

基于改进粒子群优化算法的输电系统多阶段协调规划

陈海焱, 陈金富

(华中科技大学电气与电子工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 提出了一种输电系统多阶段协调规划模型, 模型中计入了以 $N - 1$ 静态安全条件表示的可靠性约束, 并对采用粒子群优化算法 PSO (Particle Swarm Optimization) 来求解该模型进行了研究, 引入新的变异策略对基本 PSO 算法进行了改进, 改进后的算法可以处理多维的离散变量, 有可能使粒子摆脱局部最优, 提高搜索效率。仿真算例表明该方法用于输电系统的多阶段协调规划是可行的。

关键词: 静态规划; 多阶段协调规划; 粒子群优化算法; $N - 1$ 静态安全

中图分类号: TM715 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2005)23-0036-05

0 引言

近两年来我国发生了全国性的大范围缺电现象, 从一个侧面暴露出我国的电力系统规划工作还不完善。特别是在负荷需求快速增长和全国联网进一步推进的新形势下, 如何搞好电力系统的规划工作已成为规划人员面临的一个非常紧迫的任务。输电系统的扩展规划作为电力系统规划问题的一个重要组成部分, 对其进行深入研究很有必要。

本文研究输电系统长期扩展规划。一般地, 输电系统的长期扩展规划分为两种方式: 静态规划^[1,2]和多阶段协调规划^[3,4]。静态规划只局限于未来某个水平年的规划, 即只考虑在整个规划期内新建线路的位置和数目, 无法真实反映实际电网的逐步扩展过程, 可能出现局部时间段不满足负荷要求的现象。而多阶段协调规划把规划期分成若干阶段, 在每一个阶段确定新建线路的位置和数目, 前一阶段的规划对后一阶段的规划产生影响, 显然多阶段协调规划是一个动态优化过程。对这样一个复杂的规划问题, 传统的数学优化方法难以解决, 只有借助启发式算法^[3,4]。文献 [3] 提出了采用遗传算法优化的输电系统多阶段协调规划方法, 文献 [4] 引入并行蚁群算法来求解输电系统多阶段的扩展规划, 这两种方法在测试中都取得了较好的效果。但是在这两篇文献的规划模型中约束条件比较宽松, 没有考虑到可靠性约束。常用的可靠性约束是 $N - 1$ 规则, $N - 1$ 规则包括 $N - 1$ 静态安全约束和 $N - 1$ 动态安全约束, 由于输电系统扩展规划问题的复杂性, 在约束条件中很难考虑系统的动态安全约束。

粒子群优化算法是由 Kennedy 和 Eberhart 在 1995 年提出的一种启发式的随机算法^[5], 该算法具

有并行处理、鲁棒性好等特点, 能以较大概率找到问题的全局最优解。作为一种新生的优化技术, PSO 已成功应用于电力系统中的经济调度^[6]、无功电压控制^[7]、同步发电机参数辨识^[8]、电网规划^[9]、PSS 参数设计^[10]等问题。本文在文献 [3, 4] 基础上提出了一种计及 $N - 1$ 静态安全约束的输电系统多阶段协调规划模型, 并对采用 PSO 算法来求解该模型进行了研究, 提出了一种适合于电网多阶段协调规划的改进 PSO 算法, 该算法可以处理多维的离散变量, 为了克服迭代后期收敛速度过慢和陷于局部最优解的缺陷, 本文引入了一种变异策略, 用来提高粒子的搜索效率。Garver - 6 节点系统测试表明该方法用于输电系统的多阶段协调规划是可行的。

1 数学模型

输电系统多阶段协调规划的基本原则是保证在规划期内各个阶段都能将电能安全可靠地送到负荷中心, 并且使输电网络在整个规划期内的总投资最小。本文选择规划期内输电线路投资总成本最小为目标函数, 采用直流法建立潮流约束方程, 并且考虑了以 $N - 1$ 静态安全条件表示的可靠性约束。为了灵活处理经济性和可靠性之间的关系, 引用惩罚因子将可靠性约束融入目标函数中。考虑到多阶段规划问题的复杂性, 本文假设规划期内各个阶段的可行路径相同。建立的数学模型如下:

目标函数

$$\min f = \sum_{t=1}^s \left(\sum_{i=1}^n c_i x_i^t + c_p^t \right) \quad (1)$$

约束条件:

$$B^t - t = P^t \quad (1a)$$

$$|P_L^t| \leq P_{Lmax} \quad (1b)$$

$$B^{t-1} = P^t \quad (1c)$$

$$|P_L^t| \leq P_{Lmax} \quad (1d)$$

$$\sum_{i=1}^s x_i^t \leq N_{max} \quad (1e)$$

其中: f 为目标函数; s 为规划期分成的阶段总数; n 为规划期内每个阶段的可行路径总数; c_i 为第 i 条可行路径上新建一回线路的投资成本; x_i^t 为第 t 个阶段第 i 条可行路径上拟新建的回路数; β^t 为贴现因子, $\beta^t = 1/(1+I)^{y_t}$, I 为贴现率, y_t 为规划期开始到 t 阶段末的年数; c_p^t 为 t 阶段不满足约束条件的惩罚因子, 分成三种情况: 不满足连通性约束、不满足 N 校核 (正常运行情况的潮流方程约束和支路功率约束)、满足 N 校核但不满足 $N-1$ 校核, 本文采用文献 [11] 介绍的方法计算 c_p^t ; B^t 、 B^t 为节点电纳矩阵, θ^t 、 θ^t 为节点电压相角构成的相量, P^t 、 P^t 为节点注入功率相量, P_L^t 、 P_L^t 为 t 阶段各线路有功潮流相量, 没有上标“ t ”的符号代表正常情况下的网络参数, 有上标“ t ”的符号代表 $N-1$ 开断条件下的网络参数, P_{Lmax} 为各支路最大有功潮流相量, N_{max} 为第 i 条路径在规划期内可扩建回路的最大数目。

上述式 (1) 构成的模型从数学上看是一个含有多种约束的多变量整数线性规划问题, 其中待优化的变量个数为各个阶段所有可行路径的总和, 由于实际系统中每一规划阶段可扩建回路的路径集合一般很庞大, 所以优化变量的维数非常高, 基于群智能的 PSO 算法在多维寻优中表现出了很好的特性, 本文在下面尝试将 PSO 算法用于输电系统多阶段的协调规划。

2 PSO 的改进与实现

2.1 基本粒子群算法 (BPSO) 介绍

粒子群优化算法同遗传算法类似, 也是基于群体迭代的, 但是它比遗传算法简单, 更容易实现。基本 PSO 算法描述如下^[5]:

设粒子种群规模为 N , 每个粒子的搜索空间为 D 维, 第 i 个粒子位置用向量 $X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{im})$ 表示; 第 i 个粒子在“飞行”历史中的最优位置用 $P_i = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{im})$ 表示, 称为个体极值 ($pBest_i$); 其中第 g 个粒子的历史最优位置 P_g 为所有 P_i ($i=1, \dots, N$) 中的最优, 则 P_g 称为群体极值 ($gBest$); 第 i 个粒子位置变化率 (速度) 为向量 $V_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{im})$ 。粒子每一维的速度和位置按式 (2) 和式 (3) 计算。

$$v_{id}(k+1) = w \times v_{id}(k) + c_1 \times rand() \times [p_{id}(k) - x_{id}(k)] + c_2 \times rand() \times [p_{gd}(k) - x_{id}(k)] \quad (2)$$

$$x_{id}(k+1) = x_{id}(k) + v_{id}(k+1) \quad (3)$$

$$x_{idmin} \leq x_{id} \leq x_{idmax}, \quad v_{idmin} \leq v_{id} \leq v_{idmax}$$

$$i=1, 2, \dots, N, \quad d=1, 2, \dots, D$$

式中: k 为迭代次数, c_1 、 c_2 为正常数, 称为加速因子或学习因子; $rand()$ 为 $[0, 1]$ 之间的随机数; w 称惯性因子, w 较大适于对解空间进行大范围探查, w 较小适于进行小范围开挖。其中 x_{mind} 、 x_{maxd} 分别为第 d ($1 \leq d \leq D$) 维的位置变化范围的上、下限, 第 d 维速度变化范围为 $[v_{mind}, v_{maxd}]$ 。

2.2 PSO 的改进 (MPSO)

PSO 算法早期搜索速度很快, 但是在后期当所有粒子都趋于粒子群历史最优位置 P_g 时, 粒子的速度更新将主要由式 (2) 等号右边第一项决定, 因为惯性因子 w 一般取值小于 1, 可见粒子的速度呈衰减趋势, 由式 (2)、式 (3) 知在迭代后期各粒子都趋向同一, 失去了多样性。针对基本粒子群算法的这个缺点, 学者们提出了变异思想^[6]: 即若连续 M 次迭代, 粒子群体最优结果不变, 则按概率 P_m 选取除最优个体外的粒子进行变异, 让随机产生的新粒子取代原粒子。通过这种变异, 可以在迭代后期重新获得粒子的多样性。这种变异是粒子由“死亡”到“重生”的过程, 实际上是一种全维变异, 即旧粒子的信息完全被淘汰掉。采用全维变异的 PSO 可以加速迭代后期的收敛速度, 但有时候仍会陷于局部最优。在输电系统扩展规划中, 局部最优解可能非常接近全局的最优解, 如果对迭代结束后得到的 $gBest$ 进行部分维变异, 有可能使计算结果摆脱局部最优。基于此, 本文提出如下的策略:

- 1) 确定部分维变异维数 m ($m < D$)。
- 2) 迭代计算结束后, 在 $[0, D]$ 内随机生成 m 个互不相同的整数 u_1, u_2, \dots, u_m 。
- 3) 变异 $gBest$ 相量在 u_1, u_2, \dots, u_m 位置上元素, 得到一个新的相量 $MBest$ 。
- 4) 分别计算 $MBest$ 和 $gBest$ 的适值 f_1, f_2 。
- 5) 如果 $f_2 < f_1$, 令 $MBest$ 为最终解; 否则令 $gBest$ 为最终解。

事实上, 在上述的 MPSO 算法中, 包含两个变异过程, 即全维变异和部分维变异。迭代后期的全维变异可以使粒子群体重新获得多样性, 迭代结束后对 $gBest$ 进行部分维变异有可能使粒子摆脱局部最优, 故有利于提高搜索成功率。

2.3 MPSO 的实现

1) 初始化

采用 MPSO 求解前面提到的规划问题时, 粒子 i

可以用下面的矩阵表示：

$$X_i = \begin{bmatrix} x_{i1}^{(1)} & x_{i1}^{(2)} & \dots & x_{i1}^{(s)} \\ x_{i2}^{(1)} & x_{i2}^{(2)} & \dots & x_{i2}^{(s)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{in}^{(1)} & x_{in}^{(2)} & \dots & x_{in}^{(s)} \end{bmatrix} \quad (4)$$

令 $X_i^{(t)} = (x_{i1}^{(t)}, x_{i2}^{(t)}, \dots, x_{in}^{(t)})^T$, 则 $X_i = (X_i^{(1)}, X_i^{(2)}, \dots, X_i^{(s)})$ 。矩阵 X_i 中的元素随机初始化, 但根据实际电力系统的要求, 矩阵 X_i 中的元素必须满足下面的约束：

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^s x_{ij}^{(t)} & N_{jmax} \\ x_{ij}^{(t)} & Z, j = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (5)$$

其中: Z 为正整数集; N_{jmax} 是规划期内第 j 条可行路径上扩建线路的最大数目, 搜索空间的维数 D 等于 $s \times n_0$ 。

同样地, 粒子 i 的速度矩阵定义如下：

$$V_i = \begin{bmatrix} v_{i1}^{(1)} & v_{i1}^{(2)} & \dots & v_{i1}^{(s)} \\ v_{i2}^{(1)} & v_{i2}^{(2)} & \dots & v_{i2}^{(s)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ v_{in}^{(1)} & v_{in}^{(2)} & \dots & v_{in}^{(s)} \end{bmatrix} = (V_i^{(1)}, V_i^{(2)}, \dots, V_i^{(s)}) \quad (6)$$

其中: $V_i^{(j)} = (v_{i1}^{(j)}, v_{i2}^{(j)}, \dots, v_{in}^{(j)})^T, j = 1, 2, \dots, n_0$ 。 $v_{ij}^{(j)}$ 在区间 $[v_{min}^{(j)}, v_{max}^{(j)}]$ 内随机产生。

设粒子群体规模为 N , 则随机产生 N 个 X_i 矩阵和 V_i 矩阵, 即可完成粒子群的初始化。在用 PSO 算法实现过程中, 对应的粒子位置为整数矩阵, 速度为实数矩阵, 因此优化过程中既有离散变量也有连续变量, 在用式 (2) 和式 (3) 进行迭代计算时需要作相应的修改。具体修改方法如下 (以粒子 i 为例)。

- 按式 (2) 计算速度矩阵中各元素 $v_{ij}^{(t)} (k + 1)$;
- 按式 (3) 计算位置矩阵中各元素 $x_{ij}^{(t)} (k + 1)$, 且 $x_{ij}^{(t)} (k + 1)$ 向上取整数;
- 当 $v_{ij}^{(t)} (k + 1)$ 和 $x_{ij}^{(t)} (k + 1)$ 超过其范围时, 按边界取值。

2) 实现流程

利用改进的 PSO 算法求解输电系统多阶段协调规划问题的算法实现流程框图如图 1 所示。其中, t 为规划期内的某一时间阶段, s 为规划期分成的总阶段数, K_{max} 为最大迭代次数, 惩罚值的计算参见文献 [11], 全维变异和部分维变异采用 2-1 节介绍的方法进行。

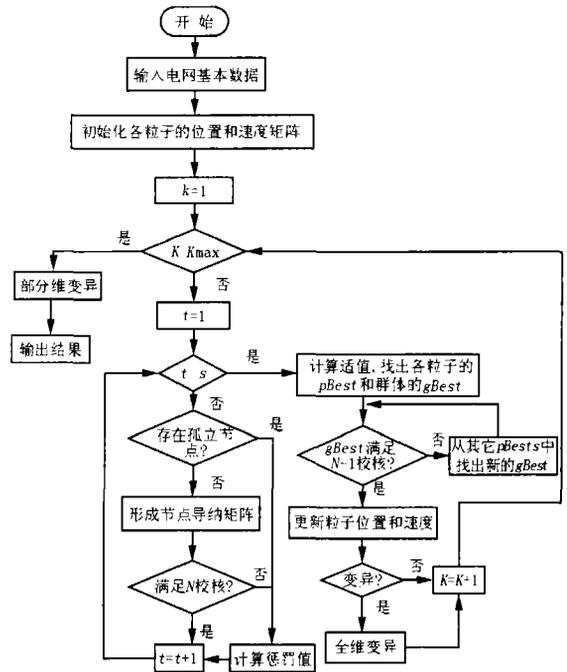


图 1 算法流程框图

Fig 1 Flow chart of the algorithm

3 算例分析

测试算例采用 Garver-6 节点系统 [12], 初始网络结构如图 2。取粒子群规模 100, 粒子变异概率 $p_m = 0.08$, 加速因子 $c_1 = c_2 = 2.0$, 惯性因子 $\omega = 0.8$, 最大迭代次数 $K_{max} = 700$; 设规划期为 2006 ~ 2020 年, 分成 3 个阶段, 每个阶段为 5 年, 不同阶段的电源出力和负荷数据如表 1 所示, 其它数据参见文献 [12]。

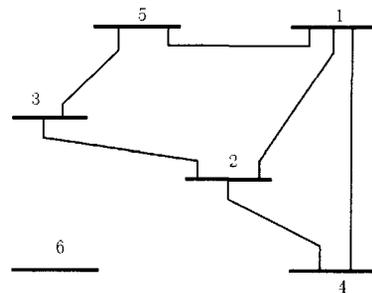


图 2 初始网络结构

Fig 2 The original network structure

表 2 是不计 $N - 1$ 约束时对应的单阶段规划结果, 用带全维变异、部分维变异的 MPSO 和仅带全维变异的 BPSO 两种方法各计算 50 次, 得到的最优结果相同, 但是采用 MPSO 方法的成功率为 32%, 而采用 BPSO 方法成功率仅为 20%, 可见本文提出的

部分维变异策略对摆脱局部最优值是有效的。图 3 是采用 MPSO 算法的收敛特性曲线,从中可以看出 150 次迭代后粒子的收敛速度变慢,陷于了局部最优值。500 次迭代后,全维变异操作开始生效,收敛过程明显加快,但是 600 次迭代后限于局部最优,迭代次数达到 700 后迭代结束,对迭代结果进行部分维变异,最终收敛到全局最优解。

表 1 各阶段的发电出力 and 负荷

Tab 1 The real power of generators and loads in each stage

Bus na	Stage 1 (2006 ~ 2010)		Stage 2 (2011 ~ 2015)		Stage 3 (2016 ~ 2020)	
	G_1	L_1	G_2	L_2	G_3	L_3
	1	25	40	40	64	50
2	0	120	0	192	0	240
3	82.5	20	132	32	165	40
4	0	80	0	128	0	160
5	0	120	0	192	0	240
6	272.5	0	436	0	545	0

注: G, L 分别表示规划期第 i 阶段的发电出力和负荷大小,单位 MW。

表 2 不计 $N - 1$ 约束的单阶段仿真结果比较Tab 2 Comparison of simulation results of two methods without $N - 1$ constraints in single stage

	The optimal case	Successful rate
MPSO	$L_{2-6}(4), L_{3-5}(1), L_{4-6}(2)$	32%
BPSO	$L_{2-6}(4), L_{3-5}(1), L_{4-6}(2)$	20%

表 3 是采用 MPSO 算法经过 50 次运算后得到的多阶段规划最优结果,计算过程共耗时约 210 s,若不考虑 $N - 1$ 约束,计算时间则为 85 s。在规划期末,在 2-6、3-5、3-6、4-6 四条路径上分别新建了 4 回、2 回、1 回、3 回线路,各路径的具体扩建方案分布在三个阶段完成。得出的方案在整个规划期内总投资最小,满足中间各个阶段的 $N - 1$ 安全要求,能够适应负荷和发电出力的连续增长,显然本文的规划方法比单阶段的规划更能真实地反映电网逐步扩展的过程。

表 3 计及 $N - 1$ 约束的多阶段测试结果Tab 3 Test results with $N - 1$ constraints in multi-stage planning

Path	The optimal case		
	Stage 1	Stage 2	Stage 3
L_{2-6}	3	0	1
L_{3-5}	1	1	0
L_{3-6}	0	1	0
L_{4-6}	1	2	0

注: 1) 数字表示要扩建的回路数; 2) 没标出的路径表示不扩建

4 结论

本文将粒子群优化算法用于求解输电系统的多

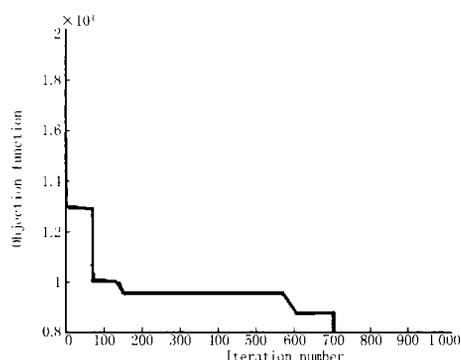


图 3 改进 PSO 算法的收敛特性

Fig 3 Convergence characteristics of the improved PSO algorithm for the single stage planning

阶段协调规划问题,提出了计及 $N - 1$ 静态安全约束的多阶段协调规划数学模型,给出了一种带部分维变异算子的改进 PSO 算法,6 节点系统的测试表明了该方法的可行性。相比遗传算法,所提出的改进 PSO 算法在解决输电系统多阶段规划问题时,优化变量维数的增加并不增加计算的复杂性。但是本文所做的工作只是 PSO 算法在输电网络多阶段协调规划中的初步尝试,由于约束条件中考虑了 $N - 1$ 静态安全条件,导致算法的计算速度相比无 $N - 1$ 静态安全约束时有所下降,如何提高 PSO 算法在大规模电力系统规划中的计算速度是下一步研究的工作。

参考文献:

- [1] da Silva E L, Mauricio J, Ortiz A, et al. Transmission Network Expansion Planning Under a Tabu Search Approach[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2001, 16(1): 62-68.
- [2] 杨宁,文福拴. 基于机会约束规划的输电系统规划方法[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(14): 23-27.
YANG Ning, WEN Fu-shuan. Transmission System Expansion Planning Based on Chance Constrained Programming[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(14): 23-27.
- [3] Escobar A H, Gallego R A, Romero R. Multi-stage and Coordinated Planning of the Expansion of Transmission Systems[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2004, 19(2): 735-744.
- [4] 翟海保,程浩忠,吕干云,等. 多阶段输电网络最优规划的并行蚁群算法[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(20): 37-42.
ZHA I Hai-bao, CHENG Hao-zhong, L ü Gan-yun, et al. Parallel Ant Colony Algorithm for the Multistage Transmission Network Optimal Planning[J]. Automation of E-

- lectric Power Systems, 2004, 28(20): 37-42
- [5] Kennedy J, Eberhart R. Particle Swarm Optimization[A]. Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks Perth(Australia): 1995. 1-12
- [6] 侯云鹤,鲁丽娟,熊信银,等. 改进粒子群算法及其在电力系统经济负荷配中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(7): 95-100
HOU Yun-he, LU Li-juan, XDNG Xin-yin, et al. Enhanced Particle Swarm Optimization Algorithm and Its Application on Economic Dispatches of Power Systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(7): 95-100.
- [7] Yoshida H, Kawata K, Fukuyama Y, et al. A Particle Swarm Optimization for Reactive Power and Voltage Control Considering Voltage Security Assessment[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2000, 15(4): 1232-1239.
- [8] 胡家声,郭创新,曹一家. 基于扩展粒子群优化算法的同步发电机参数辨识[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(6): 35-40
HU Jia-sheng, GUO Chuang-xin, CAO Yi-jia. Generator Parameter Identification Based on Extended Particle Swarm Optimization Method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(6): 35-40.
- [9] 胡家声,郭创新,叶彬,等. 离散粒子群优化算法在输电网络扩展规划中的应用[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(20): 31-36
HU Jia-sheng, GUO Chuang-xin, YE Bin, et al. Application of Discrete Particle Swarm Optimization to Transmission Network Expansion Planning[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(20): 31-36
- [10] Abido M A. Optimal Design of Power-system Stabilizers Using Particle Swarm Optimization[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2002, 17(3): 406-413.
- [11] 王晖,韩新阳,胡兆光,等. 基于模糊控制遗传算法的输电系统最优化规划[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(2): 51-55.
WANG Hui, HAN Xin-yang, HU Zhao-guang, et al. Transmission Network Planning and Optimization Model with Genetic Algorithms Based on Fuzzy Logic Controller[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(2): 51-55.
- [12] Romero R, Monticelli A, Garcia A, et al. Test Systems and Mathematical Models for Transmission Network Expansion Planning[J]. IEEE Proceedings—Gener, Transm and Distrib, 2002, 149(1): 27-36

收稿日期: 2005-04-06; 修回日期: 2005-05-24

作者简介:

陈海焱(1979-),男,博士研究生,主要研究方向为电力系统规划与分析计算;E-mail: chenhaiyan_415@163.com

陈金富(1972-),男,博士后,主要研究方向为电力系统规划、运行以及 FACTS应用技术。

Particle swarm optimization for transmission systems multi-stage and coordinated planning

CHEN Hai-yan, CHEN Jin-fu

(Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: A new model of transmission system multi-stage and coordinated planning, is presented in this paper considering $N-1$ static security constraints. This paper presents an improved particle swarm optimization (PSO) algorithm and selects it as the solution to multi-stage planning of transmission systems. The improved PSO is available to handle multi-dimension discrete variables. And a new mutation operator is described to enhance the search efficiency of particles. The test results show that the improved PSO is feasible to apply to multi-stage planning of transmission systems.

Key words: static planning; multi-stage planning; particle swarm optimization; $N-1$ static security constraints

(上接第 11 页 continued from page 11)

(1. Nanjing Automation Research Institute, Nanjing 210003, China; 2. NARI Power Control Company, Nanjing 210003, China)

Abstract: This paper points out the shortcomings of the digital relay based on DFT, which is applied in main-apparatus protection. And it discusses the influence on performance of the protections of main apparatus, which apply several digital relays based on DFT such as current differential relay, over voltage relay, over load relay, zero sequence over current relay, etc. It also introduces the uncorrected judgement of these relays in operation and promotes the improved method to enhance the performance.

Key words: DFT; digital relay; main apparatus; relay protection