

考虑电压暂降指标的电压协调控制方法研究

黄小庆, 曹阳, 吴卫良, 黄超, 曹一家

(湖南大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘要: 针对电压暂降给敏感负荷带来严重损失的问题, 提出一种改进的紧急电压控制方法。通过 STATCOM 动态无功补偿和紧急切负荷控制策略协调补偿故障电压, 改善电压暂降发生概率。首先, 基于蒙特卡洛方法搭建故障模型, 并计算电压暂降发生概率。接着, 构建年总支出费用函数, 优化求解费用最小所对应的 STATCOM 最优容量。进一步地, 针对不同故障给节点造成不同的电压暂降深度, 引进紧急切负荷控制。综合运用 STATCOM 补偿和切负荷控制手段, 优先进行 STATCOM 补偿, 但当 STATCOM 补偿容量达到上限时, 进行紧急切负荷控制, 最大限度抑制并降低电压暂降发生概率。最后, 以广东东莞片区为例进行分析, 仿真验证所提出方案的正确性和有效性。

关键词: 电压暂降; 蒙特卡洛; STATCOM; 切负荷; 协调控制

Research on voltage coordination control method considering voltage sag index

HUANG Xiaoqing, CAO Yang, WU Weiliang, HUANG Chao, CAO Yijia

(College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: Considering serious damage to sensitive load caused by the voltage sag, this paper proposes an improved emergency voltage control method. It installs STATCOM device and sheds load coordinately to compensate voltage to improve the voltage sag probability index. Firstly, based on the Monte Carlo method, fault model is built to calculate voltage sag occurrence probability. Then, the total annual cost function is put forward, which solves the minimum cost to get optimal capacity of the STATCOM. Further, according to different failures causing different failure severity to a node, an emergency load control is introduced. Combining the STATCOM with shedding load, the STATCOM is used to compensate voltage as the first priority. When the STATCOM compensation reaches its limit, it will shed the load to prevent and reduce the voltage sag occurrence probability as far as possible. Finally, an example of Dongguan district in Guangdong province is simulated, the results show that the method mentioned is correct and effective.

This work is Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51577053).

Key words: voltage sag; Monte Carlo; STATCOM; load shedding; coordinated control

中图分类号: TM74

文章编号: 1674-3415(2015)22-0147-08

0 引言

随着国民经济的高速发展, 敏感负荷如 PLC、计算机、可调速电机等用电设备所占比例越来越多, 区别于只有停电才受影响的传统负荷, 这类现代负荷更加敏感, 对电能质量尤其是暂态电压提出了更高的要求^[1-2]。电压暂降作为电能质量中的一类, 发生频率高, 已经成为很多发达国家位居第一的电能质量问题^[3-4]。

电压暂降属于暂态电压研究范畴, 应对暂态电压稳定问题, 需要相应采取紧急控制措施。暂态电压稳定紧急控制是一种事故后控制, 它通过采取适当的措施, 使电力系统恢复到正常状态或者暂时进入恢复状态。常见的改善措施分为两类: 一类是安装以静止同步补偿器为代表的动态无功补偿装置, 故障后快速地对负荷节点提供无功支撑, 如文献[5]考虑暂态电压安全, 以故障切除后 1 s 母线电压恢复值不低于 0.75 p.u. 为约束, 采用线性规划方案求解多个故障下的 STATCOM 容量, 文献[6]提出以极限切除时间作为暂态电压稳定指标, 通过对比多种方案改善极限切除时间得到最优动态无功补偿方案。另

基金项目: 国家自然科学基金(51577053); 微网群高效可靠运行关键技术及示范(2012AA050 217(863 计划))

一类是紧急切负荷控制, 通过快速切除部分可控负荷, 调节故障电压, 确保电压尽快恢复至安全状态, 如文献[7]基于 WAMS 提出低压切负荷控制策略, 采用更短的延时和更大的切负荷比例, 有效提高了意外故障导致电压失稳时切负荷的成功率, 文献[8]搭建了暂态稳定紧急控制方案的数学模型, 并使用线性化方案提出切机/切负荷方案。

事实上, 电压控制措施是综合的、多方面的, 各种措施既针对特定的现象又相互配合, 共同发挥作用。如文献[9], 同时考虑无功和紧急电压控制策略, 对大型风电场接入配网的电压问题进行控制研究。因此, 本文尝试结合上述两类紧急电压控制方法, 在考虑STATCOM容量约束的情况下, 紧急切负荷, 协同改善电压暂降。首先, 基于概率分析理论, 引进蒙特卡洛方法, 随机模拟故障, 提出电压暂降概率指标。然后, 从电网投资者角度分析, 以年总支出费用最小为优化目标, 选择STATCOM最优容量。最后, 从敏感负荷出发, 考虑用户满意度, 将STATCOM和切负荷两种紧急控制方式结合起来, 提出以STATCOM动态无功补偿为主的协调控制策略。当STATCOM达到容量上限而暂态电压仍不满足要求时, 进行切负荷控制, 协调补偿缺额电压。

1 电压暂降补偿分析

1.1 电压暂降

电压暂降(又称电压骤降、电压凹陷或电压跌落), 按照电气与电子工程师协会 IEEE 的定义, 是指工频条件下电压均方根值减小到 0.1~0.9 倍额定电压、持续时间为 0.5 周波至 1 min 的短时间电压变动现象^[10]。

电压暂降对设备损害严重, 如引起敏感控制器不必要的动作(跳闸), 造成包括计算机系统失灵、自动化控制装置停顿或误动、变频调速器停顿等^[11]。不同的敏感负荷电压耐受曲线不一样, 为了分析方便, 按照工程中所设定的, 把0.7 p.u.额定电压值记为敏感负荷承受电压的限值^[12], 当节点电压大于 0.7 p.u.时, 该节点敏感负荷可看做正常工作, 反之会对设备造成很大损失。由于敏感负荷多是工业重要负荷, 从用户满意度考虑应尽量确保其安全可靠运行。

1.2 Q-V 关系分析

电力系统运行时, 电源的无功出力在任何时刻都同负荷的无功功率和网络中的无功损耗之和相等, 即

$$Q_{GC} = Q_{LD} + Q_L \quad (1)$$

其中: Q_{GC} 为电源供应无功功率之和; Q_{LD} 为无功

负荷之和; Q_L 为网络无功功率损耗之和^[13]。电压稳定问题物理本质是系统传输能力与负荷功率需求之间的矛盾, 当系统传输能力无法满足负荷功率需求时, 就会出现电压失稳, 此时无功功率将在较低的节点电压下达到平衡。

以电力网络 2 节点等值模型为例, 如图 1, 经过公式推导可以得出发电机送到负荷节点的功率为

$$P = VI \cos \varphi = \frac{EV}{X} \sin \delta \quad (2)$$

$$Q = VI \sin \varphi = \frac{EV}{X} \cos \delta - \frac{V^2}{X} \quad (3)$$

当 P 为定值时, 得:

$$Q = \sqrt{\left(\frac{EV}{X}\right)^2 - P^2} - \frac{V^2}{X} \quad (4)$$

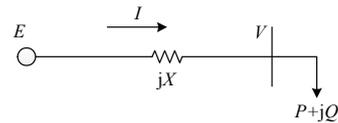


图 1 电力网络 2 节点等值模型

Fig. 1 Electric power network of node 2 equivalent model

若电势 E 为定值, 则 Q 同 V 的关系为一条开口向下的抛物线, 如图 2 曲线 1。负荷侧的主要组成部分为异步电动机, 其消耗的无功包括励磁损耗和漏抗损耗, 在额定电压附近时, 电动机的无功功率随着电压的升降而增减, 其趋势如图 2 曲线 2。

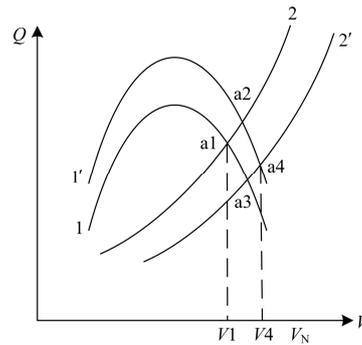


图 2 无功—电压关系曲线图

Fig. 2 Relationship graph of reactive power and voltage

当系统正常运行时, 节点电压在额定值 V_N 附近波动, 当系统受到大扰动, 各节点电压偏离额定值, 在较低电压值下达到新的平衡, 如图 2 曲线 1 与曲线 2 的交点 a_1 对应电压 V_1 。为了改善节点电压, 一方面从电源无功功率入手, 增加无功功率补偿装置, 将曲线 1 升高至曲线 1', 曲线交点为 a_2 , 另一方面从负荷侧入手, 减少系统负荷量, 将曲线 2 降

至曲线2', 曲线交点为 a_3 。从图中可以看出, 如果两种措施相结合的话, 对电压波动改善效果更好。

1.3 电压暂降抑制效果分析

以标准 IEEE 9 节点系统作为研究对象, 选用 PSD-BPA 软件进行仿真。在相同场景下, 考虑不同故障类型, 得出某节点电压仿真曲线如图 3。通过曲线可以发现发生单相接地故障时电压下降幅度很小; 三相故障发生时母线电压将大幅下降, 图中电压最低点下降到 0.25 p.u.; 两相短路和两相接地短路故障时电压暂降值一般维持在 0.4~0.6 p.u。当不考虑紧急电压控制手段时, 线路发生三相短路故障、两相短路故障、两相接地短路故障节点电压暂降值一般都低于 0.7 p.u., 此时会影响节点敏感负荷的正常运行, 而单相短路对节点敏感负荷影响甚微。下面分别使用两种电压补偿策略对电压暂降进行抑制分析。

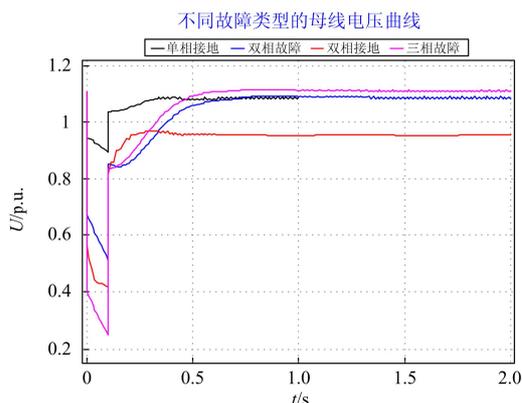


图 3 不同故障类型的电压曲线

Fig. 3 Voltage curve of different fault types

(1) STATCOM 装置补偿的效果分析

本文选用静止同步补偿器(STATCOM, 又称 SVG)进行无功补偿。作为动态无功补偿装置, 它具有响应速度快, 可连续平滑调节, 无需安装滤波器, 不存在谐振问题, 低电压下的输出特性好、控制特性稳定等优点。STATCOM 装置一般并联接在负荷侧, 通过向系统提供无功电流, 补偿电压的不足。

以IEEE9系统为例, 设定该系统某线路发生三相故障, 故障持续时间为 0.1 s, 在母线 A 安装 STATCOM 装置, 容量分别为 0 MVA、30 MVA、50 MVA, 母线 A 电压曲线图如图 4。从仿真曲线可以看出: STATCOM 无功补偿效果明显, 不仅加快故障电压的恢复速度, 同时提高了故障期间电压暂降值, 增加 STATCOM 无功补偿容量改善效果会更明显。

(2) 紧急切负荷的补偿效果分析

低压减负荷措施, 是目前公认的解决电压稳定问题的投资最小且最有效的方法。低压减负荷装置一般分散安装于节点上, 通过检测节点电压, 判断是否切除部分负荷^[14]。

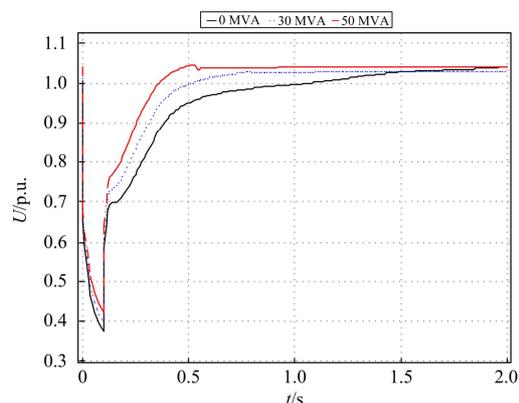


图 4 母线 A 电压曲线图

Fig. 4 Voltage curves of bus A

设定该系统某线路发生两相故障, 相同场景下, 对比仿真分析故障发生时切负荷对电压的改善效果图如图 5。从仿真曲线可以看出: 跟 STATCOM 的补偿效果类似, 有效提高了电压暂降值, 不足的是切除负荷后恢复电压值高达 1.1 p.u., 略高于不切负荷时恢复电压值。

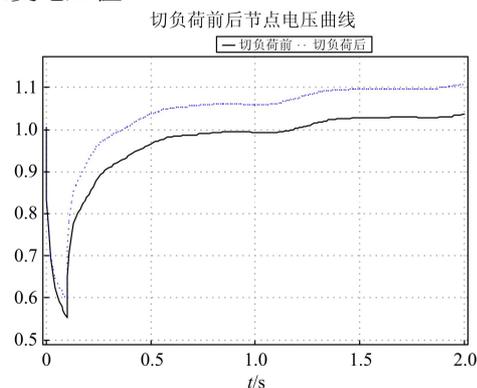


图 5 母线 A 电压曲线图

Fig. 5 Voltage curves of bus A

2 紧急电压控制方法流程

当系统出现短路故障时, 它会以故障发生点为圆心向外辐射, 形成一个电压凹陷区域, 影响区域内敏感负荷的正常运行。以改善电压暂降概率指标为目标, 提出一套新的电压紧急控制方法。新方法将 STATCOM 无功补偿和紧急切负荷两种紧急电压补偿措施结合起来, 考虑 STATCOM 无功补偿容量约束, 协调切负荷控制, 最大限度降低电压暂降发生概率指标, 减少故障后电压暂降对敏感设备造成

的危害。

STATCOM补偿为主，切负荷控制为辅，共同协调控制补偿电压。在上述的控制策略下，当系统线路发生短路故障，则优先考虑STATCOM装置进行动态无功补偿，当无功补偿达到容量上限时，快速比对电压暂降值。若此时节点电压高于0.7 p.u.，不进行切负荷处理；若仍低于限值0.7 p.u.时，按照预设的切负荷控制表切除节点中部分不重要负荷，以尽量确保故障电压能抬升至0.7 p.u.。

电压补偿流程图如图6。

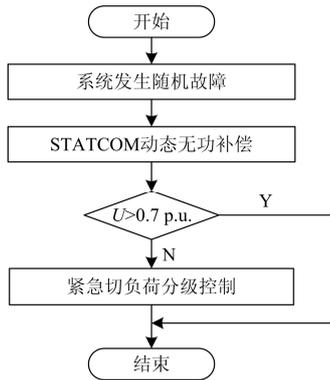


图6 电压补偿流程图

Fig. 6 Flow chart of voltage compensation

3 考虑电压暂降的STATCOM容量优化

3.1 基于蒙特卡洛的电压暂降概率模型搭建

导致电压暂降发生的影响因素很多，当输配电系统中发生短路故障、大容量感应电机启动、雷击、开关操作、变压器以及电容器组投切等事件时，均可引起电压暂降。据统计配电系统中80%以上的电压暂降是由短路故障所引起的^[15]。为了简化分析，仿真时只考虑短路故障所引起的电压暂降问题。

蒙特卡洛方法以概率和统计为理论依据，可以方便地模拟用户需求，常用来解决随机性问题。由于电力系统具有不确定性，因而可以用蒙特卡罗方法从宏观上进行概率评估^[16]，真实反映系统的电压稳定性情况。

在电力配网中，短路故障随机模型的建立包括线路故障类型，故障地点和故障持续时间等。

(1) 对于故障类型，本文考虑使用文献[17]的故障类型及其概率模型如表1。

表1 不同故障类型的概率表

Table 1 Different fault types of probability table

故障类型	概率	故障类型	概率
三相短路	0.04	两相接地短路	0.17
相间短路	0.06	单相接地短路	0.73

随机选取故障变量 x ，使它服从(0,1)之间的均匀分布。确定 x 值之后对照下面的标准即可确定故障类型。

(2) 对于故障地点模型，考虑同一线路上的故障引起负荷点的电压暂降程度相似，在误差允许情况下将各线路均看成一个故障节点，不考虑线路发生故障的具体位置，所有节点发生故障的可能性是

$$F_T = \begin{cases} 1, \text{三相短路} & 0 \leq x < 0.04 \\ 2, \text{相间短路} & 0.04 \leq x < 0.1 \\ 3, \text{两相接地短路} & 0.1 \leq x < 0.27 \\ 4, \text{单相接地短路} & 0.27 \leq x \leq 1.0 \end{cases} \quad (5)$$

均等的。建立系统中线路的均一概率为

$$p_1 = \frac{1}{m} \quad (6)$$

式中： m 为线路总数。随机选取变量 y ，服从(0,1)之间的均匀分布。 y 在不同概率下对应的故障位置可表示为

$$F_L = \begin{cases} 1, 0 < y < p_1 \\ 2, p_1 \leq y < 2p_1 \\ \vdots \\ m, (m-1)p_1 \leq y < 1.0 \end{cases} \quad (7)$$

(3) 对于故障持续时间，考虑系统永久故障仿真跳开时间大多设置为5个周波，为方便后续计算，本文也统一设定故障持续时间为0.1 s。

设定好各模型后，通过Matlab软件随机选取变量 (x, y) ，参照式(1)、式(3)即可确定故障发生类型和故障地点，然后进行故障仿真，观察并统计电压暂降值。为了保证仿真数据与实际值更贴近，拟定仿真5 000次。考虑到敏感负荷的耐受电压值，本文拟定以0.7 p.u.为标准，当电压暂降值大于0.7 p.u.，节点负荷看作正常运行，当故障电压或改善后电压暂降值仍小于0.7 p.u.，则敏感负荷切除，提出暂降电压概率表如表2。文章中提到的电压暂降概率值均默认为电压低于0.7 p.u.的发生概率。

表2 电压暂降概率表

Table 2 Voltage sag probability tables

P	母线 1	母线 2	...	母线 n
$P(U \geq 0.7 \text{ p.u.})$	$1-P_1$	$1-P_2$...	$1-P_n$
$P(U < 0.7 \text{ p.u.})$	P_1	P_2	...	P_n

3.2 STATCOM 最优容量优化配置

STATCOM 容量越大改善效果越好，但是STATCOM 装置费用昂贵，在考虑补偿效果的同时，必须充分顾忌补偿成本。以经济费用为目标，一定存在投资费用与补偿效果相对的一个平衡点，即最

佳补偿容量。

基于风险理论, 将研究的不同目标都统一量化成费用形式, 考虑电压暂降所引起的年总支出费用, 提出以年总支出费用最小为单目标的优化模型^[18]。其组成部分包括年电压暂降损失费用 R_C , 线路有功损耗费用 R_L 和STATCOM投资装置费用 R_S 。约束条件有: 暂态电压稳定不等式约束; 节点配置STATCOM容量范围限制; 系统暂态过程行为的微分代数方程组(DAE)等式模型, 其可表示为

$$\begin{cases} \min F = R_C + R_L + R_S \\ \text{s.t.} & V_i(t_c + 1.0) \geq 0.75 + \varepsilon \\ & Q_{C\min} \leq Q_C \leq Q_{C\max} \\ & \frac{dx}{dt} = f(x, y, Q_C) \\ & g(x, y, Q_C) = 0 \end{cases} \quad (8)$$

式中: V_i 为节点 i 的母线电压值; t_c 为故障清除时间; ε 为留有的控制裕度, 取 $\varepsilon = 0.01$ p.u.; x 为系统的一般包括无功补偿设备、发电机机端电压、功角等的状态向量; y 为母线电压; Q_C 为控制变量, $Q_{C\max}$ 和 $Q_{C\min}$ 为补偿容量上下限, 分别为 0 MVA 和 100 MVA。

其中:

$$R_C = N\mu\zeta \sum_{i \in a, i=1}^n P_i G_i t_G \quad (9)$$

式中: N 为年发生电压暂降次数; μ 为修正系数 (0.6~1.0); ζ 为单位损失成本; P_i 为电压暂降低于 0.7 p.u. 的概率, G_i 为电压暂降引起的脱扣负荷总量; t_G 为区域电网完全恢复所需的时间。

$$R_L = P_1 \times T_E \times C_L = P_M \times T_M \times C_L \quad (10)$$

式中: P_1 为系统有功损耗; T_E 为给定工况持续时间; C_L 为系统的单位电价; P_M 为系统最大损耗功率; T_M 为最大损耗功率对应时间。

$$R_S = \rho \sum_{i \in U} \gamma_i (f_i + \delta Q_{Ci}) \quad (11)$$

式中: U 为系统动态无功补偿的候补安装节点集; Q_{Ci} 为补偿装置的容量; δ 为补偿设备单价; γ_i 指节点 i 是否安装 STATCOM 装置, γ 等于 0 或者 1, 当 $\gamma = 1$ 表示节点安装动态无功补偿装置, 否则该节点无增设; f_i 为节点 i 的安装费用; ρ 是投资回报率。

在配置点安装不同STATCOM容量, 仿真计算发现STATCOM配置容量越大, 电压暂降费用损失、线路有功损耗费用越小, 相应STATCOM投资成本越大。考虑到电压暂降费用 R_C 与STATCOM容量 Q_C

的具体函数关系是复杂的、非线性的, 所以本文尝试通过Matlab曲线拟合的方式, 求解电压暂降费用 R_C 与容量 Q_C 潜在的函数关系式。优化流程图见图7, 具体优化求解步骤如下:

(1) 变量初始化。设定补偿容量 Q_C 上下限, 步长设定为 10 MVA。

(2) 通过蒙特卡洛随机模拟, 求取不同STATCOM容量下各节点电压暂降概率情况, 同时计算电压暂降费用。

(3) 对步骤(2)中得出的多组年电压暂降费用与容量数据进行曲线拟合。

(4) 考虑线路有功损耗和装置费用, 求出总支出费用的函数表达式, 画出图形并求出年总支出费用最小下对应的最优容量。

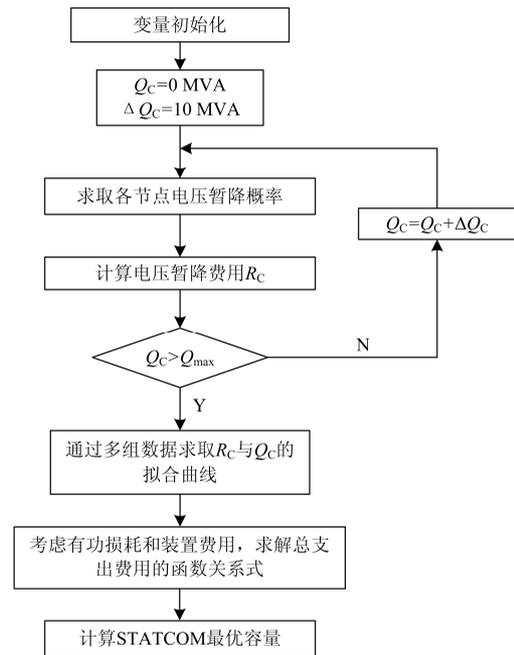


图 7 STATCOM 容量优化流程图

Fig. 7 Flow chart of STATCOM capacity optimization

4 实例分析

4.1 STATCOM 容量优化配置

以广东电网东莞片区为例, 采用电网夏大运行方式的数据进行仿真分析, 其 220 kV 网络的网架结构如图 8 所示。该系统是以东莞 500 kV 枢纽站点为中心的典型 220 kV 片区, 包含 9 个 220 kV 的站点, 该区域有功负荷总量为 3 024.2 MW。考虑负荷模型对系统电压的稳定性影响很大, 搭建综合负荷模型: 感应电机+静态负荷, 其中感应电机负荷占总负荷量比例为 50%。

通过 BPA 软件仿真, 以阻抗模裕度指标作为判

别区域各节点电压稳定性强弱的依据,按照数值大小进行排序。分析数据结果,得出 STATCOM 装置配置点集的先后顺序依次为:葵湖、白玉、莆心、跃立。

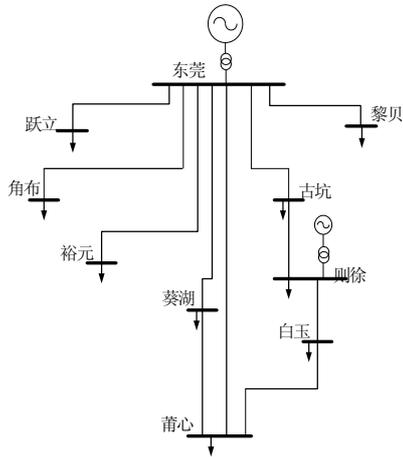


图 8 东莞片区 220 kV 单线接线图

Fig. 8 220 kV single wiring diagram of Dongguan

在葵湖点配置STATCOM装置,按照上述优化算法,综合考虑电压暂降改善效果和投资成本费用,得出总支出费用与容量的关系曲线如图9,从图中可以得出总支出费用最小对应的最优容量26 MVA。按照同样的计算方法,得出白玉、莆心、跃立各节点配置的最优容量分别为:32 MVA、25 MVA、35 MVA。

以东莞—黎贝 220 kV 三相线路故障为例,故障持续时间为 5 个周波,在葵湖、白玉、莆心、跃立配置点各自安装最优容量的 STATCOM 装置,各节点暂降电压值如图 10。从图中可以发现安装 STATCOM 装置后,各节点的电压暂降值都有所提升,其中配置了 STATCOM 装置的节点改善效果更加明显。根据节点距离故障线路的电气距离长短,各节点的电压暂降值跌落程度不同,如跃立节点距离故障线路比较近,电压暂降值比较大,虽然 STATCOM 实时无功响应,但暂降电压仍低于 0.7 p.u.,该节点敏感负荷的正常工作仍然会受到威胁。

4.2 紧急电压控制仿真分析

从电网投资者的角度看,各节点配置了 STATCOM 最优容量之后,在控制年总支出运行费用最小的同时又有效改善了故障电压。但是敏感负荷用户更关心的是故障电压改善效果,希望无论遇到哪种扰动,都能将损害降到最低。此时电网投资者眼中的最优容量显然达不到要求。所以本文在 STATCOM 补偿达到容量限度时,考虑紧急切负荷策略,这里所切的负荷是相对敏感负荷而言的不重要负荷。

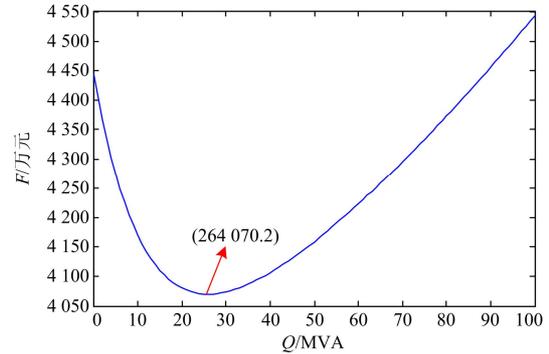


图 9 年总支出费用曲线

Fig. 9 The total cost curve

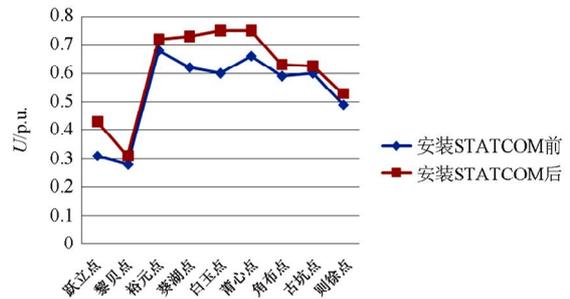


图 10 安装STATCOM前后节点电压对比图

Fig. 10 Voltage comparison chart before and after installing STATCOM

在东莞片区各节点安装分散型低压减负荷装置。为了避免故障时切除过多的负荷,紧急切负荷按照分级离散方法进行控制,检测电压幅值,根据故障电压的严重程度切除相应负荷量,如表 3。即当检测电压符合 $0.65 \text{ p.u.} < U < 0.7 \text{ p.u.}$ 时,切除节点 10% 的有功负荷量,同时按比例切除无功负荷;当电压符合 $0.6 \text{ p.u.} < U < 0.65 \text{ p.u.}$ 时,切除节点 15% 的负荷量,以此类推。

表 3 切负荷控制策略

Table 3 Load control strategy

电压 U	≥ 0.7	< 0.7	≤ 0.65	≤ 0.6	≤ 0.55	≤ 0.5
切负荷量	0	10%	15%	20%	25%	30%

以电压暂降低于 0.7 p.u. 的概率值作为电压改善效果指标,为了突出本文紧急控制策略的补偿效果,考虑三种场景如下:

场景一: 负荷节点不作任何补偿措施。

场景二: 配置点安装 STATCOM 装置。

场景三: 配置点安装 STATCOM, 同时各节点安装低压减负荷装置。

系统发生随机故障,统计各节点电压暂降低于 0.7 p.u. 的概率值。为了突出紧急切负荷的改善效果,

列出葵湖、白玉、莆心、跃立四个点的电压暂降概率表, 统计数据如表4。以莆心点为例, 从表格中可以发现, 第二种方案仅安装STATCOM策略相对于不补偿, 发生电压暂降后电压低于0.7 p.u.的概率降低到0.113 4, 减少了32.86%, 本文在此基础上提出的安装STATCOM和切负荷协调控制方案, 将系统电压暂降概率降到0.045 6, 减少了73%, 效果明显, 更有效地降低了电压暂降对敏感负荷的影响。虽然切负荷控制增加了一部分费用, 但却提高了电能质量, 增加了用户满意度, 最大地保证了敏感负荷的正常运行, 避免了设备的损害甚至人员的伤亡, 从发电侧和用电侧看价值显著。不同方案下的电压暂降概率图如图11。

表4 三种方案对应的电压暂降概率表

Table 4 Voltage sag probability of three schemes

$P(U<0.7 \text{ p.u.})$	葵湖	白玉	莆心	跃立
方案一	0.120 2	0.175 6	0.168 9	0.15
方案二	0.085 5	0.131 1	0.113 4	0.105 6
方案三	0.075 6	0.075 6	0.045 6	0.071

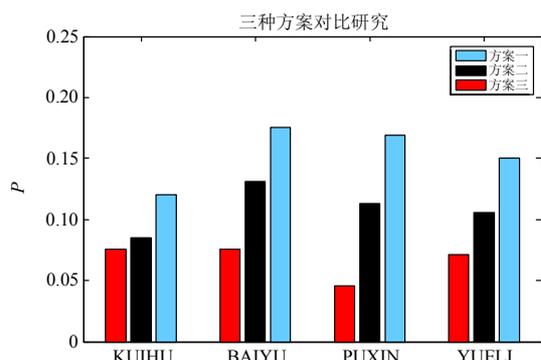


图11 不同方案下的电压暂降概率图

Fig. 11 Voltage sag probability of different schemes

5 结语

STATCOM 动态无功补偿和切负荷两种紧急电压控制策略能有效改善暂降电压。论文构建了基于蒙特卡洛方法的故障模型, 提出了电压暂降概率指标。建立了年总支出费用函数, 优化求解费用最小对应的 STATCOM 最优容量。进一步地, 考虑 STATCOM 最优容量约束, 结合切负荷控制策略改善电压暂降概率指标。最后以广东东莞片区网络为例进行实例分析, 仿真论证了本文提出的切负荷和 STATCOM 无功补偿协调控制新方法的正确性, 可以有效降低电压暂降的风险。

参考文献

[1] 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.

[2] 杨京燕, 倪伟, 肖湘宁, 等. 计及电压暂降的配网可靠性评估[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(18): 28-33.

YANG Jingyan, NI Wei, XIAO Xiangning, et al. Reliability evaluation of distribution network considering voltage sags[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(18): 28-33.

[3] 甄晓晨, 陶顺, 肖湘宁, 等. 电压暂降的工厂级经济损失评估模型研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(12): 104-111.

ZHEN Xiaochen, TAO Shun, XIAO Xiangning, et al. An evaluation model of plant-level economic loss due to voltage dips[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(12): 104-111.

[4] 陶顺, 肖湘宁, 刘晓娟. 电压暂降对配电系统可靠性影响及其评估指标的研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(21): 63-69.

TAO Shun, XIAO Xiangning, LIU Xiaojuan. Study on distribution reliability considering voltage sags and acceptable indices[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(21): 63-69.

[5] 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.

[6] 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.

[7] 刘昇, 徐政, 侯俊贤, 等. 一种基于 WAMS 的低压切负荷控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(15): 82-88.

LIU Sheng, XU Zheng, HOU Junxian, et al. A control strategy for undervoltage load shedding based on WAMS [J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(15):

82-88.

[8] 张瑞琪, 闵勇, 侯凯元. 电力系统切机/切负荷紧急控制方案的研究[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(18): 6-12. ZHANG Ruiqi, MIN Yong, HOU Kaiyuan. A new method for generation shedding and load shedding in power system emergency control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(18): 6-12.

[9] WANG Qi, TANG Yi, JIAO Boluo. Reactive power and voltage emergency control strategy of large-scale grid-connected wind farm[C] // PES General Meeting/Conference & Exposition, 2014 IEEE. 2014: 1-6.

[10] GALLO D, LUISO M. Survey on voltage dip measurements in standard framework[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2014: 374-387.

[11] 肖先勇, 陈卫东, 杨洪耕, 等. 以用户满意度区间数为测度的电压暂降频次评估[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(16): 104-110. XIAO Xianyong, CHEN Weidong, YANG Honggeng, et al. Voltage sag frequency assessment under the measure of interval data of customer satisfaction[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(16): 104-110.

[12] 王玲, 徐柏榆, 王奕, 等. 东莞地区负荷低压脱扣事故分析[J]. 广东电力, 2013(2): 30-35. WANG Ling, XU Baiyu, WANG Yi, et al. Analysis on low voltage releasing accident of load in Dongguan District[J]. Guangdong Electric Power, 2013(2): 30-35.

[13] 何仰赞, 温增银. 电力系统分析[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2002: 77-92.

[14] 汤涌. 电力系统电压稳定性分析[M]. 北京: 科学出版社, 2011: 243-249.

[15] 卢本初, 陈红坤, 梁有伟. 电力系统中电压骤降的综合分析[J]. 电力设备, 2003, 30(6): 11-13. LU Benchu, CHEN Hongkun, LIANG Youwei. Integrated analysis of voltage sags in power system[J]. Electrical Equipment, 2003, 30(6): 11-13.

[16] 马振宇. 电网可靠性的蒙特卡洛仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(14): 55-58, 67. MA Zhenyu. Research of Monte Carlo simulation for power system reliability assessment[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(14): 55-58, 67.

[17] 李文沅, 卢继平. 暂态稳定概率评估的蒙特卡罗方法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(10): 18-23. LI Wenyuan, LU Jiping. Monte Carlo method for probabilistic transient stability assessment[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(10): 18-23.

[18] 李建辉, 曹阳, 辛拓, 等. 考虑电压暂降风险的高压配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.

收稿日期: 2015-01-22; 修回日期: 2015-04-10

作者简介:

黄小庆(1981-), 女, 博士, 讲师, 研究方向为电力系统分析、电动汽车与新能源接入的分析; E-mail: huang_xq@126.com

曹阳(1990-), 男, 硕士, 研究方向为电力系统电压稳定与控制研究、微电网运行与控制;

吴卫良(1989-), 男, 硕士, 研究方向为电力系统稳定与控制。

(编辑 葛艳娜)