

非解析复变电力系统动态无功点优化配置

张勇¹, 罗滇生¹, 范幸¹, 李剑辉², 辛拓², 毛戈¹

(1. 湖南大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082; 2. 广东电网公司电力调度控制中心, 广东 广州 510000)

摘要: 动态无功补偿装置在电网中无功补偿的效果很大程度上取决于补偿点的选择。从非解析复变电力系统的动态分析方法出发, 指出阻抗模裕度指标是电压稳定性分析最直观的指标, 并利用该指标对系统薄弱环节进行一个初步判定。然后分析了系统在暂态扰动下失稳的过程, 指出暂态稳定裕度指标是描述系统暂态扰动过程稳定性的最本质指标, 利用动态无功补偿装置可以改善此指标。在此基础上, 提出了一种结合阻抗模裕度指标和暂态稳定裕度指标的动态无功优化配置方法, 比较各种无功配置方案下暂态稳定裕度指标的提升值以得到最优配置方案。通过 IEEE 39 母线系统和广东电网 220 kV 网络算例说明了该方法的有效性。

关键词: 动态无功补偿装置; 补偿点; 阻抗模裕度; 暂态稳定裕度; 无功优化

Optimization configuration of dynamic reactive power point for non-analytical complex variable power system

ZHANG Yong¹, LUO Diansheng¹, FAN Xing¹, LI Jianhui², XIN Tuo², MAO Yi¹

(1. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China; 2. Guangdong Power Dispatch Center, Guangdong Power Grid Company, Guangzhou 510000, China)

Abstract: The effect of reactive power compensation largely depends on the reactive power compensation point selection. From the dynamic analysis methods for non-analytic complex variable power system, the impedance modulus margin index is pointed out to be the most intuitive indicator for voltage stability analysis, and it is used to preliminarily determinate weak line in system. Then this paper analyzes the system instable process under the transient disturbances, and points out that the transient stability margin is the essential indicator describing the stability of the system transient disturbance process, which can be quickly calculated by using extended equal area criterion. On the basis, a kind of dynamic reactive power optimization configuration method based on transient stability margin index is put forward, then the transient stability margin index increase values of various reactive power allocation schemes are compared to get the optimal one. By IEEE 39-bus system and the Guangdong Power Grid 220 kV network system examples, this method is proved to be effective.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 61233008) and Guangdong Power Grid Special Research Project (No. 036000QQ00120001).

Key words: dynamic reactive power compensation device; compensation point; impedance modulus margin; transient stability margin; reactive power optimization

中图分类号: TM71

文献标识码: A

文章编号: 1674-3415(2015)08-0028-07

0 引言

近年来发生的多起大规模停电事故主要是由于电网结构不够强壮, 或者安装的自动装置不够健全

导致^[1], 归根结底是由于系统暂态失稳, 造成电压崩溃。而以静止同步补偿器(Static synchronous compensator, STATCOM)为代表的动态无功补偿装置可在系统故障后紧急控制, 迅速输出无功, 维护系统稳定^[2-5]。在电网的电源、负荷及接线方式确定后, 无功补偿的布局直接影响补偿效果的发挥。本文主要研究补偿点的优化选择, 补偿容量的优化确

基金项目: 国家自然科学基金资助重点项目(61233008); 广东电网专题研究项目(036000QQ00120001)

定可参见文献[6]。

前人针对无功补偿装置在电网中的优化配置问题已经作出了一些探讨。文献[7]提出了一种根据电压控制先导节点确定无功源配置地点的方法；文献[8]利用“电气距离”把电力系统分成几个耦合性强的小区，再结合电压稳定灵敏度进行无功优化配置。上述方案都是以提高系统的静态电压稳定性为目标实施优化的。也有以动态无功装置投资效益等经济性指标来确定无功源安装地点的方法。文献[9]采用有功损耗/无功灵敏度方法，结合 Tabu 搜索进行无功优化，使系统投资及有功损耗最小。文献[10]基于遗传算法和分支定界法，求取当获得最小投资时对应的无功补偿安装节点。按照上述方案实施无功补偿后，或改善了系统的无功功率水平，提高了系统的电压水平；或减少了有功功率的损耗，获得了较好的投资效益，但都无法准确描述感应电动机、直流输电系统等快速响应设备的动态过程，且利用暂态稳定控制装置去提高系统静态电压稳定裕度，不能充分发挥其在解决暂态稳定问题方面特有的优势。文献[11]建立了考虑多故障暂态电压安全的动态无功装置安装地点数学模型，通过特定故障后系统母线电压恢复到 0.75 p.u. 以上的时间确定敏感母线进而确定 STATCOM 的安装地点，但没有考虑动态装置本身的实际特性。文献[12]基于暂态电压失稳机理，提出了一种寻找最大程度延长极限切除时间指标的无功优化方法，考虑了无功补偿装置的暂态特性；文献[13]提出了一种基于改进轨迹灵敏度指标的动态无功优化方法，可以定量地描述无功补偿装置的补偿效果。但是上述思路存在以下问题：1) 对电力系统本身非解析复变的特性考虑不足；2) 仅仅使整体的补偿效果量化指标变优，而这些效果可能来自于本身较稳定节点的贡献，得出的补偿方案不一定能使系统内所有薄弱节点在故障下保持暂态稳定；3) 对无功补偿后的系统的稳定性没有校核。此外，系统的暂态稳定不仅包括暂态电压稳定，而且还有暂态功角稳定，并且后者是电力系统中造成电压崩溃的主要原因。

为弥补以上方法的不足，本文从非解析复变电力系统的动态分析理论出发，建立了线性化的综合动态等值电路，利用能准确描述节点动态稳定性强弱的阻抗模裕度指标对系统的薄弱环节进行初步判定，作为无功源的待选安装位置；在此基础上，利用能定量描述系统参数轨迹变化过程的暂态稳定裕度指标进一步缩小待选节点范围，并利用其在安装 STATCOM 后的提升值来确定 STATCOM 的最终安装位置。新方法既考虑了电力系统非解析复变的动

态特性，又充分发挥了动态无功补偿装置的暂态支撑作用。通过 IEEE 39 节点系统验证该方法的有效性，并以广东电网 220 kV 网络实例介绍其在大型受端电网动态无功补偿装置优化配置中的应用。

1 非解析复变电力系统电压稳定动态分析方法

电力系统是非解析的复变电力系统，文献[14]提出非解析复变电力系统电压稳定的动态分析方法，将系统简化为如图 1 所示的等值电路。

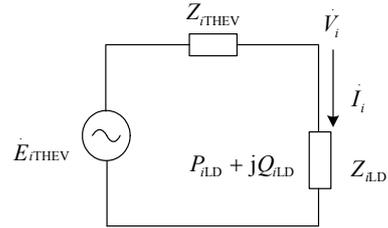


图 1 非解析复变电力系统综合动态等值电路

Fig. 1 Comprehensive dynamic equivalent circuit of non-analytic complex power system

图中： Z_{iLD} 为节点负荷 i 静态等值阻抗； Z_{iTHEV} 为系统动态等值阻抗； \dot{E}_{iTHEV} 为等值系统动态电势； \dot{V}_i 为等值系统端电压； \dot{I}_i 为注入等值系统的电流； $P_{iLD} + jQ_{iLD}$ 为等值的系统负荷。

系统动态等值阻抗：

$$Z_{iTHEV} = -\frac{d\dot{V}_i}{d\dot{I}_i} \quad (1)$$

非解析复变电力系统中节点电压不是注入电流的解析复变函数，在复数域内不能直接求导。引入作为实数的注入系统的功率 λ 为参变量，可得：

$$Z_{iTHEV} = -\frac{d\dot{V}_i/d\lambda}{d\dot{I}_i/d\lambda} \quad (2)$$

然而， λ 不能同时作为目标函数和其中的参变量应用于非解析复变电力系统的计算中。理论上，能反应系统运行状态的任何实变量均可替代之。不妨取注入节点电流的实部 I_x ，进一步替换为

$$Z_{iTHEV} = -\frac{d\dot{V}_i/d\lambda}{d\dot{I}_i/d\lambda} = -\frac{d\dot{V}_i/dI_x}{d\dot{I}_i/dI_x} \quad (3)$$

定义负荷节点阻抗模裕度指标以判定系统内节点的动态稳定性，如式(4)所示。

$$\mu_i = \frac{|Z_{iLD}| - |Z_{iTHEV}|}{|Z_{iLD}|} \quad (4)$$

上述定义将解析复变系统极限传输功率判据推广到非解析复变电力系统，进而应用该等值模型计算阻抗模裕度指标。阻抗模裕度反映了系统当前运行状态离极限传输状态的距离，其取值区间为 0 到

1. 其值越小, 节点电压稳定性越弱。当 μ 为0时, 系统处于电压稳定临界点。可见, μ 是电压稳定性分析最直观的指标, 本文提出的动态无功优化配置方案即是基于此指标初步确定薄弱节点。

在阻抗模裕度指标的计算中, 在负荷模型确定情况下, 基础负荷水平和负荷扰动方式对其值是有影响的。但当负荷功率水平同步增大时, 各节点的阻抗模裕度指标值也是同步一致变化的。因此, 随着基础负荷功率水平变大, 负荷功率在此基础上增加, 都会使节点的阻抗模裕度一致变小, 但在同一时刻, 它们彼此之间的大小关系不会因此改变。

在实际应用计算中, 为考察电压失稳概率更大情况下系统的稳定性, 一般根据调度部门的规划数据潮流选择负荷水平较重的夏大运行方式、负荷功率同步扰动^[14]进行仿真分析。

2 动态无功补偿装置提高系统暂态稳定性机理分析

对于一个 n 机电力系统 R_n , 每台发电机的转子运动方程可简化为

$$M_i \ddot{\delta}_i = P_{mi} - P_{ei} \quad i \in [1, n] \quad (5)$$

式中, M_i 、 δ_i 、 P_{mi} 、 P_{ei} 分别为第 i 台发电机转子等效的惯性时间常数、转子角、输入的原动机机械功率和输出电磁功率。

将 n 台发电机分成互补的领先群 S 和余下群 A , 并将隶属于同一群的机组转子运动方程两端相加, 可得互补群转子等值运动方程:

$$\begin{cases} M_S \ddot{\delta}_S = P_{mS} - P_{eS} \\ M_A \ddot{\delta}_A = P_{mA} - P_{eA} \end{cases} \quad (6)$$

式中, M_S 、 M_A 、 δ_S 、 δ_A 、 P_{mS} 、 P_{mA} 、 P_{eS} 、 P_{eA} 依次为 S 群和 A 群的等值转动惯量、等值转子角、等值机械输入功率、等值电气输出功率。运用互补群惯量中心(Complementary Cluster COI, CCCOI)变换, 将 S 或 A 中所有受扰轨迹进行惯量加权平均, 即可得等值两机系统 R_2 的受扰轨迹。进一步利用相对运动(Relative Movement, RM): $R_2 \rightarrow R_1$ 变换, 将两机系统等值变换为单机无穷大(one machine-infinity bus, OMIB)系统:

$$M \ddot{\delta} = P_m - P_e \quad (7)$$

式中, M 和 δ 依次为等值OMIB系统的转动惯量和转子角。易得电磁输出功率 P_e 为 δ 分段正弦函数, 将上式两边对 δ 积分得:

$$\frac{M}{2} \dot{\delta}^2 = \int_{\delta_0}^{\delta} (P_m - P_e) d\delta \quad (8)$$

式中, δ_0 为故障前转子角。该式对应物理过程为: 发生故障后产生不平衡力矩对发电机转子做功并转换为其动能, 如图2所示。

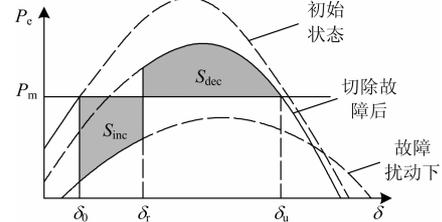


图2 单机无穷大系统电磁功率-转子角图

Fig. 2 P- δ of OMIB

由图可见, 故障发生后转子角不断增加, 转子积累暂态动能。 τ 时刻切除故障后, 不平衡力矩变号, 使OMIB系统由加速运动转为减速运动, 暂态动能也逐渐减少。应用扩展等面积法则(Extended equal area criterion, EEAC)^[15], 将上述过程等效为如图中阴影部分所示动能增加面积 S_{inc} 和动能减少面积 S_{dec} 。定义暂态稳定裕度并进行标么化得:

$$\eta_\tau = \frac{S_{dec}(\delta_\tau) - S_{inc}(\delta_\tau)}{S_{inc}(\delta_\tau)} \quad (9)$$

式中动能增加面积

$$S_{inc}(\delta_\tau) = \int_{\delta_0}^{\delta_\tau} (P_m - P_e) d\delta \quad (10)$$

动能减少面积

$$S_{dec}(\delta_\tau) = \int_{\delta_\tau}^{\delta_u} (P_m - P_e) d\delta \quad (11)$$

式中, δ_τ 、 δ_u 分别为故障切除时刻和新的平衡点对应的转子角。注意到, 某一故障下, 暂态动能减少量如果不能抵消暂态动能增加量, 即 $\eta < 0$, 表明系统失去稳定性; $\eta > 0$, 则能保持暂态稳定。

暂态稳定裕度指标精确反映了系统在扰动下的暂态过程, 是衡量系统在暂态扰动下保持稳定能力的本质指标。安装动态无功补偿装置后, 故障的极限切除时间延长, 对暂态稳定裕度具有提升作用, 进而改善系统暂态稳定。显然, 安装动态无功装置后能使 η 值提升为正值, 且提升额度最大的补偿点即对应无功装置最佳的安装位置。

3 优化配置方法

本文首先对全网所有负荷节点的阻抗模裕度指标进行计算, 确定待选的配置点集; 其次计算STATCOM安装前后配置点集内节点的暂态稳定裕度指标, 其中安装后能使得暂态稳定裕度提升值最大且提升为正值的位置即为最终的STATCOM安装

位置。具体步骤如下。

1) 根据调度部门分区结果和被研究网络潮流计算结果, 选出负荷重、电源少、商业发达、无功储备不足的薄弱区域为重点研究区域。

2) 利用电力系统分析软件 BPA 计算系统功率同步扰动, 得到一定时间段内电力系统运行的动态仿真数据, 计算各 PQ 节点的阻抗模裕度指标 μ 。

3) 将指标中小于平均值 $\bar{\mu}$ 的节点纳入系统的薄弱节点集, 组成 STATCOM 待选安装位置。其中

$$\bar{\mu} = \frac{\sum_{i \in N} \mu_i}{N} \quad (12)$$

式中: N 为区域内节点总数; μ_i 为节点 i 的阻抗模裕度值。

4) 考察系统发生故障后的暂态稳定性, 应用第 2 节中方法计算薄弱节点的暂态稳定裕度 η , η 值最小时即对应该母线节点的关键故障。记录关键故障下小于零的各节点 η 值, 这样待选节点的数量进一步缩减, 进一步逼近最佳的安装位置。

5) 选取固定的动态无功容量, 分别配置于缩减后的各节点, 计算同一关键故障下的暂态稳定裕度值, 并记录下变为正值的暂态稳定裕度 $\{\eta'_1, \eta'_2, \dots, \eta'_L\}$, L 为安装 STATCOM 后 η 变为正值的节点数量, 显然在这些节点上进行补偿都能使系统暂态稳定性恢复稳定。

6) 定义并计算在第 j 个节点安装 STATCOM 后关键故障下的暂态裕度指标提升值

$$\Delta\eta_j = \eta'_j - \eta_j \quad (13)$$

$\Delta\eta_j$ 最大者即对动态无功补偿装置最佳安装位置, $j=1, 2, \dots, L$ 。

7) 利用阻抗模裕度指标对补偿效果进行校核。

上述针对 STATCOM 的无功优化配置方法结合阻抗模裕度和暂态稳定裕度两个指标, 在对系统薄弱环节判定的基础上进行无功补偿效果的优化计算, 主要创新之处体现如下: 1) 兼顾考虑了电力系统非解析复变的动态特性以及动态装置对电网的暂态支撑特性; 2) 根据暂态稳定裕度指标在无功补偿后的提升值确定最佳补偿点, 不仅可改善系统暂态电压稳定性, 也可改善系统的暂态功角稳定性; 3) 能反映特定扰动激发的具体模式, 更适用研究非线性对大扰动稳定性的影响。

需要注意的是, 在暂态稳定裕度指标的计算中,

1) 理论上是要考虑不同类型故障发生时的多故障场景。但在实际系统中, 为简便起见, 一般只选用一种或几种关键故障作为预想故障进行加权计算, 各故障的权重取决于其严重程度; 2) 单个动态无功

补偿装置的容量相对于全网装机容量是很小的, 选取不同安装容量一般不影响指标排序。为减少这种影响, STATCOM 安装容量取较大值。

4 算例分析

4.1 IEEE39 节点系统

4.1.1 阻抗模裕度指标计算

所有负荷均按 20% 恒阻抗和 80% 感应电动机设置, 其他参数见文献[16]。考虑系统负荷同步功率扰动, 设置负荷在 $\Delta T=12$ s 持续增长 1.2 倍于基础潮流数据。计算系统内 PQ 节点(编号 1~29)在 $t=60$ s 时的阻抗模裕度, 将其中小于平均值 $\bar{\mu}=0.75$ p.u. 的节点组成薄弱节点集 $\{B_4, B_{12}, B_{15}, B_{16}, B_{20}, B_{21}, B_{24}, B_{27}, B_{28}\}$, 列于表 1。

表 1 补偿前部分 PQ 节点阻抗模裕度

Table 1 Node impedance module sorting before compensation

排序	母线	μ /p.u.
1	B ₁₂	0.641 3
2	B ₁₅	0.651 1
3	B ₂₄	0.663 3
4	B ₂₀	0.669 9
5	B ₄	0.721 0
6	B ₁₆	0.736 8
7	B ₂₁	0.746 2
8	B ₂₇	0.747 8
9	B ₂₈	0.748 4

4.1.2 暂态稳定裕度指标计算

通过故障扫描, 发现当各节点发生三相短路接地故障时暂态稳定裕度值最小。为计算简便, 只考察各节点发生三相短路故障(0.1 s 后切出故障)情形。记录下此时暂态稳定裕度为负值的节点 $\{B_4, B_{15}, B_{24}, B_{27}, B_{28}\}$ 。分别在这些母线上安装容量为 100 Mvar 的 STATCOM, 再次进行故障下的暂态稳定裕度值计算, 安装无功源前后暂态稳定裕度值如表 2 所示, η 值的提升值 $\Delta\eta$ 也列于表中。

表 2 配置前后敏感母线暂态稳定裕度变化情况

Table 2 Transient stability margin index before and after compensation

母线	η	η'	$\Delta\eta$
B ₄	-0.156 3	0.433 9	0.590 2
B ₁₅	-0.186 8	0.105 6	0.292 4
B ₂₇	-0.417 2	-0.188 7	—
B ₂₄	-0.529 3	0.198 4	0.727 7
B ₂₈	-0.788 8	0.240 9	1.029 7

由表可见, 节点 B₂₇ 安装 STATCOM 后 η 值依然为负, 不作安装考虑。而在节点 B₂₈ 处安装无功装置对系统暂态稳定裕度提升最大。故确定在节点 B₂₈ 处安装一台 STATCOM。

暂态稳定最明显的表征是故障后系统电压的变化情况。比较考察在节点 B₂₈、节点 B₂₇ 分别安装一台 100 Mvar 的 STATCOM, 以及无补偿三种方案下节点 B₂₇ 的电压变化情况, 如图 3 所示。由图可见, 无补偿情况下, 故障后系统失稳。在 B₂₇ 处补偿, 系统暂态稳定也不能恢复(印证 $\eta' < 0$)。而在 B₂₈ 安装 STATCOM, 可使其恢复暂态稳定。

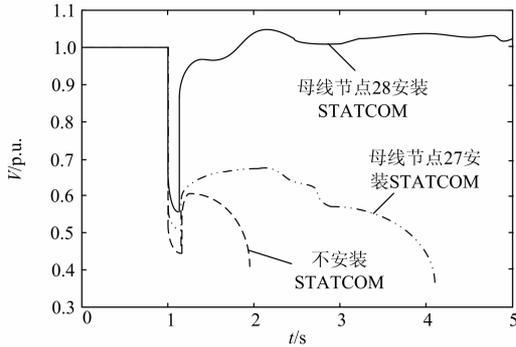


图 3 故障下节点 B₂₇ 的电压变化曲线

Fig. 3 Voltage of bus 27 under the specified contingency

图 4 给出了在 B₂₈ 补偿前后, 薄弱节点的阻抗模裕度指标。可见, 补偿后薄弱节点的 μ 值有明显提高, 亦即使这些节点稳定性增强。实际上, 其他较稳定节点的 μ 值也会有所提高, 但效果不明显。

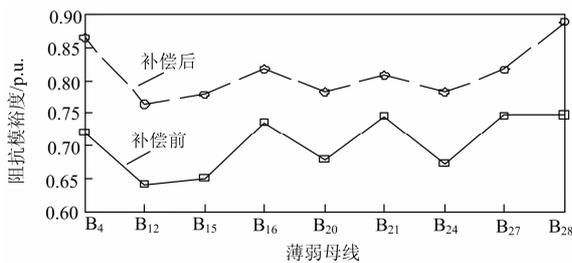


图 4 补偿前后阻抗模裕度对比图

Fig. 4 Impedance modulus margin before and after compensation

4.2 广东电网 220 kV 网络系统

广东电网某电力调度分区 220 kV 网络如图 5 所示, 类似的 220 kV 电压等级层面解环方式运行的区域网架结构越来越多, 故上述研究对象很具有代表性。

该系统是以顺德 500 kV 枢纽站点为中心的典型 220 kV 片区, 包含 6 个 220 kV 的站点, 系统负荷采用 ZIP 负荷模型(30%恒阻抗, 40%恒功率, 30%恒电流)。采用负荷较重的电网夏大运行方式进行仿真, 扰动形式为 $\Delta T=12$ s 内负荷持续增长 1.2 倍于基础潮流数据, 求得片区各站点分别在 50 s、100 s、150 s 的阻抗模指标, 由大到小排序如表 3。

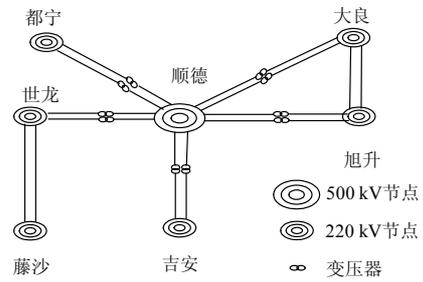


图 5 广东电网某 220 kV 网络

Fig. 5 220 kV network of Guangdong power grid

表 3 不同时刻阻抗模裕度指标

Table 3 Impedance modulus margin under different time

站点	T=50 s 的 阻抗模裕度	T=100 s 的 阻抗模裕度	T=150 s 的 阻抗模裕度
旭升	0.515 7	0.407 0	0.353 9
世龙	0.494 9	0.375 4	0.342 8
大良	0.479 1	0.362 7	0.309 1
藤沙	0.461 7	0.337 6	0.304 3
都宁	0.435 9	0.308 5	0.274 2
吉安	0.425 6	0.297 2	0.263 4

可见, 不同站点在不同时刻的阻抗模裕度值大小顺序一致。确定阻抗模裕度较小(小于平均值)的吉安、都宁、藤沙为 STATCOM 候选点。设置故障为顺德至旭升 220 kV 线路发生三相短路故障, 0.1 s 后切除故障, 并对其在安装 30 Mvar STATCOM 前后进行暂态稳定裕度指标计算, 如表 4。

表 4 配置前后待选站点暂态稳定裕度变化情况

Table 4 Transient stability margin index before and after compensation of selected sites

站点	η	η'	$\Delta\eta$
吉安	-0.346 7	0.433 9	0.780 6
都宁	-0.267 3	0.605 6	0.873 8
藤沙	-0.198 7	0.235 8	0.434 5

三站点安装 STATCOM 能使系统恢复暂态稳定, 选取暂态稳定裕度值提升最大的都宁作为该系统无功补偿配置点。比较在都宁、吉安、藤沙三站点分别安装 30 Mvar STATCOM 以及不补偿四种方案情况下吉安站电压变化情况, 如图 6 所示。

可见, 没有无功补偿时, 系统是暂态失稳的, 在待选的三个站点分别进行无功补偿后都能使故障后的电压有所恢复, 但在都宁站点进行无功补偿电压提升效果最明显, 最接近故障前的稳定水平。

利用阻抗模裕度指标对无功补偿后节点的稳定性进行校核, 表 5 给出了故障发生后分别在各站点无功补偿下 50 s 的各站点阻抗模裕度指标值。

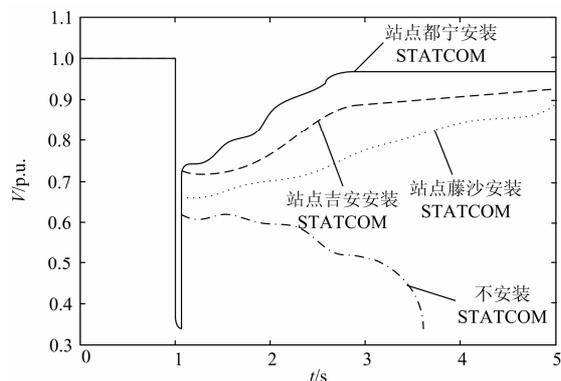


图6 故障下吉安电压变化曲线

Fig. 6 Voltage of bus Ji'an the specified contingency

表5 无功补偿后阻抗模裕度指标

Table 5 Impedance modulus margin under different time

站点	不同站点补偿后 $T=50$ s 的阻抗模裕度指标		
	藤沙	吉安	都宁
旭升	0.517 8	0.518 7	0.520 0
世龙	0.495 9	0.496 5	0.499 9
大良	0.483 2	0.494 5	0.502 3
藤沙	0.536 9	0.568 7	0.625 6
都宁	0.529 8	0.583 2	0.788 9
吉安	0.517 9	0.616 5	0.691 3

由表3可见,无功补偿后各站点阻抗模裕度指标变大,节点稳定性增强。在都宁站补偿阻抗模裕度指标提升最大。对于暂态失稳的各站点,阻抗模裕度指标变化尤其明显。因此确定最佳的无功补偿点为都宁站。

5 结论

电力系统是非解析复变的动态系统。STATCOM可在系统发生暂态扰动后快速紧急控制。基于上述特性,文中利用阻抗模裕度指标对系统薄弱环节进行初步确定,提出了一种最大程度提高系统暂态稳定裕度指标的无功优化配置方法,充分发挥了STATCOM装置快速实时补偿的暂态特性,为以STATCOM为首的FACTS装置投入工程应用提供了一定指导。

通过IEEE 39节点系统以及广东电网220 kV系统实例详细介绍了这种方法的步骤,验证了这种思路是可行的。为了更加贴近实际应用,还应考虑怎样在复杂大型受端电网精确分区的基础上对系统进行分散配置。

参考文献

[1] 李锋, 谢开. 欧洲互联电网2006年11月4日大范围停

电事故分析[J]. 中国电力, 2007, 40(5): 90-96.

LI Feng, XIE Kai. Analysis on the disturbance of UCTE inter connected system occurred on Nov. 4, 2006[J]. Electric Power, 2007, 40(5): 90-96.

[2] 杨晓峰, 范文宝, 王晓鹏. 基于模块组合多电平变换器的STATCOM及其控制[J]. 电工技术学报, 2011, 26(8): 7-13.

YANG Xiaofeng, FAN Wenbao, WANG Xiaopeng. Static synchronous compensator based on modular multilevel converter based STATCOM and its control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(8): 7-13.

[3] 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 Shunjiang, LIU Mingbo, ZHOU Xin, et al. Emergency load shedding control optimization for transient voltage security[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(11): 18-24.

[4] 王存平, 尹项根, 张哲. 配电网STATCOM输出LCL滤波器特性分析及参数设计[J]. 电工技术学报, 2011, 26(12): 99-105.

WANG Cuning, YIN Xianggen, ZHANG Zhe. Characteristic analysis and parameter design of output LCL filter in D-STATCOM[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(12): 99-105.

[5] 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 Danyue, ZHANG Xueming, et al. An exploration on index about voltage sags[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(3): 147-152.

[6] 李剑辉, 曹阳, 辛拓, 等. 考虑电压暂降风险的高压配电网动态无功容量优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(8): 47-53.

LI Jianhui, CAO Yang, XIN Tuo, et al. Study on high voltage distribution network dynamic optimal allocation of reactive power capacity considering the risk of voltage sag[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(8): 47-53.

[7] 姚小寅, 孙元章, 王志芳. 电力系统无功源最佳配置地点的研究[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(3): 12-15.

YAO Xiaoyin, SUN Yuanzhang, WANG Zhifang. Studies on the optimal allocation of reactive power sources[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(3): 12-15.

[8] 胡彩娥, 杨仁刚. 用电力系统分区方法确定无功源最

佳配置地点[J]. 电力系统及其自动化学报, 2004, 16(3): 46-49.

HU Caie, YANG Rengang. Optimal allocation of reactive power sources using network partition[J]. Proceedings of the CSU-EPSSA, 2004, 16(3): 46-49.

[9] HUANG Y C, YANG H T. Solving the capacitor placement problem in a radial distribution system using tabu search approach[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1996, 11(4): 1868-1873.

[10] DELFANTI M, GRANELLIG P, MARANNINO P, et al. Optimal capacitor placement using deterministic and genetic algorithms[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2000, 15(3): 1041-1046.

[11] 李海琛, 刘明波, 林舜江. 考虑暂态电压安全的 STATCOM 安装地点选择和容量优化[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(5): 69-76, 80.

LI Haichen, LIU Mingbo, LIN Shunjiang. Selection of STATCOM's installation site and capacity optimization considering transient voltage security[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(5): 69-76, 80.

[12] 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.

[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. Adynamic VAR configuration method based on improved trajectory sensitivity index[J]. Power System Technology, 2012, 36(2): 88-94.

[14] 刘光晔, 施海亮, 杨以涵. 非解析复变电力系统电压稳定的动态分析方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(12): 36-42.

LIU Guangye, SHI Hailiang, YANG Yihan. Comprehensive dynamic analysis method for power system static voltage stability[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(12): 36-42.

[15] 薛禹胜. 运动稳定性量化理论—非自治非线性多刚体系统的稳定性分析[M]. 南京: 江苏科学技术出版社, 1999.

[16] PAI M A. Energy function analysis for power system stability[M]. Boston: Kluwer, 1989: 223-227.

收稿日期: 2014-07-02; 修回日期: 2014-10-25

作者简介:

张 勇(1989-), 男, 通信作者, 工学硕士, 研究方向为电力系统稳定与控制; E-mail: 13647439218@163.com

罗滇生(1971-), 男, 教授, 主要研究领域为电力市场理论研究及应用、电力系统在线监测;

范 幸(1991-), 女, 工学硕士, 研究方向为电力系统稳定与控制。

(编辑 姜新丽)