

基于电气介数的电网故障无功规划选址与定容

李 晖¹, 汪 莹¹, 罗 天², 林 巍³, 杨秦敏^{3†}

(1. 国网经济技术研究院有限公司, 北京 102209; 2. 电力传输与功率变换控制教育部重点实验室, 上海交通大学, 上海 200240; 3. 浙江大学 控制科学与工程学院, 杭州 310023)

摘要: 无功补偿对电网减少线路损耗、提高故障应对能力和稳定性等有着显著作用. 为此, 基于电网拓扑电气介数模型, 针对有限经济约束的电网输电线路 $N-1$ 故障, 考虑电网系统无功补偿的经济性约束和潮流方程电气约束, 建立包括最小发电费用、最大网损降幅和最优裕度提升为目标函数的优化模型, 求解输电线路 $N-1$ 故障情况下的无功补偿策略的最优选址定容. 最后, 考虑到构建的混合整数非线性模型的复杂性与难以凸化松弛, 通过改进的精英策略的自适应遗传算法求解最优潮流问题, 并通过 IEEE-14 节点标准测试系统进行算法验证, 从而表明所提出算法的有效性以及策略的可行性.

关键词: 电气介数; 无功补偿; 选址定容; 最优潮流

中图分类号: TP29 **文献标志码:** A

Fault reactive power location and capacity planning using electric betweenness

LI Hui¹, WANG Ying¹, LUO Tian², LIN Wei³, YANG Qin-min^{3†}

(1. State Grid Economic and Technological Research Institute LTD, Beijing 102209, China; 2. MOE Key Laboratory of Control of Power Transmission and Conversion, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China; 3. College of Control Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310023, China)

Abstract: Reactive power compensation plays a significant role in reducing the line of the power grid and improving fault handling ability and stability. As a consequence, this paper aims at the transmission $N-1$ fault and the dominant fault of the power grid under limited economic constraints based on the electrical intermediary model of the grid topology. Considering the economic constraints of reactive power compensation and the constraints of power flow equations, the optimal object is combined with the minimum generation cost, the loss of network and the optimal margin, in order to explore the dominant line fault conditions optimal compensation strategy. Finally, due to its complexity of the mixed-integer nonlinear model and hard for convex relaxation, the adaptive genetic algorithm of the improved elite strategy is used to solve the problem. Simulation on the IEEE-14 node system validates the effectiveness and feasibility of the proposed algorithm.

Keywords: electric betweenness; reactive compensation; location and sizing; optimal power flow

0 引言

随着未来电网中大量分布式和集中式可再生能源的接入, 电网将呈现出复杂的非线性随机波动特性. 同时, 电力系统规模不断扩大, 输电线路数量增长迅速, 发电量与负荷容量不断上升. 复杂系统的出现增加了电压崩溃并发展为全网性事故的可能性^[1]. 而无功规划作为电网网架结构增强、保证电网稳定性和输电传送高效性的重要一环, 在未来电网建设规划中受到越来越多学者的关注.

无功功率规划问题的研究由来已久. 针对电网

稳态运行状态的线路损耗, 张宏立等^[2]以无功补偿设备的位置和容量为决策变量, 基于滤子混合协同进化算法进行潮流网络补偿. 同样, 针对电网稳态时的潮流状态进行无功补偿, 杨珺等^[3]在目标函数中引入电压压降, 结合电网网损协同优化. 在前者工作基础上引入补偿过程中的暂态网损变化, Martí等^[4]利用潮流迭代方程中网损与无功容量比值灵敏度作为目标函数进行无功配置. 在无功补偿领域, 故障同样也是研究方向之一. 丁琳等^[5]提出复杂网络的级联失效加权策略, 在网络中利用介数图论研究复杂电网线

收稿日期: 2018-11-13; 修回日期: 2019-02-20.

基金项目: 国家电网公司总部科技项目; 国家自然科学基金项目(61673347, 61751205).

责任编辑: 孙秋野.

†通讯作者. E-mail: qmyang@zju.edu.cn.

路. 考虑系统失效的支路故障, 陈斌等^[6]主要考虑支路故障情况后的配电系统可靠性研究, 提出一种基于分段最优无功补偿的配电系统可靠性评估方法. 李树凯等^[7]对静止无功补偿器(SVC)无功补偿设备的安装位置和数量建模, 提出支路参与因子法确定无功补偿在各支路上的规划方案. 不同于支路故障可靠性, Xue等^[8]分析交直流混联系统, 主要考虑了系统的稳态和暂态稳定性, 利用暂态稳定指标确定交直流逆变系统无功规划方案. Neto等^[9]和 Sonwane等^[10]对问题建模后的高效优化求解算法进行研究展开, 启发式算法和优化松弛等方法被广泛用于求解计算中.

遗传算法作为启发式算法的一种, 已广泛地应用于电力系统复杂模型的求解规划. 于莹莹等^[11]通过传统遗传算法基础上引入贪婪算法对种群进行初始化, 提升了遗传算法搜索性能, 保证种群迭代中的收敛速度; 刘健等^[12]引入了精英策略进行配网无功优化, 提高了算法搜索速度; 孙亮等^[13]则将混合智能算法应用于配网无功优化. 然而, 上述研究成果主要面向配网树状模型, 可以通过二阶锥松弛方法转换为凸优化模型, 从而提高收敛速度. 而针对环状的复杂主网, 尚无成熟的方法进行凸化, 造成传统遗传算法收敛速度下降, 而且无法保证获得最优解. 同时, 精英自适应遗传算法具有全局最优搜索能力^[14], 其精英策略将每次迭代的最优解保留进入下一轮, 避免迭代中最优解的丢失或重新寻找最优解的搜索时间过长, 可有效提升收敛速度. 配合自适应策略可根据迭代次数动态调整参数, 可在迭代后期改变交配变异概率, 防止个体在局部最优解附近反复迭代, 大大提升算法寻找全局最优能力.

此外, 从已有研究来看, 由于电气网络中的故障研究机理相对复杂, 在故障情况下的无功选址和定容方面的研究还相对薄弱. 文献[6-7]提到了在故障情况下如何进行无功补偿, 但是仅仅考虑支路故障时的功率权重, 忽略了潮流网络中单线路故障对其他线路造成的影响, 致使无功规划中无功设备的补偿点选取后其他线路功率波动较大, 而仅考虑线损、忽略经济约束则使补偿容量选择不够准确^[6-7]. 如何利用先进的启发式优化算法解决故障条件下复杂的环状主网无功规划选址与定容优化, 成为一个有趣且开放的问题.

为克服以往研究对故障的难以量化以及无功补偿目标缺少电网裕度分析的难点, 本文将电气介数为基础, 建立线路故障下无功补偿规划优化模型, 并求解得到最优补偿策略, 主要考虑电网故障发生

时, 减小线路损耗功率与提高故障时的电能质量指标. 首先, 改进以潮流功率分布因子建立的电气介数, 加入无功功率稳态变化量, 描述电网线路故障的功率影响程度; 其次, 以无功补偿设备投入与否和容量大小为决策变量, 融合电压裕度指标和无功补偿投入成本, 建立混合整数规划模型; 再次, 为克服无功补偿规划模型非凸非线性问题, 利用精英策略的自适应遗传算法求解模型, 增强算法收敛至全局最优的能力; 最后, 将该模型算法应用于IEEE-14节点以验证算法的有效性及其策略的可行性.

1 电气介数

1.1 无功补偿

电力资源从发电端到用电端经历输电、配用环节, 而配电端与用电端直接面向客户使用, 闭环设计, 开环运行, 呈辐射状分布^[4]. 输电线路中存在感性阻抗, 导致输电过程中的电能损失与电压损失. 在电网运行过程中注入一定无功功率可以减少无功功率在线路上的流动, 降低因感性阻抗引起的无功损耗. 同时, 电网中的无功功率与电压大小关系十分密切, 使用无功补偿设备可以提高各节点的功率因数, 在输电总容量不变的条件下提高有功功率, 加大节点负荷裕度. 电力系统的无功优化问题是指在电力系统有功负荷、电源输出功率及有功潮流分布已经给定的情况下, 为调节电网中电压幅值、频率大小等, 通过改变发电机无功出力、支路输送功率以及无功补偿电源容量等状态量, 达到电网运行性能提升的效果. 其中, 电网的运行性能主要包括功率损耗、电能质量以及电网经济运行成本控制等. 尤其当今电网着重发展新能源, 而新能源发电波动较大, 功率因数不稳定, 致使光伏弃光和风机弃风问题严重, 这些都与无功功率调节能力不足相关^[15].

1.2 电气介数

随着网络拓扑理论在电力网络中的应用, 电气介数被提出并应用于电网潮流分析中^[16]. 与传统网络理论的拓扑介数相比, 电气介数考虑了潮流计算和阻抗在内, 更加准确地反映了电网中的电气特性^[17]. 根据直流潮流方程模型^[18]

$$P = B\theta, \quad (1)$$

功率在传输线路 ij 上可表示为

$$p_{ij} = b_{ij}\theta_{ij}. \quad (2)$$

因此, 根据上述关系式得到 m 和 n 电气介数为

$$B_e(m, n) = \left| \sum_{i \in G, j \in G} \omega_{ij} P_{m, n}(i, j) \right|. \quad (3)$$

其中: ω_{ij} 表示输电线路功率权重值, G 表示电力网络中发电节点总和, L 表示网络中负载总和. 遍历了每条线路, 电气介数可以描述其输电线路在电网中拓扑网络与电气网络中的综合权重. 电气介数越大, 说明输电线路上的功率波动对于其他线路的影响越大.

1.3 线路故障定义

随着时间推移, 线路的损耗必然会导致电网中的电路线路的故障概率提升. 由于网络系统的线路存在耦合关系, 部分线路故障的产生会影响整个电网潮流和节点电压相角.

在电力系统运行过程中每条线路都有发生故障的可能性, 本文假设在某一特定时间段, 有且仅有一条线路发生故障. 故障下的电网拓扑结构将会发生改变, 造成系统裕度下降, 加大超限停机事故. 针对故障发生的特定情况, 本文主要讨论如何补偿和规划无功设备, 选定补偿设备的位置和容量, 从而使得整个系统达到综合裕度最大、网损最小且发电费用最省等最优目标. 假设用 C_g 表示电网拓扑结构, C_g 是 n 维矩阵, n 为电网拓扑中节点数量. 其中 $C_g(i, j) = 1$ 表示第 i 号节点与第 j 号节点存在线路相连, 当输电线路发生短路、断路等情况时, 则用 $C_g(i, j) = 0$ 模拟线路故障.

2 无功规划模型

2.1 电网稳定裕度

电网系统的稳定裕度指标主要包括功率输出裕度、电压稳定裕度以及相角稳定裕度. 本文考虑潮流分布中基础稳定裕度指标, 包括有功输出裕度、无功补偿裕度和电网稳定裕度. 当电网处于输电线路故障断路时, 基础稳定裕度指标可直接反映系统稳定程度^[19].

2.1.1 有功裕度

模型中有功功率输出裕度为

$$M_p = \frac{P_{\max} - P_i}{P_{\max} - P_{\min}}. \quad (4)$$

其中 P_{\max} 、 P_{\min} 为有功功率输出的上下限值, P_i 为潮流计算中的有功输出.

2.1.2 无功裕度

模型中无功功率补偿容量裕度为

$$M_q = \frac{Q_{\max} - Q_i}{Q_{\max} - Q_{\min}}, \quad (5)$$

其中 Q_{\max} 和 Q_{\min} 为发电节点的无功安装上下限值.

2.1.3 电压稳定裕度

模型定义的电压裕度值为

$$M_v = \frac{(V_j - V_{\max})(V_j - V_{\min})}{(1 - V_{\max})(1 - V_{\min})}. \quad (6)$$

其中: V_j 为负荷节点潮流计算电压值, V_{\max} 和 V_{\min} 为潮流中负荷节点上下限值.

2.1.4 电网裕度函数

电压裕度、有功输出裕度以及无功补偿裕度为电网系统潮流计算的基础裕度指标, 将故障状态下的基础裕度加权作为模型最终的综合裕度指标, 即

$$M = \frac{1}{3n_k} \sum_k S_k \cdot B e_k \cdot (M_P + M_Q + M_V). \quad (7)$$

其中: n_k 为电网中支路数量之和; k 为电网系统支路; S_k 表示第 m 条支路断开后潮流方程是否收敛, 若电力系统潮流计算仍然收敛, 说明系统未崩溃, 则 $S_k = 1$, 反之, 若系统计算无法收敛, 则 $S_k = -\infty$.

2.2 线路损耗

电网系统中线路功率损耗是一个重要的经济指标. 在电网处于稳态运行时, 线路损耗主要由有功功率损耗和无功功率损耗组成. 在输电网络中, 线路电抗值一般大于电阻值, 无功功率流动造成的功率损耗大于有功功率, 如何通过无功补偿措施减少无功环流, 降低输电线路损耗意义重大. 在模型中, 将线路损耗作为模型中的经济指标, 表达式为

$$G_l = \sum_{k=1}^K \frac{P_{l2}^{(k)} - P_{l1}^{(k)}}{P_{l1}^{(k)}} + \sum_{k=1}^K \frac{Q_{l2}^{(k)} - Q_{l1}^{(k)}}{Q_{l1}^{(k)}}. \quad (8)$$

其中: P_{l2} 和 Q_{l2} 为无功补偿后的有功与无功线路总损耗, P_{l1} 和 Q_{l1} 为无功补偿前的线路损耗. 因此, G_l 表示系统补偿前后的线损降低率.

2.3 发电与补偿成本

发电与无功补偿成本是电网处于稳态时的重要指标. 发电成本主要指发电节点处于稳态时输出的有功功率, 而补偿成本主要指发电节点所安装的补偿设备成本. 在电网系统中, 发电节点为 PV 节点, 无功补偿设备主要维持其电压值处于 1 p.u.^[20]. 发电与补偿成本表达式为

$$C_g = C_p \left(\sum_k P_k + \sum_k Q_k \right), \quad (9)$$

$$G_{ct} = \frac{C_g^2 - C_g^1}{C_g^1}. \quad (10)$$

其中: P_k 为第 k 个发电节点的有功输出, Q_k 为安装的无功补偿功率值, C_p 为单位功率的发电成本, G_{ct} 为电网发电与补偿成本, C_g^2 和 C_g^1 分别为无功补偿后和无功补偿前的发电费用.

2.4 目标函数

本文定义的无功规划策略的综合目标函数为

$$\max F = \lambda_1 M - \lambda_2 G_l - \lambda_3 G_{ct}. \quad (11)$$

其中: M 为电网稳定裕度, G_l 为电网的线路损耗, 参数 λ 为目标函数权重.

2.5 约束条件

2.5.1 潮流约束

电网潮流特指电力系统在某个时间断面上的电网运行状况, 重点在于电压、电流、功率和相位角的分布, 即潮流分布. 电网潮流计算非线性强, 步骤复杂. 本文采用 PQ 法进行潮流计算. 电网中潮流功率平衡式为

$$P_{\text{bus}}(\theta, V_m) + P_d - C_g P_g = 0, \quad (12)$$

$$Q_{\text{bus}}(\theta, V_m) + Q_d - C_g Q_g = 0. \quad (13)$$

其中: P_{bus} 为所有节点的输出有功功率, Q_{bus} 为无功功率, V_m 为电压幅值, θ_m 为电压相位角. 潮流功率平衡式本质为有功功率、无功功率、电压幅值与电压相位角的平衡关系式.

2.5.2 线路约束

$$P_{g\min} \leq P_g \leq P_{g\max}, \quad (14)$$

$$Q_{g\min} \leq Q_g \leq Q_{g\max}, \quad (15)$$

$$V_{l\min} \leq V_l \leq V_{l\max}, \quad (16)$$

$$\theta_{l\min} \leq \theta_l \leq \theta_{l\max}. \quad (17)$$

其中: P_g 为发电节点的有功功率输出, Q_g 为发电节点的无功补偿功率, V_l 为负荷节点当前电压值, θ_l 为节点电压相位角.

2.5.3 经济约束

从电网潮流公式中可以看出, 节点的无功补偿容量越大, 其维持电压幅值的能力越强, 电网系统对抗故障扰动的能力越强. 但节点安装无功补偿设备的数量和安装容量主要取决于优化模型中的经济投资额约束, 其表达式为

$$Q_{\text{loaction}} \cdot (C_w + C_p \cdot Q_{\text{capacity}}) \leq C_{\text{sum}}. \quad (18)$$

其中: Q_{loaction} 表示无功补偿安装选址, $Q_{\text{loaction}} = 1$ 为在第 m 个节点安装无功补偿, $Q_{\text{loaction}} = 0$ 则为第 m 个节点不进行补偿; Q_{capacity} 表示无功补偿容量规划, 其必须满足无功补偿设备限制约束; C_w 为选址建造花费; C_p 为单位容量花费; C_{sum} 为总投资额.

3 模型求解算法

3.1 故障模拟方法

本文利用电气介数, 在输电线路 $N-1$ 故障时仿真得到最佳的无功补偿选址定容策略. 由于电网系统的电气特性复杂, 本文采用蒙特卡洛仿真法进行仿真, 这是一种基于多次实验的统计仿真方法. 设定每条输电线路的断开概率, 在单次仿真中仅存在一条线

路断开. 经过反复多次实验, 其输电线路故障断开的次数逐渐逼近设定值. 本文的仿真步骤如下.

Step 1: 设定输电线路故障概率和蒙特卡洛仿真次数;

Step 2: 构建仿真模型, 设置求解方法, 定义故障类型, 在本仿真中采用等概率关系仿真;

Step 3: 进行单次故障仿真, 每次仿真后记录无功补偿选址定容问题的断开线路、无功补偿选址变量、容量变量及目标函数值;

Step 4: 重复模拟 Step 3 直至设定的蒙特卡洛仿真次数, 统计在各线路故障下的选址定容问题变量, 根据统计结果决定最终补偿策略.

3.2 精英自适应遗传算法

遗传算法的主要步骤包括父代遗传、杂交、自然选择以及子代突变等, 优势在于对求解模型复杂度要求低, 适用范围广. 但传统的遗传算法由于其收敛规则缺乏全局判断, 往往不能保证最后求解结果为全局最优^[21]; 而精英策略可以保留上轮迭代最优解, 加快探索全局收敛速度. 配合自适应策略可使靠近较优解的迭代因子交配变异概率降低, 在下一轮迭代中以较大概率在较优值附近寻找更优解; 另一方面, 令远离较优解的个体增大其变异概率以便探索更广阔的空间, 提升寻找全局最优解的能力.

由于无功选址定容模型是典型的 NP 混合整数非线性模型, 解析求解复杂^[22-23]. 本文将利用精英自适应遗传算法求解电网故障无功选址与定容优化问题, 具体求解步骤如下.

Step 1: 初始化遗传算法参数. 设 X_{1i} 表示电网中第 i 节点是否安装无功补偿设备, $X_{1i} = 0$ 表示不安装, $X_{1i} = 1$ 表示安装; X_{2i} 表示在节点 i 处的无功补偿安装容量. 则遗传因子变量为

$$X = [X_{11} \ X_{12} \ \cdots \ X_{1n} \ X_{21} \ \cdots \ X_{2n}], \quad (19)$$

其中 n 为电网节点数量. 采用二进制编码方式, 拥有较高计算精度和较快计算速度, 且搜索空间更广.

遗传因子适应度函数为目标函数缩放, 即

$$F_f = \frac{1}{k} \cdot F. \quad (20)$$

设定种群数量、迭代次数、交配概率以及变异概率等.

Step 2: 精英策略. 将遗传因子变量代入目标函数(11), 计算各遗传因子适应度函数. 传统遗传算法采用轮盘选择法, 根据下式进行概率的择优选择:

$$P_i = \frac{F_{\text{fitness}}(j)}{\sum_j F_{\text{fitness}}(j)}. \quad (21)$$

适应度越高的遗传因子交配的概率越高,被选择的因子根据二进制码交换规则得到子代。

轮盘选择中父代最优解不会保留,导致最优解可能在迭代过程中丢失。而精英策略将采用锦标赛个体保留机制,每次迭代时都保留已计算的适应度最优解。算法在迭代过程中保留父代最优解,直接进入子代中,从而改进了算法的全局收敛能力。

Step 3: 自适应策略。为了提高算法收敛到全局最优的能力,根据因子迭代次数调整其交配变异概率,自适应策略将因子在收敛性与交配变异引起的多样性中取得平衡。迭代后期遗传因子一般在最优值区域内反复迭代,如下式所示:

$$x(j) \leq x(j) \leq \bar{x}(j), j = 1, 2, \dots, n. \quad (22)$$

其中: $x(j)$ 表示第 j 个遗传因子, $\underline{x}(j)$ 、 $\bar{x}(j)$ 分别为该遗传因子 j 变异的上下界范围。采用自适应策略调整交配概率和变异概率,根据不断逼近单次迭代最优解的距离的原则,与最优解距离越远,越增大其交配与变异的概率,则有

$$p_c = \frac{F_{fm} - F_f}{F_{fm} - F_{favg}}, \quad (23)$$

$$p_m = 0.005 \times \frac{F_{fm} - F_f}{F_{fm} - F_{favg}}. \quad (24)$$

其中: p_c 为交配概率, p_m 为变异概率, F_f 为本轮迭代适应度函数最大值, F_{fm} 为第 m 个遗传因子的适应度函数值, F_{favg} 为适应度函数平均值。根据式(23)和(24),适应度较高的因子 $F_{fm} - F_f$ 项逼近于0,其交配与变异概率较低已保证变化较小可进入下一轮;而适应度较低的因子分子较大,赋予更大的交配变异概率,以增强空间的探索能力,增加搜索到最优解的能力。

Step 4: 交配变异。保留Step 2中的迭代最优解,然后根据Step 3中每个因子概率进行交配变异,变异方式为二进制码方式,即改变遗传因子变量某个或几个二进制码的值。将本轮中精英解替代适应度最低的值,重新排序,进入Step 5。

Step 5: 验证。若达到迭代次数或收敛误差小于特定值时,则结束遗传算法,输出结果;若未达到,则返回Step 2,重新进行精英选择。

综上,结合精英自适应遗传算法流程,本文故障状态的算法流程如图1所示。

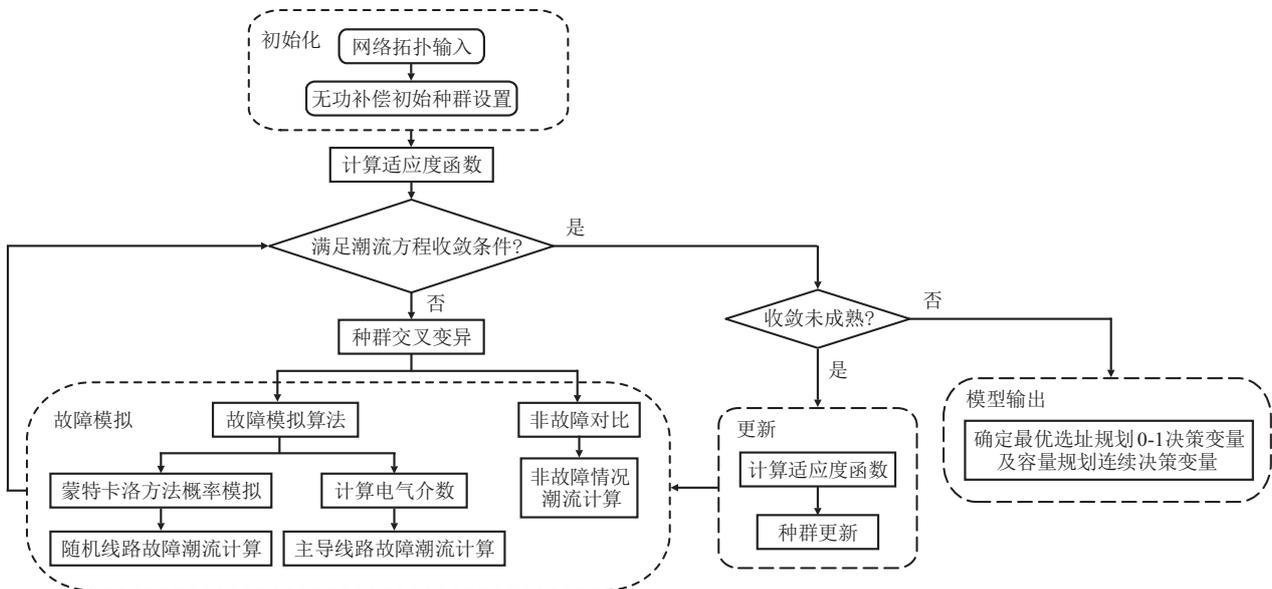


图1 基于电气介数的故障状态无功补偿优化流程

4 算例分析

本文的算例采用IEEE标准14节点系统进行验证。IEEE标准14节点系统的结构如图2所示。其中:1号节点为电网平衡节点;2、3、6、8为发电节点,在电网仿真中为PV节点,这里2、3号节点的无功补偿容量分别为 $-40 \sim 50$ MVar和 $0 \sim 40$ MVar,而6、8号节点的无功补偿为 $-6 \sim 24$ MVar;其他节点为负荷节点;系统基础容量为100 MVA。约束条件中,式(18)中 C_w 建

设费用为9.3百万元, C_p 单位补偿容量费用为0.31百万元,其他参数如表1所示。

通过式(3)计算可以得到IEEE-14节点的电气介数。从图3中看出,线路1(1号节点与2号节点相连的线路)的电气介数最高,主要是由于1号节点为平衡节点,1号节点至2号节点的传输功率较大,出现故障后其功率变化较大。

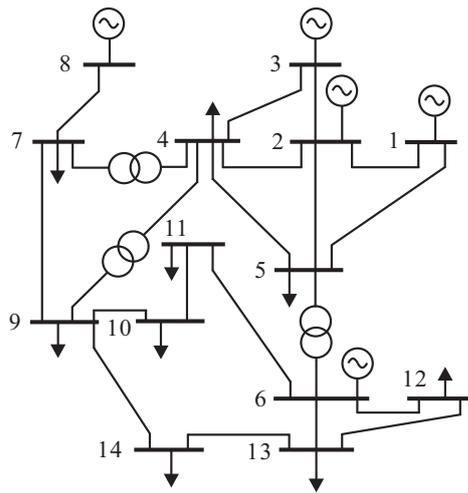


图2 IEEE-14节点标准测试系统拓扑图

表1 仿真参数所用变量值

参数名称	取值
C_w	9.3
C_p	0.31
$\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$	1, 1, 1
V_{max}, V_{min}	1.06, 0.94

表2 不同投资额约束下补偿规划结果

投资额约束值	补偿点选择	补偿容量
40	1, 9, 13	16.07, 6.47, 9.9
60	1, 3, 5	13.03, 41.5, 48.9
80	1, 3, 4, 5, 14	14.95, 40.16, 4.98, 40.52, 4.35
100	1, 2, 3, 4, 5, 6, 14	16.73, 14.5, 24.17, 18.68, 27.53, 4.53, 3.23

计算故障发生时未补偿的目标函数指标(经济指标均为1)并与投资额 $C_{sum} = 100$ 时的补偿规划的目标函数进行对比. 通过补偿后,如图4所示,各输电线路上的目标函数除了12、14号线路外都得到了提升,其中对电气介数最大的1号节点的补偿,使1号线路的目标函数值得到了明显提升. 此外,对2~6、14等节点的补偿,使得与之相连的线路2~7、17等线路的目标函数也得到了提升. 从仿真中可以得出结论:对电网系统的无功补偿可使电网中的综合目标函数得到提升;针对电气介数较高的重要线路可针对性地提升补偿效果.

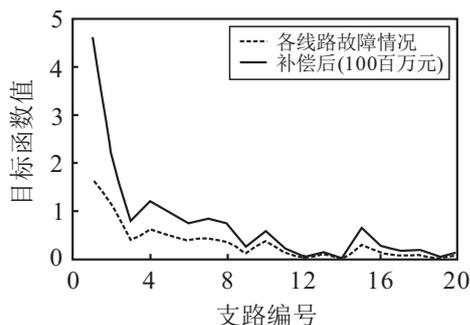


图4 补偿前后随机故障与主导线路故障对比

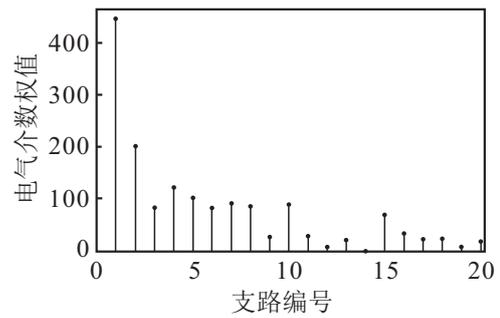


图3 IEEE-14节点电气介数值

随着投资额 C_{sum} 的增加,如表2所示,无功补偿的选址定容的策略有所不同. 当投资额为40~60百万元时,均在3个节点安装补偿设备,其补偿容量也不同. 从表2中可以观察,补偿位置仍主要集中于发电节点1、2、3、6,说明在IEEE-14节点系统中,增加发电节点的无功补偿调节容量可以更有效地提升电网系统稳定裕度. 从表2中看出,补偿位置仍主要集中在电气介数较大的位置,即电网输电线路权重较大之处.

5 结论

本文针对电网输电线路 $N-1$ 故障情况,利用电网稳态指标和经济指标,在电气约束以及投资额约束下,研究了无功补偿装置的选址定容方案. 首先,引入电气介数替代传统的拓扑介数,识别电网系统中的重要线路;然后,考虑电网潮流中的电气约束以及投资额限制安装数量容量约束,以最大提升电网稳态运行时的基础指标,最小化故障带来的线路损耗增加,研究故障状态下的安装策略;最后,针对混合整数非线性模型的复杂性,利用精英自适应遗传算法求解,并通过IEEE标准14节点系统的仿真验证了所提出策略的可行性.

参考文献(References)

[1] Wang Y, Saad W, Sarwat A I, et al. Reactive power compensation game under prospect-theoretic framing effects[J]. IEEE Trans on Smart Grid, 2018, 9(5): 4181-4193.

[2] 张宏立, 李远梅. 基于滤子混合协同进化算法的无功优化[J]. 控制与决策, 2017, 32(9): 1701-1706. (Zhang H L, Li Y M. The research of reactive power flow based on filter hybrid co-evolutionary algorithms[J].

- Control and Decision, 2017, 32(9): 1701-1706.)
- [3] 杨珺, 吴飞业. 基于双鱼群算法的电力系统无功优化[J]. 控制与决策, 2018, 33(10): 1886-1892.
(Yang J, Wu F Y. Reactive power optimization of power system based on double fish swarm algorithm[J]. Control and Decision, 2018, 33(10): 1886-1892.)
- [4] Martí P, Velasco M, Torres-Martínez J, et al. Reactive power control for loss minimization in low-voltage distributed generation systems[C]. The 12th IEEE Int Conf on Control and Automation (ICCA). Kathmandu: IEEE, 2016: 371-376.
- [5] 丁琳, 张嗣瀛. 面向级联失效的复杂网络加权策略[J]. 控制与决策, 2013, 28(9): 1399-1402.
(Ding L, Zhang S Y. Cascading failures-oriented weighting strategies on complex networks[J]. Control and Decision, 2013, 28(9): 1399-1402.)
- [6] 陈斌, 崔芳. 基于故障后最优无功补偿的配电系统可靠性评估[J]. 安徽电力, 2014, 1(1): 34-39.
(Chen B, Cui F. Distribution system reliability evaluation of optimal reactive compensation based on post-fault[J]. Anhui Electric Power, 2014, 1(1): 34-39.)
- [7] 李树凯, 蔡兴国. 考虑支路故障的SVC配置方案[J]. 电力系统及其自动化学报, 2010, 22(3): 27-31.
(Li S K, Cai X G. Configuration scheme of SVC under the condition of branch outage[J]. Proc of the CSU-EPSC, 2010, 22(3): 27-31.)
- [8] Xue Y, Zhang X P. Reactive power and AC voltage control of LCC HVDC system with controllable capacitors[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2017, 32(1): 753-764.
- [9] Neto M K, Okon T, Wilkosz K. Reactive power planning-sequential approach[C]. Energy Conf. Leuven: IEEE, 2016: 1-6.
- [10] Sonwane P M, Kushare B E. Optimal capacitor placement and sizing for enhancement of distribution system reliability and power quality using PSO[C]. Convergence of Technology. Pune: IEEE, 2015: 1-7.
- [11] 于莹莹, 陈燕, 李桃迎. 改进的遗传算法求解旅行商问题[J]. 控制与决策, 2014, 29(8): 1483-1488.
(Yu Y Y, Chen Y, Li T Y. Improved genetic algorithm for solving TSP[J]. Control and Decision, 2014, 29(8): 1483-1488.)
- [12] 刘健, 李京航, 柏小丽. 基于精英保留策略遗传算法的配电网无功优化[J]. 电气技术, 2015, 16(4): 35-38.
(Liu J, Li J H, Bai X L. Reactive power optimization of distribution network using genetic algorithm with elitist strategy[J]. Electrical Engineering 2015, 16(4): 35-38.)
- [13] 孙亮, 吕凌虹, 张秀琦, 等. 智能优化算法应用于分布式电源配电网无功优化综述[J]. 东北电力大学学报, 2017, 37(4): 27-31.
(Sun L, Lv L H, Zhang X Q, et al. The application of intelligent optimization algorithm in the reactive power optimization of the dit[J]. J of Northeast Electric Power University, 2017, 37(4): 27-31.)
- [14] Venkata Rao R, Saroj A, Bhattacharyya S. Design optimization of heat pipes using elitism-based self-adaptive multipopulation Jaya algorithm[J]. J of Thermophysics and Heat Transfer, 2018, 32(3): 1-11.
- [15] Ding T, Liu S, Yuan W, et al. A two-stage robust reactive power optimization considering uncertain wind power integration in active distribution networks[J]. IEEE Trans on Sustainable Energy, 2016, 7(1): 301-311.
- [16] 庞华勇. 基于有功潮流介数和潮流熵的电网脆弱环节辨识[D]. 广州: 华南理工大学电气学院, 2017.
(Pang H Y. Identification of vulnerable links in power system based on active power flow betweenness and power flow entropy[D]. Guangzhou: School of Electric Power, South China University of Technology, 2017.)
- [17] Bai H, Miao S. Hybrid flow betweenness approach for identification of vulnerable line in power system[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2015, 9(12): 1324-1331.
- [18] 赵晋泉, 叶君玲, 邓勇. 直流潮流与交流潮流的对比分析[J]. 电网技术, 2012, 36(10): 147-152.
(Zhao J Q, Ye J L, Deng Y. Comparative analysis on DC power flow and AC power flow[J]. Power System Technology, 2012, 36(10): 147-152.)
- [19] Yang Q, Jagannathan S, Sun Y. Robust integral of neural network and error sign control of MIMO nonlinear systems[J]. IEEE Trans on Neural Networks and Learning Systems, 2015, 26(12): 3278-3286.
- [20] 王帅威. 数据驱动的电网企业效率评估和资源优化配置[D]. 杭州: 浙江大学控制科学与工程学院, 2018.
(Wang S W. Data driven efficiency evaluation and resource allocation of power grid enterprise[D]. Hangzhou: College of Control Science and Engineering, Zhejiang University, 2018.)
- [21] Dong Z Y, Hill D J. Power system reactive scheduling within electricity markets[C]. Int Conf on Advances in Power System Control, Operation and Management. Hongkong: IEEE Xplore, 2001, 1: 70-75.
- [22] Sakr W S, El-Sehiemy R A, Azmy A M. Adaptive differential evolution algorithm for efficient reactive power management[J]. Applied Soft Computing, 2017, 53(4): 336-351.
- [23] Yang Q, Jagannathan S. Reinforcement learning controller design for affine nonlinear discrete-time systems using online approximators[J]. IEEE Trans on Systems, Man, and Cybernetics: Part B, 2012, 42(2): 377-390.

作者简介

李晖(1981—), 男, 博士, 从事输电网络规划、智能电网优化等研究, E-mail: lihui@chinasperi.sgcc.com.cn;
汪莹(1990—), 女, 工程师, 硕士, 从事智能电网调度及运行的研究, E-mail: wangying@chinasperi.sgcc.com.cn;
罗天(1993—), 男, 硕士生, 从事电网安全稳定分析与优化运行的研究, E-mail: luotian1993@sjtu.edu.cn;
林巍(1994—), 男, 硕士生, 从事电网运行、电网优化的研究, E-mail: zjuxhlinwei@zju.edu.cn;
杨秦敏(1979—), 男, 教授, 博士生导师, 从事智能控制、智能电网等研究, E-mail: qmyang@zju.edu.cn.

(责任编辑: 李君玲)