

基于禁忌算法的多目标无功优化

熊 宁, 陈 愚, 戴伟华

(南昌大学信息工程学院, 江西 南昌 330031)

摘要: 提出一种基于禁忌算法的多目标无功优化方法。在多目标优化中, 包括了距离裕度和网损两项性能指标。首先在给定负荷增长方式的前提下, 利用改进连续潮流法快速地找到电压崩溃点, 进而求得当前运行点离崩溃点间的距离, 并以此距离作为裕度指标, 然后采用模糊集理论将裕度指标和网损指标两个目标优化问题转化为单目标优化问题, 最后利用改进的禁忌算法对该单目标进行优化, 使系统在满足约束的情形下既经济又安全地运行。文章在 IEEE14 节点系统上验证了该算法的优越性。

关键词: 多目标无功优化; 裕度指标; 网损指标; 连续潮流; 模糊集理论; 禁忌算法

Multi-objective optimization based on tabu algorithm

XIONG Ning, CHEN Ken, DAI Wei-hua

(Information Engineering School, Nanchang University, Nanchang 330031, China)

Abstract: This paper proposes a method for multi-objected reactive optimization taking voltage stability into account based on tabu algorithm. At first, voltage collapse point is traced by improved continuation power-flow method under the premise that load increasing pattern is given, the distance away from collapse point which can be regarded as margin index can be got at the same time. Then the two objectives including margin index and transmission loss are converted into single objective by adopting fuzzy set theory, improved tabu algorithm is used for optimizing this single objective, at last, in order to make system operate in security and economy under conditions. The advantage of this method is validated on IEEE14 bus system.

Key words: multi-objective reactive optimization; margin index; transmission loss index; continuation power-flow; fuzzy set; tabu algorithm

中图分类号: TM715

文献标识码: A

文章编号: 1003-4897(2006)24-0021-05

0 引言

常规的无功优化^[1,2]方法是以网损最小作为目标函数, 电压安全作为约束条件出现在数学模型中。它不能保证优化后, 系统的静态电压稳定裕度满足安全裕度的要求。因此人们把多目标优化问题转向了智能算法。禁忌算法^[3,4]因其计算速度快, 爬坡和局部寻优能力强, 得到了很大的关注。但它必须从可行域内的一个初值开始搜索, 这对于约束条件苛刻的无功优化问题, 该初值是很难找到的。因此, 目前多目标优化的主要方法是遗传算法^[5~7], 但遗传算法局部寻优能力差, 解的质量一般不高。后来发展了遗传禁忌混合算法^[8,9], 把遗传优化后的个体作为禁忌搜索的初值, 但这样相当于做了两次优化, 计算时间长。另外, 多目标优化结果的好坏

很大程度上取决于目标函数取得是否恰当。文献[5]、[6]采用模糊集理论将多目标单一化, 把各目标的隶属度值累加, 优化目标是累加值最大。但采用最大化隶属度累加和的方法可能会导致提升指标好的目标来弥补指标差的目标, 很难做到整体最优。文献[10]是用权重将多目标转化为单目标, 优化的目标函数是将各目标函数值乘以各自权重的累加和最小, 同样存在不能整体最优的问题。因此极需研究一种考虑静态电压稳定裕度的多目标优化模型和一种较好的求解方法以满足求解速度和精度的双重要求。

本文提出一种新的目标函数—最小化各目标的隶属度最大值(指标差的隶属度值大), 这样将只提升差的指标, 使系统的整体性能得到提高。并且采用改进禁忌算法对其进行求解, 不仅对初值无

任何要求，而且优化速度快，解的质量高。

1 距离裕度

本文以距离裕度指标作为优化目标之一，距离裕度是指在某种负荷增长方式下，当前运行点到电压崩溃点之间的负荷距离。其中负荷增长方式代表负荷的变化方向，通常用下个运行点负荷向量（由负荷预测得到）减去当前运行点负荷向量的二阶范数表示。在运行状态不变情况下，负荷沿着不同的增长方式增长，得到的距离裕度不相同。优化目的是在给定的某种负荷增长方式下，调整当前运行点参数，使距离裕度最大。

优化目标函数为：

$$F_1 = \max \lambda = \max \frac{Y_{cr} - Y_s}{Y_d} \quad (1)$$

其中： λ 是距离裕度； Y_{cr} 是临界运行点的负荷量； Y_s 为当前运行点的注入功率； Y_d 为负荷增长方式向量。

为得到距离裕度，求解临界运行点是关键。临界运行点状态的求取是在满足约束情形下，按某种方式不断增长负荷，在系统保持稳定的条件下，负荷达到最大值的运行点即为电压稳定临界点。但采用常规潮流方法计算，在功率极限点附近雅可比矩阵接近奇异，迭代不收敛。连续潮流法^[11,12]是通过参数变化并引入一维校对方程，其机理仍是采用逐步增加负荷的方式逼近电压崩溃点，它在 PV 曲线鼻形点附近将固定负荷校正转为固定电压校正，巧妙地解决了潮流雅可比矩阵奇异的难题。但由于连续潮流法无法预估系统在多重的负荷下接近崩溃，只有通过慢慢不断增加负荷的方式来接近崩溃点。求解速度慢。为此，本文下面提出改进方法。

1.1 改进连续潮流法

由于在电压崩溃点处，弱节点的电压值一般低于 0.7 pu，为了能快速地接近电压稳定临界点，本文以弱节点电压作为连续变量，进行大步长下降，直接降到崩溃电压的上方。

假设一个系统节点数为 n ，其中 PV 节点有 r 个，PQ 节点有 m 个，平衡节点一个。采用弱节点电压变步长下降的方法搜索临界点。弱节点电压为 0.7 pu 的运行点的校正公式为：

$$\begin{bmatrix} J & Y_d \\ e_i & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\theta \\ \Delta V \\ \Delta\lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_s + \lambda Y_d \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中： J 为常规雅可比矩阵； Y_s 为初始运行点的注入功率； Y_d 为负荷增长方式； e_i 为 $2n-r-2$ 维的行向量，其中电压变化量最大的节点（弱节点） i 对应的分量为 1，其余为 0； λ 为 PV 曲线上上一个运行点离初始运行点的距离。

负荷增长方式可通过超短期负荷预测得到。计算初值可用上个运行点的状态值，但令连续变量 $V_i=0.7$ 。由于在方程 (2) 中 $e_i \begin{bmatrix} \Delta\theta \\ \Delta V \end{bmatrix} + 0 \cdot \Delta\lambda = 0$ ，使得 $\Delta V_i=0$ ，在修正过程 $\theta^{(k+1)} = \theta^{(k)} + \Delta\theta^{(k)}$ ； $V^{(k+1)} = V^{(k)} + \Delta V^{(k)}$ ； $\lambda^{(k+1)} = \lambda^{(k)} + \Delta\lambda^{(k)}$ 中保证了连续变量 V_i 不变，可求出弱节点电压为 0.7pu 运行点的运行参数。

由于以弱节点电压作为连续变量，故即使采用大步长下降一般也不会导致扩展潮流解的发散。大步长下降后，为获得精确的临界点，仍需以节点电压变化量最大的电压作为连续变量，采用小步长下降来靠近崩溃点。一般步长可取 0.01~0.02(依精度而定)，计算公式仍为式 (2)。为使方程式 (2) 更快地收敛，可采用线性法或切线法^[13]对计算初值进行预估。

由于一般在电压崩溃点附近，所有无功源（平衡节点除外）的无功输出都会越限，因此完全可以在初始运行点就将所有的 PV 节点转为 PQ 节点来进行简化，这样就无需考虑崩溃点的无功约束问题。简化条件是否成立，可通过检验临界点处各无功源节点的端电压是否低于指定的电压来判断。若是，表示简化条件成立；否则把端电压高的节点转回 PV 节点，重新计算。

具体步骤如下：

- 1) 将所有的 PV 节点转为 PQ 节点，根据实际情况调整负荷增长方式 Y_d 。
- 2) 在初始运行点，对负荷增加一个步长 $\Delta\lambda$ ，采用连续潮流方法求负荷增长后的运行点。比较 m 个 PQ 节点的 ΔV_i ($i=1,2,\dots,m$)，找出变化最大的节点作为系统的弱节点。
- 3) 以弱节点电压作为连续变量，进行大步长下降，直接降到崩溃电压的上方 0.7。
- 4) 用小步长追踪精确的电压崩溃点，获得临界点。
- 5) 在崩溃点处校验简化条件是否成立。若成立，结束；否则把不成立的节点转回 PV 节点，调整负荷增长方式 Y_d ，转步骤 2)。

改进的连续潮流法采用弱节点电压变步长下降来搜索临界点,减少了中间运行点的数量,并且在初始点就将所有的PV节点转为PQ节点来处理,化除了约束条件,大大加快了求解速度。

2 网损指标

在满足约束条件下,本文以最小有功网损作为另一优化目标。

优化目标函数为:

$$F_2 = \min P_{\Sigma} = \min \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n V_i V_j G_{ij} \cos \theta_{ij} \quad (3)$$

等式约束条件为:

$$P_i = V_i \sum_{j \in i} V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (4)$$

$$Q_i = V_i \sum_{j \in i} V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (5)$$

不等式约束条件为:

$$\left. \begin{aligned} Q_c^{\min} &\leq Q_c \leq Q_c^{\max} \\ Q_{Gi}^{\min} &\leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi}^{\max} \\ U_i^{\min} &\leq U_i \leq U_i^{\max} \\ t_i^{\min} &\leq t_i \leq t_i^{\max} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

其中:公式(4)、(5)是潮流方程约束; Q_c^{\min} 是电容补偿的最小无功量; Q_c^{\max} 是电容补偿的最大无功量; Q_{Gi}^{\min} 是发电机的最小无功; Q_{Gi}^{\max} 是发电机提供的最大无功功率; t_i^{\min} 是可调变压器最小变比; t_i^{\max} 是可调变压器最大变比; U_i^{\min} 是节点*i*允许的最小电压; U_i^{\max} 是节点*i*允许的最大电压。

3 多目标单一化

静态电压稳定裕度的提高与系统网络损耗的减少有时是相互矛盾与制约的,通常意义下的最优解并不存在,即不可能使各个目标函数都达到最优,取而代之的是一组适应约束条件而相对于不同目标互有优劣的有效解。同时由于目标函数具有不同的量纲,相互之间是不可比的。因此模糊集理论解决这种多目标问题的最好方法。

3.1 多目标优化数学模型

$$F = \min \max \mu(F_i) \quad (7)$$

其中: F_i 是单目标指标值; $\mu(F_i)$ 是各目标的隶属

度值。

个体某种指标越差,相应的隶属度值越大。优化目的是将隶属度值最大的指标(该指标性能最差)最小化。

3.2 隶属度函数

隶属函数的取法有线性、凸指数形、凹指数形、双曲线形^[14]等。在此全部采用线性函数。

对于距离裕度指标,选择隶属函数 $\mu(F_1)$ 为单调递减函数。

$$\mu(F_1) = \begin{cases} 1 & F_1 \leq F_{1\min} \\ \frac{F_{1\max} - F_1}{F_{1\max} - F_{1\min}} & F_{1\min} \leq F_1 \leq F_{1\max} \\ 0 & F_1 > F_{1\max} \end{cases} \quad (8)$$

对于网损指标,选择隶属函数 $\mu(F_2)$ 为单调递增函数。

$$\mu(F_2) = \begin{cases} 0 & F_2 \leq F_{2\min} \\ \frac{F_2 - F_{2\min}}{F_{2\max} - F_{2\min}} & F_{2\min} \leq F_2 \leq F_{2\max} \\ 1 & F_2 > F_{2\max} \end{cases} \quad (9)$$

式中: $F_{1\min}$ 、 $F_{2\max}$ 为不能接受的目标值; $F_{1\max}$ 、 $F_{2\min}$ 为理想的目标值。

4 禁忌算法

本文用禁忌(TS)算法进行目标优化。TS算法基本思想是建立禁忌表对已经进行的优化过程进行记录和选择,指导下一步搜索方向。禁忌表中保存了最近若干次迭代过程中所实现的移动的逆方向,凡是处于禁忌表中的移动,在当前迭代过程中是不允许实现的,这样避免算法重新访问最近访问过的解群,从而帮助算法摆脱局部最优解。另外,为了尽可能不错过最优解,TS搜索还采用“释放准则”策略。

由于在禁忌搜索中,必须从一个可行的初始解开始搜索,然而在无功优化中,约束条件极为苛刻,选择一个满足条件的初值较为困难。并且常规禁忌只把满足约束的个体选入候选集,不满足的则丢弃,这样为了在候选集中达到一定的个体数量,不仅要进行大量的搜索、计算,而且还容易丢失解的信息。本文作如下改进。

4.1 改进禁忌算法

4.1.1 初值选择

随机选择一个个体作为禁忌搜索的初始解，该个体可能不满足约束条件，这可通过构造罚函数解决。最终的目标函数为：

$$Obj = \min \{ \max \mu(F_i) + w_1 \max \Delta Q_i + w_2 \max \Delta V_i \} \quad (10)$$

其中： $\mu(F_i)$ 是各目标的隶属度值； w_1 和 w_2 为罚因子， V_i 为各节点的越限电压量， Q_i 为各节点的越限无功量， \max 为取最大越限量。这样通过启发式搜索，找到目标函数值最小的最佳个体必然会满足约束条件。

4.1.2 邻域与候选解集合的构造

对于十进制编码，邻域的构造方法为：对当前个体的每个染色体进行单个移动，通过加 1、减 1 构造邻域。若该染色体值达到上限或下限，则只减 1 或加 1。

把邻域中所有的个体（包括不满足约束的个体）全部选入候选解集。

4.1.3 求解步骤

1) 随机产生一个初始解 x_0 ，用公式 (10) 计算 x_0 的目标函数值。

2) 令当前解 x 和最优解 x^* 等于 x_0 ，禁忌表长度 l 为 0。

3) 用 4.1.2 节中的方法构造当前解 x 的邻域，并将该邻域作为候选集，在候选集中选一个最佳解 x_1 。

4) 若 x_1 比最优解 x^* 更优，令 $x^* = x_1$ ， $x = x_1$ 。

5) 若 x_1 比最优解 x^* 差，并且 x_0 到 x_1 的变化不在禁忌表中记录，则令 $x = x_1$ 。

6) 若 x_0 到 x_1 的变化在禁忌表中，在候选解中寻找次优解 x_2 ，并令 $x_1 = x_2$ 。返回 5)。

7) 将 x_0 到 x_1 的反变化记录到禁忌表，若禁忌表长度达到最大值，去掉最早的一个记录。否则禁忌表长度 $l=l+1$ 。

8) 满足结束条件，退出，否则转 3)。

5 算例

将所提出的方法用于 IEEE14 节点系统，系统参数见文献[15]。设负荷增长方式 Y_d 按功率因数 $1/\sqrt{1^2 + 0.5^2}$ 增长，即所有节点的负荷有功按 1，无功按 0.5 增长， Y_d 使用前须单位化。优化前系统的网损为 0.134 0 pu，距离裕度指标为 0.444 1。

5.1 对控制变量处理

1) 系统中变压器有 3 个，取值范围为 0.9~1.1，每档 2.5%，共 8 档。

2) 无功源有 5 个，端电压取值范围 1.0~1.1，将其离散化，每档 0.01，共 10 档。

3) 补偿电容有 1 个，在节点 9，取值范围 0~0.3，每档 0.1，共 3 档。

5.2 对状态变量的处理

1) 无功源的无功输出限制在文献[15]中给出。

2) PQ 节点电压取值范围为 0.95~1.05。

5.3 编码方式

采用 10 进制编码，染色体排列方式见表 1，染色体值为相应变量所取的档数。

表 1 染色体编码

Tab.1 Chromosome coding

变压器编号			无功源节点号				补偿电容点号		
1	2	3	2	3	6	8	1	9	

5.4 算法中参数的取值

取优化前网损、距离指标的上、下 10% 作为理想值和不可接受值。即裕度指标不可接受值 $F_{1min}=0.3997$ ，理想值 $F_{1max}=0.4885$ ；网损指标不可接受值 $F_{2max}=0.1474$ ，理想值 $F_{2min}=0.1206$ 。罚因子 $w_1 = w_2 = 1000$ 。禁忌表长度取 10。

5.5 数据分析

由于智能算法优化结果与所取初值有关，本文随机选取 6 个初始个体（个体编码见表 2），分别迭代 60 次，求得的最优个体及其各项指标见表 3、表 4。

表 2 初始个体编码

Tab.2 The coding of the original individuals

编号	初始个体编码								
1	4	4	4	0	0	0	0	0	0
2	4	3	0	5	1	2	5	7	0
3	2	5	8	4	0	5	6	8	2
4	3	4	2	4	1	4	2	9	2
5	2	8	0	3	0	3	2	8	3
6	0	4	3	5	1	6	4	7	2

将表 3 解码后的数据代入潮流方程求解状态变量，所有个体都满足约束条件。从表 4 可以看出，优化后网损从 0.1340 降到了 0.1255（平均值），比文献[16]中的最小网损 0.1328 小很多。裕度指标也从 0.444 1 升到了 0.478 9（平均值），稳定性和经济性大大提高了。并且寻优次数只需进行 60 次，速

度远远快于遗传算法和遗传禁忌混合算法。

表3 最优个体编码

Tab.2 The coding of optimized individuals

编号	优化后个体编码								
1	2	5	5	8	4	5	5	10	3
2	3	5	1	8	4	5	4	10	2
3	2	8	0	8	4	6	2	10	3
4	4	5	3	7	4	4	2	10	3
5	4	6	1	7	4	4	2	10	3
6	3	5	4	7	4	5	4	10	3

表4 最优个体的指标和目标函数值

Tab.4 The index of optimized individuals

编号	网损	距离裕度	目标函数值
1	0.1254	0.4856	0.1799
2	0.1253	0.4750	0.1764
3	0.1253	0.4837	0.1760
4	0.1256	0.4742	0.1882
5	0.1256	0.4751	0.1880
6	0.1256	0.4798	0.1874

6 结束语

由算例可知,用本文提出的改进方法求多目标优化,在无需对初值特别选取的基础上,得到了质量较高的解。不仅有效地降低了网损,提高了系统的电压稳定性,而且减少了为达到一定数量候选解个体而进行的大量搜索与计算。同时在搜索电压崩溃点过程中,利用改进连续潮流法减少了求解中间运行点的个数。通过以上改进,大大减少了计算时间。同时,本文运用模糊集理论,构造了更符合实际情况的目标函数。把复杂的多目标问题简化为单目标问题,进而找到了高质量的优化解。

参考文献

- [1] 姚诸香,涂惠雅,徐国禹.基于灵敏度分析的无功优化潮流[J].电力系统自动化,1997,21(11).
YAO Zhu-xiang, TU Hui-ya, XU Guo-yu. Reactive Optimization Based on Sensitivity Matrix[J].Automation of Electric Power Systems, 1997,21(11).
- [2] 郭靖,陈青,张卫星.电力系统无功优化的原对偶内点算法及其应用[J].电力自动化设备,2004,24(5):44-46.
GUO Jing, CHEN Qing, ZHANG Wei-xing. Reactive Optimization Based on Primal-dual Interior Algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2004,24(5):44-46.
- [3] 刘玉田,马莉.基于Tabu搜索方法的电力系统无功优化[J].电力系统自动化,2000,24(2):61-64.
LIU Yu-tian, MA Li. Reactive Optimization of Power

- [4] 杨银国,张伏生,贺春光,等.基于主动禁忌搜索的配电网无功电压优化控制[J].西安交通大学学报,2005,39(8):113-117.
YANG Yin-guo, ZHANG Fu-sheng, HE Chun-guang, et al. Volt/Var Control in Distribution System with Reactive Tabu Search[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2005,39(8):113-117.
- [5] 胡彩娥.考虑静态电压稳定裕度的多目标电压-无功规划(硕士学位论文)[D].北京:中国农业大学,2004.
Taking Voltage Stability into Account, Thesis[D]. Beijing:China Agricultural University, 2004.
- [6] 胡彩娥,杨仁刚.考虑电压稳定的电力系统无功优化规划[J].继电器,2005,33(4):25-28,33.
HU Cai-e, YANG Ren-gang. Reactive Programming of Electric Power System Taking Voltage Stability into Account[J]. Relay, 2005,33(4):25-28,33.
- [7] 石立宝,徐国禹.一种求解电网多目标模糊优化运行的自适应进化规划算法[J].中国电机工程学报,2001,21(3):53-58.
SHI Li-bao, XU Guo-yu. A Self-adaptive Evolutionary Programming Algorithm of Multi-objective Fuzzy Optimal operation [J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(3):53-58.
- [8] 谭涛亮,张尧.基于遗传禁忌混合算法的电力系统无功优化[J].电网技术,2003,28(11).
TAN Tao-liang, ZHANG Yao. Reactive Optimization Based on Geneticv Tabu Hybrid Algorithm[J]. Power System Technology, 2003,28(11).
- [9] 周晖,谈顺涛.基于GATS的电网无功电压综合控制[J].继电器,2004,32(6):4-8.
ZHOU Hui, DAN Shun-tao. GATS Based Reactive Power and Voltage Interated Control[J]. Relay, 2004,32(6):4-8.
- [10] 李晨.考虑电压稳定的无功优化(硕士学位论文)[D].南京:河海大学,2005.
LI Chen. Reactive Optimization Taking Voltage Stability into Account, Thesis[D]. Nanjin:Hohai University, 2005.
- [11] 陈浩河.电力系统电压稳定分岔点快速算法研究(硕士学位论文)[D].广州:华南理工大学,2000.
CHEN Hao-he. Research of Voltage Stability on Electric Power System, Thesis[D]. Guangzhou:South China University of Technology,2000.
- [12] 周双喜.电力系统电压稳定性及其控制[M].北京:中国电力出版社,2003.171-176.
ZHOU Shuang-xi. Voltage Stability and Controlling of Electric Power System[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2003. 171-176.
- [13] 郭瑞鹏,韩祯祥.电压稳定性分析的改进连续潮流法[J].电力系统自动化,1999,23(14):13-16.
GUO Rui-peng,HAN Zhen-xiang. Improved Continuation Power Flow of Voltage Stability Analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999,23(14):13-16.

(下转第32页 continued on page 32)

法[J]. 电网技术, 2005, 29(02): 64-67 .
 CHENG Qi-yun, WANG You-yuan, CHEN Wei-gen. Modified Principal Component Analysis Based Short-term Load Forecasting[J]. Power System Technology, 2005, 29(02): 64-67 .

[10] 李征光, 邢亮. 配电变压器过负荷原因分析及对策[J]. 河北电力技术, 2004, (6): 4-5 .
 LI Zheng-guang, XING Liang . Cause Analysis and Countermeasures of Overload of Power Distribution Transformers[J]. Hebei Electric Power, 2004, (6): 4-5 .

[11] 杨云龙, 王凤清. 配电变压器三相不平衡运行带来的附加损耗、电压偏差及补偿方法[J]. 电网技术, 2004, 28(8): 73-76 .
 YANG Yun-long, WANG Feng-qing . Additional Loss and Voltage Deviation Caused by Unbalance Operation of Distribution Transformer and Countermeasures[J]. Power System Technology, 2004, 28(8): 73-76 .

[12] DL/T572-1995 电力变压器运行规程[M]. 北京: 中国电力出版社, 2000 .
 DL/T572-1995 Specification for Operation of Power Transformers[M]. Beijing:China Electric Power Press, 2000 .

[13] GB/T15164-1994 油浸式电力变压器负载导则[M]. 北京: 中国电力出版社, 2000 .
 GB/T15164-1994 Loading Guide for Oil-immersed Power Transformers

[M]. Beijing:China Electric Power Press, 2000 .

[14] GB/T13462-1992 工矿企业电力变压器经济运行导则[M]. 北京: 中国电力出版社, 2000 .
 GB/T15164-1992 Guides for the Power Transformers Energy Saving Operation in Factories [S] . Beijing:China Electric Power Press, 2000 .

[15] 胡景生, 胡国元, 裴铁成, 等. 变压器经济运行[M]. 北京: 中国电力出版社, 1998.266-313 .
 HU Jing-sheng, HU Guo-yuan, PEI Tie-cheng, et al.Operation of the Power Transformer[M]. Beijing: China Electric Power Press, 1998.266-313 .

收稿日期: 2006-07-26; 修回日期: 2006-10-13

作者简介

李涛(1979-), 男, 硕士研究生, 研究方向为配电自动化和配电管理系统; E-mail: litym@sjtu.edu.cn
 刘东(1968-), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向为配电自动化、调度自动化及计算机信息处理、分布式发电;
 王媚(1970-), 女, 工程师, 上海市电力公司市区供电公司科技主管。

(上接第 20 页 continued from page 20)

[3] LIU Xue-lian, LI Ji-wen, LI Hong-mei, et al . Fuzzy Modeling and Interior Point Algorithm of Multi-objective OPF with Voltage Security Margin[A]. 2005 IEEE/PES T&D Conference & Exhibition: Asia and Pacific. Dalian(China):2005.1-6.

[4] Rosehart W D, Canizares C A, Quintana V H. Multiobjective Optimal Power Flows to Evaluate Voltage Security Costs in Power Networks[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2003, 18(2): 578-587 .

[5] Torres G L, Quintana V H. On a Nonlinear Multi-centrality-corrections Interior-point Method for Optimal Power Flow[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2001, 16(2): 222-228 .

[6] 刘明波, 杨勇. 计及静态电压稳定约束的无功优化规划[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(5): 21-25 .
 LIU Ming-bo, YANG Yong . Optimal Reactive Power Planning Incorporating Steady State Voltage Stability Constraints[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(5): 21-25 .

[7] 刘雪连. 电力系统最优运行的电压安全成本研究(博士学位论文)[D]. 济南: 山东大学, 2006 .
 LIU Xue-lian . Research on Voltage Security Cost in Optimal Operation of Power System, Doctoral Dissertation[D]. Jinan: Shandong University, 2006 .

[8] 梁国坚, 梁冠安, 高明振. 电力系统无功功率的模糊优化控制[J]. 电网技术, 1997, 21(1): 42-44 .
 LIANG Guo-jian, LIANG Guan-an, GAO Ming-zhen . A New Method for Optimal Reactive Power Control Using Fuzzy Set Theory[J]. Power Systems Technology, 1997, 21(1): 42-44 .

[9] Zimmerman R D, Murillo-Sánchez C E, Gan D Q. Documentation for Matpower, Version 2[EB/OL]. <http://www.pserc.cornell.edu/matpower/matpower.html>.

收稿日期: 2006-06-16; 修回日期: 2006-09-08

作者简介:

刘雪连(1979-), 女, 讲师, 博士, 研究方向为电力系统优化运行与控制; E-mail: jasmine.lxl@163.com.
 厉吉文(1962-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统优化控制与无功补偿;
 段振刚(1958-), 男, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为现代测控技术及应用。

(上接第 25 页 continued from page 25)

[14] 吴晓莉, 林哲辉. MATLAB 辅助模糊系统设计[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2002 .
 WU Xiao-li, LIN Zhe-hui. Auxiliary System Design Based on MATLAB[M]. Xi'an: Xidian University Press, 2002 .

[15] 张伯明, 陈寿孙. 高等电力网络[M]. 北京: 清华大学出版社, 1996 .
 ZHANG Bo-ming, CHEN Shou-sun. Advanced Electric Grid[M]. Beijing: Qinghua University Press, 1996 .

[16] 方鸽飞, 王惠祥, 黄晓烁. 改进遗传算法在无功优化中的应用[J]. 电力系统及其自动化学报, 2003, 15(4): 17-20 .
 FANG Ge-fei, WANG Hui Xiang, HUANG Xiao-shuo. An Improved Genetic Algorithm for Reactive Power Optimization[J]. Proceedings of the

EPSCA, 2003, 15(4): 17-20.

收稿日期: 2006-06-22; 修回日期: 2006-10-23

作者简介:

熊宁(1975-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统稳定与经济运行; E-mail: civilaviation@hotmail.com
 陈恩(1956-), 男, 教授, 研究方向为电力系统稳定与经济运行;
 戴伟华(1969-), 男, 副教授, 研究方向为电力与电子技术。