

基于灵敏度分析的限流方案优化决策方法

杨冬¹,周勤勇²,刘玉田³

(1. 国网山东省电力公司电力科学研究院, 山东 济南 250003; 2. 中国电力科学研究院, 北京 100192;
3. 山东大学 电网智能化调度与控制教育部重点实验室, 山东 济南 250061)

摘要: 考虑限制短路电流与提高系统稳定性的相互制约关系, 提出一种基于灵敏度分析的限流方案优化决策方法。通过分析各种限流措施对阻抗矩阵元素的影响, 推导各种限流措施与超标站点自阻抗的灵敏度关系, 提出一种考虑限流措施灵敏度的支路筛选策略。以总投资成本最小和短路容量裕度最小为目标, 应用自适应混合粒子群优化算法寻找限流方案集。基于层次分析法建立综合评价模型, 应用模糊综合评价算法对限流方案集进行系统性定量决策。实际系统仿真结果表明该方法能够快速获得优化决策方案。

关键词: 限流; 短路电流; 灵敏度分析; 粒子群优化算法; 层次分析法; 模糊综合评价

中图分类号: TM 77

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2015.05.018

0 引言

电网联系日趋紧密及大容量发电机组接入使受端电网短路电流超标问题日益严重。根据配置限流措施的成本及效果, 可将限流措施分为 2 类: 一类是打开线路或母线开关以降低网络联系紧密程度, 该措施简单经济, 限流效果明显, 但对稳定性影响较大; 另一类是加装或更换设备以增加系统节点间的电气距离, 其对稳定性影响较小, 但成本较高, 限流效果有限。针对电网的具体情况, 选择合适的限流措施, 是解决问题的关键。

文献[1-4]针对限流措施的优化计算主要集中在故障限流器或限流电抗器的安装位置、数量及阻抗值的优化配置上。文献[5]通过分析开断线路对节点阻抗矩阵的影响, 提出一种快速寻找限制短路电流的开断线路优化组合方法。文献[6]将限流措施配置问题描述成一个混合整数规划问题, 能够给出投资成本最低的限流措施优化配置方案。文献[7]在考虑潮流约束的情况下, 建立了一种限流措施多目标优化模型, 但是难以解决实际大规模电网的限流优化问题。

限制短路电流与提高系统稳定性是一对矛盾体^[8-9]。限流方案优化决策需要综合考虑电网静态安全性、暂态稳定性、短路电流水平及运行经济性。现有研究大多根据投资成本、计及稳态约束条件进行单目标优化, 缺少对短路电流与系统稳定性的综合考虑。限流方案优化决策属于电网运行规划的研究范畴, 它是一个多目标、非线性、非连续的混合整数

规划问题, 其中一些约束条件涉及微分方程, 难以描述为完整、统一的优化模型, 一般将该优化过程分为方案形成和方案评价 2 个阶段^[10]。

考虑限制短路电流与提高系统稳定性的相互制约关系, 本文提出了一种基于灵敏度分析的限流方案优化决策方法。通过分析各种限流措施对阻抗矩阵元素的影响, 推导各种限流措施与超标站点自阻抗的灵敏度关系, 提出一种考虑限流措施灵敏度的支路筛选策略; 以总投资成本最小和短路容量裕度最小为目标, 应用自适应混合粒子群优化(PSO)算法寻找限流方案集; 基于层次分析法建立综合评价模型, 应用模糊综合评价算法对限流方案集进行系统性定量决策。实际系统仿真结果表明该方法能够快速获得优化决策方案。

1 限流措施灵敏度分析

三相短路一般是电力系统最严重的短路故障, 通常被用来确定断路器的额定遮断容量。三相短路电流大小与节点的自阻抗成反比, 以下推导限流措施与超标站点自阻抗的灵敏度关系。

假设原网络形成 h 阶阻抗矩阵 Z_h , 当在该网络节点 i 与 j 之间追加阻抗为 z_{ij} 的支路时, 阻抗矩阵变为 Z'_h 。根据形成网络阻抗矩阵的支路追加法, 可得:

$$Z'_{kl} = Z_{kl} - \frac{(Z_{ki} - Z_{kj})(Z_{li} - Z_{lj})}{Z_{ii} + Z_{jj} - 2Z_{ij} + z_{ij}} \quad (1)$$

其中, $k, l = 1, 2, \dots, h$; h 为网络节点数; Z'_{kl} 为阻抗矩阵 Z'_h 中第 k 行第 l 列元素; $Z_{kl}, Z_{ii}, Z_{jj}, Z_{ij}, Z_{ki}, Z_{kj}, Z_{li}, Z_{lj}$ 为阻抗矩阵 Z_h 中相应位置的元素, 近似为纯感性电抗。

1.1 开断线路

开断线路相当于在节点 i 与 j 之间追加阻抗为 $z_{ij} = -z$ 的支路, 如图 1 所示。

如果将母联开关所连母线视为独立节点, 则母线

收稿日期: 2014-06-02; 修回日期: 2015-03-06

基金项目: 国家电网公司大电网规划与运行控制技术深化研究重大专项(SGCC-MPLG020-2012)

Project supported by State Grid Corporation of China, Major Projects on Planning and Operation Control of Large Scale Grid(SGCC-MPLG020-2012)

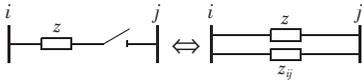


图 1 开断线路等值模拟

Fig.1 Equivalent model of open line

分裂等同于开断线路。定义开断线路对超标站点自阻抗的灵敏度如式(2)所示。

$$\lambda_k = \frac{Z'_{kk} - Z_{kk}}{Z_{kk}} = \frac{\Delta Z_{kk}^{(1)}}{Z_{kk}} \quad (2)$$

$$\Delta Z_{kk}^{(1)} = -\frac{(Z_{ki} - Z_{kj})^2}{Z_{ii} + Z_{jj} - 2Z_{ij} - z}$$

其中, Z_{kk} 和 Z'_{kk} 分别为开断线路前、后超标站点 k 的自阻抗。

λ_k 越大,表明开断该线路对超标站点 k 的限流效果越好。考虑开断某一线路对网络中所有超标站点的限流效果,定义加权灵敏度为:

$$\lambda = \sum_{k=1}^{N_e} \omega_k \lambda_k, \quad \omega_k = \left(\frac{I_k}{I_k^{\max}} \right)^2 \quad (3)$$

其中, N_e 为超标站点个数; ω_k 为权重因子; I_k 和 I_k^{\max} 分别为超标站点 k 的三相短路电流和断路器最大遮断电流。

1.2 加装限流电抗器

加装限流电抗器相当于在节点 i 与 j 之间追加阻抗为 $z_{ij} = -(z^2 + z\Delta z) / \Delta z$ 的支路,如图 2 所示。

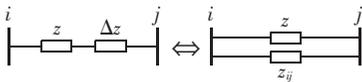


图 2 加装限流电抗器等值模拟

Fig.2 Equivalent model of line with current limiting reactor

理想的故障限流器对电网的正常运行没有影响,在发生短路故障时能够迅速投入较大的限流电抗。因此,在考虑限流效果时,可以将故障限流器等同于限流电抗器来处理。定义加装限流电抗器对超标站点自阻抗的灵敏度为:

$$\gamma_k = \lim_{\Delta z \rightarrow 0} \frac{\Delta Z_{kk}^{(2)}}{\Delta z} = \left(\frac{Z_{ki} - Z_{kj}}{z} \right)^2 \quad (4)$$

$$\Delta Z_{kk}^{(2)} = -\frac{(Z_{ki} - Z_{kj})^2}{Z_{ii} + Z_{jj} - 2Z_{ij} - z^2 + z\Delta z}$$

γ_k 越大,表明在该支路上加装限流电抗器对超标站点 k 的限流效果越好。考虑在某支路上加装限流电抗器对网络中所有超标站点的限流效果,定义加权灵敏度为:

$$\gamma = \sum_{k=1}^{N_e} \omega_k \gamma_k, \quad \omega_k = \left(\frac{I_k}{I_k^{\max}} \right)^2 \quad (5)$$

由式(2)和式(4)可知,当 $\Delta z \rightarrow j \cdot +\infty$ 时,则有 $\Delta Z_{kk}^{(1)} = \Delta Z_{kk}^{(2)}$; 只要 $\Delta z > j \cdot 0$, 则有 $\Delta Z_{kk}^{(1)} > \Delta Z_{kk}^{(2)}$, 就同一支路而言,开断线路比加装限流电抗器的限流效果要好。

1.3 更换高阻抗变压器

更换高阻抗变压器可以看作在原变压器的基础上增加短路电压百分比,相当于追加具有相同变比、阻抗值为 $z_{ij} = -(z_T^2 + z_T \Delta z_T) / \Delta z_T$ 的变压器支路,如图 3 所示。

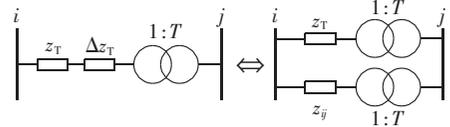


图 3 更换高阻抗变压器等值模拟

Fig.3 Equivalent model of line with high-impedance transformer

当追加变压器支路时,式(1)改写为:

$$Z'_{kk} = Z_{kk} - \frac{(TZ_{ki} - Z_{kj})(TZ_{ki} - Z_{kj})}{T^2 Z_{ii} + Z_{jj} - 2TZ_{ij} + T^2 z_{ij}} \quad (6)$$

定义增加变压器短路电压百分比对超标站点自阻抗的灵敏度为:

$$\delta_k = \lim_{\Delta z_T \rightarrow 0} \frac{\Delta Z_{kk}^{(3)}}{\Delta z_T} = \left(\frac{TZ_{ki} - Z_{kj}}{Tz_T} \right)^2 \quad (7)$$

$$\Delta Z_{kk}^{(3)} = -\frac{(TZ_{ki} - Z_{kj})^2}{T^2 Z_{ii} + Z_{jj} - 2TZ_{ij} - T^2 z_T^2 + z_T \Delta z_T}$$

δ_k 越大,表明在该变压器支路更换高阻抗变压器对超标站点 k 的限流效果越好。考虑在某变压器支路更换高阻抗变压器对所有超标站点的限流效果,定义加权灵敏度为:

$$\delta = \sum_{k=1}^{N_e} \omega_k \delta_k, \quad \omega_k = \left(\frac{I_k}{I_k^{\max}} \right)^2 \quad (8)$$

1.4 支路筛选策略

为了缩小决策变量的搜索范围,避免陷入维数灾难,本文提出一种考虑限流措施灵敏度的支路筛选策略。由前文所述,对于同一线路,根据开断线路定义的灵敏度 λ ,反映的是当 $\Delta z \rightarrow j \cdot +\infty$ 时该线路的限流特性;根据加装限流电抗器定义的灵敏度 γ ,反映的是当 $\Delta z \rightarrow j \cdot 0$ 时该线路的限流特性。因此,取 2 种灵敏度的平均值,作为该线路的综合限流措施灵敏度:

$$\mu_l = \frac{\lambda_l^* + \gamma_l^*}{2}, \quad \lambda_l^* = \frac{\lambda_l - \lambda^{\min}}{\lambda^{\max} - \lambda^{\min}}, \quad \gamma_l^* = \frac{\gamma_l - \gamma^{\min}}{\gamma^{\max} - \gamma^{\min}} \quad (9)$$

其中, μ_l 为线路 l 的综合限流措施灵敏度; λ_l^* 和 λ_l 分别为线路 l 根据开断线路定义的灵敏度的归一值和实际值; γ_l^* 和 γ_l 分别为线路 l 根据加装限流电抗器定义的灵敏度的归一值和实际值; λ^{\min} 和 λ^{\max} 分别为根据开断线路定义的灵敏度的最小值和最大值; γ^{\min} 和 γ^{\max} 分别为根据加装限流电抗器定义的灵敏度的最小值和最大值。

支路筛选策略为:对网络中的所有线路,按照线路综合限流措施灵敏度 μ_l 降序排列,选择前 N_l 回路加入降维决策变量集;而对所有变压器支路,按照灵敏度 δ 降序排列,选择前 N_T 回变压器支路加入降

维决策变量集。

2 限流方案的形成方法

2.1 数学模型

限流方案优化的决策变量包括两部分:一部分是表示限流措施是否投入的控制变量 u_s ,另一部分是表示限流设备的具体参数变量 z_s 。限流方案优化既要考虑限制短路电流的成本及效果,又要尽量保持网络联系的紧密程度。

目标函数 f_1 衡量限流方案的经济性,具体定义为限流措施的总投资成本:

$$\min f_1 = \sum_{s=1}^{N_s} u_s (k_{as} + k_{ls} z_s) \quad (10)$$

其中, N_s 为所投入的限流措施总数; $u_s=1$ 表示采用限流措施 s , $u_s=0$ 表示不采用限流措施 s ; k_{as} 、 k_{ls} 为限流措施 s 的投资成本系数^[6]; z_s 为限流电抗器的电抗值或高阻抗变压器的短路电压百分比增量。

目标函数 f_2 衡量网络联系的紧密程度,具体定义为系统中所有节点的短路容量裕度:

$$\min f_2 = \sum_{k=1}^{N_b} \frac{S_{ck}^{\max} - S_{ck}}{S_{ck}} \quad (11)$$

其中, N_b 为节点总数; S_{ck}^{\max} 为节点 k 的短路容量控制上限,其值小于断路器最大遮断容量; S_{ck} 为采用限流措施后节点 k 的短路容量。

短路容量能够反映系统各节点的抗扰动能力及网络关联强度^[11],本文考虑采用限流措施尽量不破坏网络联系的完整性和紧密性,因此取短路容量裕度最小为目标。同时,为兼顾限流效果,可根据工程经验指定短路电流控制上限。

除上述目标函数外,限流方案优化需要满足的约束条件包括系统没有孤立节点,潮流有功、无功平衡,短路电流、支路功率、节点电压、限流设备参数不超限,具体如式(12)所示。

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{没有孤立节点} \\ P_i = U_i \sum_{j=1}^{N_b} U_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) \quad i=1, 2, \dots, N_b \\ Q_i = U_i \sum_{j=1}^{N_b} U_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}) \quad i=1, 2, \dots, N_b \\ I_k \leq I_k^{\max} \quad k=1, 2, \dots, N_b \\ S_l \leq S_l^{\max} \quad l=1, 2, \dots, N_l \\ U_k^{\min} \leq U_k \leq U_k^{\max} \quad k=1, 2, \dots, N_b \\ z_s^{\min} \leq z_s \leq z_s^{\max} \end{array} \right. \quad (12)$$

其中, I_k^{\max} 为节点 k 的短路电流控制上限; N_l 为支路总数; S_l^{\max} 为支路 l 的功率上限; U_k^{\max} 、 U_k^{\min} 分别为节点 k 的电压上、下限; z_s^{\max} 、 z_s^{\min} 分别为限流设备的参数变量取值上、下限。

2.2 模型求解算法

针对上述非凸、非线性、非连续优化问题,采用

自适应混合 PSO 算法求解该模型。首先在传统 PSO 算法的基础上引入遗传的思想,将粒子更新过程用交叉和变异操作来代替^[12];其次结合文献[13]在连续优化过程中调整参数的思想,通过分析个体极值的优劣自动调整交叉和变异参数,形成求解离散优化问题的自适应策略。

对种群中的粒子进行整数编码,每个粒子分为 2 个子串,如图 4 所示。

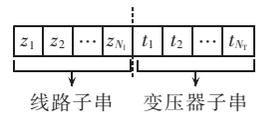


图 4 粒子编码结构
Fig.4 Structure of particle code

a. 线路子串由 N_l 位组成, z_i 是第 i 位的值,它可以是 $(0, [z_i^{\min}, z_i^{\max}], z_i^{\max} + 1)$ 中的任意整数。若 z_i 取 0, 表示在线路 i 上不采用限流措施;若 z_i 取 $z_i^{\max} + 1$, 表示将线路 i 开断;若 z_i 取 $[z_i^{\min}, z_i^{\max}]$ 中的任意整数,表示在线路 i 上加装电抗值为 z_i 的限流电抗器。

b. 变压器子串由 N_T 位组成, t_i 是第 i 位的值,它可以是 $(0, [t_i^{\min}, t_i^{\max}])$ 中的任意整数。若 t_i 取 0, 表示在变压器支路 i 上不采用限流措施;若 t_i 取 $[t_i^{\min}, t_i^{\max}]$ 中的任意整数,表示在变压器支路 i 上增加 t_i 的短路电压百分比增量。

将式(12)的约束条件以罚值形式计入目标函数中,构造如下适应值函数:

$$f = \omega_1 f_1 + \omega_2 f_2 + M \quad (13)$$

其中, ω_1 、 ω_2 为权重系数; M 为罚值,若式(12)的所有约束条件均得到满足,则 $M=0$,若存在某一约束条件未得到满足,则 M 为一充分大的正值。

基于上述分析,给出限流方案形成方法实现流程如图 5 所示,图中 N_{set} 为设定的限流方案最大个数。全维决策变量集为原始网络中的所有线路和变压器支路,降维决策变量集为通过灵敏度排序后选择出的线路和变压器支路。

3 限流方案的评价模型

影响限流方案评价的因素很多,如果不加区分全部放入评价模型,将使评价过程复杂繁琐,权重系数取值困难,可能干扰评价结果的准确性。比较有效的方法是建立一种能够反映主要矛盾的限流方案评价模型。限制短路电流与提高系统稳定性是影响限流方案评价的一对主要矛盾。本文应用层次分析法建立了一种能够反映这对矛盾的综合评价模型,如图 6 所示。

3.1 评价准则

准则 1: 静态安全性。静态安全分析假设系统从事故前的稳态直接转移到事故后的另一个稳态,不考虑暂态过程,用于检验事故后各种约束条件是否得到满足。静态安全性可以用系统发生 $N-1$ 或 $N-2$ 预想事故后新的运行工况下,各种约束条件是否得

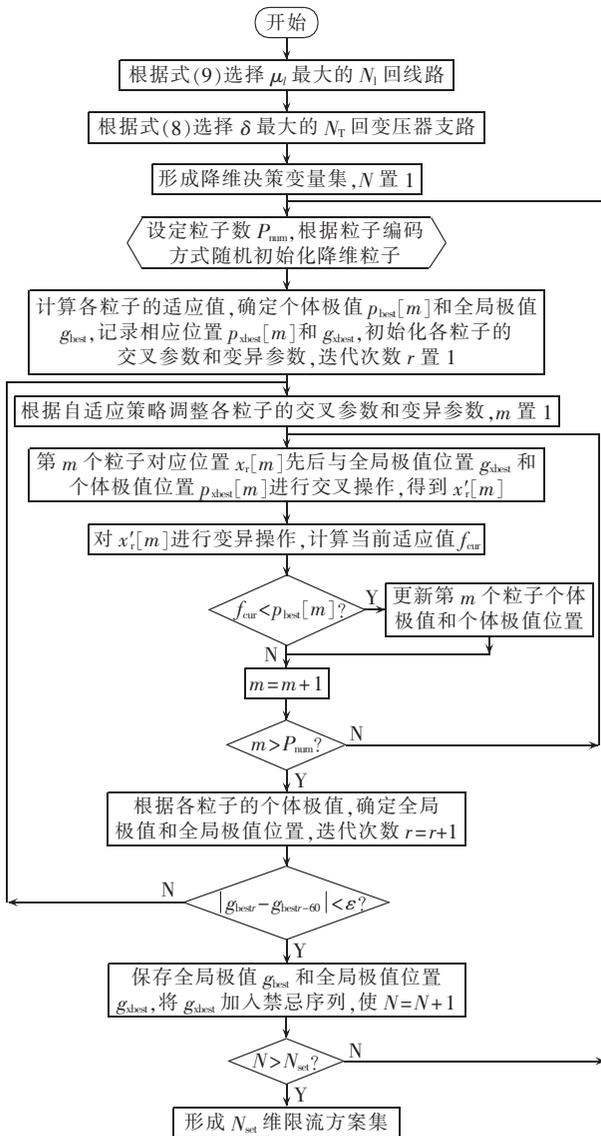


图 5 方案形成方法流程图

Fig.5 Flowchart of strategy set generation

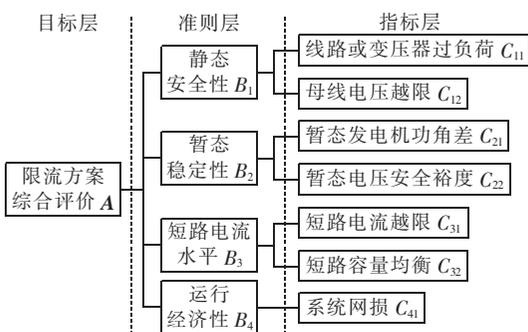


图 6 综合评价模型层次结构图

Fig.6 Hierarchy structure of comprehensive evaluation model 到满足来表征,即线路或变压器是否过负荷、母线电压是否越限。

准则 2:暂态稳定性。动态安全分析研究系统从事故前的稳态过渡到事故后的另一个稳态的暂态过程中保持稳定的能力。功角稳定性主要关心电气距离较远的发电机之间的关系,可以用暂态发电机功

角差衡量;电压稳定性主要关心负荷区域与负荷特性,可以用暂态电压安全裕度衡量。

准则 3:短路电流。一方面,考虑限制系统各电厂的短路电流,防止其超过断路器等电气设备的额定遮断容量,可以用短路电流越限表征。另一方面,基于电源分层分散接入电网的原则,考虑减小各节点的短路容量差异,使各节点的抗扰动能力尽量均衡,可以用短路容量均衡表征。

准则 4:运行经济性。本文采用系统网损作为衡量运行经济性的标准。

3.2 评价指标

指标 C_{11} :线路或变压器过负荷指标。

$$C_{11} = \sum_{m \in \varphi} \left[\sum_{l \in \alpha} \omega_{P,l} \left(\frac{S_l}{S_l^{\max}} \right)^{2n} \right]_m \quad (14)$$

其中, φ 为预想事故集合; α 为线路或变压器支路集合; $\omega_{P,l}$ 为权重因子; S_l 为支路功率; S_l^{\max} 为支路功率上限; n 为正整数。

指标 C_{12} :母线电压越限指标。

$$C_{12} = \sum_{m \in \varphi} \left[\sum_{i \in \beta} \omega_{U,i} \left(\frac{U_i - U_i^{\text{sp}}}{\Delta U_i^{\text{lim}}} \right)^{2n} \right]_m \quad (15)$$

$$U_i^{\text{sp}} = \frac{U_i^{\max} + U_i^{\min}}{2} \quad (16)$$

$$\Delta U_i^{\text{lim}} = \frac{U_i^{\max} - U_i^{\min}}{2} \quad (17)$$

其中, β 为母线集合; $\omega_{U,i}$ 为权重因子; U_i 为母线电压幅值; U_i^{\max} 、 U_i^{\min} 分别为母线电压幅值上、下限。

指标 C_{21} :暂态发电机功角差指标。

$$C_{21} = \sum_{m \in \varphi} \omega_{\theta,m} (\max |\theta_i - \theta_j|)_m \quad (18)$$

其中, $\omega_{\theta,m}$ 为权重因子; θ_i 和 θ_j 分别为发生预想事故的暂态过程中任意 2 台发电机的功角。

指标 C_{22} :暂态电压安全裕度指标。

$$C_{22} = \sum_{m \in \varphi} \left(\sum_{k \in \eta} \omega_{TV,k} \varepsilon_k \right)_m \quad (19)$$

其中, η 为监视母线电压曲线集合; $\omega_{TV,k}$ 为权重因子; ε_k 为母线电压曲线的暂态电压跌落可接受裕度(TVDA)^[14]。

指标 C_{31} :短路电流越限指标。

$$C_{31} = \sum_{i \in \beta} \omega_{I,i} \left(\frac{I_i}{I_i^{\max}} \right)^{2n} \quad (20)$$

其中, $\omega_{I,i}$ 为权重因子; I_i 为母线实际短路电流; I_i^{\max} 为母线断路器最大遮断电流。

指标 C_{32} :短路容量均衡指标。

$$C_{32} = \sqrt{\sum_{i \in \beta} (s_{cci} - s_{ccave})^2} \quad (21)$$

其中, s_{cci} 为母线短路容量; s_{ccave} 为所有母线的短路容量平均值。

指标 C_{41} :系统网损指标。

$$C_{41} = \sum P_{\text{gen}} - \sum P_{\text{load}} \quad (22)$$

上述各式中,权重因子的设置取决于相应评价指

表 1 综合限流措施灵敏度排序

Table 1 Ranked line sensitivity to comprehensive current limiting measure

序号	线路名称	λ	序号	线路名称	λ
1	闻韶—美里湖	0.8967	11	姚家—文昌	0.7077
2	姚家—兴隆	0.8751	12	济南—大正	0.6809
3	闻韶—清河	0.8511	13	历城—韩仓	0.6643
4	许寺—清河	0.8245	14	历城—邢村	0.6309
5	邢村—姚家 1	0.8008	15	黄台厂—历城 1	0.6111
6	黄台厂—济南	0.7821	16	黄台厂—历城 2	0.6111
7	水电—美里湖 1	0.7531	17	水电—东门	0.5982
8	水电—美里湖 2	0.7531	18	黄台厂—水电 1	0.5712
9	邢村—姚家 2	0.7245	19	黄台厂—水电 2	0.5712
10	黄台厂—飞鹰	0.7122	20	东门—彩虹	0.5305

表 2 仿真计算统计结果比较

Table 2 Comparison of statistical results among different calculation conditions

计算条件	平均收敛次数	平均收敛值
自适应 PSO 算法+降维粒子	94.8	0.1955
基本 PSO 算法+降维粒子	178.9	0.2051
自适应 PSO 算法+全维粒子	171.2	0.4452
基本 PSO 算法+全维粒子	267.1	0.5305

采用降维粒子时,2种算法的优化结果差别不大,自适应 PSO 算法具有更快的收敛速度;采用全维粒子时,2种算法的优化结果容易陷入局部早熟收敛,自适应 PSO 算法具有较好的收敛值。

采用自适应 PSO 算法和降维粒子求解优化模型,不同权重系数下优化结果比较如表 3 所示。当总投资成本项权重较大时,限流优化方案为开断线路的组合;当短路容量裕度项权重较大时,加装限流电抗器和更换高阻抗变压器用来组成限流优化方案。这 2 项互相矛盾是由限流措施的特性决定的,开断线路是限流效果最好、投资成本最低的限流措施,但是会明显降低网络联系的紧密程度;加装限流电抗器和更换高阻抗变压器具有较开断线路更平滑的限流效果,能够在限流的同时尽量保持网络联系的紧密程度,但是其投资成本较大。以往方法大多关注限流措施的经济性,只会得到方案 1;而本文方法通过对目标函数 f_1 和 f_2 赋予不同的权重值,能够得到方案 1、

表 3 不同权重系数下优化结果比较

Table 3 Comparison of optimization results among different weight coefficients

方案	ω_1	ω_2	限流措施	短路电流/kA	
				济南站	黄台厂
1	0.9	0.1	断开许寺—清河线, 断开邢村—姚家双线	45.77	44.31
2	0.5	0.5	断开黄台厂—济南线, 断开邢村—姚家 1 线, 长清站 2 号主变阻抗+3%	46.95	45.97
3	0.1	0.9	断开许寺—清河线, 黄台厂—飞鹰线+8 Ω , 济南—大正线+10 Ω , 闻韶站 2 号主变阻抗+3%	47.01	46.55

方案 2、方案 3,从而为决策者提供更全面、更丰富的限流方案集合。

取权重系数 ω_1 和 ω_2 为 0.5,将每一次计算得到的最优粒子保存并加入禁忌序列,避免最优粒子重复出现,限流方案集合如表 4 所示。

表 4 不同的限制短路电流方案

Table 4 Different short circuit current limiting strategies

方案	限流措施	短路电流/kA		适应值
		济南站	黄台厂	
1	断开黄台厂—济南线, 断开邢村—姚家 1 线, 长清站 2 号主变阻抗+3%	46.95	45.97	0.1721
2	断开邢村—姚家双线, 长清站 2 号主变阻抗+3%	46.48	45.39	0.1799
3	断开许寺—清河线, 断开邢村—姚家双线	45.77	44.31	0.1821
4	断开许寺—清河线, 断开黄台厂—济南线, 闻韶站 2 号主变阻抗+4%	46.01	44.77	0.1842

对以上 4 种限流方案分别进行潮流计算、暂稳计算和短路计算,评价指标计算结果如表 5 所示。

表 5 4 种限流方案的评价指标计算结果

Table 5 Calculated evaluation indices for 4 strategies

方案	C_{11}	C_{12}	C_{21}	C_{22}	C_{31}	C_{32}	C_{41}
1	153.64	688.33	23.98	42.29	18.78	32.11	958.14
2	185.00	1053.55	24.12	43.56	17.21	30.03	957.53
3	152.31	907.67	25.25	43.10	15.10	34.12	957.10
4	167.31	1060.58	25.78	45.26	13.80	33.45	958.17

表中, C_{22} 为效益型指标,数值越大越好; C_{11} 、 C_{12} 、 C_{21} 、 C_{31} 、 C_{32} 和 C_{41} 为成本型指标,数值越小越好。经综合评价,4 种限流方案的优先度分别为 0.4309、0.4058、0.4812 和 0.4282。

由上可知,就限制短路电流水平能力而言,方案的优劣顺序依次为 1、2、3、4;在综合考虑了静态安全性、暂态稳定性、短路电流和运行经济性等多项指标后,方案的优劣顺序为 3、1、4、2。方案 3 为综合评价最好的方案。

根据工程经验,断开许寺—清河线、邢村—姚家双线可以实现济南地区 500 kV/220 kV 电磁环网开环运行,从而有效降低短路电流,使系统潮流分布更加合理,调度管理更加方便。

5 结论

本文采用先方案形成、后方案评价的思路,提出了一种基于灵敏度分析的限流方案优化决策方法。实际系统仿真结果表明,所提出的限流措施筛选策略能够有效缩小决策变量搜索范围,避免陷入维数灾;应用自适应混合 PSO 算法,结合限流措施筛选策略,在保证全局收敛性的前提下有效地提高了算法收敛速度,能够快速寻找限流方案集;综合评价体

系考虑了静态安全性、暂态稳定性、短路电流水平及运行经济性的影响,能够对限流方案集进行系统性定量决策。

参考文献:

- [1] NAGATA M, TANAKA K, TANIGUCHI H. FCL location selection in large scale power system[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2001, 11(1): 2489-2494.
- [2] 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 Zhinong, 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.
- [3] TENG J H, LU C N. Optimum fault current limiter placement with search space reduction technique[J]. IET Generation, Transmission and Distribution, 2010, 4(4): 485-494.
- [4] 蒋平,茅嘉毅,胡伟. 考虑暂态稳定约束的串联电抗器优化配置[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(11): 38-42, 55.
JIANG Ping, MAO Jiayi, HU Wei. Optimal allocation of series reactors with transient stability constraint[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(11): 38-42, 55.
- [5] 张永康,蔡泽祥,李爱民,等. 限制 500 kV 电网短路电流的网架调整优化算法[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(22): 34-39.
ZHANG Yongkang, CAI Zexiang, LI Aimin, et al. An optimization algorithm for short-circuit current limitation of 500 kV power grid by adjusting power grid configuration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(22): 34-39.
- [6] 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.
- [7] 叶承晋,黄民翔,陈丽莉,等. 基于并行非支配排序遗传算法的限流措施多目标优化[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(2): 49-55.
YE Chengjin, HUANG Minxiang, CHEN Lili, et al. Multi-objective current limiters configuration based on parallel fast and elitist non-dominated sorting genetic algorithm-II[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(2): 49-55.
- [8] TADA Y, OKAMOTO H, KURITA A, et al. Analytical methods for determining a system configuration acceptable from viewpoints of both short circuit current and voltage stability[J]. Electrical Engineering in Japan, 1998, 124(3): 30-39.
- [9] 黄弘扬,徐政,林晞. 基于故障限流器的直流多馈入受端系统动态分区技术[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(19): 58-64.
HUANG Hongyang, XU Zheng, LIN Xi. Fault current limiters based dynamic segmentation technique for multi-infeed HVDC systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(19): 58-64.
- [10] 王锡凡. 电力系统优化规划[M]. 北京:水利电力出版社, 1990: 3.
- [11] 代飞,崔挺,徐箭,等. 基于综合灵敏度分析的电压校正控制[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(12): 15-20.
DAI Fei, CUI Ting, XU Jian, et al. Voltage correction control based on comprehensive sensitivity analysis[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(12): 15-20.
- [12] 高尚,杨静宇. 群智能算法及其应用[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2007: 85-87.
- [13] ZHANG W, LIU Y. Multi-objective reactive power and voltage control based on fuzzy optimization strategy and fuzzy adaptive particle swarm[J]. Electrical Power and Energy Systems, 2008, 30(9): 525-532.
- [14] 薛禹胜,徐泰山,刘兵,等. 暂态电压稳定性及电压跌落可接受性[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(14): 4-8.
XUE Yusheng, XU Taishan, LIU Bing, et al. Quantitative assessments for transient voltage security[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(14): 4-8.
- [15] 杨冬. 特高压输电网架结构优化与未来电网结构形态研究[D]. 济南:山东大学, 2013.
YANG Dong. Studies on structure optimization and concept design of UHV transmission backbone[D]. Ji'nan: Shandong University, 2013.
- [16] WOOD A J, WALLENBERG B F. Power generation, operation and control[M]. New York, USA: John Wiley & Sons Inc, 1996: 430.
- [17] 马丽叶,卢志刚,胡华伟. 基于区间数的城市配电网经济运行模糊综合评价[J]. 电工技术学报, 2012, 27(8): 163-171.
MA Liye, LU Zhigang, HU Huawei. A fuzzy comprehensive evaluation method for economic operation of urban distribution network based on interval number[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(8): 163-171.
- [18] 杨志超,张成龙,葛乐,等. 基于熵权法的绝缘子污闪状态模糊综合评价[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(4): 90-94.
YANG Zhichao, ZHANG Chenglong, GE Le, et al. Comprehensive fuzzy evaluation based on entropy weight method for insulator flashover pollution[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(4): 90-94.
- [19] 赖显光,管霖,王滔,等. 基于模糊综合评判的直流输电系统检修时机选择方法[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(9): 90-95.
LAI Yuguang, GUAN Lin, WANG Tao, et al. HVDC maintenance timing based on fuzzy comprehensive evaluation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(9): 90-95.
- [20] 钟慧荣,顾雪平. 基于模糊层次分析法的黑启动方案评估及灵敏度分析[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(16): 34-37, 49.
ZHONG Huirong, GU Xueping. Assessment of power system black-start schemes based on fuzzy analytic hierarchy process and its sensitivity analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(16): 34-37, 49.
- [21] 叶华,刘玉田,牛新生. 500 kV-220 kV 电磁环网开环方案模糊综合评价[J]. 电力自动化设备, 2006, 26(7): 1-5.
YE Hua, LIU Yutian, NIU Xinsheng. Fuzzy comprehensive evaluation of opening schemes for 500 kV-220 kV electromagnetic loop[J]. Electric Power Automation Equipment, 2006, 26(7): 1-5.

作者简介:



杨冬

杨冬(1984—),男,山东日照人,博士,主要研究方向为电力系统运行与控制(E-mail: yangdong_epri@163.com);

周勤勇(1977—),男,江苏苏州人,硕士,主要研究方向为电力系统规划(E-mail: qyzhou@epri.sgcc.com.cn);

刘玉田(1964—),男,山东青州人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为电力系统运行与控制(E-mail: liuyt@sdu.edu.cn)。

Short circuit current limiting strategy optimization based on sensitivity analysis

YANG Dong¹, ZHOU Qinyong², LIU Yutian³

(1. State Grid Shandong Electric Power Research Institute, Ji'nan 250003, China;

2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China;

3. Key Laboratory of Power System Intelligent Dispatch and Control of Ministry of Education, Shandong University, Ji'nan 250061, China)

Abstract: With the consideration of mutual restriction between short circuit current limiting and system stability improvement, a method of short circuit current limiting strategy optimization based on sensitivity analysis is proposed. The influence of current limiting measure on the impedance matrix element is analyzed and the sensitivity relationship between the current limiting measure and the self-impedance of node with over-current is derived, based on which, a branch selection strategy considering the sensitivity of current limiting measure is proposed. With the minimum total investment cost and the minimum short circuit capacity margin as the objectives, the adaptive hybrid particle swarm optimization algorithm is adopted to obtain the current limiting strategy set. A comprehensive evaluation model is established based on the analytic hierarchy process and the fuzzy comprehensive evaluation algorithm is applied to realize the systematic and quantitative decision-making for the current limiting set. The simulative results of a practical system show that the optimal current limiting strategy can be quickly obtained.

Key words: short circuit current limiting; short circuit currents; sensitivity analysis; particle swarm optimization algorithm; analytic hierarchy process; fuzzy comprehensive evaluation

(上接第 110 页 continued from page 110)

2009, 26(9): 40-42.

WU Jingying. A new low-voltage arc-fault circuit interrupter device[J]. Electrical Engineering Magazine, 2009, 26(9): 40-42.

作者简介:

王晓远(1962—),男,河北唐山人,教授,博士研究生导师,研究方向为电机电磁场的分析与计算、特殊电机与电器的



王晓远

设计与控制(E-mail: xywang62@tju.edu.cn);

高森(1989—),男,河北石家庄人,硕士研究生,研究方向为故障电弧检测及永磁同步电机(E-mail: aimbbsgm@gmail.com);

赵玉双(1988—),女,河北沧州人,硕士研究生,研究方向为高功率密度异步电机。

Characteristic analysis of low-voltage arc fault in resistive load conditions

WANG Xiaoyuan, GAO Miao, ZHAO Yushuang

(School of Electrical Engineering and Automation, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: A test platform of series arc faults is constructed and the line current is acquired in normal and series arc fault conditions for different resistive load powers. The time- and frequency-domain characteristics of the line currents acquired are analyzed, including rising rate, average, RMS, arc interval, odd/even harmonic factors and so on. The analytical results show that, the 2 to 6-order harmonic factors and their variation rates should be selected as the criteria of series arc fault detection.

Key words: electric arcs; electric breakers; resistive load; time domain analysis; frequency domain analysis; Fourier transforms; harmonic factor; harmonic analysis