

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2020.06.027

基于改进 PSO-GSA 算法的快速开关型电网故障 限流器优化配置

王 博^{1,2}, 马 莉², 王国东³

(1. 武汉大学电气与自动化学院, 武汉 430072; 2. 国网宁夏电力有限公司电力科学研究院, 银川 750001; 2. 国网宁夏电力有限公司检修公司, 银川 750011)

摘要: 针对快速开关型故障限流器(fast switch fault current limiter, FSFCL)在电网中布点和容量优化问题, 提出一种基于改进 PSO-GSA 算法的 FSFCL 全局优化配置模型。首先分析了 FSFCL 的基本原理, 采用基于支路阻抗的灵敏度法缩小搜索空间; 将限流效果及限流器成本作为优化目标, 构造适应度函数; 然后利用粒子群算法改进万有引力搜索算法(PSO-GSA)并对该混合算法进一步改进, 制定算法优化流程。同时, 由于依据人工经验在直接选择最终配置方案时可能会达不到最佳的效果, 通过建立方案评价模型, 依据相对熵原理确定各指标组合权重, 再利用加权逼近理想点排序法(technique for order by similarity to an idea solution, TOPSIS)对方案进行排序, 选取了最终配置方案。文中的方案评价模型可避免仅凭人工经验选择安装 FSFCL 线路的盲目性, 有效地降低了电网规划成本。最后采用 IEEE39 节点系统算例仿真验证了该全局优化配置模型和方案评价模型的有效性。

关键词: 快速开关型故障限流器; 改进 PSO-GSA 算法; 优化配置; 组合权重; 加权 TOPSIS 法

Optimal Configuration of Fast Switching Grid Fault Current Limiter Based on Improved PSO-GSA

WANG Bo^{1,2}, MA Li², WANG Guodong³

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Wuhan University, Wuhan 430072, China;
2. Ningxia Electric Power Research Institute, State Grid Ningxia Electric Power Company, Yinchuan 750001, China;
3. Maintenance Company, State Grid Ningxia Electric Power Company, Yinchuan 750011, China)

Abstract: Aiming at the problem of fast switch fault current limiter (FSFCL) in power grid, a global optimal configuration model of FSFCL based on improved PSO-GSA algorithm is proposed. Firstly, the basic principle of FSFCL is analyzed, and the sensitivity method based on branch impedance is used to narrow the search space. The current limiting effect and the cost of limiter are taken as optimization targets to construct the fitness function. Then, the particle swarm optimization algorithm is used to improve the gravitational search algorithm (PSO-GSA) and the hybrid algorithm is further improved. The algorithm optimization process is formulated. At the same time, due to the best results may not be achieved when selecting the final configuration scheme based on artificial experience. The scheme evaluation model is established. The weights of each index combination are determined according to the principle of relative entropy. The scheme is sorted by TOPSIS method, and the final configuration scheme is selected. The scheme evaluation model can avoid the blindness of installing FSFCL line only by manual experience and effectively reduce the cost of power grid planning. Finally, the effectiveness of the global optimal configuration model and the scheme evaluation model is verified by the simulation of IEEE39 node system.

收稿日期:2020-02-20; 修回日期:2020-04-25

基金项目:国家电网公司总部科技项目(5229DK160005)。

Project Supported by Science and Technology Project of SGCC(5229DK160005).

Key words: fast switching fault current limiter (FSFCL); improved PSO-GSA; optimal configuration; combined weight; weighted TOPSISI method

0 引言

现代电网规模日益扩大与新能源的不断接入,使得短路故障电流水平持续攀升,已成为影响电网安全稳定运行的主要问题之一^[1-2]。传统分层分区、分列母线等限流措施,限流效果明显,但建设工期长、投资大且难以保证电网运行可靠性及网络完整性^[3-4];限流电抗器经济简单,但运行时会增加网络损耗,降低系统稳定性^[5]。快速开关型故障限流器是近年来提出的一种新型故障限流装置^[6-7],在正常运行时损耗接近于零,故障时可迅速断开投入限流电抗,使故障电流降至断路器遮断容量以下,该类型FCL在同等限流效果下投资更小^[8-9]。

考虑电网实际结构,当电网存在多个短路电流超标点,实现FSFCL的数量、阻抗以及布点优化是研究的难点^[10-13]。文献[10]采用枚举法选取超导故障限流器的安装位置与阻抗值,但对于大规模电网,计算量过大,且容易错过最优配置方案。文[11]采用非支配遗传算法,但算法易破坏种群多样性,且限流目标只考虑了限流器成本;文[12]采用基本粒子群优化算法,但易陷入局部最优,优化结果不稳定;文[13]以全局限流效果和FCL经济性为优化目标,采用等成本倒位算子改进免疫算法寻优,但算法规模过大,计算效率下降,且配置方案选取依赖个人主观因素。

在上述研究的基础上,针对大电网短路电流快速限制问题,文中提出一种基于改进PSO-GSA算法的FSFCL布点和参数优化配置新方法。该方法以FSFCL的成本和限流效果为优化目标,采用改进PSO-GSA算法进行寻优,避免GSA算法在寻优时陷入局部最优,建立FSFCL配置方案综合评价模型,利用组合权重与加权TOPSISI法对方案进行综合评价,选取最终优化配置方案。

1 FSFCL工作原理

快速开关型故障限流器整体结构见图1。K为智能快速断路器;L为限流电抗器;KM为旁路开关,可在K发生故障后承载工作电流;CT为洛克特种线圈,用来检测母线电流;ZNO避雷器防止过电压; C_1 为分压电容; C_2 为高压耦合电容,隔离变压器用于装置取能。

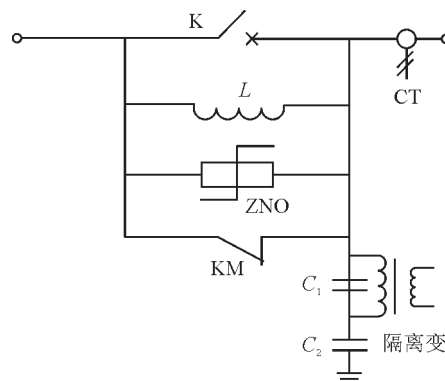


图1 FSFCL原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of FSFCL

在电网正常运行时,系统电流流过K且不产生压降及损耗,当某处发生短路故障,K在20 ms内断开,投入L,短路电流降至断路器遮断容量内,故障被切除后,CT检测到母线电流恢复至正常,则控制器发送合闸指令,K合闸,系统恢复正常运行。当电网发生多处短路故障且分布在不同位置时,考虑整网运行安全性及可靠性,需确定FSFCL最优安装数量、位置及容量大小。

2 基于PSO-GSA算法的FSFCL优化配置

2.1 基于支路阻抗的灵敏度计算

在大型输电网中,安装故障限流器可选支路增加,计算量急剧增加。文中采用灵敏度系数排序的方法适当降低FSFCL的安装范围,在确保算法优化能力的同时增加全局搜索的效率。基于支路阻抗灵敏度^[14]计算公式为

$$\eta = \frac{dZ'_{ff}}{dz_{FCL}} \Big|_{z_{FCL}=0} = \frac{(Z_{fi} - Z_{fj})^2}{z_{ij}^2} \quad (1)$$

式(1)中: dZ'_{ff} 为加装FCL后节点*f*的自阻抗值; z_{FCL} 为加装FCL的阻抗; z_{ij} 为节点*i*与*j*的支路阻抗; Z_{fi} 与 Z_{fj} 分别为节点*i*与*j*与节点*f*的互阻抗。

基于支路阻抗计算的灵敏度值实际是筛选出对每个超标节点自阻抗较敏感的前*n*条支路,但该值最大并不代表该条支路就是最佳安装位置,应进一步从全局考虑最佳配置问题。

2.2 FSFCL优化目标函数

限流器的优化配置在满足安装最小数量与容量的情况下,需要使短路电流尽可能降低,从限流器的成本与限流效果两方面综合考虑。

目标函数 f_1 衡量配置方案的经济性, 为总成本评估函数, 通常包括安装台数与总阻抗值以及负载总损耗, 由于文中采用的 FSFCL 为开关型微损耗限流器, 在电网正常运行时电抗器被闭合的快速开关所旁路, 一次负载电流流通闭合的开关, 一次损耗接近为零, 而二次功耗很低可忽略不计。因此, 开关型微损耗限流器的负载总损耗可视为 0, 总成本评估函数只考虑安装台数与总阻抗值, 公式为

$$\begin{cases} \min f_1 = k_1 \sum_{i=1}^{N_{\text{FCL}}} Z_{\text{FCL}}(i) + k_2 N_{\text{FCL}} \\ \text{s.t. } Z_{\min} \leq Z_{\text{FCL}}(i) \leq Z_{\max} \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中: $i=1, 2, \dots, N_{\text{FCL}}$, $Z_{\text{FCL}}(i)$ 表示第 i 台 FSFCL 的阻抗值; k_1 、 k_2 分别为安装容量和数量的权值, 安装容量权值设置为 1.5^[14], 每套 FCL 的安装成本是单位欧姆电抗器 5~10 倍^[10], 考虑 FSFCL 的经济性 $k_2=6$; N_{FCL} 为安装 FSFCL 的数量; $Z_{\min}$ 和 $Z_{\max}$ 分别为限流器阻抗上下限。

目标函数 f_2 表示配置方案的限流效果, 采用 FSFCL 对电网短路电流进行限制时应保证所有超标节点被限制后的短路电流低于目标值。因此, 节点 k 限流效果可表示为

$$\eta_k = \frac{I_B - I'_k}{I_B} \quad (3)$$

限流效果函数为

$$\begin{cases} \max f_2 = \sum_{k=1}^{N_k} \eta_k \\ \text{s.t. } I_k \leq I_B \end{cases} \quad (4)$$

式(3)中: I_k 和 I'_k 分别为节点 k 安装 SFFCL 前后的短路电流大小; N_k 为所有超标节点集合, η_k 越大表明系统限制短路电流效果越好。

罚函数法是对有约束条件的目标函数增加一个惩罚项将约束问题转化为非约束问题求解^[15]。文中把包含限流电抗器的电抗值以及短路电流在内的约束转化为罚函数形式, 结合目标函数构成适应度函数。由于目标函数 f_1 求取经济性, 目标函数 f_2 衡量限流效果, 在构建适应度函数时设置求取最小值, 则适应度函数可表示为

$$\begin{cases} \min f = w_1 f_1 + w_2 (1/f_2) + M \times (Z \lim it + S_{\text{SCC}} \lim it) \\ Z \lim it = \sum_{i=1}^{N_{\text{FCL}}} \max \{Z_{\text{FCL}}(i) - Z_{\max}, Z_{\min} - Z_{\text{FCL}}(i), 0\} \\ S_{\text{SCC}} \lim it = \sum_{k=1}^{N_k} \max \{I_k - I_B\} \end{cases} \quad (5)$$

式(5)中, w_1 、 w_2 为权重系数; 若满足约束条件, 则 $M=0$, 若某一约束条件不满足, 则 $M=1000$ 。

2.3 改进 PSO-GSA 算法

万有引力搜索算法 (gravitational search algorithm, GSA) 是 2009 年提出的一种新兴智能优化算法^[15]。该算法搜索空间粒子遵循万有引力定律, 相互作用, 各粒子位置就为优化问题的解; 已有研究表明 GSA 算法的优化性能优于粒子群、遗传算法等智能优化算法^[16]; 但 GSA 在更新时只依据粒子当前位置, 缺乏群体信息共享能力, 局部优化能力差。因此, 引入具有群体间信息交换能力的粒子群算法 (particle swarm optimization, PSO)^[17-18]改进万有引力搜索算法速度、位移公式。万有引力定律数学表达式为

$$F = G \frac{M_1 \times M_2}{R_2} \quad (6)$$

式(6)中: F 为粒子间引力; G 为引力常数; M_1 和 M_2 为惯性质量; R 为粒子间欧氏距离。

PSO-GSA 算法具体步骤如下。

1) 假设在一个 D 维搜索空间的粒子 i 的位置为

$$x_i = (x_i^1, x_i^2, \dots, x_i^D) \quad i=1, \dots, n \quad (7)$$

2) t 时刻粒子之间的引力为

$$F_{ij}^d(t) = G(t) \times \frac{M_{ij}(t) \times M_{pi}(t)}{R_{ij}(t)^2} \times \frac{[x_j^d(t) - x_i^d(t)]}{R_{ij}(t)} \quad (8)$$

式(8)中: $F_{ij}^d(t)$ 为粒子 j 对 i 的引力; $R_{ij}(t)$ 为粒子 i 和 j 之间的欧氏距离; $M_{ij}(t)$ 为作用物体的惯性质量; $M_{pi}(t)$ 为被作用物体的惯性质量; $G(t)$ 为 t 时刻的引力常数, $G(t) = G_0 \exp(a \times t / T_{\max})$, 其中, $T_{\max}$ 为总的迭代次数, G_0 一般取值为 100。

3) 粒子 i 于 t 时刻的惯性质量 $M_{ij}(t)$ 为

$$\begin{cases} m_i(t) = \frac{fit_i(t) - worst(t)}{best(t) - worst(t)} \\ M_i(t) = m_i(t) / \sum_{j=1}^N m_j(t) \end{cases} \quad (9)$$

式(9)中: $fit_i(t)$ 为 t 时刻粒子 i 的适应度值; $worst(t)$ 和 $best(t)$ 分别为 t 时刻最差值和最优值, 表达式为

$$\begin{cases} best(t) = \min_{j \in \{1, 2, \dots, N\}} [fit_j(t)] \\ worst(t) = \max_{j \in \{1, 2, \dots, N\}} [fit_j(t)] \end{cases} \quad (10)$$

4) 在第 d 维 t 时刻在粒子 i 上的作用力和为

$$F_i^d(t) = \sum_{j=1, j \neq i}^N rand_j \times F_{ij}^d(t) \quad (11)$$

5) 加速度为

$$a_i^d(t) = F_i^d(t) / M_i(t) \quad (12)$$

6) 依据各粒子加速度, 每次迭代时粒子更新速

度和位置公式为:

$$v_i^d(t+1) = rand_j \times v_i^d(t) + a_i^d(t) \quad (13)$$

$$x_i^d(t+1) = x_i^d(t) + v_i^d(t+1) \quad (14)$$

式(13)、(14)中: $rand_j$ 为 0~1 的随机数; $v_i^d(t)$ 、 $x_i^d(t)$ 分别为粒子 i 在第 d 维 t 时刻的速度和位置。粒子不断更新直到达到设置的最大迭代次数 $T_{\max}$, 此时的 $best(t)$ 为最优解。

由式(13)–(14)可以看出 GSA 算法粒子位置更新只考虑了当前位置, 引入 PSO 算法, 则粒子速度公式变为

$$v_i^d(t+1) = \omega v_i^d(t) + c_1 r_1 a_i^d(t) + c_2 r_2 [g_{best}^d - x_i^d(t)] \quad (15)$$

式(15)中: g_{best}^d 是当前全局最优解; ω 是惯性权重; c_1 、 c_2 为学习因子; r_1 、 r_2 为 0~1 之间的随机数。由式(15)可知, PSO-GSA 是利用当前最优解引导惯性质量大的粒子向全局最优方向聚集, 加快了群体运动, 优化能力更强。

由于引入的 PSO 算法本身也存在容易陷入局部最优的缺点, 为进一步改善算法全局搜索能力, 针对 PSO-GSA 算法做出如下改进。

1) 自适应惯性权重调整。为平衡算法全局搜索能力和局部改良能力, 采用自适应权重替代依据经验选取的惯性权重, 使其随粒子适应度值变化

$$\omega = \begin{cases} \omega_{\min} - \frac{(\omega_{\max} - \omega_{\min}) * (f - f_{\min})}{(f_{\text{avg}} - f_{\min})} & f \leq f_{\text{avg}} \\ \omega_{\max} & f \geq f_{\text{avg}} \end{cases} \quad (16)$$

式(16)中: f 为当前粒子适应度值; $\omega_{\min}$ 和 $\omega_{\max}$ 分别为惯性权重最小值和最大值。

2) 学习因子的调整。学习因子 c_1 表示粒子自我搜寻能力, c_2 表示向群体最优个体的学习能力, 取值范围为 0~4, 当 c 缺少变化时, 算法具有陷入局部最优的风险, 采用式(9)对学习因子进行调整

$$c_1 = c_2 = c_{\max} - (c_{\max} - c_{\min}) * t / T_{\max} \quad (17)$$

式(17)中: $c_{\max}$ 与 $c_{\min}$ 分别为学习因子最大值和最小值; $T_{\max}$ 为最大迭代数; t 为当前迭代数量。

3) 变异。引入遗传算法中的变异过程^[19], 以保证粒子在更新时的种群多样性、提升算法全局搜索能力, 自适应变异概率为

$$P_m = (P_{\max} - P_{\min}) \left(\frac{\varepsilon^2}{T_{\max}} \right) + P_{\max} + (P_{\min} - P_{\max}) \left(\frac{2\varepsilon^2}{T_{\max}} \right) \quad (18)$$

式(18)中: P_m 为全局最优值的变异概率; ε^2 适应度方差; $P_{\max}$ 和 $P_{\min}$ 分别为变异概率最大值和最小值。

当粒子陷入局部最优时, 对粒子进行变异

$$x_{id}^k = \begin{cases} x_{id}^k * (1 + 0.3\eta) & e < P_m \\ x_{id}^k & e \geq P_m \end{cases} \quad (19)$$

式(19)中: η 服从 [0 1] 的高斯分布; e 是 [0 1] 之间的随机数; x_{id}^k 为粒子位置。

2.4 基于改进 PSO-GSA 算法优化流程

基于改进 PSO-GSA 算法的 FSFCL 布点配置全局优化步骤如下: ①计算全网指定电压等级母线短路电流确定超标节点; 确定安装限流器的数量上限和安装阻抗变化范围; 依据式(1)筛选可安装支路; ②确定当前安装台数 m (初始 $m=1$); ③初始化改进 PSO-GSA 算法参数, 如: $\omega_{\min}$ 和 $\omega_{\max}$ 、 $T_{\max}$ 、 $P_{\max}$ 、 $P_{\min}$ 等参数; ④初始化粒子位置和速度; 计算粒子适应度值; ⑤更新 $G(t)$ 、 $best(t)$ 、 $worst(t)$ 及 $M_i(t)$; ⑥依据式(11)计算粒子受到的作用力总和; ⑦利用式(12)计算加速度; ⑧根据式(16)、(17)计算惯性权重、学习因子; ⑨依据式(15)、(14)更新粒子速度和位移; ⑩依据式(18)计算变异概率, 并将粒子按式(19)进行变异操作; ⑪若达到最大迭代次数则改进 PSO-GSA 算法停止搜索, 输出该 FCL 台数下的最优安装配置方案, 否则回到步骤⑥; ⑫若达到限流器安装上限则算法停止, 否则 $m=m+1$ 回到步骤②。

3 FSFCL 优化配置方案评价模型

3.1 评价指标

目前研究表明, 限流方案评价指标主要包括系统暂态稳定性、静态安全性、短路电流水平以及经济性指标 4 个方面^[20], 各指标描述如下。

1) 短路电流抑制效果评价指标 C_1 为

$$C_1 = \sum_{\varphi} \tau_i \left(\Delta I_{sc} / I_0 \right)^2 \quad (20)$$

式(20)中: φ 为母线断路器集合; ΔI_{sc} 为限制后短路电流降低程度; I_0 为断路器额定遮断电流; τ_i 为母线断路器权重。

2) 暂态稳定评价指标 C_2 。发电机最大功角差为

$$C_2 = \max |\theta_i - \theta_j| \quad (21)$$

式(21)中, θ_i 和 θ_j 为暂态过程中任意 2 台发电机功角。

3) 系统静态安全性指标 C_3 。静态安全性指标包括母线电压越限 C_U 以及线路过负荷 C_L , 即

$$C_3 = C_U + C_L \quad (22)$$

母线电压越限指标 C_U 为

$$C_U = \sum_{i=1}^M \left| \frac{U_i - (U_i^H + U_i^L)}{(U_i^H - U_i^L)/2} \right| \quad (23)$$

式(23)中: U_i 为母线 i 的电压; U_i^H 和 U_i^L 为电压上下限制; M 为母线集合。

线路过负荷指标 C_L 为

$$C_L = \sum_{i=1}^N |S_i / S_{ie}| \quad (24)$$

式(24)中: N 为所有线路集合; S_i 为线路 i 的功率; S_{ie} 为线路 i 的功率上限值。

4) 经济性评价指标 C_4 为

$$C_4 = M_{\text{invd}} + M_{\text{ploss}} \quad (25)$$

式(25)中: M_{invd} 为投资费用; M_{ploss} 为增加的网损费用

3.2 基于相对熵计算组合权重

假设算法优化后共得到 m 个配置方案, 建立 n 个对配置方案进行评价的指标, 则原始评价始阵 $Y_i = (y_{ij})_{m \times n}$ 。为更好的对配置方案进行综合评价, 采用相对熵原理将主观赋权和客观赋权相组合, 确定各评价指标的权重, 避免了主、客观单一赋权的片面性。

主观权重采用层次分析法^[21], 权重值取决于专家意见和决策者的态度。客观权重采用熵权法^[22], 权重值根据指标值提供的信息量的多少来确定。

相对熵常用来描述两个概率分布之间的差异, 在确定组合权重时, 其思想就是使组合后的权重与单一赋权的权重之间的相对熵总和最小^[23]。

设组合权重为: $W_0 = \{\omega_{01}, \omega_{02}, \dots, \omega_{0n}\}$ 单一权重为: $W_k = \{\omega_{k1}, \omega_{k2}, \dots, \omega_{kn}\}$, 则根据相对熵原理建立数学模型

$$\begin{cases} \min \sum_{j=1}^l D_k(W_0; W_k) = \sum_{j=1}^n \omega_{0j} \ln \omega_{0j} / \omega_{kj} \\ \text{s.t.} \begin{cases} \sum_{j=1}^n \omega_{0j} = 1 \\ \omega_{0j} \geq 0 \end{cases} \end{cases} \quad (26)$$

式(26)中: $D_k(W_0; W_k)$ 为第 k 个概率分布 W_k 与 W_0 的相对熵; l 为概率分布的个数。

利用 Lagrange 函数, 求解上述数学模型可得

$$\omega_{0j} = \frac{\prod_{k=1}^l (\omega_{kj})^{1/l}}{\sum_{j=1}^n \prod_{k=1}^l (\omega_{kj})^{1/l}} \quad (27)$$

3.3 基于加权 TOPSIS 法计算配置方案评价

利用相对熵计算出各指标组合权重后, 采用加

权 TOPSIS 对配置方案进行排序, 得到最终配置方案。计算过程如下。

1) 由于存在效益型评价(指标值越大越好)与成本型评价(指标值越小越好), 需对指标进行同向化处理

$$y_{ij} = \begin{cases} \frac{1}{k + \max |Y_i| + y_{ij}} & y_{ij} \text{ 为负向指标} \\ y_{ij} & y_{ij} \text{ 为正向指标} \end{cases} \quad (28)$$

式(28)中, $\max |Y_i|$ 为评价指标所在行元素最大值, k 一般取 0.1。

2) 得到同趋势化矩阵后的指标矩阵, 对其进行归一化处理

$$z_{ij} = \frac{y_{ij}}{\left(\sum_{i=1}^m y_{ij}^2 \right)^{1/2}} \quad (29)$$

3) 确定方案 m 中的最优方案对应的 Z^+ 和最劣方案对应的 Z^- :

$$Z^+ = (z_1^+, \dots, z_j^+, \dots, z_n^+) \quad (30)$$

$$Z^- = (z_1^-, \dots, z_j^-, \dots, z_n^-) \quad (31)$$

式(30)、(31)中: $z_j^+ = \min_{1 \leq i \leq m} \{z_{ij}\}$; $z_j^- = \max_{1 \leq i \leq m} \{z_{ij}\}$ 。

4) 计算各评价对象与最优方案和最劣方案之间的欧氏距离:

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n [\omega_{0j} (z_{ij} - z_j^+)]^2} \quad (32)$$

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n [\omega_{0j} (z_{ij} - z_j^-)]^2} \quad (33)$$

5) 计算各方案评价

$$B_i = D_i^- / (D_i^+ + D_i^-) \quad (34)$$

式(34)中, $B_i \in [0, 1]$, B_i 值越大, 则配置方案评价越优。

4 算例分析

4.1 超标节点与候选支路

以 IEEE39 节点系统为例进行仿真, 系统由 10 个发电机节点、29 个负荷节点以及 42 条支路组成, 基准容量为 100 MVA。设定系统短路电流目标值为 40 kA, 为保证系统稳定性, 保留 10% 的安全裕度, $I_B = 36$ kA, 扫描全网 39 节点三相短路电流, 扫描全网 39 节点短路电流, 共有 4 个短路电流超标节点, 见表 1。

计算以上节点短路后各支路对应短路电流值, 并根据故障限流器的启动条件^[24], 即 $I_k \geq 3I_N$, 筛选

表1 短路电流超标节点

超标节点	短路电流/kA
2	43.610
16	42.423
3	38.346
17	37.997

FSFCL的可安装支路。计算所有可安装支路的灵敏度系数,减小搜索空间,并按灵敏度大小进行排序,选取前5条支路作为候选支路,见表2,去掉重复支路,可得总的候选支路数为13条。

表2 FSFCL候选支路

超标节点	FCL候选支路(灵敏度)
2	2-3(0.215 3);2-25(0.210 7); 3-18(0.050 1); 1-2(0.047 6);17- 18(0.043 0)
16	16-17(0.319 1);33-19(0.152 7); 15-16(0.094 2); 2-30(0.079 9); 17-27(0.077 7)
3	2-3(0.124 4); 3-18(0.112 9);17-18(0.102 6); 3-4(0.082 5); 4-5(0.024 2)
17	16-24(0.909 1);17-27(0.3171);17-18(0.304 9); 16-17(0.212 4); 3-18(0.039 0)

4.2 基于PSO-GSA的优化计算

文中通过改进PSO-GSA算法优化选取FSFCL在电网中的最佳布点与容量,算法参数设置为:种群数目为100, $T_{\max}=1\,000$, 变异概率 $P_{\max}=0.05$, $P_{\min}=0.02$, $\omega_{\max}=0.9$, $\omega_{\min}=0.3$, $w_1=0.5$, $w_2=0.5$ 。故障限流器的电抗取值范围在0~1范围内变化(标么值),安装上限为4台,优化结果见表3。

表3 FSFCL布点优化和容量选择结果

配置方案	FSFCL电抗值/p.u.	安装支路	FSFCL个数	适应度函数值 f
1	0.086 9	16-17	1	1 002.926
2	0.061 4	2-3	2	5.767
	0.085 8	16-17		
	0.062 1	2-3		
3	0.012 5	2-25	3	8.748
	0.088 4	16-17		
	0.063 2	2-3		
4	0.022 9	2-30	4	11.667
	0.054 2	17-18		
	0.062 4	16-27		

安装1台FSFCL限制后的短路电流见图2,节点2短路电流超过36 kA,不满足约束条件中限制短路电流的要求,所以表3中安装1台FSFCL的适应度函数中包括惩罚值,因此不考虑安装1台时的方案。

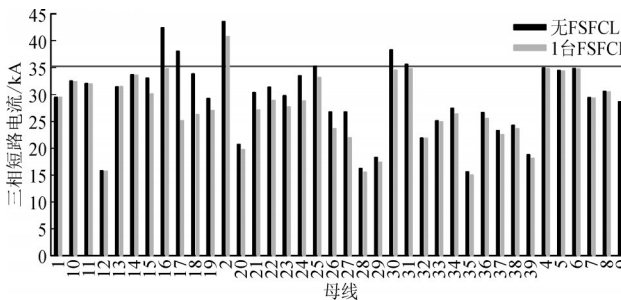


图2 安装1台FSFCL时短路电流大小

Fig. 2 Short circuit current of one FSFCL installed

由图2可以看出除超标节点外,其余母线也受到限制,并未出现超标情况,因此对比剩余方案超标节点短路电流,见图3。其余3种方案超标短路电流值均被限制至短路电流目标值以下。若只考虑限流效果则方案4>方案2>方案3,只考虑经济性则方案2>方案3>方案4。在考虑短路电流未超过目标值的情况下,很明显安装台数越少经济性越好,此时应选择方案2。但当电网短路电流超标严重,考虑限流效果重要性要高于经济性,安装台数增加更符合实际需要;必要时还需考虑安装之后的电网稳定性等因素。为更加全面、客观选取FSFCL安装布点方案,可采用评价模型进一步决定。各系统具体情况可依据文中建立的优化和评价模型,得出最终符合方案。

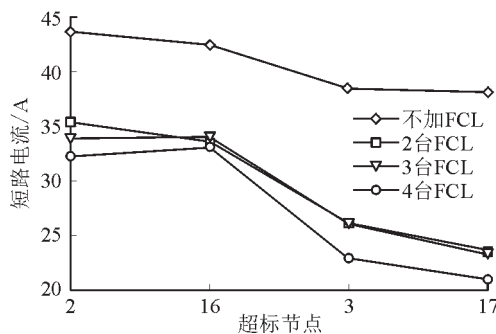


图3 超标节点短路电流

Fig. 3 Short circuit current of over standard node

4.3 方案评价

采用电力系统分析综合程序(PSASP7)计算IEEE39节点系统在不同FSFCL配置下的评价指标值,结果见表4。

对不同属性和量纲的评价指标进行标准化处理,采用层次分析法、熵权法及相对熵计算各方案指标主观权重、客观权重和组合权重,结果见表5。

表 4 配置方案的评价指标

配置方案	C_1	C_2	C_3	C_4
方案 2	0.686 2	44.599 0	0.714 7	12.22
方案 3	0.819 4	45.125 8	0.798 2	18.34
方案 4	0.971 3	45.896 9	0.820 6	24.30

表 5 指标权重值

方法	C_1	C_2	C_3	C_4
层次分析法	0.390 5	0.276 1	0.195 3	0.138 1
反熵权法	0.257 4	0.256 5	0.244 3	0.241 8
组合权重	0.323 3	0.269 8	0.221 5	0.185 3

由表 5 中主观权重 W_1 、客观权重 W_2 及组合权重值可以看出相对熵组合权重赋权可以结合单一权重的主观性和客观性,更为合理。将权重带入加权 TOPSIS 法,计算可得 3 种配置方案评价值,见表 6。在综合考虑了限流效果、稳定性和经济性指标后,方案的优先顺序为 3、2、4。即对于 IEEE39 节点系统,在综合考虑了限流效果、稳定性及经济性后方案 3 为综合评价最好的方案。

表 6 方案评价值

限流方案	评价值
3	0.553 1
2	0.531 8
4	0.446 9

依据上述分析可以看出:依据实际情况,若需要在保证限流效果情况下经济性最小,则选择方案 2 即可;若需考虑电网两到三年内的短路电流增长情况、系统稳定性要求较高,且对经济性的要求不是第一条件,则选择方案 3 为最佳方案。

5 结论

1)针对 FSFCL 在电网中的布点优化和容量选择问题,文中采用了一种基于改进 PSO-GSA 算法的优化配置方法,以限流效果与限流器的成本为优化目标,求得分别安装不同台数时 FSFCL 最优配置方案。

2)根据各 FSFCL 配置方案评价指标值、相对熵计算组合权重以及加权 TOPSIS 法建立的客观评价模型,可准确求得各方案评价值,避免了单一赋权对 FSFCL 优化配置方案评价结果可能产生的负面影响。

参考文献:

[1] 袁 娟,刘文颖,董明齐,等. 西北电网短路电流的限制

措施[J]. 电网技术,2007,31(10):42-45.

YUAN Juan, LIU Wenyong, DONG Mingqi, et al. Application of measures limiting short circuit currents in Northwest China Power Grid[J]. Power System Technology, 2007, 31(10): 42-45.

[2] NAJY W, ZEINEIDIN H, WOON W. Optimal protection co-ordination for microgrids with grid-connected and islanded capability[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2013, 60(4): 1668-1677.

[3] 徐 贤,丁 涛,万秋兰. 限制短路电流的 220 kV 电网分区优化[J]. 电力系统自动化,2009,33(22):98-101.

XU Xian, DING Tao, WAN Qiulan. 220 kV power grid district-dividing optimization for limiting fault current[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(22): 98-101.

[4] 陈丽莉,黄民翔,张 弘,等. 电网限流措施的优化配置[J]. 电力系统自动化,2009,33(11):38-42.

CHEN Lili, HUANG Minxiang, ZHANG Hong, et al. An optimization strategy for limiting short circuit current[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(11): 38-42.

[5] 朱思丞,赵成勇,李承昱,等. 考虑故障限流器动作的直流电网限流电抗器优化配置[J]. 电力系统自动化,2018, 42(15):142-149.

ZHU Sicheng, ZHAO Chengyong, LI Chengyu, et al. Optimal configuration of current-limiting reactor considering fault current limiter action in DC grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(15): 142-149.

[6] 艾绍贵,李秀广,杜 玮,等. 基于永磁斥力机构的真空快速开关的研究[J]. 高压电器,2017,53(2):54-60.

AI Shaogui, LI Xiuguang, DU Wei, et al. Study on high speed vacuum switch based on permanent magnetic repulsion mechanism[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(2): 54-60.

[7] 李新海,肖 星,廖文强,等. 基于零损耗深度限流装置的电网短路电流建模与仿真研究[J]. 高压电器,2017,53(9):137-142.

LI Xinhai, XIAO Xing, LIAO Wenqiang, et al. Modeling and simulation of short-circuit current of power grid based on deep current limiter with zero-loss[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(9): 137-142.

[8] 艾绍贵,李秀广,黎 炜,等. 配电网快速开关型消除弧光接地故障技术研究[J]. 高压电器,2017,53(3):178-184.

AI Shaogui, LI Xiuguang, LI Wei, et al. Arc suppression technology based on fast switch for distribution network[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(3): 178-184.

[9] QIN L. Research on fault current limiter based on fast switching technology[C]//3rd International Conference on Control and Robotics Engineering (ICCRE).Nagoya, IEEE, 2018: 196-200.

[10] MASAKI N, KAZUYUKI T, HARUHITO T. FCL location selection in large scale power system[J]. IEEE Transaction

- on Applied Super-conductivity, 2001, 11(1): 2489-2494.
- [11] 胡文旺, 卫志农, 孙国强, 等. 基于灵敏度法的超导故障限流器的优化配置[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(22): 62-67.
- HU Wenwang, WEI Zhihong, SUN Guoqiang, et al. Optimal allocation of superconducting fault current limiters based on sensitivity method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(22): 62-67.
- [12] 应林志, 王建全, 陈 迅, 等. 广东电网超高压短路限流器优化配置方案[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(4): 96-100.
- YING Linzhi, WANG Jianquan, CHEN Xun, et al. An optimal configuration scheme for ultra-high voltage short-circuit current limiter in Guangdong power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(4): 96-100.
- [13] 陈柏超, 魏亮亮, 雷 洋, 等. 基于免疫算法的高温超导故障限流器 Pareto 多目标优化配置[J]. 电网技术, 2015, 39(5): 1343-1350.
- CHEN Baichao, WEI Liangliang, LEI Yang, et al. Immune algorithm based Pareto multi-objective optimal allocation of high temperature superconductor-fault current limiters[J]. Power System Technology, 2015, 39(5): 1343-1350.
- [14] 肖怀硕, 李清泉, 张 岩, 等. 基于非支配排序遗传改进算法的故障限流器的优化配置[J]. 电网技术, 2016, 40(8): 2444-2450.
- XIAO Huaishuo, LI Qingquan, ZHANG Yan, et al. Optimization of fault current limiter configuration based on improved NSGA-2[J]. Power System Technology, 2016, 40(8): 2444-2450.
- [15] 贾 彦, 李文雄, 赵 萌, 等. 罚函数改进粒子群算法的风光储系统优化配置[J]. 太阳能学报, 2019, 48(7): 2071-2077.
- JIA Yan, LI Wenxiong, ZHAO Meng, et al. Optimal configuration for solar-wind-battery hybrid power system based on penalty function improved particle swarm optimization[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2019, 48(7): 2071-2077.
- [16] RASHEDI E, NEZAMABADI-POUR H, SARYAZDI S. GSA: A gravitational search algorithm[J]. Information Sciences, 2009, 179(13): 2232-2248.
- [17] 左迎芝, 曹洪亮, 韩 通, 等. 基于粒子群算法的金属氧化物避雷器老化监测研究[J]. 高压电器, 2016, 52(11): 113-118.
- ZUO Yingzhi, CAO Hongliang, HAN Tong, et al. On-line aging monitoring of metal oxide arrester using particle swarm optimization[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(11): 113-118.
- [18] 罗 朋, 李一峰, 夏正龙, 等. 利用粒子群优化最小二乘支持向量机诊断 H 桥功率模块 IGBT 故障[J]. 电力电容器与无功补偿, 2018, 39(2): 26-31.
- LUO Peng, LI Yifeng, XIA Zhenglong, et al. IGBT fault diagnosis in H-bridge power module by particle swarm optimization least squares support vector machine[J]. Power Capacitors & Reactive Power Compensation, 2018, 39(2): 26-31.
- [19] LI C, ZHOU J. Parameters identification of hydraulic turbine governing system using improved gravitational search algorithm[J]. Energy Conversion & Management, 2011, 52(1): 374-381.
- [20] 胡 骏, 乐英高, 蔡绍堂, 等. 基于改进变异粒子群算法的 TDOA/AOA 定位研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2019(4): 14-19.
- HU Jun, YUE Yinggao, CAI Shaotang, et al. Research on TDOA/AOA location algorithm based on improve mutation-al particle swarm optimization[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2019(4): 14-19.
- [21] 徐铭铭, 曹文思, 姚 森, 等. 基于模糊层次分析法的配电网重复多发性停电风险评估[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(10): 19-25.
- XU Mingming, CAO Wensi, YAO Sen, et al. Risk assessment of repeated multiple blackouts for distribution network based on fuzzy AHP[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(10): 19-25.
- [22] 聂宏展, 吕 盼, 乔 怡, 等. 基于熵权法的输电网规划方案模糊综合评价[J]. 电网技术, 2009, 33(11): 60-64.
- NIE Hongzhan, LYU Pan, QIAO Yi, et al. Fuzzy comprehensive evaluation of transmission network planning scheme based on entropy weight method[J]. Power System Technology, 2009, 33(11): 60-64.
- [23] CHANDRASEKARAN V, SHAH P. Relative entropy optimization and its applications[J]. Mathematical Programming, 2017, 161(1/2): 1-32.
- [24] HONGESOMBUT K, MITANI Y, TSUJI K. Optimal location assignment and design of superconducting fault current limiters applied to loop power systems[J]. IEEE Trans. on Applied Superconductivity, 2003, 13(2): 1828-1831.
- 王 博(1975—), 男, 博士, 从事输变电设备研究工作。
- 马 莉(1995—), 女, 硕士, 从事电气设备在线监测与故障诊断相关研究(通讯作者)。
- 王国东(1994—), 男, 助理工程师, 从事变电检修与电器实验工作。