

考虑运行损耗的故障限流器布点优化和容量选择

许逵¹, 孙婷², 韩松², 赵立进¹, 马晓红¹

(1. 贵州电力试验研究院, 贵州 贵阳 550001; 2. 贵州大学电气工程学院, 贵州 贵阳 550025)

摘要: 为完善串联谐振型故障限流器的系统侧应用技术, 提出了一种考虑运行损耗的故障限流器布点优化和容量选择方法。初步构建了一个以全网损耗增量和限流电抗值总和最小为目标函数, 以母线短路电流、母线电压、限流器阻抗及其安装候选位置为约束条件的数学模型。借助 PSS/E 和 Matlab 粒子群算法工具包, 实现了该优化问题的求解。案例研究在一个修改的 IEEE-39 节点系统中展开, 不同台数优化安装方案的比较结果表明, 该方法是有效的。其模型引入了网损变量, 完善了传统目标函数中的经济性指标。

关键词: 短路电流; 故障限流器; 布点优化; 参数优化; 电网损耗; 粒子群算法

Optimal sitting and parameter selection for fault current limiter constrained with power losses

XU Kui¹, SUN Ting², HAN Song², ZHAO Lijin¹, MA Xiaohong¹

(1. Guizhou Electric Power Testing and Research Institute, Guiyang 550001, China;

2. Department of Electrical Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

Abstract: In order to improve the system-side application technology of series resonant-type fault current limiter (SRFCL), this paper proposes an optimization model and method constrained with power losses for optimal sitting and parameter selection of SRFCL. A mathematical model is initially developed based on particle swarm optimization (PSO) algorithm, whose objective function is subject to the minimization of the total impedance of SRFCLs and the power loss increment, bounded by the inequality constraints including short circuit current, bus voltage, current limiting reactance and candidate location. PSS/E software and the particle swarm optimization toolbox in Matlab are employed to solve the above optimization problem. The case study has been carried out in a modified IEEE-39 bus test system, and the comparison with the results from different SFCL placement schemes demonstrates that this methodology is effective, and it improves the economic indicator of the traditional method through introducing the system loss variable.

Key words: short-circuit current; fault current limiter; optimal sitting; parameter selection; power losses; particle swarm optimization

中图分类号: TM471 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)05-0021-06

0 引言

近年来, 为满足负荷快速增长需求以及提高输电配电网可靠性, 国内部分区域特别是高负荷密度地区电网的装机规模、网架结构、互联线路日趋增强, 短路电流水平显著增加。这给变压器、断路器、隔离开关、互感器、母线、绝缘子、架构、接地网等电气一次设备提出了更苛刻的要求, 并严重威胁电

网安全稳定运行^[1-5]。因此, 为避免大规模地更换或加强这些电网装备, 如何将短路电流水平控制在合理的范围之内, 已成为我国电力系统规划设计和运行管理中亟需解决的问题^[6-8]。

传统上, 限制短路电流可以采用分层、分区、解列运行、加装串联普通电抗器等方法^[9-10]。但這些被动式短路电流限制措施受系统网架结构、运行方式、安全稳定性等因素的制约, 限流效果有限, 且存在如降低系统正常运行时的供电可靠性与运行灵活性、压降损耗和操作过电压隐患等负面影响。而故障电流限制器(Fault Current Limiter, FCL)

基金项目: 贵州电网公司重点科技项目(K-GZ2012-098); 贵州省科教青年英才培养工程项目(2012151)

则能够主动式地限制短路电流, 确保系统安全稳定运行, 节省电气设备更换成本。可以说, 对于近中期区域网架变化较小、短路电流又较高的变电站500 kV母线来说, 串联限制型故障限制器(SRFCL)不失为一种灵活有效的故障电流限制补充方式。

目前, 电力系统规划设计中的短路电流限制方案一般采用依据专家经验的启发式方法, 借助传统的短路电流计算等分析手段, 通过多个专家预选基本方案(涉及安装地点、型式、限流电抗及其取值范围等)的比选来获得最佳方案^[11-14]。该类方法往往费时费力, 不能保证布点和参数最优方案的获得, 存在一定的局限性。文献[15]提出了一种以短路电流变化灵敏度为指标的超导故障限流器优化配置方法。文献[16]提出一种以系统短路电流方程为约束条件, 以限流阻抗的取值范围和系统短路电流不超限, 节点短路电流平方和最小、接入的限流阻抗代数和最小为优化目标, 运用粒子群优化算法、遗传算法, 基于广义逆与变换的优化方法以及由其构成的混合优化算法求解方法, 初步实现了多变量情况下的最优解求解问题。但上述方法均未考虑SRFCL接入电网后的运行损耗或方案经济性问题。为完善传统目标函数的经济性指标, 本文引入了系统损耗变量, 提出了一种基于粒子群算法的短路电流限制器的布点和参数优化模型和方法。它可以在满足限制各母线短路电流低于相应开关遮断容量的前提下, 使得加装SRFCL的数量和容量(阻抗值)最小, 同时保证各母线电压在允许的限度内, 案例分析在一个IEEE39节点测试系统展开, 其结果表明了该方法的有效性。

1 SRFCL的布点和容量选择优化问题

1.1 数学模型

为使系统中接入SRFCL限流阻抗后满足系统各节点短路电流不超限, 各非故障母线电压均在合理范围内, 同时在一定程度上考虑接入后的全网网损变化最小, 实现最小的SRFCL限流阻抗接入和最少的SRFCL安装数量的优化目标, 可建立如下优化模型。

(a) 目标函数

$$\text{Min}J = \sum_{i=1}^{N_{\text{SRFCL}}} (X_i) + k \cdot \Delta P_{\text{Loss}} \quad (1)$$

在上述目标函数数学模型中, X_i 是第 i 个 SRFCL 的电抗值, N_{SRFCL} 是 SRFCL 的数量, P_{Loss} 是

潮流分析获得的全网损耗, k 是全网损耗增量 P_{Loss} 和 SRFCL 电抗值总和 $\sum_{i=1}^{N_{\text{SRFCL}}} (X_i)$ 之间的折中权重系数, 小型网络一般取为 1。

(b) 约束条件

$$I_{j_{\min}}^{\text{SC}} \leq I_j^{\text{SC}} \leq I_{j_{\max}}^{\text{SC}}, \quad j = 1, \dots, N_B; \quad (2)$$

$$X_{i_{\min}} \leq X_i \leq X_{i_{\max}}; \quad (3)$$

$$V_{j_{\min}} \leq V_j \leq V_{j_{\max}}, \quad j = 1, \dots, N_B; \quad (4)$$

$$L_{\text{SRFCL}, \min} \leq L_{\text{SRFCL}} \leq L_{\text{SRFCL}, \max}. \quad (5)$$

在上述约束条件数学模型中, N_B 为全网母线总数, 式(2)为母线短路电流约束条件, 其中 I_j^{SC} 为 j 母线的三相短路电流计算值, $I_{j_{\max}}^{\text{SC}}$ 为 j 母线的三相短路电流上限, 一般取该母线线路开关的标准遮断容量值, $I_{j_{\min}}^{\text{SC}}$ 为 j 母线的三相短路电流下限, 一般取该值为原网络短路电流值的 50% (该值过低, 或导致寻优计算中局部短路电流过低; 该值过高, 或导致寻优计算时间过长)。式(3)为限流阻抗参数范围约束 (实际系统, 一般在 5~25 Ω)。式(4)为母线电压约束。式(5)为安装候选位置约束, 其中 L_{SRFCL} 是 SRFCL 安装候选位置, 即线路编号, $L_{\text{SRFCL}, \max}$ 是 SRFCL 安装候选线路编号的上限, $L_{\text{SRFCL}, \min}$ 是 SRFCL 安装候选线路编号的下限。一般来说, 对于实际系统, 为减少计算量, 可根据全网短路电流计算结果, 结合短路电流追踪情况, 给出一个候选线路的编号范围。当然, 对于小规模系统来说, 完全可以选择全网线路作为候选。

1.2 计算方法

粒子群算法, 也称粒子群优化算法 (Particle Swarm Optimization, PSO), 最早由 Kenney 和 Eberhart 于 1995 年提出^[17], 是一种源于对鸟群捕食行为研究的群智能随机优化算法。PSO 算法属于进化算法 (Evolutionary Algorithm, EA) 的一种, 和模拟退火算法相似, 也是从随机解出发, 通过迭代寻找最优解, 它也是通过适应度来评价解的品质, 但它比遗传算法规则更为简单, 它没有遗传算法的“交叉” (Crossover) 和“变异” (Mutation) 操作, 它通过追随当前搜索到的最优值来寻找全局最优。这种算法可以通过粒子间的信息交换, 快速决定收敛于求解空间中的某一点, 容易实现且需要的调整参数少, 引起了学术界的广泛关注。因其具有实现容易、精度高、收敛快的优点, 与其他算法相比, PSO 具有平衡搜索全局和探索局部之间的控制能力, 这种

独特的功能可以提升搜索能力, 适合在工程上应用。

结合SRFCL的布点和容量选择优化问题的数学模型分析和构建情况, 可以看出, L_{SRFCL} 、 X_i 可以用下述PSO算法的一个粒子来表征。

下面介绍本文采用的PSO求解方法。

$$v_i^{k+1} = wv_i^k + r_1 \text{rand}_1 \times (p_i^{\text{opt}} - u_i^k) + r_2 \text{rand}_2 \times (g_i^{\text{opt}} - u_i^k) \quad (6)$$

$$u_i^{k+1} = u_i^k + v_i^{k+1} \quad (7)$$

式中: v_i^k 、 v_i^{k+1} 分别代表第 k 、 $k+1$ 次迭代中主体 (Agent) i 的速度; u_i^k 、 u_i^{k+1} 分别代表第 k 、 $k+1$ 次迭代中主体 (Agent) i 的位置; w 代表权函数; r_1 、 r_2 分别代表个体最优位置和全局最优位置的相对权系数; rand_1 和 rand_2 代表两个不同的0到1之间的随机数; p_i^{opt} 代表第 i 个粒子的个体最优位置; g_i^{opt} 代表第 i 个群体的全局最优位置。

此外, 关于权函数, 存在如式(8)的关系。

$$w = \frac{w_{\text{max}} - w_{\text{min}}}{i_{\text{max}}} \times i \quad (8)$$

式中: w_{max} 和 w_{min} 代表最大和最小权系数; i_{max} 代表允许的最大迭代次数; w 和 i 分别代表当前的权重值和迭代次数。

1.3 算法步骤和说明

本文算法流程图如图1所示。并进一步说明如下:

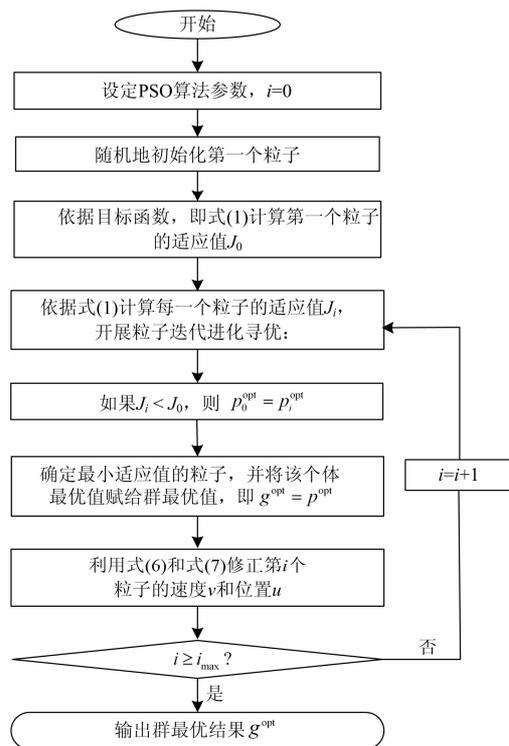


图 1 本文算法流程图

Fig. 1 Flow chart of the proposed algorithm

(a) 指定PSO算法的各项初始化参数, 如: 种群数目、最大粒子速度、权重系数、个体最优位置和全局最优位置的相对权系数、允许最大迭代次数、约束条件取值范围等。

(b) 随机地初始化第一个粒子。

(c) 由目标函数, 即式(1)来计算该粒子的适应值 J_0 , 并将该结果赋予 p_0^{opt} 。

(d) 再由式(1)计算下一个粒子的适应值 J_1 , 从而借助迭代开展粒子进化寻优计算。

(e) 如果 $J_i < J_0$, $p_0^{\text{opt}} = p_i^{\text{opt}}$, 否则, p_0^{opt} 不变。

(f) 选择最小适应值的粒子, 并将该个体最优值赋给群最优值, 即 $g^{\text{opt}} = p^{\text{opt}}$ 。

(g) 利用式(6)修正第 i 个粒子的速度 v 、利用式(7)修正第 i 个粒子的位置 u 。

(h) 如果 i 小于允许最大迭代次数 i_{max} , 则重新进行适应值计算, 继续迭代进化; 若到达允许迭代次数上限, 则输出群最优结果。

2 算例分析

本文的案例分析采用了一个IEEE 39节点的系统。该系统有10台等值发电机, 最大短路电流标幺值出现在母线36上, 其标幺值为75.4 p.u.。考虑中心区域负荷增长, 规划在该系统中新增5台等值发电机, 新增装机容量共计800 MW, 各新增发电机位置如图2虚线部分所示。其中, 三个100 MW的发电厂分别安装在母线24、母线37和母线39, 另外两个250 MW发电厂分别安装在母线21和母线35。这个规划电力系统的最大短路电流母线同样位于36母线, 其值增至96.2 p.u.。

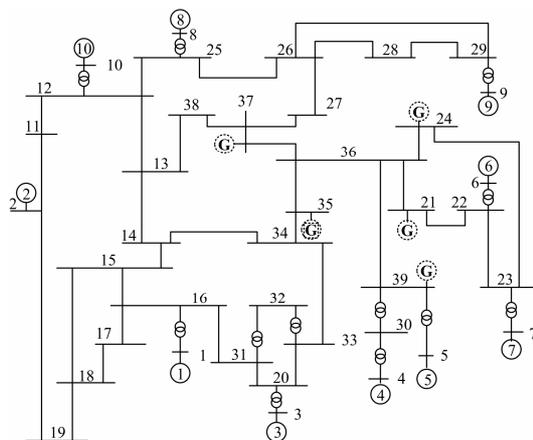
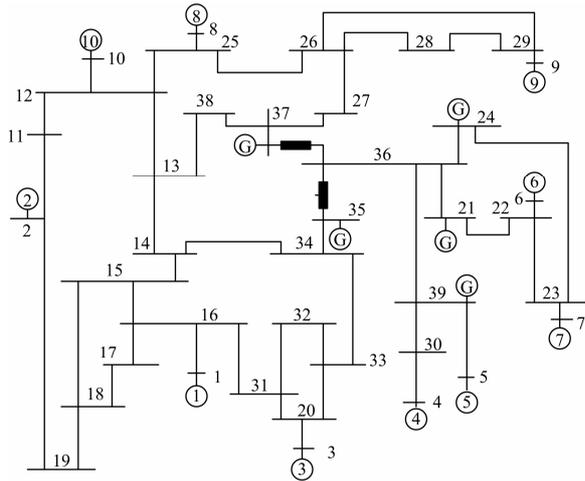


图 2 一个修改的IEEE39节点测试系统

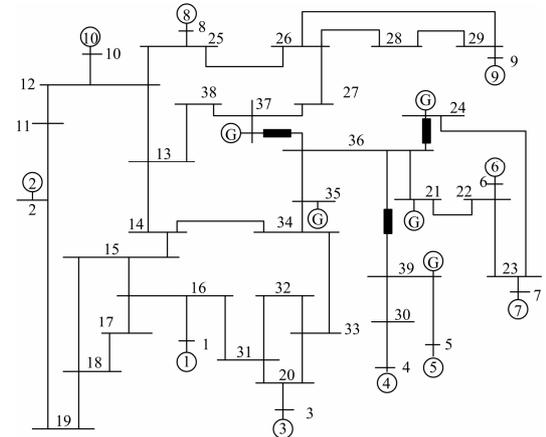
Fig. 2 A modified IEEE 39 bus system

针对上节所述PSO优化算法,借助PSS/E软件和Matlab软件PSO工具包^[18],制定了以下计算方案和搜索参数的取值范围: $X_i \in [0.0001, 0.04]$, $L_{SRFCL} \in [1, 46]$, 最大短路电流允许值为80 p.u., 最低允许电压为0.90 p.u., 最大粒子速度为8, 种群数目为48, $w_{max}=0.9$, $w_{min}=0.3$, $r_1=2$, $r_2=2$, $i_{max}=500$, $k=1$ 。

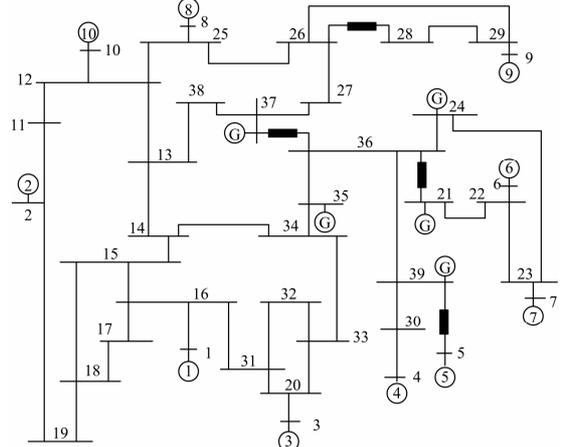
这样,使用上述基于PSO的优化算法来求解该算例的故障限流器布点优化和容量选择问题,SRFCL安装在不同母线处的短路电流限制效果列写于表1。计算所得不同台数SRFCL的安装方案示意图如图3所示。



(a) 2台SRFCL的安装方案示意图



(b) 3台SRFCL的安装方案示意图



(c) 4台SRFCL的安装方案示意图

图3 不同台数SRFCL的安装方案示意图

Fig. 3 Several sitting schemes for SRFCL

表1 基于PSO算法的SRFCL布点优化和容量选择结果

Table 1 Results from the PSO based optimum placement and parameter selection algorithm for SRFCL

FCL 个数	FCL 阻抗值	安装支路编号	首端母线	末端母线	短路电流/p.u.	FCL 总阻抗值/p.u.	损耗增量 ΔP_{Loss}
1	0.027 2	6	36	37	85.6	0.027 2	0.004 9
2	0.020 1	7	35	36	79.98	0.050 5	0.008 2
	0.030 4	6	36	37			
3	0.027 9	6	36	37	79.96	0.051 3	0.008 5
	0.001 7	3	36	24			
	0.021 7	5	36	39			
4	0.001 7	12	26	28	79.98	0.080 1	0.012 1
	0.027 9	4	36	37			
	0.016 3	36	36	21			
	0.034 2	6	39	5			

由表1和图3可见,本优化算法计算结果给出了4种短路限流器安装方案。其中,(1)单台方案:仅在线路6安装1台阻抗为0.027 2 p.u.(损耗增量0.004 9 p.u.)的SRFCL时,母线36处的短路电流仍超过断路器的遮断容量80 p.u.,不能满足约束条件中的限流要求。(2)双

台方案:在线路7和线路6首端上各安装1台阻抗大小分别为0.020 1 p.u.和0.030 4 p.u.(总电抗值0.050 5 p.u.,损耗增量0.008 2 p.u.)的SRFCL时,母线36处的短路电流可以降到79.98 p.u.,满足约束条件中限流要求。(3)三台方案:在线路6、线路3以及线路5首端上各安

装1台阻抗大小分别为0.027 9 p.u.、0.001 7 p.u.和0.021 7 p.u.(总电抗值0.051 3 p.u., 损耗增量0.008 5 p.u.)的SRFCL时, 母线36处的短路电流能够降到79.96 p.u., 亦满足约束条件中限流要求。(4) 四台方案: 在线路12、线路4、线路36以及线路6首端上各安装1台阻抗大小分别为0.001 7 p.u.、0.027 9 p.u.、0.016 3 p.u.和0.034 2 p.u.(总电抗值为0.080 1 p.u., 损耗增量为0.012 1 p.u.)的SRFCL时, 母线36处的短路电流可降至79.98 p.u.。综合来看, 上述2~3台SRFCL方案均可以使该案例中母线36短路电流降至允许最大短路电流以下, 但2台SRFCL安装方案, 具有最小的安装数量(2台)、阻抗值之和(即0.050 5 p.u.)以及较低的网络损耗(0.008 2 p.u.)。因此, 该方案为推荐方案。最后, 给出了该系统加装2台SRFCL前后各母线短路电流的比较结果, 如图4所示。

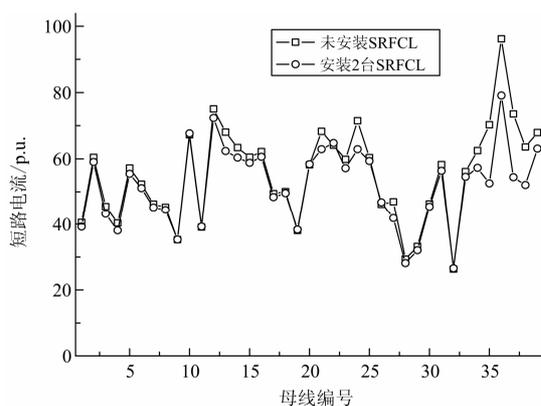


图4 2台SRFCL安装前后的全网母线短路电流对比

Fig. 4 Short circuit currents at all buses with and without the two SRFCLs

可见, 2台SRFCL安装方案可以将母线36上的最大短路电流从96.18 p.u.降到79.98 p.u., 低于最大短路电流允许值80 p.u., 说明本文所提方法是有效的。

3 结论

为了探究大规模电网的串联谐振型故障限流器(SRFCL)布点和容量选择优化问题, 本文提出了一种基于粒子群算法的短路电流限制器的布点及参数优化模型和方法。该优化方法考虑了系统损耗变量, 完善了传统目标函数中经济性指标。该算法可以搜寻SRFCL的安装台数、位置, 最经济、最有效地满足短路电流约束的要求。一个修改的IEEE39节点测试系统的仿真结果展示了该方法的有效性。

当然, 在实验研究中也发现, 这种基于PSO的优化算法的缺点是对于存在多个较接近短路电流值

母线的案例, 容易出现“早熟现象”而陷入局部最优, 难以获得全局最优解, 目前正通过增加群体的多样性以及约束方程取值范围修正的方法来进行改进。

参考文献

- [1] 韩松, 徐政, 毛雪雁, 等. 适用于大电网机电暂态仿真的高压 SCCL 模型研究[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(3): 27-31.
HAN Song, XU Zheng, MAO Xueyan, et al. High voltage SCCL model for electromechanical transient simulation of large power grid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(3): 27-31.
- [2] 顾雪平, 杨智龙. 不对称短路时电抗型故障限流器对暂态稳定性的影响[J]. 电工技术学报, 2009, 24(9): 86-91.
GU Xueping, YANG Zhilong. Influences of reactance-type fault current limiter on power system transient stability with asymmetrical short-circuit faults[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(9): 86-91.
- [3] 卫元朋, 韩松, 许逵. 串联谐振型高压故障限流器研究及应用进展述评[J]. 高压电器, 2013, 49(7): 104-109.
WEI Yuanpeng, HAN Song, XU Kui. Critical review on high-voltage series resonance type fault current limiter[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(7): 104-109.
- [4] KUO M T, WEI H T. Planning scheduling strategies to suppress the magnitudes of fault currents[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2014, 61(4): 474-481.
- [5] 刘凯, 陈红坤, 林军, 等. 故障限流器在电力系统中应用研究现状[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(7): 147-151.
LIU Kai, CHEN Hongkun, LIN Jun, et al. Study situation of applications of fault current limiter in power system[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(7): 147-151.
- [6] 耿淑娟, 张君捧, 张明玉. 串联谐振型 FCL 对高压断路器开断短路故障的影响[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(18): 32-38.
GENG Shujuan, ZHANG Junpeng, ZHANG Mingyu. Influence of serial-resonant FCL on the characteristics of circuit breakers during short-circuit faults[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(18): 32-38.
- [7] 昃萌, 廖敏. 故障电流限制器的晶闸管阀触发与监测系统[J]. 电工技术学报, 2010, 25(10): 191-195.
ZE Meng, LIAO Min. Thyristor triggering and monitoring system of fault current limiter[J].

- Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(10): 191-195.
- [8] 江道灼, 毛航银, 敖志香, 等. 串联谐振式限流器的仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(23): 164-169.
JIANG Daozhuo, MAO Hangyin, AO Zhixiang, et al. Simulation study of series resonance type fault current limiter[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(23): 164-169.
- [9] 谢国辉, 张粒子, 舒隽, 等. 求解互联电网经济调度的层级协调方法[J]. 电工技术学报, 2010, 25(4): 176-181.
XIE Guohui, ZHANG Lizi, SHU Jun, et al. Economic dispatching of interconnected power systems based on hierarchy coordination method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(4): 176-181.
- [10] 梁纪峰, 刘文颖, 梁才, 等. 500 kV 自耦变中性点串接小电抗对接地短路电流限制效果分析[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(13): 96-99.
LIANG Jifeng, LIU Wenyong, LIANG Cai, et al. Analysis of limiting effect of 500 kV autotransformer neutral grounding by small reactance on ground short-circuit current[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(13): 96-99.
- [11] TENG J, LU C. Optimum fault current limiter placement with search space reduction technique[J]. IET Generation, Transmission and Distribution, 2010, 46(4): 485-494.
- [12] 刘文颖, 但扬清, 朱艳伟, 等. 基于电力系统分析综合程序的限流方案综合评价方法[J]. 电网技术, 2011, 35(8): 150-154.
LIU Wenyong, DAN Yangqing, ZHU Yanwei, et al. A power system analysis software package based comprehensive evaluation method for short-circuit current limitation strategy[J]. Power System Technology, 2011, 35(8): 150-154.
- [13] KHAZALI A, KALANTAR M. Optimal power flow considering fault current level constraints and fault current limiters[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2014, 59(2): 204-213.
- [14] 应林志, 王建全, 陈讯, 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.
- [15] 胡文旺, 卫志农, 孙国强, 等. 基于灵敏度法的超导故障限流器优化配置[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.
- [16] 丘文千. 短路限流阻抗优化配置方法研究[J]. 浙江电力, 2012, 36(22): 1-5.
QIU Wenqian. Research on method of allocation optimization for short-circuit current limiting impedances[J]. Zhejiang Electric Power, 2012, 36(22): 1-5.
- [17] KENNEDY J, EBERHART R. Particle swarm optimization[C] // Proc IEEE Int Conf Neural Networks, 1995: 1942-1948.
- [18] BIRGE B. PSO-a particle swarm optimization toolbox for use with MATLAB[C] // Proc of Swarm Intelligence Symp: IEEE, 2003: 182-186.

收稿日期: 2014-06-03; 修回日期: 2014-07-08

作者简介:

许 远(1984-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事高电压技术、电力系统运行与控制方面的研究工作; E-mail: 15242819@qq.com

孙 婷(1986-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统运行与控制; E-mail: 249304706@qq.com

韩 松(1978-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为交直流电力系统建模与仿真、广域测量系统、配电网规划与运行和新型电力电子装备。E-mail: ee.shan@gzu.edu.cn

(编辑 魏小丽)