

一种新型故障限流器选址与配置优化方法

刘玲玲¹, 金国锋¹, 谭捷², 赵树野¹, 杨世峰¹, 王川³, 袁铁江²

(1. 国网内蒙古东部电力有限公司经济技术研究院, 内蒙古 呼和浩特 010020; 2. 大连理工大学电气工程学院, 辽宁 大连 116024;
3. 安徽电科技股份有限公司, 安徽 合肥 230088)

摘要:随着电网规模日趋扩大, 电网短路水平不断地攀升, 安装限流器是一种经济可行的限流措施。首先, 提出一种新型故障限流器选址优化与容量规划方法, 基于电网节点与支路的分布特性, 定义全网短路电流水平与开断裕度向量以及成本与电能损耗向量; 然后, 通过对所定义向量的赋范空间特性的研究, 定义一类有具体物理含义的超空间范数作为各向量的距离度量, 导出全网故障限流器配置方案的成本与增益指标, 并构建限流器选址与容量配置的目标函数; 最后, 考虑电网安全运行约束, 利用可变染色体长度的遗传算法进行求解, 并基于 IEEE 14 母线标准试验系统进行算例分析, 结果证明该方法的有效性与实用性。

关键词:故障限流器; 电力系统优化选址; 短路电流; 遗传算法; 赋范空间

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2021.05.020 中图分类号: TM56 文章编号: 1673-9140(2021)05-0161-08

A novel fault current limiter location and configuration optimization method

LIU Lingling¹, JIN Guofeng¹, TAN Jie², ZHAO Shuye¹,
YANG Shifeng¹, WANG Chuan³, YUAN Tiejia²

(1. State Grid East Inner Mongolia Economic Research Institute, Huhhot 010020, China; 2. School of Electrical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China; 3. Anhui Huidian Science Technology Co., Ltd., Hefei 230088, China)

Abstract: The scale of the power grid is expanding day by day, and the short-circuit short circuit level of the power grid is continuously rising. Installing the current limiter is an economically feasible current limiting measure. Under the background, this paper proposes a new fault current limiter location optimization and capacity planning method. Based on the distribution characteristics of the grid nodes and branches, the vector of short-circuit current level and breaking margin and the vector of the cost and power loss of the whole network are defined. By studying the normative space characteristics of the defined vectors, a class of hyperspace norms with specific physical meanings is defined as the measure of vector distance, the cost and gain indicators of the fault-limiting device configuration scheme of the whole network are derived, and the objective function of the current limiter location and capacity configuration is constructed. Considering the safe operation constraint of power grid, the paper uses a genetic algorithm with variable chromosome length to solve the problem. The example analysis is based on the IEEE 14 bus standard test system to verify the effectiveness and practicability of the proposed method.

Key words: fault current limiter; power system optimization location; short circuit current; genetic algorithm; norm space

收稿日期: 2018-12-31; 修回日期: 2019-04-08

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFB0903500); 国家电网公司科技项目(SGTYHT/17-JS-199)

通信作者: 谭捷(1995-), 男, 硕士研究生, 主要从事电力系统仿真、大规模新能源并网、氢储能研究; E-mail: jie.tan@mail.dlut.edu.cn.

电力系统故障限流器(fault current limiter, FCL)在系统正常运行状态下表现为零阻抗或微阻抗,其不改变电网运行参数,并对系统正常运行无不利影响^[1]。在系统发生短路故障时,FCL先于继电保护装置动作,迅速增大系统阻抗和限制短路电流大小^[2]。因此,在电力系统中装设FCL是一种有效限制短路电流的技术手段。鉴于限流器空间占用、制造及安装维护成本,经济型限流器的工程实际应用要求需通过优化限流器的安装位置,以尽可能少的限流器数量以及限流电抗大小来减低全网短路电流水平,提高断路器的开断裕度,确保断路器可靠切断故障回路,保证系统安全稳定运行。

针对FCL的优化配置问题,相关研究主要考虑限流效果及经济效益的优化。文献[3]对各种限流措施的限流效果和费用进行建模,利用混合整数规划方法对各类措施的投运与否和容量进行了优化配置,但是将FCL等效为一般限流电抗器,配置结果会提高系统稳定性冗余,且存在维度灾难。考虑到FCL故障触发投入的特性,文献[4]使用自阻抗灵敏度加权 and 衡量限流效果,采用追加单台FCL的方式降低计算复杂度,实现多台FCL选址和容量的优化配置,但是结果容易陷入局部最优;文献[5-7]根据FCL的启动条件以及支路灵敏度进行预选以缩小搜索空间,只考虑短路电流约束下的成本作为优化目标,而没有对总体限流效果进行评价。

在构建混合整数多目标规划模型的基础上,兼顾FCL全局限流效果及经济效益,后续相关研究致力于解决多目标决策权衡、局部最优、维度灾难等问题。其主要分为2种途径,对规划模型本身进行设计,搭建更为切实可行的优化模型^[4-9],文献[8]改进了灵敏度排序降维结果陷入局部最优的问题,将灵敏度较低的支路也纳入搜索空间,并将较大的电网进行局部等效处理,避免维度灾难的产生,然而支路选择以及网络简化程度把控存在一定主观性,缺乏科学判据;文献[9]考虑了FCL的动作特性,以各出口切断电流和吸收能量的和最小对FCL进行了多目标配置,但缺少两者权重设定的判据。另一种途径是设计新的快速寻优算法^[10-17],文献[10]根据FCL规划模型特性,在常规免疫算法基础上提出改进型的等成本倒位算子;文献[11]提出了一种基于

细菌觅食行为多目标分布估计算法的FCL优化配置方法;文献[12-14]根据FCL应用特点对粒子群编码方式进行了改进;文献[15]利用局部差分方法改进NSGA-2进行FCL优化配置;文献[16]使用模糊聚类控制进化过程的多目标烟花算法,实现FCL优化配置。

综上所述,启发式智能算法应用于FCL优化配置问题的研究较为成熟,改进空间不大。网络简化、支路筛选等变量降维技术囿于特定经验场景,缺少理论依据,多目标权重设定的直观性较大。此外,以上文献都是针对同一种技术原理的FCL进行配置,在实际工程实践中,快速开关式FCL可以通过对原有限流电抗器改装来装设^[9,18-19],也可以单独架设谐振式、超导式等其他技术原理的FCL,这将大幅度减少运行损耗和FCL装设成本,提升系统稳定性和经济效能,限流电抗器改装对FCL配置的影响还需进一步研究。

该文首先提出一种新型FCL选址优化与容量规划方法,构建以各节点或支路技术经济指标为分量的有限维向量空间;然后通过相应范数的引入描述全网整体技术经济性能,基于线性算子理论探讨不同原理FCL技术参数的影响机制;最后基于可染色体长度遗传算法对IEEE 14母线标准试验系统进行了算例分析,结果可为FCL优化目标构建及变量降维提供理论基础。

1 限流器优化选址与容量规划数学模型

1.1 FCL技术经济指标

当电力系统发生短路故障时,接入电网的限流器在继电保护装置动作前迅速将电抗投入运行,增大系统阻抗,限制各支路短路电流大小。从电力系统安全经济运行角度考虑,限流器接入电网的优化选址与容量规划的目标是消除短路电流水平超标的节点,尽可能减少限流器装设成本,提高全网断路器总体开断裕度。因此,故障限流器优化选址与容量规划的目标函数的搭建,首先需考虑如下几个问题:

- 1)故障限流器装设投资成本的定量描述;
- 2)全网限流器非故障运行时有功损耗的描述;

3) 全网短路电流水平指标的确定;

4) 全网断路器总体开断裕度的确定。

$$I_s^m = \frac{U_m}{Z_{mm}} \quad (7)$$

式中 U_m 为节点 m 处正常电压水平; Z_{mm} 为节点 m 的网络自阻抗。

定义全网短路电流开断裕度向量为

$$\mathbf{v}_{\text{slack}} = [\xi^1, \xi^2, \dots, \xi^n] \quad (8)$$

各分量为

$$\xi^m = \frac{\varphi^m I_s^m}{I_{\text{BRK}}^m} \quad (9)$$

式中 φ^m 为节点 m 的开断裕度系数; I_s^m 为节点 m 的短路电流水平; I_{BRK}^m 为节点 m 处母线断路器设定开断容量。

1.2 基于向量范数的 FCL 技术经济性能评价

1.2.1 向量范数的原理

设 \mathbf{X} 为一个向量空间, 其标量域为 K , 如果对于 $\forall \mathbf{x} \in \mathbf{X}, \exists \|\mathbf{x}\| \in \mathbb{R}$ 与之对应, 且满足以下 3 个性质。

1) 非负性。 $\|\mathbf{x}\| \geq 0, \|\mathbf{x}\| = 0 \Leftrightarrow \mathbf{x} = \mathbf{0}$;

2) 绝对齐性。 $\|a\mathbf{x}\| = |a| \|\mathbf{x}\| (\mathbf{x} \in \mathbf{X}, a \in K)$;

3) 三角不等式。 $\|\mathbf{x} + \mathbf{y}\| \leq \|\mathbf{x}\| + \|\mathbf{y}\| (\mathbf{x}, \mathbf{y} \in \mathbf{X})$, 则称 $\|\cdot\|$ 为 \mathbf{X} 上的范数, 称 $\|\mathbf{x}\|$ 为 \mathbf{x} 上的范数, 称 \mathbf{X} 按照范数 $\|\cdot\|$ 为赋范空间。

根据 FCL 的限流原理可以推论, FCL 安装成本总成本、有功损耗以及短路电流水平皆满足以上 3 个性质, 即都为各支路或节点技术经济指标的某个特定范数。根据线性算子理论, FCL 对全网技术经济性能的影响可用一个有界线性算子表示, 其作用大小可用一个上确界表征。算子范数为

$$\|T\| = \sup_{\mathbf{x} \neq \mathbf{0}} \frac{\|T\mathbf{x}\|}{\|\mathbf{x}\|} = \sup_{\|\mathbf{x}\|=1} \|T\mathbf{x}\| \quad (10)$$

式中 T 为 FCL 对全网技术经济性能影响的等效有界线性算子; \mathbf{x} 为特定技术经济指标向量。

1.2.2 安装成本评价指标

该文定义的安装成本向量的各分量代表该配置方案中各支路的安装成本, 因此, 可以利用绝对值范数导出全网限流器安装成本指标, 即

$$\eta_{\text{cost}}(V) = \|\mathbf{v}_{\text{cost}}(V)\|_1 \quad (11)$$

式中 $\mathbf{v}_{\text{cost}}(V)$ 为以方案 X 配置的安装成本向量; $\eta_{\text{cost}}(V)$ 为方案 V 的安装成本指标, 由全网安装成本向量的 1 范数导出。

$$\mathbf{v}_{\text{cost}} = [\lambda^1, \lambda^2, \dots, \lambda^l] \quad (1)$$

式中 l 为全网可配置故障限流器支路个数。各分量为

$$\lambda^k = \sum_{i=1}^p (Z_i^k \alpha^i + N_i^k \beta^i) + \sum_{j=1}^q M_j^k \delta^j \quad (2)$$

式中 Z_i^k 为支路 k 第 i 类改装 FCL 所加装阻抗的大小; N_i^k 为第 i 类改装 FCL 安装个数; M_j^k 为第 j 类一体式 FCL 安装个数; α^i 为第 i 类改装 FCL 单位阻抗成本权重系数; β^i 为第 i 类改装式 FCL 固定成本权重系数; δ^j 为第 j 类一体式故障限流器的成本权重系数, 各权重系数与该 FCL 设计参数和技术原理有关; p 、 q 为可供选择的改装式和一体式 FCL 的种类数量。

1.1.2 故障限流器累计有功损耗

定义全网限流器非故障运行时的支路累计有功损耗向量为

$$\mathbf{v}_{\text{power}} = [\epsilon^1, \epsilon^2, \dots, \epsilon^l] \quad (3)$$

各分量为

$$\epsilon^k = \int_T [I^k(t)]^2 dt \cdot (\Phi^k R^k + \sum_{i=1}^p N_i^k r^i + \sum_{j=1}^q M_j^k r^j) \quad (4)$$

式中 N_i^k 与 M_j^k 分别为改装式与一体式故障限流器各型号安装个数; r^i 与 r^j 分别为改装式与一体式各型号故障限流器正常运行时的欧姆电阻; R^k 为支路 k 上原限流电抗器的欧姆电阻大小, 其中 Φ^k 为

$$\Phi^k = \begin{cases} 0, & (\sum_{i=1}^p N_i^k + \sum_{j=1}^q M_j^k) > 0 \\ 1, & (\sum_{i=1}^p N_i^k + \sum_{j=1}^q M_j^k) = 0 \end{cases} \quad (5)$$

由式(5)可知, Φ^k 为 0-1 整型变量。当支路 k 改装限流器时, Φ^k 为 0, 否则为 1, 以此表示限流电抗器改装后对全网有功损耗的影响。

1.1.3 全网短路电流水平指标及断路器开断裕度

定义全网短路电流水平向量为

$$\mathbf{v}_{\text{short}} = [I_s^1, I_s^2, \dots, I_s^n] \quad (6)$$

式中 n 为全网汇流母线节点个数。各分量为

1.2.3 有功损耗增益评价指标

定义的全网累计有功损耗向量的各分量代表该配置方案中各支路累计损耗的电能,因此,利用绝对值范数导出全网限流器累计有功损耗增益指标,即

$$\eta_{\text{power}}(V) = \frac{\|\nu_{\text{power}}(0) - \nu_{\text{power}}(V)\|_1}{\|\nu_{\text{power}}(0)\|_1} \quad (12)$$

式中 $\nu(0)$ 为未配置限流器全网累计有功损耗向量; $\nu(V)$ 为以方案 V 配置限流器后全网累计有功损耗向量; $\eta(V)$ 为方案 V 的累计有功损耗增益指标,由全网累计有功损耗向量的 1 范数相对增益导出。

1.2.4 短路电流水平及开断裕度增益评价指标

全网短路电流水平向量与短路电流开断裕度向量的各分量代表该配置方案中各节点的最大短路电流水平以及开断裕度。开断裕度向量的 1 范数为各分量的线性叠加,并不能代表全网的总体开断水平,因此,利用内积诱导的范数作为方案 V 的全网短路电流水平增益指标及全网短路电流开断裕度增益指标,由其全网短路电流水平向量与短路电流开断裕度向量的 2 范数相对增益导出,即

$$\eta_{\text{short}}(V) = \frac{\|\mathbf{v}_{\text{short}}(0) - \mathbf{v}_{\text{short}}(V)\|_2}{\|\mathbf{v}_{\text{short}}(0)\|_2} \quad (13)$$

$$\eta_{\text{slack}}(V) = \frac{\|\mathbf{v}_{\text{slack}}(0) - \mathbf{v}_{\text{slack}}(V)\|_2}{\|\mathbf{v}_{\text{slack}}(0)\|_2} \quad (14)$$

式中 $\mathbf{v}_{\text{short}}(0)$ 、 $\mathbf{v}_{\text{slack}}(0)$ 分别为未配置限流器全网短路电流水平向量与短路电流开断裕度向量; $\mathbf{v}_{\text{short}}(V)$ 、 $\mathbf{v}_{\text{slack}}(V)$ 分别为以方案 V 配置限流器后全网短路电流水平向量与短路电流开断裕度向量。

1.3 限流器选址与规划的目标及约束条件

基于以上向量超空间范数指标,建立限流器选址与规划的目标函数为

$$\min f(X) = \frac{\eta_{\text{cost}}}{A\eta_{\text{power}} + B\eta_{\text{short}} + C\eta_{\text{slack}}} \quad (15)$$

式中 A 、 B 、 C 分别为各增益指标的权重系数,全网限流器综合增益指标皆由各范数导出并加权得到,其物理意义在于目标函数最小,使得配置限流器后全网单位增益成本最低。其中,优化变量为

$$X = [V^1, V^2, \dots, V^l] \quad (16)$$

优化变量的分量由 3 个向量组合而成,即

$$V^k = [N_1^k, \dots, N_p^k, Z_1^k, \dots, Z_p^k, M_1^k, \dots, M_q^k] \quad (17)$$

式中 k 为限流器支路号; p 为可选改装式故障限流器型号数量; q 为可选一体式故障限流器型号数量。因此,优化向量的维度为

$$D = l \cdot (2p + q) \quad (18)$$

在经济型限流器的优化选址与容量规划中,考虑到实际电网的运行情况和限流器的控制现状,问题需满足一定的约束条件以保证系统正常安全稳定运行,具体描述如下。

在工程实际应用当中,一条支路上最多允许安装 2 台限流器,可供选择以及最终装配的限流器型号种类也有限制,全网装配限流器的总台数也是有一定限制,即

$$\begin{cases} [N^k + M^k \in \{0, 1, 2\}, k = 1, 2, \dots, l \\ \sum_{k=1}^l N^k + M^k \leq P \end{cases} \quad (19)$$

式中 P 为全网限流器安装最大个数。

故障节点 m 的短路电流应限制在目标值以下,即

$$I_s^m \leq I_{\text{Tgt}}^m, m = 1, 2, \dots, n \quad (20)$$

式中 n 为全网汇流母线节点个数; I_s^m 为汇流母线节点 m 的短路电流; I_{Tgt}^m 为汇流母线节点 m 的短路电流限制预期目标值。

故障节点 m 短路时,其他非故障节点 j 的电压应保持在正常电压范围之内,即

$$U_j^{\text{down}} \leq U_j \leq U_j^{\text{up}} \quad (21)$$

2 基于 GA 的限流器选址与容量规划算法

限流器优化选址与容量规划即在全网选择若干可安装限流器的输电线路,通过优化选取限流器的安装位置,以尽可能少的限流器数量以及限流电抗大小,使得所有短路电流水平超标节点的恢复到额定水平,降低全网短路电流水平,提高断路器的开断裕度,确保断路器可靠切断故障回路,进而保证系统安全稳定运行。

因此,限流器优化选址与容量规划需要建立全网限流器优化效果指标,以可安装支路限流器台数、限流器容量规格作为问题的决策变量,以限流器安装后全网限流效果最优以及限流器安装成本最低为目标,寻求满足电力系统安全稳定运行约束的限流

方案。从决策变量的特征来看,该类问题是一个大型的非线性混合 0-1 规划问题,由于在实际工程应用当中,可选择的经济型限流器电抗值大小是有限的;从数学角度来看,该类问题可转化为一个整数规划问题。因此,该问题可由遗传算法快速有效求得全局最优解。

2.1 染色体编码

遗传算法的实现条件首先需要得到决策变量的基因型编码。限流器优化选址与容量规划方案中应由限流器容量大小及全网分布数据组成以表达完备的全网限流器配置方案。遗传算法的全局收敛速度以及精度受染色体编码方式影响很大,需根据具体规划问题以及电网实际情况选择合适的编码方式。规划方案中染色体的编码方式可分为固定长度染色体编码方式(fixed-length genome)与可变长度染色体(variable-length genome)编码方式。

由于变长度向量搜索域里没有显性的梯度向量定义,最优化理论多基于固定变量个数的前提假设,所以大多数最优化算法都使用固定长度的向量来表达一个解。标准遗传算法一般都设定固定长度的染色体,染色体编码的序列长度在迭代过程中保持不变,适用于决策变量的个数确定不变的情况。在限流器优化选址与容量规划问题当中,可以选取部分固定支路安装的限流器的型号及其台数作为决策变量来完整描述问题的解决方案。

固定长度染色体编码由各个限流器启动支路编码排列组成。单个支路的信息用数组 $\{C_k, N_k\}$ 表示,其中 C_k 为支路 k 安装的限流器型号的编号, N_k 为支路 k 限流器台数。在可安装限流器支路数为 b 的电网中,一个完整的限流器优化选址与容量规划方案个体由 b 组 $\{C_k, N_k\}$ 数组组成,即

$$V = \{C_1, N_1, C_2, N_2, \dots, C_b, N_b\} \quad (22)$$

8 条启动支路的方案个体的 0-1 编码示范如表 1 所示,固定染色体编码的长度与电网可启动限流器支路数、可选限流器型号数以及单条支路可安装限流器台数相关。

固定长度染色体的迭代过程简单,收敛速度较快,适合于决策变量数量较少、而变量取值较多的情况。染色体长度对收敛的精度及速度影响极大,不

表 1 固定长度染色体编码示范

Table 1 Fixed length chromosome coding demonstration

支路	型号	台数	支路编码
1	1	1	011
2	3	1	111
3	2	0	100
4	1	0	010
5	2	1	101
6	1	0	010
7	1	1	011
8	3	1	111
染色体编码			011111100010101010011111

合适的染色体长度会使得算法无法收敛或陷入局部最优。虽然遗传算法可以根据决策变量状态,在迭代过程中重新编码来调整染色体长度以改善算法性能,但是如果决策变量数量变化大,染色体长度变化范围也会很大,这会使得算法整体性能变得非常低效,甚至无法收敛。因此,若限流器可选择的安装支路数较多,而可提供的限流器型号种类较少,可以使用可变长度染色体编码方式。

可变长度染色体由具有完备定义的表现型变量组合而成,每个表现型变量都可以单独或者组合表达一个完备的解决方案。在遗传算法迭代过程中,染色体被复制、切断、拼接,各表现型也不断重新组合成新的染色体,从而得到最优解。

在限流器优化选址与容量规划模型中,可变长度染色体编码的各表现型可由各安装支路与各类限流器的组合方式表示。如表 2 所示,单个表现型为

$$M_{i \times j} = \{L_i, C_j\} \quad (23)$$

表 2 可变染色体表现型示范

Table 2 Variable length chromosome coding demonstration

支路	安装各型号限流器的支路表现型			
	1	2	3	4
1	M_1	M_9	M_{17}	M_{25}
2	M_2	M_{10}	M_{18}	M_{26}
3	M_3	M_{11}	M_{19}	M_{27}
4	M_4	M_{12}	M_{20}	M_{28}
5	M_5	M_{13}	M_{21}	M_{29}
6	M_6	M_{14}	M_{22}	M_{30}
7	M_7	M_{15}	M_{23}	M_{31}
8	M_8	M_{16}	M_{24}	M_{32}

式中 L_i 为支路 i 的编号; C_j 为限流器编号。在可安装限流器支路数为 b , 可供选择的限流器种类数为 c 的电网中, 共有 $b \times c$ 种表现型, 一个完整的限流器优化选址与容量规划方案个体由各表现型变量组合而成, 一个由 n 个表现型组成的个体为

$$X = \{M^{(1)}, M^{(2)}, \dots, M^{(n)}\} \quad (24)$$

2.2 遗传算法求解步骤

1)潮流计算。计算整个系统正常运行时的潮流, 得到节点电压幅值及相角、各支路的电流大小。

2)短路计算。形成节点导纳矩阵, 计算整个系统每个节点三相短路电流及对应各支路的电流大小。

3)短路电流超标节点和限流器启动支路选取。根据步骤 2 的短路运算结果, 选取电路电流裕量不足的节点 n 个及对应的限流器启动支路 b 条。

4)初始方案种群。基于以上步骤得到的节点和支路参数, 生成适应度函数和优化变量种群。

5)种群迭代。对种群进行交叉、变异、选择, 生成下一代种群, 达到设定精度, 得到最优个体。

3 算例分析

为验证所提出方法的有效性, 该文以 IEEE 14 母线标准试验系统作为算例进行测试。在算例里, 提供 4 种典型规格的一体式快速开关式经济型限流器作为配置对象, 其型号规格如表 3 所示。

不配置限流器时, 全网 14 条母线节点短路电流水平如表 4 所示, 其中母线 #2、4、5、9、10 这 5 条母线的短路电流水平严重超标, 超出了断路器的遮断能力。因此, 需要在全网装配故障限流器, 将短路电流水平限制在正常范围之内。

鉴于多目标增益的成本考量, 基于以上限流器配置与选址优化方法, 利用遗传算法对 4 种典型规

格的故障限流器进行优化配置, 并给出了最优方案, 具体方案如表 5 所示。

表 4 IEEE 14 母线标准试验系统短路电流水平

Table 4 IEEE 14 bus standard test system short-circuit current level p. u.

母线	电流水平		开断裕度			
	原短路	遮断	无配置	方案 1	方案 2	方案 3
1	22.73	25	0.91	0.84	0.69	0.65
2	31.59	30	1.05	0.83	0.67	0.67
3	24.37	25	0.97	0.80	0.62	0.52
4	32.34	30	1.08	0.72	0.79	0.73
5	30.60	30	1.02	0.69	0.71	0.80
6	24.59	25	0.98	0.67	0.76	0.94
7	23.86	25	0.95	0.87	0.85	0.66
8	14.43	20	0.72	0.72	0.71	0.45
9	26.41	25	1.05	1.03	0.85	0.68
10	20.93	20	1.04	1.03	0.81	0.57
11	17.48	20	0.87	0.73	0.85	0.56
12	16.51	20	0.83	0.54	0.80	0.82
13	19.53	20	0.98	0.73	0.95	0.96
14	15.17	20	0.76	0.75	0.75	0.50

表 5 故障限流器选址优化与容量配置方案

Table 5 Fault current limiter location optimization and capacity configuration scheme

方案	各型号限流器安装位置				指标		
	1	2	3	4	适应度	成本	增益
1	—	2-5	2-3	4-5	1.518	143	217
		6-13	#2	6-11			
		#7	#5	#4			
		#11	#13	#6			
		2-3		#12			
2	2-4	4-5	#2	1-2	1.403	164	230
	4-9	5-6	#4	#3			
	6-12	9-10	#10	#5			
	9-14	#6	#9	#9			
		#7		2-3			
3	1-2	3-4	4-5	#2	1.290	249	322
	2-5	6-11	10-11	#3			
	5-6	12-13	#1	#4			
			#7	#8			
			#9	#10			
				#11			
			#14				

表 3 典型规格故障限流器参数

Table 3 Typical specifications parameters of the fault current limiter

型号	阻抗/p.u.	权重系数	
		阻抗成本	固定成本
FCL-1	0.01	100	5
FCL-2	0.02	100	5
FCL-3	0.05	100	5
FCL-4	0.10	100	5

由表4的短路水平抑制效果可知,给出的3个优化方案对短路电流的限制作用都比较显著。方案1使得短路超标的节点数量从5个降到2个,尤其对短路电流超标严重的母线2与母线4做出了大幅度限制,而对其他节点短路电流水平也有很明显的改善。方案2由于增加了限流器的数量,已经完全消除短路电流超标的节点,全网短路电流水平均得到了显著改善。方案3装配的限流器数量过多,导致断路器的开断裕度过于充足,不够经济。

由表5的优化结果可知,方案1需要13台限流器,方案2需要17台限流器,方案3需要21台限流器。方案1对限流器数量配置较少,而限流器阻抗规格较大,适应度最大;方案2增加了限流器的数量,而对限流器阻抗规格要求有所降低;方案3的增益最大,而成本太高,适应度相对最低。

综合以上结果分析,利用该方法获得的限流器选址与配置方案可以达到限制全网总体短路电流水平的效果,并且可以得到经济性最优的结果。通过适当的设定权重系数获得优化方案,对其限流效果进行校验,最终可以得到经济与效益最优的配置方案。

4 结语

该文通过研究各种不同规格故障限流器接入电网后全网节点和支路参数的分布特性,定义了一类有具体物理含义的超空间范数指标,提出一种新型故障限流器选址优化与容量规划方法,并基于IEEE 14母线标准试验系统进行了测试。基于以上工作,得到如下结论。

1)利用该方法获得的限流器选址与配置方案可以达到限制全网总体短路电流水平的效果,并且可以得到经济性最优方案。

2)该方法定义的全网短路电流水平向量以及开断裕度向量的范数空间有具体的物理含义,导出的增益指标可以明确地度量全网总体电流水平。

3)该方法定义的目标函数建立在规范向量空间之上,因此,该方法降低了优化问题的复杂度,有利于优化算法的全局快速收敛。

该文提出的方法可以用于电力系统故障限流器的选址与配置,针对特定系统可以给出具体的故障限流器的型号选择、数量、阻抗大小以及安装位置,

具有一定工程参考价值,提出的优化选址方法的思路对电力系统其他设备的选型和配置具有一定启发意义。该文针对所定义向量空间的绝对值范数与欧式范数的物理含义进行了研究,对于其他种类范数的应用及背后物理含义有待后续研究的进一步探讨。

参考文献:

- [1] 艾绍贵,卢文华,张军,等.故障限流器在电力系统中应用研究综述[J].智慧电力,2019,47(10):14-21.
Ai Shaogui, LU Wenhua, ZHANG Jun, et al. Overview of fault current limiter application in power system[J]. Smart Power, 2019, 47(10): 14-21.
- [2] 金晶,殷勤.含电阻型超导限流器的南澳柔性直流系统故障特性分析[J].高压电器,2020,56(12):286-291.
JIN Jing, YIN Qin. Fault characteristics analysis of nan'ao flexible DC system with resistance superconducting current limiter[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(12): 286-291.
- [3] 夏仕伟,高晨祥,孙昱昊,等.含多种限流设备的柔性直流电网RT-LAB实时仿真建模[J].中国电力,2021,54(10):28-37.
XIA Shiwei, GAO Chenxiang, SUN Yuhao, et al. Real-Time modeling and simulation of flexible DC grid with various types of current limiting devices based on RT-LAB[J]. Electric Power, 2021, 54(10): 28-37.
- [4] 吴跃斌,祁天星,马涛,等.直流微电网故障限流特性分析[J].电网与清洁能源,2021,37(6):18-28+34.
WU Yuebin, QI Tianxing, MA Tao, et al. Analysis of fault current limiting characteristics of DC microgrid[J]. Power System and Clean Energy, 2021, 37(6): 18-28+34.
- [5] Teng J H, Lu C N. Optimum fault current limiter placement[C]//2007 International Conference on Intelligent Systems Applications to Power Systems, New York, USA: IEEE, 2007.
- [6] Teng J H, Lu C N. Optimum fault current limiter placement with search space reduction technique[J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2010, 4(4): 485-494.
- [7] 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. Op-

- timal allocation of superconducting fault current limiters based on sensitivity method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(22): 62-67.
- [8] Ngoc P T, Singh J G. Short circuit current level reduction in power system by optimal placement of fault current limiter[J]. International Transactions on Electrical Energy Systems, 2017, 27(12): e2457. 1-e2457. 16.
- [9] 陈艳霞, 吕立平, 李振兴, 等. 基于超导故障限流器的多级馈线电流保护新方案[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(24): 86-94.
CHEN Yanxia, LV Liping, et al. A new current protection scheme based on a superconducting fault current limiter for a multi-stage feeder[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(24): 86-94.
- [10] 宋文峰, 王倩, 李亚楠, 等. 基于双馈风电场低电压穿越的高温超导故障限流器建模及其参数优化[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(18): 99-107.
SONG Wenfeng, WANG Qian, LI Yanan, et al. Modeling and parameter optimization of HTS-FCL based on low voltage ride-through of doubly-fed wind farm[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(18): 99-107.
- [11] 郭登辉, 肖先勇. 基于BF行为的多目标分布估计算法优化配置SFCL[J]. 计算机应用研究, 2015, 32(5): 1345-1348.
GUO Denghui, XIAO Xianyong. Optimal allocation superconducting fault current limiters using multi-objective estimation of distribution algorithm based on bacterial foraging[J]. Application Research of Computers, 2015, 32(5): 1345-1348.
- [12] Habil H B, Azad-Farsani E, Abyaneh H A. A novel method for optimum fault current limiter placement using particle swarm optimization algorithm[J]. International Transactions on Electrical Energy Systems, 2015, 25(10): 2124-2132.
- [13] 应林志, 刘天琪, 王健全. 基于改造粒子群游的超高压故障限流器全局优化配置算法[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(2): 145-152.
YING Linzhi, LIU Tianqi, WANG Jianquan. Global optimization algorithm for fault current limiter configuration based on rearranged particle swarm optimization[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(2): 145-152.
- [14] Guarda F G K, Cardoso G, Da Silva C D L, et al. Fault current limiter placement to reduce recloser-fuse miscoordination in electric distribution systems with distributed generation using multiobjective particle swarm optimization[J]. IEEE Latin America Transactions, 2018, 16(7): 1914-1920.
- [15] 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 Huaihuo, 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.
- [16] Bahramian-Habil H, Azad-Farsani E, Vahidi B, et al. Fault current limiter placement using multi-objective firework algorithm[J]. Electric Power Components and Systems, 2017, 45(17): 1929-1940.
- [17] 何泽宇, 陈小月, 张杏子, 等. 区域电网电磁暂态等值及短路电流直流分量分析[J]. 电测与仪表, 2020, 57(20): 10-15.
HE Zeyu, CHEN Xiaoyue, ZHANG Xingzi, et al. Analysis of DC component of electromagnetic transient equivalent and short-circuit current in regional power grid[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(20): 10-15.
- [18] 冯倩倩, 张志丰, 高惠娟, 等. 基于分裂电抗器的开关转换型超导直流限流器[J]. 低温与超导, 2019, 47(9): 42-47.
FENG Qianqian, ZHANG Zhifeng, GAO Huijuan, et al. Research on switching-conversion DC SFCL based on a split reactor[J]. Cryogenics & Superconductivity, 2019, 47(9): 42-47.
- [19] 朱思丞, 赵成勇, 李承昱, 等. 含直流故障限流装置动作的直流电网故障电流计算方法[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(2): 469-478+644.
ZHU Sicheng, ZHAO Chengyong, LI Chengyu, et al. The DC fault current calculation of DC fault current limiter action included in bipolar MMC-HVDC grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(2): 469-478+644.