

考虑电压暂降风险的高压配网动态无功容量优化配置

李剑辉¹, 曹阳², 辛拓¹, 杨银国¹, 曹一家², 李帅虎²

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

摘要: 高压配网系统中, 结合敏感负荷特性, 引入电压暂降风险作为电压稳定的考虑对象。选用 STATCOM 进行动态无功补偿, 从暂态研究电压稳定。建立无功优化的单目标函数模型, 将电压暂降损失、线路有功损耗、动态无功补偿装置费用经济量化相加。设定多组无功容量并求取相应的总支出费用。通过 Matlab 软件对费用和容量进行曲线拟合, 以计算最优容量。最后以广东电网某片区进行实例仿真, 求取对应的最优解, 结果显示在提高电力系统的安全可靠性同时也大大降低了经济成本。
关键词: 动态无功补偿; 蒙特卡洛; 电压暂降风险; 高压配网; 容量优化

Study on high voltage distribution network dynamic optimal allocation of reactive power capacity considering the risk of voltage sag

LI Jian-hui¹, CAO Yang², XIN Tuo¹, YANG Yin-guo¹, CAO Yi-jia², LI Shuai-hu²

(1. Guangdong Power Dispatch Center, Guangdong Power Grid Company, Guangzhou 510000, China;

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

Abstract: In high voltage distribution network system, combining with the sensitive load characteristics, this paper introduces risk of voltage sag as stability considerations object. It selects STATCOM device to function as a dynamic reactive power compensation and researches transient voltage stability. Single objective function model of reactive power optimization is put forward, which quantitatively adds the loss of voltage sag, the line active loss and cost of dynamic reactive power compensation devices. Here we calculate the multiple sets of the total cost corresponding to reactive power capacity. Finally, the fitting curve of cost and capacity is given by using MATLAB software to seek the corresponding optimal solution in some area of Guangdong power grid and the result shows that it not only improves the safety and reliability of the power system but also greatly reduces the economic cost.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 61233008).

Key words: dynamic reactive power compensation; Monte Carlo; risk of voltage sag; high voltage distribution network; capacity optimization

中图分类号: TM74 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)08-0047-07

0 引言

随着西电东送战略的逐步实施和深入, 我国逐渐形成了珠三角、长三角等大型受端电网。受端系统的远方电源 供电比重逐渐增大, 现代负荷所占比例越来越大, 静态无功补偿所占比例远大于动态无功补偿, 这些使得电压稳定问题日益突出^[1]。

无功功率一般实现就地补偿, 无功优化目标是合理地确定补偿装置的配置位置和配置容量, 难点是无功优化建模。文献[2]以系统网损最小建立目标

函数, 该模型没有考虑电压稳定等影响, 得出的结果在准确性上存在一定不足, 实际应用范围比较窄。文献[3]提出不同量纲的多目标优化建模, 建立了电压稳定裕度和网络损耗两个指标。虽然多目标优化考虑更为全面, 能兼顾多个方面的优化, 但是各个目标的优化往往存在冲突, 多个目标权重系数难以选择。文献[4]选择无功补偿设备投资和系统有功损耗的综合费用作为目标函数, 同时将电压水平和电压稳定性作为两个约束条件考虑。随着风险理论的引入, 可以将所有指标都折算成费用。文献[5]将有功损耗对系统经济运行的影响以及电压失稳和电压越限对系统安全运行的影响以风险指标的形式经济量化, 以此进行无功优化, 一定程度上简化了计算

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)

而且算出的结果相对准确。

但是以上的优化方案中均没有从负荷角度出发。传统型负荷只考虑电压断电与否,而随着科技高速发展,敏感负荷越来越多,这对电压质量也提出了更高要求。电压暂降作为目前最受关注的动态电能质量问题之一,不仅发生频率高,而且对系统尤其是敏感负荷造成巨大的经济损失^[6]。为此,本文引入电压暂降风险理论,从暂态考虑系统电压稳定。为了实现系统电压无功需求的快速响应,本文选用静止同步补偿器(STATCOM,又称SVG)进行补偿。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。文中以年总支出费用最小为目标函数建立无功优化模型,分别考虑电压暂降损失、线路有功损耗损失、STATCOM补偿装置费用,通过费用计算求解最优补偿容量。最后以广东某片区进行实例计算,证明该方法的有效性。

1 电压暂降模型建立

1.1 电压暂降介绍

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额定电压之间、持续时间为0.5周波至1 min的短时间电压变动现象。电压暂降的幅值、持续时间和相位跳变是电压暂降的三个特征量。导致电压暂降发生的影响因素很多,当输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。其中配电系统中80%以上的电压暂降是由短路故障所引起的^[7]。

对于分区运行的高压配电网,当线路发生故障时,它会形成电压凹陷区域,影响区域内负荷的正常运行,尤其是对电压敏感的现代负荷。当发生电压暂降时,根据电压暂降的发生强度,就有可能造成各负荷节点所带的不同量的敏感负载发生失压脱扣主动响应,出现一部分负荷为保护自身设备安全脱离供电网现象,这就造成了这一部分用户的停电损失,即使这个动态过程是有利于系统电压恢复正常状态。为了简化优化计算,本文做如下两点假设:

(1) 不考虑其他因素,将线路短路故障作为电压暂降的诱因;

(2) 当发生电压暂降,考虑电网只发生负荷脱扣,以方便计算损失。

1.2 基于蒙特卡洛的电压暂降概率及仿真模型

蒙特卡罗方法以概率和统计为理论依据,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^[8-9]。

在电力配网中,考虑对各节点电压的影响因素,包括线路故障类型,故障地点,故障持续时间以及故障接地阻抗等随机模型。模型建立的好坏直接影响仿真数据结果的误差大小。

(1) 对于故障类型,本文考虑使用文献[10]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

故障类型	概率
三相短路	0.04
相间短路	0.06
两相接地短路	0.17
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以确定故障类型。

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

(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均等的。建立系统中线路的均一概率为

$$p_l = 1/m \quad (2)$$

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

$$F_L = \begin{cases} 1, 0 < y < p_l \\ 2, p_l \leq y < 2p_l \\ \vdots \\ m, (m-1)p_l \leq y < 1.0 \end{cases} \quad (3)$$

(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。当故障切除后,节点电压迅速回升,逐渐恢复至稳定状态。

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,计算各节

点电压暂降值和对应的电压暂降时间。这里电压暂降时间定义为从故障开始到电压回升到 0.9 pu 之间的时间, 电压暂降值是对应电压暂降时间内的电压有效值的平均值。为了保证仿真数据与实际值更贴近, 本文拟定仿真 5 000 次。由于仿真次数庞大, 为了提高电脑运作效率, 可以先列举所有故障地点, 故障位置, 并求取相应故障状态下负荷节点的电压暂降情况, 保存数据, 等到随机变量确定后, 直接调用数据完成^[11]。计算结果按照表 2 进行归类统计。

表 2 暂降电压发生概率表

	0~100 ms	100~300 ms	300~600 ms	>600 ms
>0.9	P_{11}	P_{12}	P_{13}	P_{14}
0.8~0.9	P_{21}	P_{22}	P_{23}	P_{24}
0.7~0.8	P_{31}	P_{32}	P_{33}	P_{34}
0.6~0.7	P_{41}	P_{42}	P_{43}	P_{44}
<0.6	P_{51}	P_{52}	P_{53}	P_{54}

2 基于电压暂降风险的动态无功容量优化

2.1 动态无功容量优化模型

本文基于风险理论, 将研究的不同目标都统一量化成费用形式, 并定义年总支出费用作为系统研究的单目标函数。其组成部分包括年电压暂降损失费用, 线路有功损耗费用和 STATCOM 投资装置费用。提出以年总支出费用最小为目标的优化模型, 其可表示为

$$\min F = R_C + R_L + R_S \quad (4)$$

式中: F 为年总支出费用; R_C 为年电压暂降损失费用; R_L 为线路年有功损耗费用; R_S 为 STATCOM 装置的年投资费用。

2.1.1 电压暂降的运行风险

当系统发生电压暂降时, 考虑各节点负荷种类很多, 尤其是对电压比较敏感负荷包括 PLC、ASD、PC 等, 其电压耐受能力变化范围不一样。但都基本符合图 1 的电压耐受曲线图, 即各敏感负荷都存在三种运行状态: 正常、故障、不确定区^[12]。

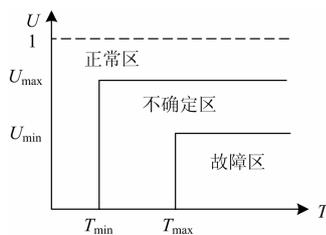


图 1 敏感负荷电压耐受曲线

Fig. 1 Tolerance curve of sensitive load voltage

当暂降电压降到某一幅值并持续一段时间, 不同敏感负荷的运行状态不一样。为了简化计算, 本文考虑将所有的敏感负荷等效为一个综合性的敏感负荷进行处理。设定当电压暂降值大于 0.9 时, 敏感负荷正常运行, 当暂降值小于 0.6 时, 敏感负荷全部脱扣。当持续时间小于 20 ms, 负荷不动作, 当持续时间大于 300 ms, 敏感负荷脱扣, 以此建立正常区, 故障区和不确定区, 即 $U_{\max}=0.9$ pu, $U_{\min}=0.6$ pu, $T_{\max}=300$ ms, $T_{\min}=20$ ms。正常区和故障区很容易看出, 其故障严重程度定为 0 和 1, 物理意义分别为敏感负荷没有脱扣和全部脱扣。关键是不确定区, 考虑到故障发生的严重程度与暂降时间和暂降电压值密切相关, 故定义故障严重程度为

$$Q_{ij} = \frac{(U_{\max} - U_{ij})(T_{ij} - T_{\min})}{(U_{\max} - U_{\min})(T_{\max} - T_{\min})} \quad (5)$$

式中, U_{ij}, T_{ij} 分别对应表 2 中设定电压区间和时间区间的平均值。根据式 (5) 求出不确定区的故障严重程度 Q , 以表 3 形式列出。

表 3 故障严重程度表

	0~100 ms	100~300 ms	300~600 ms	>600 ms
>0.9	Q_{11}	Q_{12}	Q_{13}	Q_{14}
0.8~0.9	Q_{21}	Q_{22}	Q_{23}	Q_{24}
0.7~0.8	Q_{31}	Q_{32}	Q_{33}	Q_{34}
0.6~0.7	Q_{41}	Q_{42}	Q_{43}	Q_{44}
<0.6	Q_{51}	Q_{52}	Q_{53}	Q_{54}

显然在不同故障严重程度下, 电压暂降引起的经济损失值不一样。本文采用质量工程理论中的质量损失函数对电压暂降经济损失进行评估^[13-14]。其函数公式为

$$E_{ij} = K \times [1 - \exp(-\frac{Q_{ij}^2}{2\sigma^2})] \quad (6)$$

式中: K 为经济损失函数的最大损失值; σ^2 为敏感性参数; Q_{ij} 即为电压暂降严重程度矩阵的元素。

电压暂降造成的年经济损失与暂降发生的年次数, 暂降电压概率分布和对应的经济损失有关。因此, 定义年暂降总经济损失为

$$R_C = N \times (\sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^4 P_{ij} \times E_{ij}) \quad (7)$$

式中: N 为年发生电压暂降次数; P 为电压暂降概率矩阵; E 为电压暂降严重程度对应损失费用矩阵。

2.1.2 有功损耗费用

电能传输过程中，必然存在功率损耗，损耗的多少也影响发电的成本。在系统保持电压稳定的前提下，降低网损可以相应的减少这部分损失。安装动态无功补偿装置，虽然增加了成本，但也改善了系统稳定性，有效地减少了有功损耗费用。有功损耗费用函数为

$$R_L = P_1 \times T_E \times C_L = P_M \times T_M \times C_L \quad (8)$$

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。

2.1.3 STATCOM 装置投入费用

STATCOM 装置并联于电网中，相当于一个可控的动态无功电流源，其无功电流可以快速地跟随负荷无功电流的变化而变化，自动补偿电网系统所需无功功率，对电网无功功率实现动态无功补偿。其补偿效果明显但运行和装置费用也相对很高。投资费用用式 (9) 表示^[15]。

$$R_s = \rho \sum_{i \in U} (\gamma f_i + \delta Q_{Ci}) \quad (9)$$

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； $\gamma = 1$ 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。

2.2 动态无功容量优化流程

配网某线路发生故障时会造成故障点及附近区域发生电压暂降，从而可能会引起负荷脱扣带来经济损失。STATCOM装置接入前后对某节点电压影响情况如图2。曲线1为接入STATCOM装置前节点电压情况，曲线2为接入STATCOM后节点电压变化状况。从图中可以看出：故障期间，接入STATCOM对节点电压影响不明显，但是故障排除

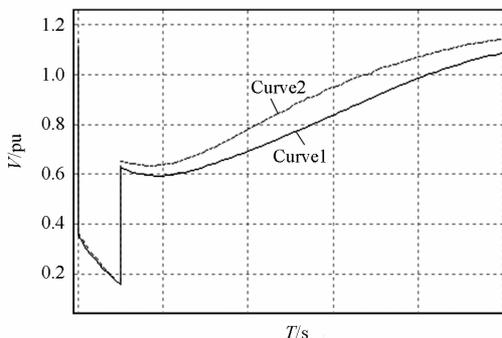


图2 某节点电压曲线比较
Fig. 2 A node voltage curve comparison

后能有效地提高电压暂降幅值，减少暂降时间，即故障严重程度降低。这有利于脱扣负荷量相应缩减，间接的带来经济效益。

动态无功容量优化流程按如下进行：

(1) 选定高压配网的研究区域，列出区域内所有线路和负载节点，对每条线路进行不同故障类型仿真，记录各节点的暂降电压和对应暂降时间，组成数据库。

(2) 通过 Matlab 随机产生 5 000 组 (x, y) 数据，对照 (1) 中数据库信息，输出对应的暂降电压值和暂降时间，按照表 2 统计数据以形成暂降电压概率表。

(3) 根据给出的参数值，按照式 (6)、式 (7) 计算电压暂降的年经济损失费用。

(4) 设定 STATCOM 容量分别为 ± 0 Mvar, ± 30 Mvar, ± 50 Mvar, ± 100 Mvar, 重复上面三步操作，求取对应的年总电压暂降费用。

(5) 采用 Matlab 中的 CF TOOL 曲线拟合工具箱对第 4 步得到的数据进行拟合，求出年电压暂降费用与安装 STATCOM 容量的函数关系。

(6) 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。

3 算例分析

本文选取广东电网莞城片区进行研究，该区是以 GUANCHEN 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，其网架结构如图 3 所示。电网暂态仿真计算使用中国电力科学研究院的 BPA 软件，它能准确的模拟线路故障时节点电压暂态情况和故障切除后电压恢复正常的情况。系统运行模式定为广东电网 2013 夏大方式。正常运行时区域总有功负载为 3 711 MW，无功负载为 684 Mvar。通过软件仿真，首先判断区域各节点电压稳

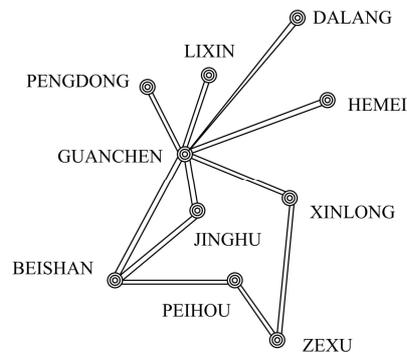


图3 广东电网某220 kV网络网架结构图
Fig. 3 A 220 kV network of Guangdong power grid

定的强弱, 并设定待选配置点集, 然后选用轨迹灵敏度方法, 从整体优化考虑, 确定最终配置方案。结果表明优先选择在景湖节点安装 STATCOM 装置。

为了计算年总支出费用, 设定各费用参数如下: STATCOM 装置补偿单价 $\delta = 45$ 万元/Mvar, 装置安装费用 $f_i = 20$ 万元, 年发生电压暂降次数 $N = 60$ 次, 敏感性参数 $\sigma^2 = 0.3$, 电压暂降损失费用最大值 $K = 400$ 万元, 单位电价 $C_L = 0.5$ 元/(kWh), 投资回报率 $\rho = 0.3$ ^[15]。

3.1 电压暂降费用计算

以不安装 STATCOM 装置为例, 故障线路选择莞城到立新线, 故障类型定为两相短路故障, 故障从 0 s 开始。观察景湖站点的暂态电压情况如图 3, 短路期间电压迅速掉到 0.73 pu 左右, 等故障线路切除, 电压逐渐回升至正常状态。电压暂降持续时间定为从故障开始到电压回升到 0.9 pu 之间的时间, 故图 4 所示案例电压暂降持续时间为 0.21 s, 电压暂降值为 0.77 pu。

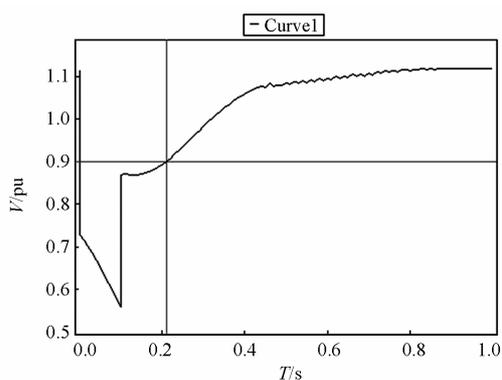


图 4 故障后节点暂态电压情况

Fig. 4 Node transient voltage after the fault

仿真结束后, 计算各节点电压暂降值和暂降时间, 统计结果见表 4。由于故障仿真时, 单相故障发生频次最多, 而统计数据结果也显示大部分集中在幅值 0.8~0.9 pu 区域, 时间持续在 0~100 ms, 与实际相吻合。

表 4 莞城片区电压暂降概率表

Table 4 Probability table of regional voltage sag of Guan Cheng

	0~100 ms	100~300 ms	300~600 ms	>600 ms
>0.9	0.232 4	0	0	0
0.8~0.9	0.510 3	0.001 9	0	0
0.7~0.8	0.026 1	0.046 9	0.071 8	0.000 4
0.6~0.7	0.012 8	0.022 9	0.022 7	0.018 7
<0.6	0.032 2	0.000 9	0	0

根据式 (5) 求出不确定区的故障严重程度, 结果统计如表 5。

表 5 莞城片区故障严重程度表

Table 5 Fault severity table of Guan Cheng

	0~100 ms	100~300 ms	300~600 ms	>600 ms
>0.9	0	0	0	0
0.8~0.9	0.018	0.119	0.256	1
0.7~0.8	0.054	0.357	0.768	1
0.6~0.7	0.089	0.595	1	1
<0.6	0.214	1	1	1

将上述数据代入式 (6) 求出电压暂降严重程度对应的损失费用, 再按照式 (7) 得出年电压暂降费用。

$$R_C = N \times \left(\sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^4 P_{ij} \times E_{ij} \right) = 2394.6 \text{ (万元)}$$

按照上述方法, 分别计算安装 STATCOM 容量为 ± 30 Mvar, ± 50 Mvar, ± 100 Mvar 时年暂降费用, 结果显示如表 6。观察数据发现, 暂降费用 and 对应容量之间大致服从指数函数关系, 这里使用 Matlab 软件对数据进行曲线拟合, 得出拟合曲线图形如图 5, 对应曲线函数为

$$R_C = 976.3 \exp(-0.139Q_C) + 1418 \exp(-0.003Q_C)$$

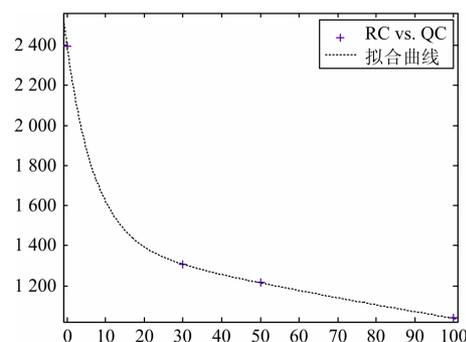


图 5 暂降费用与容量拟合曲线

Fig. 5 Fitting curve of sag cost and capacity

表 6 电压暂降费用列表

Table 6 Voltage sag fee list

容量 Q_C /Mvar	0	30	50	100
暂降费用 R_C /万元	2 394.6	1 306.8	1 214.5	1 038.4

3.2 最优配置容量计算

通过式 (4) 分别计算配置 STATCOM 装置容量为 0, ± 30 , ± 50 , ± 100 Mvar 时对应的年总支出费用, 结果见表 7。

表 7 总支出费用列表

Table 7 Total cost list

容量 Q_C /Mvar	0	30	50	100
总费用 F /万元	7 393.8	6 711.0	6 888.7	7 384.7

表 7 结果显示, 当配置容量达到 ± 100 Mvar 时虽然电压暂降费用最小, 但总支出费用并不是最小, 就表明存在一个最优容量。列出年总支出费用与配置容量的函数关系, 画出对应图形如图 6, 得出当最优无功配置容量为 $Q_C=20$ Mvar 时, 此时片区年总支出费用最少, $F=6 664.7$ 万元。

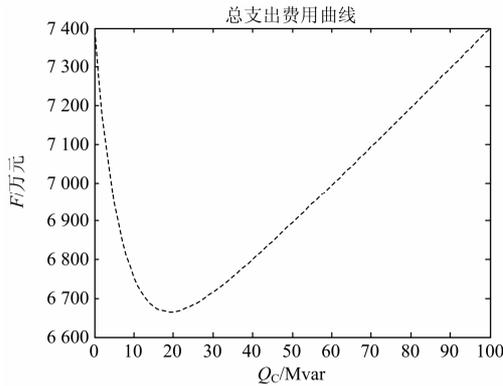


图 6 年总支出费用曲线

Fig. 6 The total cost curve

设定在景湖节点安装 20 Mvar STATCOM 装置, 继续对莞城片区进行 BPA 仿真。观察各节点电压稳定的强弱情况, 如果仍有节点不符合要求, 可在此基础上从新筛选并确定待选配置点集, 然后使用轨迹灵敏度方法从新确立新一轮的最佳配置点, 并按照上述方法优化选择出最优容量。如此反复, 直到该片区中所有节点电压稳定性都达到设定要求。

4 结语

STATCOM 容量优化配置的目的是要使电力系统运行在更加合理的状态下, 保证各敏感负荷的安全可靠运行。安装动态无功补偿装置能有效提高系统故障后的恢复时间, 提高电能质量, 减少损失。本文提出的考虑电压暂降风险高压配网动态无功容量优化配置以年总支出费用包括电压暂降损失, 系统有功损耗费用和 STATCOM 补偿装置投资最小为目标函数建立优化模型, 实现了经济成本运行最小化下的最优容量配置。提出的优化模型考虑了高压配网电压敏感负荷目前正在持续增长的现代电网特征、电网发生电压暂降概率远远大于电压崩溃或电压失稳的概率和目前动态无功补偿装置配置费用相

对较高等实际影响因素, 从理论和工程角度上反映了其优越性, 而且该方法具有普遍适用性。最后通过实例仿真, 从经济效益角度入手真实并准确地反映了优化的效果, 并表明方法的正确性。

参考文献

- [1] 李邦峰, 张勇军, 李勇, 等. 受端系统动态无功补偿优化建模方法综述[J]. 电网技术, 2007, 31(15): 21-26.
LI Bang-feng, ZHANG Yong-jun, LI Yong, et al. A survey on modeling approach of optimized dynamic reactive power compensation in receiving systems[J]. Power System Technology, 2007, 31(15): 21-26.
- [2] LIU M B, SAK T S O, CHENG Y. An extended nonlinear optimization of large scale power systems with discrete control variables[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2002, 17(4): 982-991.
- [3] VENKATESH B, SADASIVAM G, KHAN M A. A new optimal reactive power scheduling method for loss minimization and voltage stability margin maximization using successive multi-objective fuzzy LP technique[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2000, 15(2): 844-851.
- [4] 张勇军, 任震. 基于灾变遗传算法的无功规划优化[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(23): 29-32.
ZHANG Yong-jun, REN Zhen. Cataclysmic genetic algorithms based optimal reactive power planning[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(23): 29-32.
- [5] 戴剑锋, 周双喜, 鲁宗相, 等. 基于风险的电力系统无功优化问题研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(22): 38-43.
DAI Jian-feng, ZHOU Shuang-xi, LU Zong-xiang, et al. Study on reactive power optimization based upon risk[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(22): 38-43.
- [6] 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 Xiang-ning, LIU Xiao-juan. Study on distribution reliability considering voltage sags and acceptable indices[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(21): 63-69.
- [7] 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 Ben-chu, CHEN Hong-kun, LIANG You-wei. Integrated analysis of voltage sags in power system[J].

- Electrical Equipment, 2003, 30(6): 11-13.
- [8] 张新松, 郭晓丽, 易龙芳. 基于蒙特卡洛模拟的发电边际成本分析[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(14): 21-25.
ZHANG Xin-song, GUO Xiao-li, YI Long-fang. Analysis of marginal cost of power generation based on Monte Carlo simulation[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(14): 21-25.
- [9] 黄殿勋, 张文, 郭萍, 等. 发输电系统可靠性评估的蒙特卡洛改进算法[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(21): 179-183.
HUANG Dian-xun, ZHANG Wen, GUO Ping, et al. The Monte Carlo improved method for reliability evaluation of generation and transmission systems[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(21): 179-183.
- [10] 钟庆, 林凌雪, 易杨, 等. 电压暂降评估指标 (I) ——电网薄弱环节指标[J]. 电力系统及其自动化, 2012, 24(1): 110-114.
ZHONG Qing, LIN Ling-xue, YI Yang, et al. Study on the evaluation index of voltage sags: unsubstantial location index[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2012, 24(1): 110-114.
- [11] 易杨, 张尧, 钟庆, 等. 基于蒙特卡罗方法的大型电力用户电压暂降评估[J]. 电网技术, 2008, 32(6): 57-60.
YI Yang, ZHANG Yao, ZHONG Qing, et al. Assessment of voltage sags in large power consumer based on Monte Carlo method[J]. Power System Technology, 2008, 32(6): 57-60.
- [12] 刘旭娜, 肖先勇, 徐方维, 等. 敏感设备电压暂降严重程度可信性评价测度与方法[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(1): 190-196.
LIU Xu-na, XIAO Xian-yong, XU Fang-wei, et al. Credibility measure and assessment method of sensitive equipment voltage sag severity[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(1): 190-196.
- [13] 丁泽俊, 陈波, 雷金勇, 等. 电压暂降的经济损失评估[J]. 现代电力, 2011, 28(5): 90-94.
DING Ze-jun, CHEN Bo, LEI Jin-yong, et al. Economic loss assessment of voltage sag[J]. Modern Electric Power, 2011, 28(5): 90-94.
- [14] 周明, 张彪, 李庚银, 等. 基于质量工程理论的电压骤降经济评估[J]. 电工技术学报, 2007, 22(12): 152-158.
ZHOU Ming, ZHANG Biao, LI Geng-yin, et al. Economic assessment of voltage sags based on quality engineering theory[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(12): 152-158.
- [15] 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 Yong-jun, HAN Dong-kun, 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: 2013-07-25; 修回日期: 2013-09-27

作者简介:

李剑辉(1964-), 男, 高级工程师, 从事广东电网调度、运行管理工作; E-mail: lishuauihu2010@126.com

曹阳(1990-), 男, 硕士, 主要研究方向为电力系统电压稳定与控制研究;

辛拓(1985-), 男, 工学硕士, 工程师, 主要从事电力系统运行方式分析工作。