

采用粒子群算法优化配置限流电抗器的研究及应用

茅嘉毅¹, 蒋平¹, 胡伟²

(1.东南大学电气工程学院, 江苏南京 210096;

2. 江苏省电力公司调度通信中心, 江苏南京 210024)

摘要:随着电网规模的扩大, 母线短路电流不断增大。目前常采用加装限流电抗器的方法来限制 500 kV 电网的三相短路电流。文中提出一种采用粒子群算法优化配置限流电抗器的方法, 在满足限制短路电流的前提下, 加装电抗器的数量和总阻抗最小, 同时保证系统正常运行。通过在 IEEE30 节点系统的测试, 以及与枚举法结果比较, 验证了该方法的实用性和可靠性。采用该方法限制江苏电网短路电流, 取得很好的效果, 达到设计的要求。

关键词:粒子群算法; 优化配置; 限流电抗器; 限制短路电流

中图分类号: TM471

文献标志码: A

文章编号: 1009-0665(2010)05-0021-05

随着我国电力系统负荷的迅速增长以及大容量发电机的不断投入, 电网规模进一步扩大, 500 kV 枢纽变电站高压侧三相短路电流已经面临着超过断路器遮断电流的威胁, 严重降低了系统抗风险能力和调度灵活性。

目前, 可以用来限制 500 kV 超高压系统三相短路电流的方法分为两类, 一类是调整电网结构, 另一类是加装限流设备。调整电网结构的措施包括: 发展更高电压等级电网、采用直流输电、电网分层分区、母线分段运行、环网解环等^[1]。其中前 2 种措施能从根本上解决短路电流过大问题^[2,3], 但是这些措施从开始设计到实际应用需要较长时间, 而且投资巨大。后 3 种措施相对简单, 易于应用, 但是会对系统供电可靠性和稳定性带来不利影响。基于以上原因, 现在主要采用加装限流设备的方法限制短路电流。限流设备包括: 限流电抗器(也称串联电抗器, 后简称串抗器), 电力电子故障限流器和超导故障限流器^[4]。采用加装限流电抗器限制短路电流的技术已经非常成熟, 并成功应用在巴西、美国、中国上海等地^[5,6]。因此, 目前主要采用配置串抗器的方法来限制 500 kV 母线短路电流。

限流电抗器价格较为昂贵, 而且会减少线路传输功率, 降低受端母线电压, 并对电网稳定性带来不利影响, 所以系统中不宜加装过多串抗器。就目前江苏电网而言, 苏南地区有多条母线的三相短路电流将会超标, 因此对串抗器进行优化配置, 减少加装串抗器的数量和阻抗显得尤为重要。

传统配置方法主要依靠经验和反复的试验, 效率低, 而且无法把握全局效果。文献[7]提出一种电力系统限流措施的优化方法。本文在此基础上, 只

考虑加装限流电抗器这种限流措施, 提出一种采用粒子群算法优化配置方法, 使得在满足限制短路电流的前提下, 加装串抗器的数量和阻抗值最小, 同时保证系统正常运行。并针对应用粒子群算法, 改进串抗器数学模型, 减少优化变量的数量。

1 限流电抗器概述

加装限流电抗器的本质是通过增加系统线路阻抗, 以减小变压器母线某些分支的短路电流。目前常采用干式空心电抗器限制短路电流。相比于油浸式电抗器, 干式空心电抗器具有大范围的线性阻抗特性, 而且维护简单、占地面积小^[8]。由于串抗器会引起线路两侧断路器瞬时恢复电压过大, 造成断路器重燃事故, 常接有对地耦合电容器和跨接耦合电容器, 限流电抗器整套设备如图 1 所示^[9,10]。

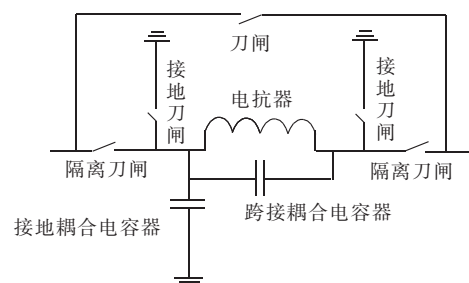


图 1 限流电抗器整套设备

限流电抗器的典型配置方式有: 串接于分段母线联络线方式、串接于线路方式、串接于变压器支路和加装在变压器中性点等几种方式^[11]。前 2 种接线方式常用于限制三相短路电流。串接于分段母线联络线方式首先要求母线可分段, 而且对现场有一定的要求, 需要分段母线间留有一定空间用于安装串抗器。本文都采用串接于线路方式配置限流电抗器。

2 优化配置限流电抗器设计思想

2.1 整体设计思想

优化配置限流电抗器需要优化选择限流电抗器的安装位置和限流电抗器的阻抗值,使得在满足限制短路电流的前提下,加装串抗器的数量和总阻抗最少。

文献[7]所采用的模型将限流电抗器的安装位置和阻抗值都作为优化的控制变量,增加了优化变量的数量和复杂程度。本文采用一种简化模型,以减少优化变量的数量。首先,假设与故障母线相连的每条线路都串联了电抗器,再优化选择串联的电抗器阻抗值。如果选择的配置阻抗值为零,则相当于该线路没有加装串抗器;如果配置的串抗器阻抗值非零,则相当于该线路加装了串抗器,相应阻抗值大小为配置串抗值。需要注意的是对于双回线和三回线而言,若需加装限流电抗器,则每一回线都需要加装串抗器,且阻抗值必须相同。

2.2 限流电抗器数学模型

在线路上加装限流电抗器,其等值图如图2所示。

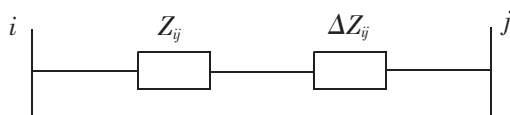


图2 加装限流电抗器等值图

加装线路电抗器不会改变导纳矩阵的阶数,但会改变节点*i*和节点*j*的互导纳、节点*i*和节点*j*的自导纳,相应的变化量为^[7]:

$$\begin{cases} \Delta Y_{ii} = \Delta Y_{jj} = -\frac{\Delta Z_{ij}}{Z_{ij}(Z_{ij} + \Delta Z_{ij})} \\ \Delta Y_{ij} = \Delta Y_{ji} = \frac{\Delta Z_{ij}}{Z_{ij}(Z_{ij} + \Delta Z_{ij})} \end{cases} \quad (1)$$

式中: ΔZ_{ij} 为线路上安装的限流电抗器阻抗值。采用式(1)计算系统加装串抗器后的导纳矩阵,避免反复重构导纳矩阵,节约计算时间。

2.3 目标函数

优化算法目标是尽可能的减少加装串抗器的数量和总阻抗值,实质上是多目标优化问题。本文采用串抗器台数和总加装阻抗值加权的形式,同时衡量这2个量的影响,将多目标优化问题转换为单目标优化问题,其数学表达式为:

$$f = g1 \times N_{CLI} + g2 \times \sum_{i=0}^n x_i \quad (2)$$

式中: $g1$ 和 $g2$ 分别为加装串抗器的数量和串抗器

总阻抗的权值; x_i 为第*i*条线路安装的串抗器阻抗值; N_{CLI} 为安装串抗器的台数。

通过权值可调整加装串抗器的数量和总加装阻抗值在目标函数中的影响程度。优化配置串抗器时,首先关注系统加装串抗器的数量,其次关注总加装串抗值,所以应设定 $g1 > g2$ 。但是由于当线路加装串抗电抗越大时,短路电流对串抗的灵敏度反而越小(如图3所示),所以 $g1$ 与 $g2$ 的比不应设置过大。设置合理的权值对优化方案的实用性至关重要。本文从工程应用方面考虑,采用投入经济性作为设置权值的标准。根据实际经验,每套设备的安装及配套设施的成本是单位欧姆串抗器成本的5至10倍。本文折中考虑将设 $g1$ 为10,设 $g2$ 为1.5。此目标函数值表示总投入成本系数。

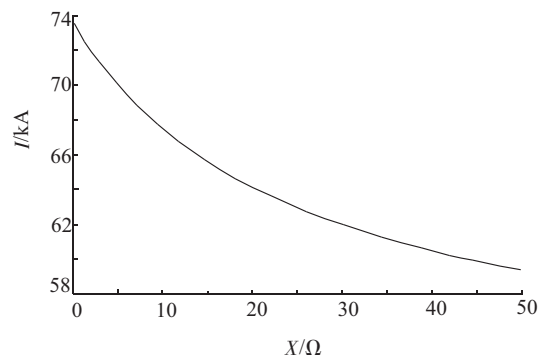


图3 串抗器阻抗对短路电流的影响

2.4 约束条件

串抗器配置方案需要满足2个约束条件:母线短路电流小于限流目标;母线电压需要在设定允许范围内。

(1)短路电流约束条件:

$$Isc.i = Ire.i \quad (3)$$

式中: $Ire.i$ 为*i*母线的限流目标电流; $Isc.i$ 为*i*母线的计算短路电流。

(2)母线电压约束条件:

$$V_{i.min} < V_i < V_{i.max} \quad (4)$$

式中: $V_{i.min}$ 和 $V_{i.max}$ 分别为电网正常运行时*i*母线的电压允许最小值和最大值。

3 优化配置限流电抗器算法流程

粒子群算法以其在处理目标函数问题中易于实现、数学逻辑基础简单以及对目标函数较强的灵敏性等优势,在最优配置问题中受到很多学者的重视^[12]。本文采用粒子群算法优化配置限流电抗器,再利用专业软件校核方案可靠性和系统稳定性,具体流程如图4所示。

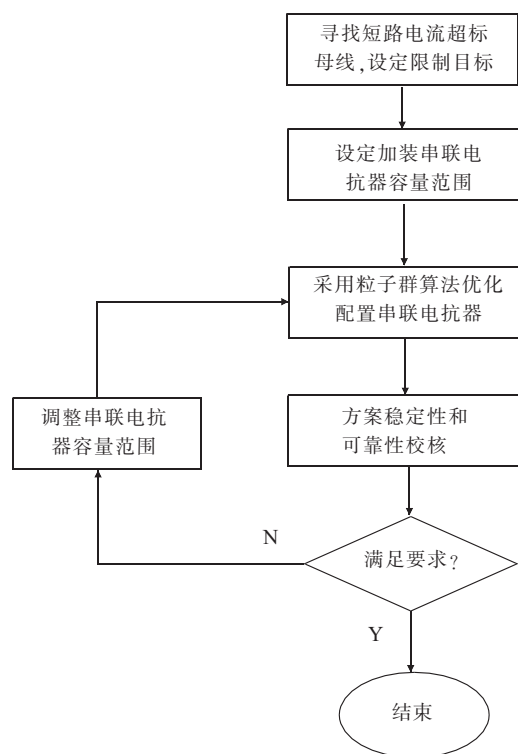


图4 优化算法流程图

4 算例分析

用上述算法对 IEEE30 节点系统优化配置限流电抗器限制短路电流。系统中 2 台发电机和 4 台调相机的短路阻抗(标么值)分别取 0.011, 0.012, 0.01, 0.01, 0.2 和 0.2; 设定系统短路电流不能超过 46 kA。计算系统母线短路电流, 发现有 4 条母线短路电流超标, 见表 1。采用优化配置限流电抗器算法限制这 4 条母线短路电流, 得到串抗器配置方案见表 2, 此时母线短路电流值见表 1。由于 IEEE30 节点系统规模较小, 可以采用枚举法计算最佳配置方案, 验证优化算法的可靠性。设置枚举步长为 0.5Ω , 所得方案见表 2, 限流效果见表 1。

表 1 IEEE30 系统超标母线短路电流 kA

母线名	原系统	采用粒子群法 所得方案	采用枚举法 所得方案
bus1	47.19	46	45.90
bus2	47.62	45.49	45.39
bus5	47.42	46	46.00
bus8	48.4	46	45.97

表 2 2 种算法所得串抗器配置方案的比较 Ω

加装串抗器 线路	粒子群算法所得方案 配置串抗阻值	枚举法所得方案配 置串抗阻值
bus1 - bus2	3.17	3.5
bus2 - bus5	19.78	20
bus6 - bus10	14.69	15

根据粒子群算法优化所得方案配置限流电抗器, 成功限制母线短路电流。优化算法所得配置方案总加装串抗器阻抗值为 37.64Ω , 总投入成本系数为 86.48; 枚举法所得最佳方案总加装串抗器阻抗值为 39Ω , 总投入成本系数为 86.86。优化所得方案和枚举法所得方案选择加装串抗器线路相同, 配置的容量大小相近。只是由于受到枚举法步长精度的影响, 使得枚举法所得方案配置阻抗略大。通过和枚举法最佳配置方案的比较, 验证了优化配置串抗器算法的可靠性和实用性, 满足算法设计的要求。对于实际大电网, 由于采用枚举法配置串抗器计算量过大, 并不可行。而采用粒子群算法的优化效率远高于枚举法, 使得应用于实际大电网成为可能。

5 在江苏电网的应用

5.1 优化配置电抗器限制江苏电网短路电流

根据 2010 年江苏电网规划, 武南、晋陵、惠泉和石碑 500 kV 侧母线短路电流严重超标 (具体短路电流值见表 3), 武南母线三相短路电流高达 73.63 kA, 需要加装限流电抗器限制短路电流。设定限流目标时应留有一定裕度, 以防止电网规模进一步扩大和新电源接入使短路电流再次超标。同时, 限流目标不宜设定过低, 因为当规划建设的高压电网和直流电网建成后, 500 kV 电网的短路电流将会明显下降。综合考虑留有 5% 的裕度, 将限流目标设为 60 kA。

采用本文方法优化配置限流电抗器, 所得最佳方案见表 4 (该方案记为方案 1), 此时短路电流值见表 5。

表 3 2010 年江苏电网 500 kV 超标母线短路电流 kA

母线名	三相短路电流	限流目标	电流超标量
晋陵	72.47	60	12.47
武南	73.63	60	13.63
惠泉	63.87	60	3.87
石碑	66.03	60	6.03

表 4 优化所得最佳配置方案 (方案 1) Ω

加装串抗器线路	配置串抗阻值
惠泉 - 武南 双回线	2.76
晋陵 - 武南 双回线	32.25
石碑 - 常熟南 双回线	14.33
总配置阻抗	98.68

方案 1 对于 4 条母线超标的情况, 在 3 条双回线上加装串抗器, 总加装串抗阻值为 98.68Ω , 总投入成本系数为 207.58, 此时短路电流已满足限制目标。但是方案 1 在武南 - 晋陵双回线上加装的串

表 5 采用优化方案后的系统短路电流 kA

母线名	根据优化方案 加装串抗器后	原系统	限制电流
晋陵	60	72.47	12.47
武南	59.41	73.63	14.22
惠泉	54.97	63.87	8.9
石碑	60	66.03	6.03

抗器阻抗过大,根据工程经验,并不实用。考虑到目前武南至晋陵采用双回线联接,断开其一回线,将明显增加武南至晋陵的电气距离,降低武南和晋陵母线的短路电流,减少加装的串抗器阻抗。此时江苏电网超标母线短路电流见表 6,可见武南和晋陵母线的短路电流大为下降。

表 6 2010 年江苏电网 500 kV 超标母线短路电流 (武南至晋陵单回线运行) kA

母线名	三相短路电流	限流目标	电流超标量
晋陵	65.58	60	5.58
武南	67	60	7
惠泉	60.88	60	0.88
石碑	65.99	60	5.99

表 7 优化所得最佳配置方案(方案 2) (武南至晋陵单回线运行) Ω

加装串抗器线路	配置串抗阻抗值
武南—晋陵 单回线	16.54
石碑—常熟南 双回线	14.61
总配置阻抗	45.76

表 8 采用优化方案后的系统短路电流 (武南至晋陵单回线运行) kA

母线名	根据优化方案 加装串抗器后	原系统	限制电流
晋陵	58.42	65.58	7.16
武南	60	67	7
惠泉	57.28	60.88	3.6
石碑	60	65.99	5.99

采用本文方法优化配置限流电抗器,所得最佳配置方案见表 7(该方案记为方案 2),此时短路电流见表 8。方案 2 仅在一条单回线和一条双回线上加装串抗器,总加装阻抗为 45.76 Ω,总投入成本系数为 98.4,不到方案 1 总投入成本的一半。从经济性和电网结构完整性的角度考虑,方案 2 是待选最佳方案。

5.2 加装串抗器后系统潮流和稳定性校核

加装限流电抗器会对系统的潮流和稳定带来影响,需要对加装串抗器后的系统进行校核。

5.2.1 潮流校核

根据方案 2 加装串抗器,对加装串抗线路的潮流影响较大。未加装串抗器前,晋陵至武南单回线传输有功功率 380 MW、无功功率 -118Mvar,常熟南至石碑双回线传输有功功率 2 436 MW、无功功率 31.2 Mvar;加装串抗器后晋陵至武南单回线传输功率明显下降,此时传输的有功功率为 302 MW、无功功率为 -73.5 Mvar,常熟南至石碑双回线传输有功功率 1 988 MW、无功功率 74 Mvar。减少的传输功率分摊在东西两边的输电线路路上,使得晋陵至张家港双回线和东善桥—廻峰—岷珠—武南沿线传输功率上升。纵观全网,没有线路出现过载。

优化中已经考虑电压约束,所以方案 2 必然满足电压要求。进一步计算可知,加装串抗器前后母线电压变化甚微。

2.2 稳定性校核

在 BPA 软件中,对加装串抗器线路和临近线路进行暂态稳定仿真,以校核其稳定性。故障设定为三相金属性短路,0.1 s 后故障线路永久切除,比较加装串抗器前后系统最大功角差曲线。其中加装串抗器线路最大功角差曲线如图 5、图 6 所示,偏差最大的最大功角差曲线如图 7 所示。

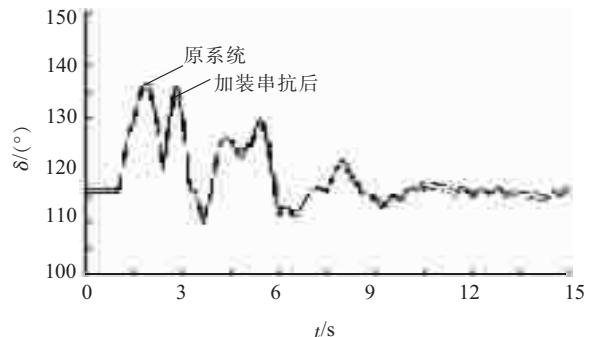


图 5 武南至晋陵单回三相短路系统最大功角差曲线比较

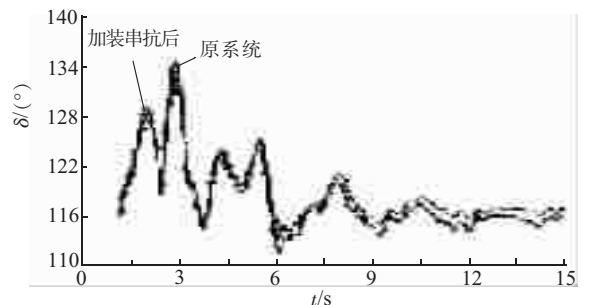


图 6 常熟南至石碑单回三相短路系统最大功角差曲线比较

加装串抗器线路发生三相短路时,系统最大功角差略有下降,如图 5 和图 6 所示,这是由于加装串

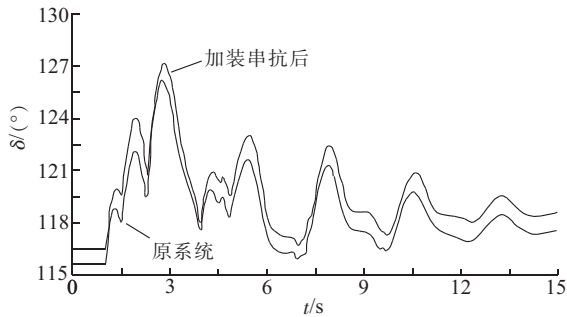


图7 晋陵至张家港单回三相短路系统最大功角差曲线比较

抗器线路的潮流减少造成的,并不意味着系统的稳定裕度提高^[13]。当系统加装串抗器后,晋陵至张家港线路和廻峰至岷珠线路发生故障时的最大功角略有增加,如图7所示。这是因为输电线传输功率增加,更接近极限传输功率造成的。不过可以明显判断出系统仍然是稳定的。

经过对加装串抗器前后系统潮流和稳定性的校核可知,根据方案2加装串抗器,虽然会对潮流和稳定性带来影响,但是远不足以使系统线路过载或者系统失稳。方案2满足系统正常运行的要求。

6 结束语

本文提出了一种采用粒子群算法优化配置限流电抗器的方法,使得在满足限制短路电流的前提下,尽可能地减少加装串抗器的数量和总阻抗,即使得总投入成本最小,同时保证系统正常运行。通过在IEEE30节点标准系统和江苏电网的实际应用,表明本文方法的可靠性和实用性。江苏电网优化配置串抗器方案(方案2)满足限制短路电流和电网正常运行的要求,具有一定的实用价值。

参考文献:

- [1] SARMIENTO H G, CASTELLANOS R, PAMPIN G, et al. An Example in Controlling Short Circuit Levels in a Large Metropolitan Area [J]. Power Engineering Society General

Meeting, 2003(2):589-594.

- [2] 黄娟娟,郑英芬. 特高压网架对华中电网短路电流水平的影响分析及限流措施[J]. 中国电力, 2007, 40(3):49-52.
- [3] 王文廷,江道灼. 电网短路电流限制措施的探讨[D]. 杭州:浙江大学, 2005.
- [4] 江道灼,熬志香,卢旭日,等. 短路限流技术的研究与发展[J]. 电力系统及其自动化学报, 2007, 19(3): 8-19, 87.
- [5] 殷可,高凯. 应用串联电抗器限制500 kV短路电流分析[J]. 华东电力, 2004, 32(9):7-10.
- [6] AMON J F, FERNANDEZ P C, ROES E H, et al. 巴西在将限流电抗器用于短路电流限制方面取得的成功经验[J]. ELECTRO-TECHNICAL APPLICATION, 2006, 25(1):4-8.
- [7] 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.
- [8] 杨帆. 干式空心限流电抗器技术特点[J]. 华东电力, 2005, 33(5):38-40.
- [9] 薛敏,卢波,黄花,等. 首台500 kV线路串联电抗器在华东电网的应用研究[J]. 华东电力, 2008, 36(11): 47-50.
- [10] BELLEI T A, CAMM E H, RANSOM G. Current limiting Inducors Used in Capacitor bank Applications and their Impact on Fault Current Interruption[J]. Transmission and Distribution Conference and Exposition, 2001(1):603-607.
- [11] 祝瑞金,蒋跃强,杨增辉,等. 串联电抗器限流技术的应用研究[J]. 华东电力, 2005, 33(5): 18-22.
- [12] COELLO C A, PULIDO G T, LECHUGA M S. Handling Multiple Objectives with Particle Swarm Optimization [J]. IEEE Trans on Evolutionary Computation, 2004, 8(3):256-279.
- [13] 王宗义,郭志忠. 远距离输电断面暂态稳定极限的影响因素分析[J]. 中国电力, 2006, 39(8):29-32.

作者简介:

- 茅嘉毅(1986-),男,江苏南京人,硕士研究生,从事电力系统运行控制方面的研究工作;
- 蒋平(1954-),男,江苏溧阳人,教授,主要研究方向为电力系统运行控制和电力电子在电力系统中的应用;
- 胡伟(1978-),男,江苏常熟人,工程师,从事江苏电网运行分析及稳定研究工作。

Research on Optimal Location of CLI Using PSO Algorithm and its Application

MAO Jia-yi¹, JIANG Ping¹, HU Wei²

(1. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. Dispatching and Communicating Center of Jiangsu Electric Power Company, Nanjing 210024, China)

Abstract: With the continuously increasing scale of the power system, the short-circuit current of buses is consequently increasing. At present, the current-limiting inductor (series inductor) is often used to limit the three-phase fault current in 500 kV power system. The paper presents a new approach for optimal CLI location based on particle swarm optimization(PSO), to make the quantity and total impedance of CLI least and ensure power system normal operation in the premise of meeting short-circuit current limit. The practicability and reliability of the approach is verified by comparison with enumeration results of an IEEE 30-bus system. The approach has been applied to the Jiangsu Power Grid and met the design requirements.

Key words: particle swarm optimization (PSO); optimal location; current-limiting inductor; short-circuit current