 避免出现除 0 错误。

为了避免个别极值烟花造成火花数目过少, 使目标函数限于局部最优, 干扰全局搜索进程, 必须对火花数目进行限制。

$$S_i = \begin{cases} \text{round}(a \times m) & \text{if } S_i < a \times m \\ \text{round}(b \times m) & \text{if } S_i > b \times m, a < b < 1 \\ \text{round}(S_i) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (16)$$

式中,  $a$ 、 $b$  是控制常数, 用于限制火花数目的最大最小值。

3) 变异。对于任意一个烟花  $x_i$ , 都可能从  $z$  个方向变异产生火花  $x_j$ 。

$$z = \text{round}(d \times \text{rand}(0,1)) \quad (17)$$

$\mathbf{x}$  矩阵的构造如图 2 所示, 对于  $d$  维空间问题, 第  $i$  个烟花  $x_i$  由  $[x_i^1, \dots, x_i^d]$  共  $d$  个元素组成。而  $x_j^k$  ( $1 \leq j \leq n, 1 \leq k \leq z$ ) 代表的第  $k$  维火花则可由两种方式获得: 对于大部分情况, 在其以  $A_i$  为半径的圆周附近领域搜索, 可得到均匀分布火花位置:

$$x_j^k = x_i^k + A_i \cdot \text{rand}(-1,1) \quad (18)$$

$d$  个位置的动态无功补偿安装容量

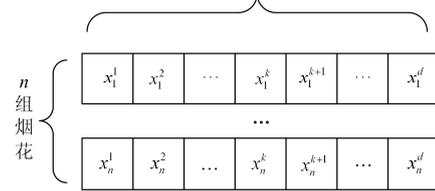


图 2  $\mathbf{x}$  矩阵示意图

Fig. 2 Schematic diagram of  $\mathbf{x}$  matrix

为了保持火花的多样性, 少部分烟花的爆炸系数可以由服从高斯分布的随机数表示, 高斯分布火花位置:

$$x_j^k = x_i^k \cdot \text{Gaussian}(1,1) \quad (19)$$

每个火花的位置都不应该超过其边界的最大最小值, 如果越界则应该将其映射在边界范围之内:

$$x_j^k = x_{\min}^k + |x_j^k| \% (x_{\max}^k - x_{\min}^k) \quad (20)$$

4) 选择。在烟花爆炸发生前都需要选择  $n$  个位置的火花作为下一次爆炸的初始化群体。在所有现存的烟花和火花中保留表现最好的火花即目标函数最小的解。其余  $n-1$  个位置由其自身与其他点的二范数值与所有点之间的二范数值的比例来获得:

$$R(x_i) = \sum_{j \in K} d(x_i, x_j) = \sum_{j \in K} \|x_i, x_j\| \quad (21)$$

$$P(x_i) = \frac{R(x_i)}{\sum_{j \in K} R(x_j)} \quad (22)$$

式中,  $K$  是当前每个烟花及其火花位置的集合。如果程序的终止条件还未满足, 则转到步骤 2)。

### 3.2 动态无功补偿方法流程

考虑降低暂态电压失稳风险的动态无功补偿方法流程如图 3 所示。由图 3 可知, 每次优化迭代都需要将时域仿真的结果代入式(9)计算目标函数, 通过烟花算法对多个动态无功补偿容量优化。优化过程中的时间开销主要在时域仿真中, 每进行一次时域仿真需要约 4 s。为了减少优化过程中时域仿真的

次数,本文设计了一个筛选环节如图3中虚线所示。这个环节主要通过比对变异后火花成本与搜索到的最好解的目标函数值,确保变异后火花成本更小,提高产生的火花质量。

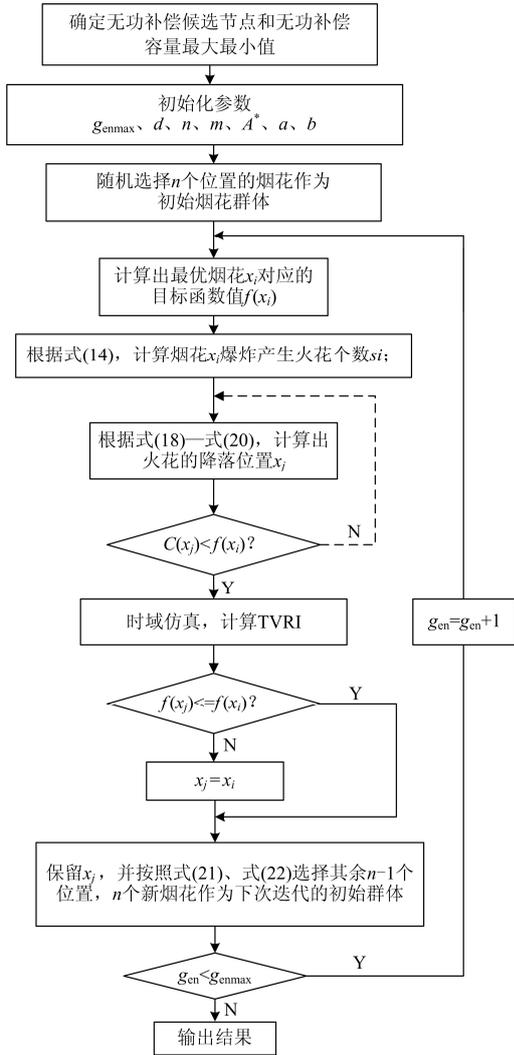


图3 动态无功配置优化方法流程图

Fig. 3 Flow diagram of dynamic reactive power configuration method

其原因是只有成本比搜索到最优解的目标函数小的火花,才有可能更优。没有这个筛选环节,也能搜索到最优解,但是由于没有对火花的质量进行筛选,需要进行更多次的时域仿真,程序才能搜索到最优解。这个循环环节不需要进行时域仿真,因此时间成本非常低。通过这个筛选环节可以显著减少时域仿真的次数,节约计算时间。

#### 4 仿真分析

本节以 IEEE39 节点系统为例进行仿真分析,系统接线图如图4所示。系统的支路、节点、变压

器、发电机等参数见文献[19],应用 Matlab 和 PSD-BPA 软件仿真。所有的负荷均按 50%恒阻抗和 50%感应电动机的比例配置,负荷模型参数参考文献[1]。考虑到算例的代表性和计算量,本文考虑在 6 个节点安装动态无功补偿装置,即控制变量的维数  $d=6$ 。本文选择 SVC 作为动态无功补偿装置,相关参数套用已投运的 SVC 典型参数。SVC 的成本参数<sup>[20]</sup>:安装费用  $C_{ins}=20$  万元,无功补偿单价  $C_{pur}=32$  万元/Mvar。每个无功补偿候选安装节点的动态无功补偿容量上下限为  $Q_i^{max}=500$  Mvar,  $Q_i^{min}=0$ 。如果某个节点的动态无功补偿安装容量为 0,则认为在这个节点没有安装动态无功补偿装置。算法主要参数:  $n=10, m=5, A^*=50, a=0.8, b=0.1, g_{enmax}=30$ 。

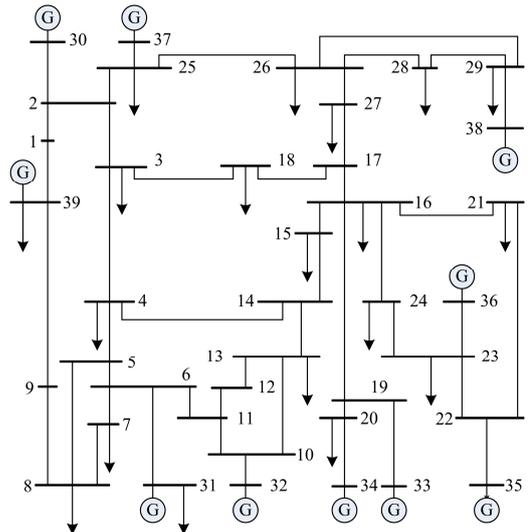


图4 IEEE39 节点测试系统接线图

Fig. 4 Wiring diagram of IEEE39-bus test system

#### 4.1 关键故障集合

动态无功补偿装置的布点和定容问题是一个整数非线性规划问题,为了减小计算量,需要事先确定系统可能发生的严重故障和无功补偿装置候选安装节点。

由 2.1 节分析可知,故障严重性指标 CSI 越大,该故障越有可能造成系统暂态电压失稳。通过对系统进行  $N-1$  三相短路扫描,根据仿真结果由式(5)计算各故障的 CSI,如图5所示。故障设置为 0 s 三相短路,0.1 s 故障切除,仿真步长  $\Delta t=0.01$  s,指标计算区间为 0.1~1.1 s。

由图5可知,在不同节点发生故障,造成系统暂态电压失稳的风险不同,有些节点发生故障也不会导致系统暂态电压失稳,如节点7等。本文选择最严重的8个故障作为关键故障集合,即节点16、19、17、24、20、21、22、26三相接地短路。

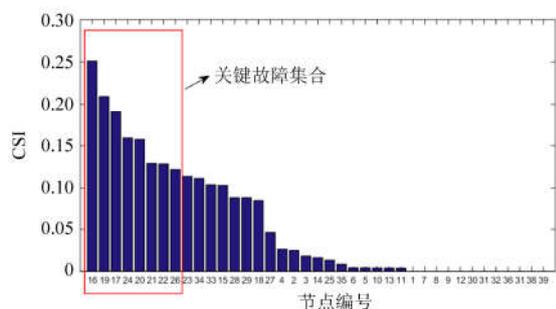


图 5 各节点故障严重性指标

Fig. 5 CSI of each bus

#### 4.2 动态无功补偿装置候选安装节点

动态无功补偿装置一般都不安装在同步发电机所在的母线, 因此本文仅考虑将 SVC 安装在非发电机所在的节点。为了确定在不同节点安装相同容量的 SVC 对抑制暂态电压失稳的效果, 通过式(7)计算灵敏度指标 SI, 计算结果如图 6 所示。

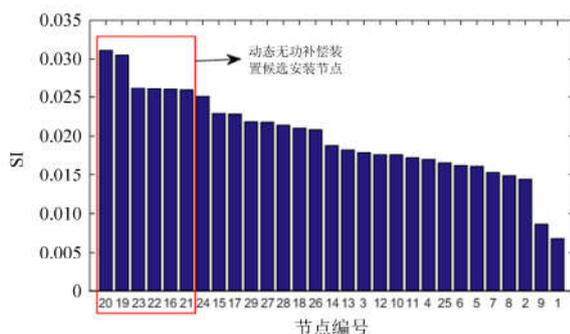


图 6 各节点灵敏度指标

Fig. 6 SI of each bus

由图 6 可知, 在不同节点安装相同容量的 SVC 对降低暂态电压失稳风险的作用是不同的, 在一些节点安装 SVC 能够更为显著地抑制暂态电压失稳现象的发生。本文选择灵敏度指标最大的 6 个节点作为动态无功补偿装置候选安装节点, 分别是节点 20、19、23、22、16、21。

#### 4.3 动态无功配置方案

确定了关键故障集合和动态无功补偿装置候选安装节点之后, 根据图 3 无功配置方法流程, 可以得到无功优化的结果, 如图 7 所示。图 7 中表示的是 5 次独立运行的优化结果。由图 7 可知, 5 次独立优化的最终优化结果基本相同, 说明本文所提方法的稳定性较好。

为了验证本文算法的有效性, 采用粒子群算法进行比较, 粒子数量设为 20, 迭代次数为 30, 其他参数采用经典参数。图 8 是采用烟花算法和采用粒子群算法的优化仿真结果。由图 8 可知, 与粒子群

算法相比, 采用烟花方法降低暂态电压失稳风险所需的无功补偿成本更少, 优化所需要进行的时域仿真次数更少, 说明烟花算法在集中速度和解决全局准确度方面更好。

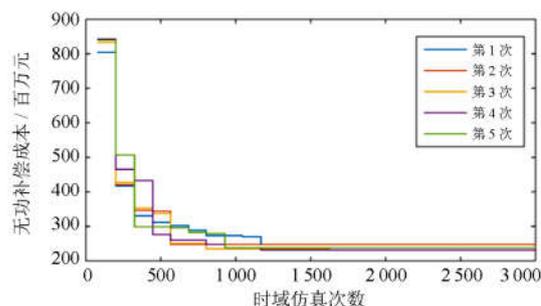


图 7 5 次独立的优化结果

Fig. 7 Results for 5 independent optimization trials

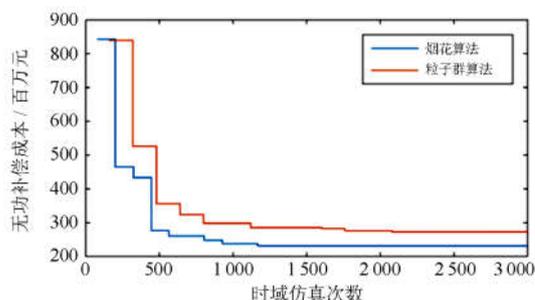


图 8 烟花算法与粒子群算法优化结果

Fig. 8 Results of fireworks optimization algorithm and particle swarm optimization algorithm

表 1 中的方案 1 是其中一次优化的结果。如果不同时优化动态无功补偿装置的安装地点和安装容量, 采用文献[10]的方法, 在每个安装点均匀分配无功补偿容量, 在相同无功补偿成本下, 无功补偿方案如表 1 中的方案 2 所示。对比本文方法和均匀分配的方法无功补偿的效果可知, 在相同动态无功补偿成本下, 本文方法的暂态电压失稳风险更小, 无功配置方案更优。

表 1 各节点无功补偿安装容量

Table 1 Reactive power compensation capacity of each bus

方案 编号	各节点安装容量/Mvar						TVRI
	16	19	20	21	22	23	
方案 1	202	69	285	43	51	80	0
方案 2	121	121	121	121	121	121	0.003

为了清楚地表示优化过程中各个无功补偿候选节点动态无功补偿安装容量的变化情况, 图 9 是某次优化过程中, 各无功补偿点的安装容量变化。

为了显示本文提出的筛选环节的作用, 在有和无

筛选环节情况下, 分别独立运行 5 次优化算法, 计算它们的平均值, 结果如图 10 所示。由图 10 可知, 有筛选环节情况下, 经过约 1 200 次时域仿真, 优化结果就已经稳定, 而没有筛选环节则需要运行超过 2 500 次时域仿真, 优化结果才趋于稳定。因此本文提出的筛选环节在减少时域仿真次数和缩短优化时间方面有显著的作用。

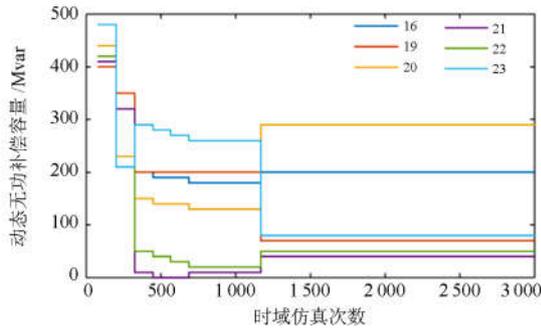


图 9 各候选节点动态无功补偿安装容量

Fig. 9 Dynamic reactive power compensation capacity of each candidate bus

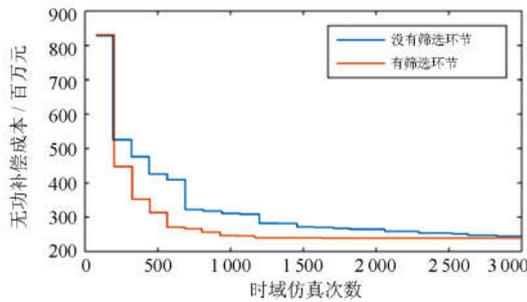


图 10 有无筛选环节对优化过程的影响

Fig. 10 Influence of the screening process on the optimization process

## 5 结论

1) 将多个动态无功补偿点的安装容量当作输入变量, 采用烟花优化算法对考虑降低暂态电压失稳的动态无功补偿模型进行求解, 可以得到系统暂态电压失稳风险最小和动态无功补偿成本最小的解。与粒子群算法相比, 采用烟花方法降低暂态电压失稳风险所需的无功补偿成本更少, 优化所需要进行的时域仿真次数更少; 与仅考虑安装地点的方法相比, 相同无功补偿成本下, 降低暂态电压失稳风险的效果更好。

2) 通过在烟花算法增加一个火花筛选环节, 可以显著减少优化过程中时域仿真的次数, 缩短优化时间。

## 参考文献

[1] 夏成军, 杨仲超, 周保荣, 等. 考虑负荷模型的多回直流同时换相失败分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(9): 76-81.  
XIA Chengjun, YANG Zhongchao, ZHOU Baorong, et al. Analysis of commutation failure in multi-infeed HVDC system under different load models[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(9): 76-81.

[2] 李东东, 梁自超, 周玉琦. 含风电场的受端系统暂态电压稳定性评估[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(13): 8-14.  
LI Dongdong, LIANG Zichao, ZHOU Yuqi. Transient voltage stability assessment of receiving end grid incorporating with wind farm[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(13): 8-14.

[3] 黄小庆, 曹阳, 吴卫良, 等. 考虑电压暂降指标的电压协调控制方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(22): 147-154.  
HUANG Xiaoqing, CAO Yang, WU Weiliang, et al. Research on voltage coordination control method considering voltage sag index[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(22): 147-154.

[4] 侯建兰, 马冰, 刘育权, 等. 电网暂态电压稳定的主要影响因素量化分析[J]. 电网与清洁能源, 2016, 32(6): 28-34.  
HOU Jianlan, MA Bing, LIU Yuquan, et al. Quantitative analysis of main factors influencing transient voltage stability of power grid[J]. Power System and Clean Energy, 2016, 32(6): 28-34.

[5] 梅永振, 王海云, 常鹏, 等. STATCOM 对输电系统及受端电能质量的影响[J]. 电网与清洁能源, 2016, 32(8): 1-6.  
MEI Yongzhen, WANG Haiyun, CHANG Peng, et al. Influences of STATCOM on power quality of transmission system and receiving-end[J]. Power System and Clean Energy, 2016, 32(8): 1-6.

[6] 杨柳青, 刘明波, 林舜江. 控制分区中含有多个先导节点的静态电压稳定裕度计算[J]. 电网技术, 2013, 37(5): 1346-1352.  
YANG Liuqing, LIU Mingbo, LIN Shunjiang. Computation of static voltage stability margin with multiple pilot buses in a control partition[J]. Power System Technology, 2013, 37(5): 1346-1352.

[7] 张靖, 程时杰, 文劲宇, 等. 通过选择 SVC 安装地点提高静态电压稳定性的新方法[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(34): 7-11.  
ZHANG Jing, CHENG Shijie, WEN Jinyu, et al. A novel steady-state voltage stability enhancement method based

- on SVC allocation[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(34): 7-11.
- [8] 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): 17-21.  
YUAN Zhichang, LIU Wenhua, SONG Qiang. Optimal allocation method of dynamic var compensation based on transient voltage stability index[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(14): 17-21.
- [9] 码 SAPKOTA B, VITTAL V. Dynamic var planning in a large power system using trajectory sensitivity[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25(1): 461-469.
- [10] 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.
- [11] 黄小庆, 阮驰骋, 邹佳芯, 等. 考虑电网特性的动态无功优化配置方法[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(9): 127-133.  
HUANG Xiaoqing, RUAN Chicheng, ZHOU Jiabin, et al. Optimal dynamic var configuration considering grid characteristics[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(9): 127-133.
- [12] 刘旺, 陈益峰, 朱添安, 等. 交直流电网的无功补偿选点及容量优化研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(10): 91-97.  
LIU Wang, CHEN Yifeng, ZHU Tianan, et al. Study on location and capacity optimization of reactive power compensation in AC-DC grids[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(10): 91-97.
- [13] WILDENHUES S, RUEDA J L, ERLICH I. Optimal allocation and sizing of dynamic VAR sources using heuristic optimization[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(5): 2538-2546.
- [14] 何笠, 李兴源, 徐梅梅. 考虑动态负荷机械转矩参数的节点暂态电压评估[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(19): 11-14.  
HE Li, LI Xingyuan, XU Meimei. Assessment of transient voltage stability of load bus considering mechanical torque of dynamic load[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(19): 11-14.
- [15] TIWARI A, AJJARAPU V. Optimal allocation of dynamic VAR support using mixed integer dynamic optimization[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(1): 305-314.
- [16] XU Y, DONG Z Y, MENG K, et al. Multi-objective dynamic Var planning against short-term voltage instability using a decomposition-based evolutionary algorithm[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(6): 2813-2822.
- [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 Shiyong, YIN Yonghua, 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] TAN Y, ZHU Y. Fireworks algorithm for optimization[J]. Advances in Swarm Intelligence, 2010: 355-364.
- [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.
- [20] 张勇军, 韩东昆, 刘巍. 受端电网静态/动态无功补偿综合优化[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(3): 32-35.  
ZHANG Yongjun, HAN Dongkun, LIU Wei. Comprehensive optimization of static/dynamic reactive power for receiving-end network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(3): 32-35.

收稿日期: 2017-03-29; 修回日期: 2017-06-14

作者简介:

周仕豪(1993—), 男, 硕士研究生, 研究方向为暂态电压稳定; E-mail: zhoushihao@whu.edu.cn

唐飞(1982—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统稳定与控制; E-mail: tangfei@whu.edu.cn

刘涤尘(1953—), 男, 教授, 研究方向为电力系统稳定与控制。E-mail: dcliu@whu.edu.cn

(编辑 葛艳娜)