

考虑多节点条件约束的柔直系统故障限流器与断路器优化配置方法

魏伟¹,王盼宝¹,孙红梅¹,杨景刚²,苏伟²,王卫¹,徐殿国¹

(1. 哈尔滨工业大学 电气工程及自动化学院,黑龙江 哈尔滨 150001;

2. 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院,江苏 南京 211103)

摘要:首先建立了适用于多节点柔直系统的潮流及故障电流的数值计算优化模型,并在三端仿真系统中验证了所建模型的准确性。随后设置约束条件及目标函数,利用粒子群优化算法建立了多端柔直系统中故障限流器与断路器的优化配置数学模型。在3节点环网中进行优化求解,并将结果配置到仿真模型检验其限流效果,验证了所提优化配置方法的准确性。最后通过所提多目标粒子群优化算法对11节点柔直系统进行故障限流器与断路器配置的优化求解,并将所得结果与多目标遗传算法进行对比。结果表明,所提优化配置方法具有较高的普适性,可实现多节点柔直系统中故障限流器与断路器的低成本配置。

关键词:柔直系统;潮流计算;故障限流器;多目标粒子群优化;优化

中图分类号:TM 771

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202105017

0 引言

基于电压源型换流器(VSC)的柔直系统是解决新能源有效消纳及远距离电能输送问题的有效技术手段^[1]。中压柔直系统作为高压直流输电和低压直流输电的联接枢纽,用于接纳不同形式的分布式电源,在经济性与高效性方面具有显著优势^[2-3]。目前世界上已投运和在建的部分中高压输电工程技术已经十分成熟,柔直系统已经成为未来电网的必然发展趋势^[4-5]。

由于柔直系统具有低阻尼、小惯性的特点,短路故障发展十分迅速。当系统发生直流线路故障时,换流站直流侧并联电容瞬间放电,线路故障电流上升迅速,通常在故障后数毫秒内达到额定电流的数十倍^[6]。这对快速开断短路故障的能力提出了很高的要求。目前已有的方法是通过在直流电网中接入故障限流器(FCL)对故障电流的上升速度进行有效限制,以保证低容量的断路器(CB)可以实现故障电流的稳定开断^[7]。电感型FCL的成本主要由其对应的电感值大小决定,电感值较大的FCL对应的成本较高^[8]。决定CB成本的重要因素之一为CB容量,CB的成本随其容量增大而大幅增加。FCL电感值越大,限流效果越好,对应的CB总容量需求越小。这2种互相抑制的目标需要利用多目标优化算法进行优化配置,在保障电网稳定运行的情况下降低总

的配置成本是十分必要的。

目前,国内外学者已经对柔直系统故障保护开展了相应研究。文献[9]对已有FCL的类型及特点进行总结,并对一些经典拓扑进行了仿真分析。文献[10]提出在直流线路两端串入电感型FCL与CB配合的短路电流限制方法,并结合直流线路保护要求以及CB主要性能参数给出了限流电感值的理论计算方法。文献[11]同时考虑各直流电抗器电感值、FCL中电容电压和CB开断故障电流值之和,给出了直流电抗器和电容型FCL的优化配置方案。文献[12]同时考虑CB对最大开断电流的要求和FCL的使用成本,采用遗传算法完成了电容型FCL的优化配置。文献[13]考虑了超导FCL与高压CB同时使用的情境,给出了二者协调配合使用的较优方法。文献[14]对粒子群优化(PSO)算法进行了改进,并利用改进后的算法对超高压FCL进行了优化配置。文献[15]借助快速非支配排序遗传算法(NSGA-II)求解多个Pareto最优配置方案,并通过算例分析获得最优配置方案。文献[16]设置约束条件,采用“教与学”优化算法实现了对限流电抗器的全局优化配置。文献[7]以CB切断故障电流之和与FCL和CB中避雷器吸收能量之和最小为优化目标,采用Simplex算法实现优化配置。文献[17]提出在柔直系统中FCL的最佳配置位置,采用改进的NSGA-II实现了对CB和FCL的优化配置。

综上,文献[12]对电容型FCL进行了优化配置,文献[13]对超导型FCL进行了分析配置,但电容型与超导型FCL应用并不广泛;文献[14]的主要贡献在于对优化算法进行改进;文献[7,15-17]虽然综合考虑总成本进行优化,但其数学模型的准确性及适

收稿日期:2020-11-11;修回日期:2021-03-09

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFB0904700);国家电网公司科技项目(SGJS0000YJJS1801250)

Project supported by the National Key Research and Development Program of China(2018YFB0904700) and the Science and Technology Project of SGCC(SGJS0000YJJS1801250)

用环境十分有限。本文从优化模型的适用范围及模型的准确性角度出发,建立了适用于任一节点柔直系统的准确数学模型,对电感型FCL与CB配合开断故障的总成本进行优化。考虑到电感型FCL的电感值越大则其限流效果越好,而CB的遮蔽容量愈小则成本愈低。针对多节点柔直系统的稳态运行与暂态运行状态分别建立了准确的数学模型。利用网络的暂态运行数学模型对故障电流约束、节点电压约束进行计算,以安装FCL的总电感值最低及CB容量最小为优化目标函数,建立多端柔直系统中FCL与CB优化配置的数学模型。对三端环状网络进行优化配置并在仿真模型中对结果加以验证。构建了11节点柔直系统,并对其进行了优化配置。同时基于本文构建的数学模型,使用多目标PSO(MOPSO)算法求解,并与多目标遗传算法进行对比分析,验证了本文提出的考虑多节点条件约束的柔直系统FCL与CB优化配置方法具有较高的普适性,可实现多节点柔直系统中FCL与CB的低成本配置。

1 柔直系统稳态模型构建

1.1 环网拓扑及换流站控制方式

本文主要针对柔直系统中FCL及CB的安装提出优化配置方法。如图1所示的柔直系统中,多个VSC之间的协调控制是实现多端柔直系统中功率平衡和直流电压稳定的前提。本文采用主从控制,其控制方式影响节点分类,具体控制方式包括定直流电压控制、定直流电流控制、定有功功率控制、定无功功率控制以及定交流电压控制。

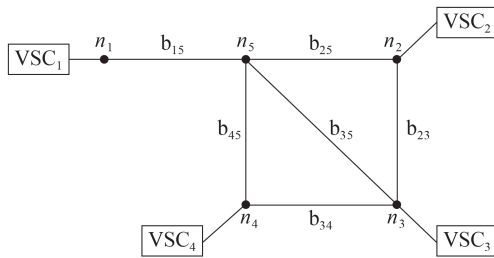


图1 柔直系统

Fig.1 Flexible DC system

1.2 节点分类及潮流计算

根据节点是否通过VSC互联可分为换流站节点、DC-PCC节点(直流电网中的公共连接点)2类。对于换流站节点,根据该节点VSC的控制方式可以将其分为2类:①P节点,该类型节点所连换流站控制直流侧功率 P_{dci} 为已知量;②V节点,该类型节点所连换流站控制直流侧电压 U_{dci} 为已知量。不同类型节点的特点及换流站直流侧控制方式如表1所示。

任取节点 $n_i(i=1,2,\dots,N)$,其潮流方程见式(1)。

表1 不同类型节点的特点及控制方式
Table 1 Characteristics and control modes of different types of node

节点类型	节点特点	换流站直流侧控制方式
P节点	P_{dci} 已知, U_{dci} 未知	定有功功率
V节点	P_{dci} 未知, U_{dci} 已知	定直流电压
DC-PCC节点	$P_{\text{dci}}=0$, U_{dci} 未知	

$$P_{\text{dci}} = U_{\text{dci}} I_{\text{dci}} = U_{\text{dci}} \sum_{j \in i} Y_{ij} U_{\text{dej}} \quad (1)$$

其中, I_{dci} 为节点 n_i 的直流电流; Y_{ij} 为线路 b_{ij} 的导纳; $j \in i$ 表示与节点 n_i 相连的所有节点 n_j 。

令 N 节点柔直系统中节点 n_N 为V节点,其余节点均为P节点。采用牛顿-拉夫逊法对式(1)进行迭代求解,其功率偏差方程为:

$$\begin{cases} \Delta P_{\text{dc}} = J_{\text{dc}} \Delta U_{\text{dc}} = \frac{\partial P_{\text{dc}}}{\partial U_{\text{dc}}} \Delta U_{\text{dc}} \\ \Delta P_{\text{dci}} = U_{\text{dci}} \sum_{j \in i} Y_{ij} U_{\text{dej}} - P_{\text{dci}} \end{cases} \quad (2)$$

其中, ΔP_{dc} 、 ΔU_{dc} 分别为直流功率 P_{dc} 偏差、直流电压 U_{dc} 偏差; ΔP_{dci} 为 P_{dci} 偏差; J_{dc} 为雅可比矩阵。雅可比矩阵中各元素的表达式为:

$$\frac{\partial P_{\text{dci}}}{\partial U_{\text{dej}}} = \begin{cases} Y_{ij} U_{\text{dci}} & j \neq i \\ \sum_{x=1, x \neq i}^N Y_{ix} U_{\text{dex}} + 2Y_{ii} U_{\text{dci}} & j = i \end{cases} \quad (3)$$

其中, Y_{ii} 为节点 n_i 的自导纳。

由式(2)可得电压修正量为:

$$\Delta U_{\text{dc}} = -J_{\text{dc}}^{-1} \Delta P_{\text{dc}} \quad (4)$$

则 $k+1$ 次迭代得到的电压值为:

$$U_{\text{dci}}^{(k+1)} = U_{\text{dci}}^{(k)} + \Delta U_{\text{dci}}^{(k)} \quad (5)$$

迭代直至节点电压修正量满足收敛判据式(6)。

$$\max \{ |\Delta U_{\text{dci}}^{(k)}| \} < \varepsilon \quad (6)$$

其中, $\max \{ \cdot \}$ 为最大值函数; ε 为收敛精度。

1.3 潮流模型验证

附录中图A1所示三端系统为一端送电两端用电系统,其系统参数见附录中表A1。基于MATLAB完成潮流计算程序的编写,交替迭代计算得到柔直系统的节点数据,并与仿真结果进行对比,结果如附录中表A2所示。由表可知,本文潮流计算程序所得计算结果与仿真模型所得结果之间存在0.004%~0.0806%的误差,误差很小。这说明所构建模型为准确的稳态模型。

2 故障后暂态模型构建

2.1 故障前、后网络矩阵生成规则

故障后暂态数值模型的准确建立是优化配置的基础。本文考虑限制柔直系统可能出现的最严重故

障——极间短路故障。忽略次要因素,将柔直系统等效为RLC放电网络,图2为三端环状柔直系统的等效电路。图中, n_1 、 n_2 、 n_3 为换流站节点; b_{12} 、 b_{13} 、 b_{23} 为支路; L_{cij} 为装设在VSC_i直流侧出口处的FCL电感值; R_{ij} 和 L_{ij} 分别为支路 b_{ij} 的线路等效电阻和电感; i_{ij} 为支路 b_{ij} 上的电流,正方向为 n_i 指向 n_j ; C_i 为VSC_i直流侧并联电容; i_{Ci} 为流过VSC_i直流侧电容的电流; u_{Ci} 为 C_i 上的直流电压,即节点电容电压。

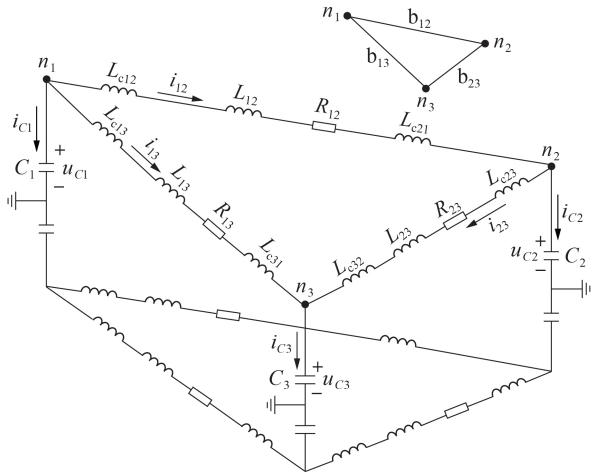


图2 三端环状柔直系统等效电路

Fig.2 Equivalent circuit of three-node ring flexible DC system

常规方法求解系统故障电流需列写各回路方程依次求解。工作步骤大量重复,在大电网中操作繁琐。因此本文提出一种规范式故障电流求解方法。

在含 N 个节点和 B 条支路的柔直系统中,对其节点进行编号。若 N 个节点中换流站节点有 p 个,编号为 $1\sim p$,则DC-PCC节点有 $N-p$ 个,编号为 $p+1\sim N$ 。支路电流矩阵 $\mathbf{i}_0$ 、节点电压矩阵 $\mathbf{u}_0$ 、换流站节点电容电压矩阵 $\mathbf{u}_{Cv0}$ 、节点注入电流矩阵 $\mathbf{i}_{e0}$ 以及换流站节点注入电流矩阵 $\mathbf{i}_{ev0}$ 的表达式分别为:

$$\mathbf{i}_0 = [i_{12}, \dots, i_{ij}]^T \quad (7)$$

$$\mathbf{u}_0 = [u_{Cv0}^T, u_{Cdp+1}, \dots, u_{Cdj}, \dots, u_{Cdn}]^T \quad (8)$$

$$\mathbf{u}_{Cv0} = [u_{Cv1}, \dots, u_{Cvi}, \dots, u_{Cvp}]^T \quad (9)$$

$$\mathbf{i}_{e0} = [i_{e1}, \dots, i_{ei}, \dots, i_{eN}]^T \quad (10)$$

$$\mathbf{i}_{ev0} = [i_{e1}, \dots, i_{ei}, \dots, i_{ep}]^T \quad (11)$$

其中, i_{ei} 为节点 n_i 的注入电流; u_{Cvi} 、 u_{Cdj} 分别为换流站节点 n_i 、DC-PCC节点 n_j 电容电压。

柔直系统中所有相关回路微分方程的矩阵表达式为:

$$\begin{cases} \mathbf{A}_0 \mathbf{u}_0 = \mathbf{R}_0 \mathbf{i}_0 + \mathbf{L}_0 \dot{\mathbf{i}}_0 \\ \dot{\mathbf{u}}_{Cv0} = \mathbf{C}_0 \mathbf{i}_{ev0} \end{cases} \quad (12)$$

节点注入电流 $\mathbf{i}_{e0}$ 与支路电流 $\mathbf{i}_0$ 之间关系为:

$$\mathbf{i}_{e0} = -\mathbf{A}_0^T \mathbf{i}_0 \quad (13)$$

$\mathbf{A}_0$ 为网络电路的关联矩阵,其行数与支路数 B

相等,列数与节点数 N 相同。 $\mathbf{A}_0$ 中元素 a_{ij} 的书写规则为:①当节点 n_i 为支路 b_{ij} 的首端点时, $a_{ij}=1$;②当节点 n_i 为支路 b_{ij} 的末端点时, $a_{ij}=-1$;③当节点 n_i 不是支路 b_{ij} 的端点时, $a_{ij}=0$ 。根据 $\mathbf{A}_0$ 的书写规则,可得图2所示网络电路的关联矩阵为:

$$\mathbf{A}_0 = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & -1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

$\mathbf{R}_0$ 为对角电阻矩阵,阶次为 $B \times B$,其行依次对应每一条支路。图3为故障后三端环状直流配电系统拓扑结构,图中 R_f 为故障电阻。对应的电阻矩阵 $\mathbf{R}_0$ 为:

$$\mathbf{R}_0 = \begin{bmatrix} R_{12} & & \\ & R_{13} & \\ & & R_{23} \end{bmatrix} \quad (15)$$

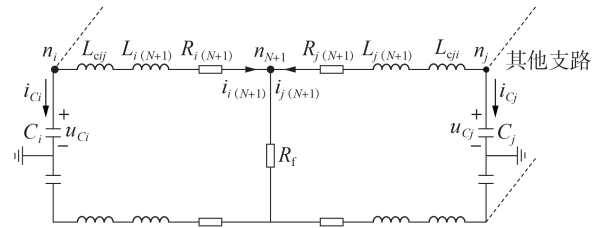


图3 故障后三端环状柔直系统等效电路

Fig.3 Equivalent circuit of three-node ring flexible DC system after fault

电感矩阵 $\mathbf{L}_0$ 同样为一个对角矩阵,则图3对应的电感矩阵 $\mathbf{L}_0$ 为:

$$\mathbf{L}_0 = \begin{bmatrix} L_{c12} + L_{12} + L_{c21} & & \\ & L_{c23} + L_{23} + L_{c32} & \\ & & L_{c13} + L_{13} + L_{c31} \end{bmatrix} \quad (16)$$

如图3所示,当系统中极间短路故障发生在支路 b_{ij} 上,增加节点编号为 n_{N+1} ,支路 b_{ij} 变成2条新支路 $b_{i(N+1)}$ 和 $b_{j(N+1)}$,根据各矩阵的列写规则对初始矩阵进行更新。

对支路 b_{ij} 对应电阻矩阵 $\mathbf{R}_0$ 和电感矩阵 $\mathbf{L}_0$ 进行更新。更新后式(12)的表达式变为:

$$\begin{cases} \mathbf{A}_r \mathbf{u}_r = \mathbf{R}_r \mathbf{i}_r + \mathbf{L}_r \dot{\mathbf{i}}_r \\ \dot{\mathbf{u}}_{Cv0} = \mathbf{C}_0 \mathbf{i}_{ev0} \end{cases} \quad (17)$$

其中, $\mathbf{A}_r$ 、 $\mathbf{u}_r$ 、 $\mathbf{R}_r$ 、 $\mathbf{i}_r$ 、 $\mathbf{L}_r$ 分别为 $\mathbf{A}_0$ 、 $\mathbf{u}_0$ 、 $\mathbf{R}_0$ 、 $\mathbf{i}_0$ 、 $\mathbf{L}_0$ 更新后的变量。代入稳态初值,迭代即可进行求解。

2.2 故障电流模型验证

如附录中图A1所示三端柔直系统,设置0.5 s时极间短路故障发生于VSC₁直流侧,位于支路 b_{14} ,且故障距离为5 km,新增故障节点为节点5,该节点电压 $u_5=0$,列写方程组并进行求解。故障发生后6 ms内各支路故障电流计算结果与仿真结果对比如附录中图A2所示。可以看出,故障发生后6 ms内,直流线路故障电流的数值解可以准确地拟合由仿真获得

的故障电流波形,验证了所构建暂态模型的准确性。相较于固定时间运行的仿真模型,数值模型的短期快速调用在运算速度上有了很大的提升。

3 优化配置模型及方法

3.1 优化配置数学模型

设定目标函数如下:

$$\begin{cases} \min f = [f_1, f_2] \\ f_1 = \sum_{i=1}^a L_{cij} \\ f_2 = 2 \sum_{i=1}^{N_b} \max \{i_{ij}\} \end{cases} \quad (18)$$

其中, f 为优化目标函数; f_1 为系统直流侧出口处安装 FCL 总电感值函数, 对函数 f_1 的优化可以实现直流系统配置 FCL 总电感值的最小化; a 为直流系统配置 FCL 的支路总数; f_2 为所有 CB 总切断最大故障电流函数; N_b 为遍历各支路故障的总数。

设置约束条件如下。

(1) FCL 电感值约束。

配置 FCL 的电感值不能无限增大, 应具有合理的取值区间。每个 FCL 的电感值必须保持在允许的范围:

$$0 \leq L_{cij} \leq L_{cmax} \quad (19)$$

其中, L_{cmax} 为满足电网暂态响应要求的 FCL 电感值的取值上限。

(2) CB 断流容量约束。

为确保系统发生直流故障后, CB 能可靠地切断直流故障电流, 故障发生后流过 CB 的故障电流应始终小于 CB 的最大断开电流, 且留有一定裕量。因此, 故障电流必须满足:

$$i_{ij} \leq \alpha I_{Dmax} \quad (20)$$

其中, I_{Dmax} 为 CB 最大允许切断电流值; α 为裕度系数, 为给 CB 切断故障电流留有裕度, 可根据需求进行选择, 一般情况下留有安全裕度 20%^[17], 即 $\alpha = 0.8$ 。

(3) 换流站出口直流侧电压约束。

为了防止直流电网穿越运行时出现节点电压过度跌落, 在隔离直流故障之前, 直流电压需保持在安全水平范围内:

$$2u_{Cvi}(t_b) \geq \beta U_{dcN} \quad (21)$$

其中, t_b 为短路故障被隔离的时刻; $u_{Cvi}(t_b)$ 为换流站节点 n_i 出口直流侧并联电容电压; U_{dcN} 为柔直系统的额定直流电压; β 为可靠系数。在短路故障发生时, 节点电压会快速降低, 为防止交流电源向直流线路上的短路点放电^[12], 设置故障的直流母线的电压不得低于额定值的 60%, 即 $\beta = 0.6$ 。

3.2 优化流程及最优折中解选取

以 Kennedy 和 Eberhart 提出 PSO 算法为基础^[18],

本文采用 MOPSO 算法对建立的多目标优化模型进行求解。整体优化流程如图 4 所示, 其中图 4(a) 为利用潮流模型以及短路故障模型进行目标函数计算部分, 图 4(b) 为生成粒子群及选取最优解部分。

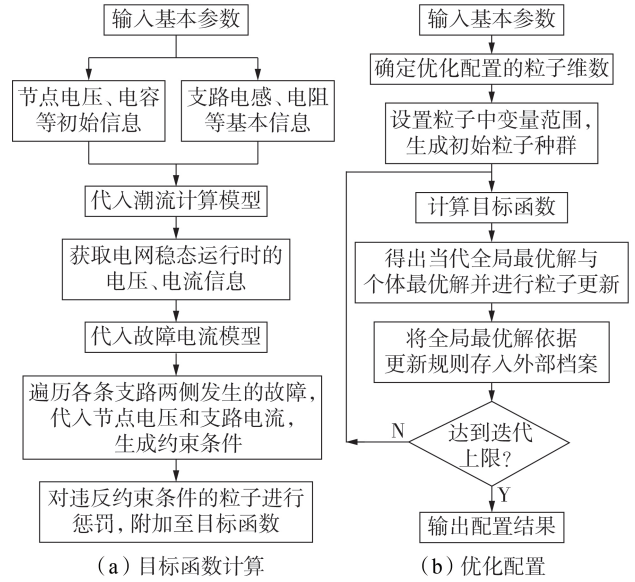


图4 MOPSO算法配置流程

Fig.4 Configuration flowchart of MOPSO algorithm

本文得到的优化结果为一组非劣解, 通常需要根据需求从中选取一个在多个优化目标上都比较满意的解, 称之为最优折中解。基于模糊集合理论^[19], 利用模糊函数计算 Pareto 前沿上每个解在各个优化目标上的满意度, 并选取满意度最大的解作为最优折中解。常见的隶属度函数有偏小型、偏大型、正态型、Γ 型、戒上型和戒下型等。在 CB 容量与 FCL 总电感这 2 个互相抑制的量之间进行成本最小化优化, 所以选择偏小型隶属度函数:

$$\mu_y = \begin{cases} 1 & f_y \leq f_{ymin} \\ \frac{f_{ymax} - f_y}{f_{ymax} - f_{ymin}} & f_{ymin} < f_y < f_{ymax} \\ 0 & f_{ymax} \leq f_y \end{cases} \quad (22)$$

其中, f_y 为该粒子在第 y 个优化目标上对应的目标函数值; f_{ymax} 和 f_{ymin} 分别为 Pareto 最优解集中第 y 个优化目标函数值的上限和下限。 μ_y 表示决策者对柔直配电系统中 FCL 优化配置方案的标准满意程度 (其值取为 0 表示决策者对此解完全不满意, 其值取为 1 表示决策者对此解完全满意)。最优折中解即为 μ 最大值在 Pareto 最优解集中对应的解。对于优化得到的 FCL 配置方案中每组 μ_y 取值, 其标准化满意度计算表达式为:

$$\mu = \frac{1}{Y} \sum_{y=1}^Y \mu_y \quad (23)$$

其中, μ 为标准化满意度值; Y 为待优化目标函数总数。

4 算例分析

4.1 3节点网络优化配置

本文以三端环网为优化配置对象进行分析。在各换流站出口直流线路上分别设置极间短路故障,共有3处。设CB的最大开断电流为6 kA,故障清除时间为6 ms, FCL电感值的取值上限为20 mH。MOPSO算法的种群规模为50,迭代次数为200,新一代粒子对全局最优与个体最优解的继承系数 w 的取值范围为 $[0.4, 0.9]$,外部档案容量的上限为15,系统中每个换流站出口的直流侧正负极线路上均装设1个FCL和1个CB,系统中共有6个位置安装FCL和CB,设置目标函数。利用MOPSO算法对三端柔直配电系统中FCL进行优化配置,得到的优化配置方案Pareto前沿如图5所示。所得优化配置方案的具体参数及其对应的目标函数值如附录中表A3所示,其中方案0显示进行优化配置前的FCL电感值大小及对应目标函数值。可以看到Pareto最优前沿包含多个非劣解,这些非劣解在目标函数上互不占优。当以系统配置FCL总电感值最小为优化目标时,可选择FCL总电感值最小的极端解方案1;当以故障限流效果最优为优化目标时,可选择限流效果最优的极端解方案2;若希望系统配置FCL总电感值和故障限流效果均较好,可选取综合最优折中解方案3。

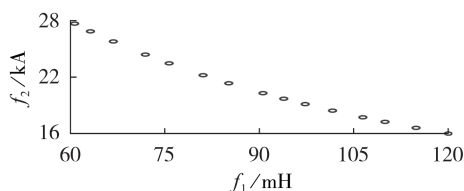


图5 三端网络优化配置方案的Pareto前沿

Fig.5 Pareto front of optimal configuration scheme for three-node network

设置3种极间短路故障分别位于VSC₁、VSC₂和VSC₃的直流侧出口,将优化配置得到的最优折中解方案3对应的各FCL电感值代入基于MATLAB搭建的三端直流配电系统仿真模型中,对3种故障工况进行仿真,得到故障发生6 ms内故障侧线路故障电流变化趋势,并与各FCL电感值均为5 mH时的故障电流波形进行对比,对比结果如图6所示。图中,实线代表各FCL电感值均为5 mH时,系统发生3处极间短路故障后故障侧线路故障电流的发展趋势;虚线代表当系统中各FCL电感值与最优折中解方案3对应时,系统发生同样极间短路故障后线路故障电流的变化趋势。由图可知,虚线处的电流上升趋势较实线处平缓,验证了本文所提柔直配电系统中FCL优化配置方法的有效性。

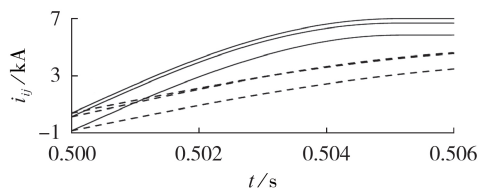


图6 优化配置前、后系统限流效果对比

Fig.6 Comparison of system current limit effect between before and after optimal configuration

4.2 11节点环网优化配置

对本文所提出的优化配置方法选用大电网进行进一步验证。参考文献[17]中11节点直流微电网模型,进行优化配置算例分析。模型如附录中图A3所示,其各节点初始信息如附录中表A4所示,设定系统采用主从控制,其中节点5采用定电压控制,参考电压为5 kV,用于维持直流母线电压的稳定以及功率平衡,为V节点;其余节点均采用定有功功率控制,为P节点。各支路基础参数如附录中表A5所示。

依据潮流模型进行电网稳态值计算,计算得到的结果如附录中表A6所示。设定正负极线路安装FCL参数一致,则种群维数为26,即决策变量长度为26,目标函数1对应52个FCL总电感值,目标函数2对应11个换流站直流侧分别发生极间短路故障时故障侧2个CB切断故障电流之和。基于以上参数,利用MOPSO算法以及多目标遗传算法对11节点直流系统中FCL进行优化配置,所得2种方法下的Pareto前沿对比如图7所示。Pareto前沿上各个解对应目标函数值如附录中表A7所示。可以看到在本文所构建的数学模型的基础上,2种算法都得到了较好的优化结果,但多目标遗传算法得到的结果在总电感值最小的这个目标上优化深度不够,总电感值仍然较大,MOPSO算法求得的解可以使总电感值更小。

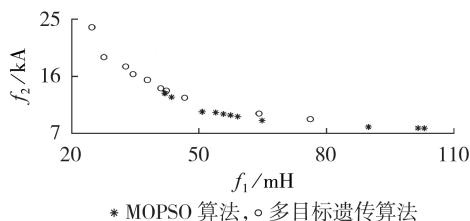


图7 MOPSO算法以及多目标遗传算法 Pareto 前沿的对比

Fig.7 Comparison of Pareto front between MOPSO algorithm and multi-objective genetic algorithm

5 结论

本文构建了适用于多节点柔直系统的稳态及暂态运行近似建模方法,可以实现对极间短路故障

后6 ms内的故障电流进行较准确计算。以CB容量最小、FCL携带总电感值最小为目标函数,设定CB的分断电流能力、节点电压的范围、每个FCL的电感值范围作为约束条件,进一步建立了FCL及CB协同工作的优化配置数学模型。最后基于MOPSO算法对3节点与11节点环网进行了FCL与CB的优化求解,并与多目标遗传算法进行了对比。结果表明,本文提出的考虑多节点约束的柔直系统FCL与CB优化配置方法具有较好的适用性,可快速实现柔直系统中FCL及CB的经济配置。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 周孝信,鲁宗相,刘应梅,等. 中国未来电网的发展模式和关键技术[J]. 中国电机工程学报,2014,34(29):4999-5008.
ZHOU Xiaoxin, LU Zongxiang, LIU Yingmei, et al. Development models and key technologies of future grid in China [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 4999-5008.
- [2] BARAN M E, MAHAJAN N R. DC distribution for industrial systems: opportunities and challenges [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2003, 39(6): 1596-1601.
- [3] AHMAD CHOWDHURY N U, YANUSHKEVICH A. Power flow analysis of meshed AC-DC super grid [C]// 2015 IEEE Eindhoven PowerTech. Eindhoven, Netherlands: IEEE, 2015: 1-6.
- [4] 汤广福,庞辉,贺之渊. 先进交直流输电技术在中国的发展与应用[J]. 中国电机工程学报,2016,36(7):1760-1771.
TANG Guangfu, PANG Hui, HE Zhiyuan. R&D and application of advanced power transmission technology in China [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(7): 1760-1771.
- [5] 盛万兴,李蕊,李跃,等. 直流配电电压等级序列与典型网络架构初探[J]. 中国电机工程学报,2016,36(13):3391-3403.
SHENG Wanxing, LI Rui, LI Yue, et al. A preliminary study on voltage level sequence and typical network architecture of direct current distribution network [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(13): 3391-3403.
- [6] LUO Y P, HE J H, LUO G M, et al. Fast DC fault location and isolation strategy for the flexible multi-terminal DC system [J]. The Journal of Engineering, 2018, 2018(15): 908-912.
- [7] 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.
- [8] STIENEKER M, BUTZ J, RABIEE S, et al. Medium-voltage DC research grid Aachen [C]// Proceedings of Die Energiewende-Blueprints for the New Energy Age, International ETG Congress. Bonn, Germany: IEEE, 2015: 1-7.
- [9] 郝鑫,王盼宝,孙红梅,等. 直流故障限流器工作原理分析与特性研究[J]. 电网技术,2019,43(12):4414-4424.
HAO Xin, WANG Panbao, SUN Hongmei, et al. Principle and characteristic analysis of existing DC fault current limiters [J]. Power System Technology, 2019, 43(12): 4414-4424.
- [10] 潘垣,陈立学,袁召,等. 针对直流电网故障的限流与限能技术研究[J]. 中国电机工程学报,2020,40(6):2006-2015.
PAN Yuan, CHEN Lixue, YUAN Zhao, et al. Research on current limiting and energy limiting technology for DC power grid fault [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(6): 2006-2015.
- [11] 蒋纯冰,赵成勇. 直流电抗器与电容型限流器多目标优化配置方法[J/OL]. 电力系统自动化. (2021-02-01)[2021-02-07]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20210129.1608.005.html>.
- [12] 邢超,奚鑫泽,刘明群,等. 直流电网中限流器优化配置方法研究[J/OL]. 电源学报. (2020-12-17)[2021-02-01]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1420.TM.20201216.1705.002.html>.
- [13] 赵坚鹏,赵成勇,许建中,等. 直流电网中超导限流器与高压直流断路器的协调配合方法[J]. 电力自动化设备,2018,38(11):121-128.
ZHAO Jianpeng, ZHAO Chengyong, XU Jianzhong, et al. Coordination between superconducting current limiter and high voltage DC circuit breaker in DC grid [J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(11): 121-128.
- [14] 应林志,刘天琪,王建全. 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.
- [15] 周勤勇,杨冬,刘玉田,等. 多直流馈入电网限制短路电流方案多目标优化[J]. 电力系统自动化,2015,39(3):140-145,151.
ZHOU Qinyong, YANG Dong, LIU Yutian, et al. Multi-objective optimization for short-circuit current limitation schemes in multiple DC infeed power systems [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(3): 140-145, 151.
- [16] 李岩,龚雁峰. 多端直流电网限流电抗器的优化设计方案[J]. 电力系统自动化,2018,42(23):120-126.
LI Yan, GONG Yanfeng. Optimal design scheme of current limiting reactor for multi-terminal DC power grid [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(23): 120-126.
- [17] 年珩,孔亮. 环网式直流微网短路故障下断路器与限流器优化配置方法[J]. 中国电机工程学报,2018,38(23):6861-6872,7120.
NIAN Heng, KONG Liang. An optimization placement method for circuit breakers and fault current limiters of looped-type DC micro-grids for short circuit faults [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(23): 6861-6872, 7120.
- [18] KENNEDY J, EBERHART R. Particle swarm optimization [C]// Proceeding of the IEEE International Conference on Neural Networks. Perth, WA, Australia: IEEE, 1995: 1942-1948.
- [19] ABIDO M A. Multiobjective evolutionary algorithms for electric power dispatch problem [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2006, 10(3): 315-329.

作者简介:



魏伟

魏伟(1999—),男,宁夏固原人,硕士研究生,主要研究方向为微电网及其保护(E-mail:243782379@qq.com);

王盼宝(1984—),男,河北秦皇岛人,副教授,博士,通信作者,主要研究方向为微电网运行与优化、直流配电系统关键技术(E-mail:wangpanbao@hit.edu.cn)。

(编辑 王欣竹)

Optimal configuration method of fault current limiter and circuit breaker in flexible DC system considering multi-node condition constraint

WEI Wei¹, WANG Panbao¹, SUN Hongmei¹, YANG Jinggang², SU Wei², WANG Wei¹, XU Dianguo¹

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

2. Electric Power Research Institute of State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 211103, China)

Abstract: Firstly, the numerical calculation optimization model of power flow and fault current suitable for multi-node flexible DC system is established, and its accuracy is verified in the three-node simulation model. Subsequently, the constraints and objective function are set up, the PSO (Particle Swarm Optimization) algorithm is used to establish the mathematical model of optimal configuration of fault current limiter and circuit breaker in multi-node flexible DC system. Then the optimization solution is carried out in a three-node ring network, and the results are configured to the simulation model to test its current limiting effect, and the accuracy of the proposed optimized configuration method is verified. Finally, the optimal configuration of fault current limiter and circuit breaker for a 11-node flexible DC system is carried out by the proposed multi-objective PSO algorithm, and the results are compared with the results of multi-objective genetic algorithm. The results show that the proposed optimal configuration method has high universality and can complete the low cost configuration of fault current limiter and circuit breaker in multi-node flexible DC system.

Key words: flexible DC system; power flow calculation; fault current limiter; multi-objective PSO; optimization

(上接第166页 continued from page 166)

Predictive current partition compensation control strategy for low inertia DC microgrid interfaced grid-connected converter

XU Hailiang, LIU Zhuangzhuang, WANG Shinan, NIE Fei

(College of New Energy, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China)

Abstract: Under the condition of frequent load switching and new energy output fluctuation, low inertia DC microgrid is prone to the problem of power mismatch on both sides of DC bus capacitor. The input and output power imbalance mechanism of grid-connected converter with DC microgrid interface is analyzed. According to the bus voltage change level, the energy required for bus voltage to recover to the command value and the bus capacitor energy change information in unit sampling period are calculated. The instantaneous output power of bus capacitor and the equivalent load information of bus voltage fluctuation after linear processing are obtained, and then the full value of current command compensation is determined. Considering the influence of voltage outer loop, a fast partition compensation strategy of current command is proposed. The smooth transition of partition is realized by adjusting the coefficient, and the fast tracking of current command is realized by model predictive current control, which improves the compensation response speed of grid-connected converter and suppresses bus voltage fluctuation. Finally, the effectiveness and feasibility of the proposed control strategy are verified by simulation and experiment.

Key words: DC microgrid; grid-connected converter; current command compensation; fast partition compensation strategy; bus voltage fluctuation suppression

附录

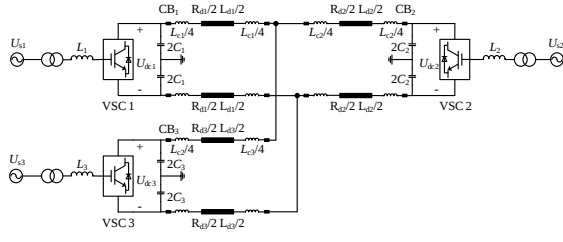


图 A1 三端柔直系统拓扑结构

Fig.A1 Topology structure of three-node flexible DC system

表 A1 三端柔直系统参数

Table A1 Parameters of three-node flexible DC system

参数	数值
直流侧额定电压 U_{dc}/kV	± 10
直流侧并联电容 $2C_1/\mu F$	1 000
限流电感/mH	5
直流线路电阻/ $(\Omega \text{ km}^{-1})$	0.013 9
直流线路电感/(mH $\text{km}^{-1})$	0.983 6
	L_{12} : 10
线路长度/km	L_{13} : 8
	L_{23} : 6
定电压控制 VSC ₁ 电压/kV	20
定有功功率控制 VSC ₂ 功率/MW	10
定有功功率控制 VSC ₃ 功率/MW	5

表 A2 潮流计算结果对比

Table A2 Comparison of power flow results

电压/kV	程序结果	仿真结果	误差/%
U_1	20	20.005 5	0.027 9
U_2	20.158 7	20.157 9	0.004 0
U_3	20.124 2	20.108 6	0.077 5
U_4	20.103 5	20.095 4	0.040 3
电流/kA	程序结果	仿真结果	误差/%
I_{14}	-0.744 5	-0.744 4	0.013 4
I_{24}	0.496 1	0.496 4	0.080 6
I_{34}	0.248 5	0.248 3	0.080 3

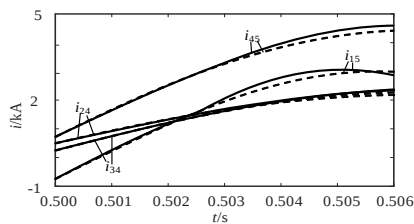


图 A2 仿真与计算故障电流对比

Fig.A2 Comparison of simulation and calculation of fault current

表 A3 优化结果

Table A3 Optimized results

编号	L_{c14}/mH	L_{c24}/mH	L_{c34}/mH	f_1/mH	f_2/kA
0	5.000 0	5.000 0	5.000 0	30.000 0	40.320 4
1	9.869 1	10.818 7	9.746 5	60.868 6	27.511 3
2	10.482 7	10.9734	10.229 6	63.371 4	26.705 2
3	11.165 3	11.734 3	10.595 7	66.990 6	25.648 6
4	12.066 9	12.444 0	11.522 3	72.066 3	24.274 2
5	13.875 6	12.714 5	11.324 5	75.829 3	23.359 6
6	14.529 4	13.528 7	12.544 9	81.206 1	22.120 6
7	15.044 3	14.211 9	13.377 2	85.266 8	21.273 2
8	15.783 5	15.184 5	14.374 6	90.685 1	20.240 6
9	16.310 2	15.644 3	15.032 4	93.973 8	19.657 9
10	16.855 3	16.309 0	15.518 5	97.365 5	19.094 1
11	17.536 3	16.813 4	16.500 0	101.699 4	18.412 2
12	18.292 1	17.573 3	17.382 6	106.496 0	17.714 2
13	18.967	18.512 1	17.522 6	110.003 4	17.240 0
14	19.336 3	19.065 3	19.054 9	114.913 0	16.612 9
15	20.000 0	20.000 0	20.000 0	120.000 0	16.011 4

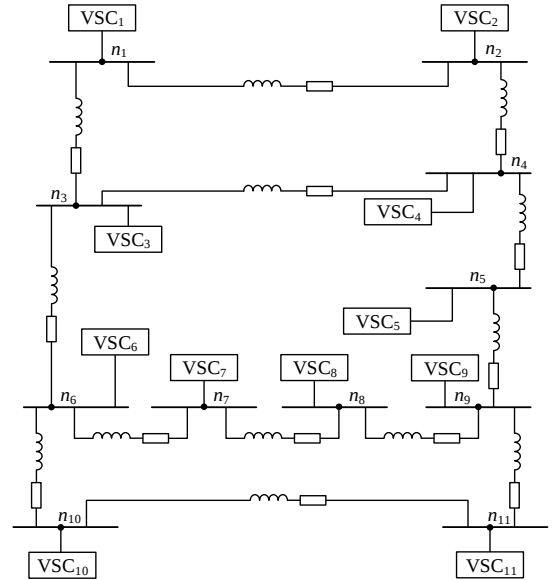


图 A3 11 节点柔直环网拓扑

Fig.A3 Topology of 11-node flexible DC ring grid

表 A4 节点初始信息
Table A4 Initial node information

节点编号	控制方式	参考值
5	定电压	59 kV
1、2、3	定有功功率	49 kW
8、9、11	定有功功率	-40 kW
4、6	定有功功率	-110 kW
7、10	定有功功率	70 kW

表 A5 支路基础参数
Table A5 Basic parameters of each branch Initial node information

支路编号	支路端点	线路电阻/ Ω	线路电感/mH
1	1-2	0.30	0.30
2	1-3	0.18	0.18
3	2-4	0.20	0.20
4	3-4	0.32	0.32
5	3-6	0.40	0.40
6	4-5	0.16	0.16
7	5-9	0.20	0.20
8	6-7	0.18	0.18
9	6-10	0.22	0.22
10	7-8	0.10	0.10
11	8-9	0.14	0.14
12	9-11	0.22	0.22
13	10-11	0.40	0.40

表 A6 算例 2 潮流结果
Table A6 Power flow results of Case 2

节点编号	电压/kV	支路编号	电流/kA
U_1	19.958 4	I_{12}	16.67
U_2	19.962 6	I_{13}	22.22
U_3	19.973 0	I_{24}	65.00
U_4	19.986 5	I_{34}	43.75
U_5	20.000 0	I_{36}	37.50
U_6	20.022 4	I_{45}	-18.75
U_7	20.030 8	I_{59}	40.00
U_8	20.040 1	I_{67}	-27.78
U_9	20.036 8	I_{610}	-31.82
U_{10}	20.025 3	I_{78}	60.00
U_{11}	20.044 0	I_{89}	21.43
		I_{911}	4.545
		I_{1011}	30.00

表 A7 Pareto 解信息对比
Table A7 Comparison of pareto information

节点编号	f_1 /mH		f_2 /kA	
	多目标遗传算法	MOPSO 算法	多目标遗传算法	MOPSO 算法
1	42.101 29	25.07	13.719	24.55
2	42.213 07	27.85	13.693	19.66
3	43.727 78	32.94	13.063	18.11
4	50.883 10	34.68	10.683	16.84
5	54.029 63	38.03	10.561	15.91
6	55.842 84	41.17	10.312	14.54
7	57.483 22	42.51	10.115	14.15
8	59.162 20	46.74	9.886	12.97
9	64.860 46	64.14	9.227	10.39
10	89.743 38	76.17	8.159	9.46
11	101.353 90		7.968	
12	102.832 30		7.942	