

基于连续潮流综合算法的电压稳定性研究

吴昊¹, 卫志农¹, 王成亮², 姜理源¹, 陈鹏¹

(1. 河海大学能源与电气学院, 江苏 南京 210098; 2. 江苏方天电力技术有限公司, 江苏 南京 211102)

摘要: 远距离送电及重负荷运行导致电网运行在电压稳定裕度较低的工作点, 如何改善静态电压稳定预防控制受到广泛的关注。提出了一种基于连续潮流(CPF)的遗传退火法的综合优化算法, 通过优化有载调压变压器和PV节点电压, 求解电网的最大静态电压稳定裕度。利用IEEE 9节点、IEEE 14节点系统, 考虑负荷增长模型, 分别用CPF法、基于CPF的遗传算法及基于CPF的遗传退火法对最大电压稳定裕度计算, 并对结果进行比较, 验证了该算法的有效性。

关键词: 稳定裕度; 连续潮流; 遗传算法; Metropolis 准则; 模拟退火法

Voltage stability study based on synthesis method of continuous power flow

WU Hao¹, WEI Zhi-nong¹, WANG Cheng-liang², JIANG Li-yuan¹, CHEN Peng¹

(1. Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Fangtian Electric Power Technology Co. Ltd, Nanjing 211102, China)

Abstract: Because of the long distance transmission and the heavy load, the power network operates at a lower voltage stability margin. Thus, how to improve the preventive control of the steady-state voltage stability of power system has attracted a wide spread attention. In this paper, a comprehensive optimization algorithm for genetic annealing algorithm based on continuous power flow (CPF) is introduced. By optimizing the on-load tap changer and PV node voltage, it can obtain the maximum static voltage stability margin of power system. The maximum stability margin is calculated with the method of CPF, genetic algorithm based on CPF, and the genetic annealing algorithm based on CPF respectively, using the IEEE 9-bus system and IEEE 14-bus system and considering the load increasing modes. The new algorithm is verified to be effective by comparing each result.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 50877024 and No. 50977021).

Key words: stability margin; CPF; GA; Metropolis rule; SA

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2011)06-0099-06

0 引言

随着国民经济、电力行业的发展, 其远距离送电及重负荷运行导致运行点非常接近电压稳态临界点, 使电力系统面临电压失稳的问题。上世纪70~80年代, 国际上一些大电网连续发生的电压失稳事故, 导致长时间大面积停电, 造成了极大的经济损失^[1-2]。根据文献[2-4]可知, 静态电压稳定分析能够判断电力系统的静态电压稳定裕度, 稳定裕度可以作为调度运行人员判断电压稳定性的一种简单、快速有效的工具, 预防电压事故的发生。

静态电压稳定分析方法主要有连续潮流法、潮流多解法、最近电压崩溃法等^[4-5], 但后两种方法由于其求解复杂或应用性不强等原因, 没有得到广泛

使用, 故不再赘述。连续潮流法由于采用了参数化技术, 能有效地避免临界点时雅克比矩阵奇异, 其模型适应性强, 能方便考虑系统中的一些约束条件, 在得到整条 $\lambda-V$ 曲线的同时, 也获得负荷临界状态的潮流解, 找到系统薄弱环节, 是一种比较可靠的方法^[5-9]。

引起电压失稳的原因比较多, 对其机理认识也存在差异, 导致目前对于电压崩溃的研究理论仍不完善, 但普遍认为, 有载变压器分接头的位置、PV节点电压等控制变量对电压稳定裕度有较大的影响^[10-12], 而利用算法对控制变量进行优化, 可以有效提高静态电压稳定裕度, 从而改善电压稳定预防控制措施, 提高系统的传递“容量”。本文的目的是通过优化调整有载变压器分接头及PV节点电压来提高稳定裕度, 增强电压稳定性。由于电力系统的目标函数与约束条件具有非线性、控制变量的离散性与连续性相混合等特点, 根据各种算法的特点, 本文在静态电压稳定分析的模型上, 基于连续

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50877024); 国家自然科学基金资助项目(50977021); 江苏省电力公司2009年重点科技项目(J2009032)

潮流法, 提出采用遗传与模拟退火综合优化进行静态电压稳定分析, 最后根据本文提出的算法给出了 IEEE 9 节点、IEEE 14 节点系统的计算结果。

1 静态电压稳定分析

1.1 连续潮流法

利用连续方法应用于电力系统分析静态电压稳定, 可以克服常规潮流在极限点附近不能收敛的问题, 从而正确得到电压崩溃点, 完整绘制 $\lambda - V$ 曲线。其算法过程主要为预测环节、校正环节及参数化和步长的选取等^[6-9], 如图 1 所示。

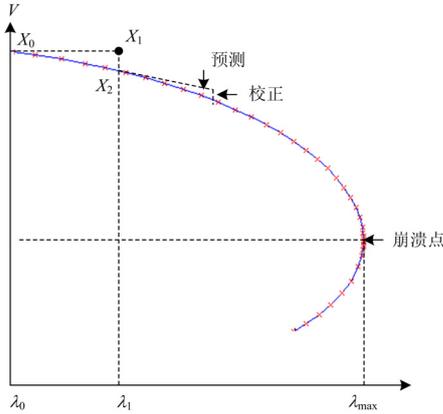


图 1 连续潮流法
Fig.1 Algorithm of CPF

在一个电力系统中, 假设有 n 个节点, 其中 n_{pq} 个 PQ 节点、 n_{pv} 个 PV 节点、一个平衡节点, 则节点 i 的注入功率为:

$$P_{Gi} - P_{Li} = U_i \sum_{j \in i} U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (1)$$

$$Q_{Gi} - Q_{Li} = U_i \sum_{j \in i} U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (2)$$

式中: $P_{Li} = P_{Li0} + \lambda P_{Li0} k_1$

$$Q_{Li} = Q_{Li0} + \lambda Q_{Li0} k_2$$

$$P_{Gi} = P_{Gi0} + \beta \sum_{j=1}^{n_{pq}} (P_{Lj} - P_{Lj0}), \text{ 其中 } \beta = \frac{P_{Gi0}}{\sum_{j=1}^{n_{pv}} P_{Gj0}}$$

λ 增长步长的选取为

$$l = \frac{m}{\|d\mathbf{X}/d\lambda\|_2} \quad (3)$$

式中: P_{Gi} 、 Q_{Gi} 分别为发电机的有功、无功出力; P_{Li} 、 Q_{Li} 分别代表有功、无功负荷; λ 为负荷增长水平; k_1 、 k_2 分别为比率因子, 即负荷增长率; U_i 、

U_j 、 θ_{ij} 分别为节点 i 和 j 的电压幅值和节点 i 和 j 之间的电压相角差; G_{ij} 、 B_{ij} 分别为节点导纳阵第 (i, j) 个元素的实部和虚部, m 为不同时段段的常数, $\|d\mathbf{X}/d\lambda\|_2$ 为状态变量切向量的 2 范数。

为了表示方便, 并且考虑控制变量 K , 将式 (1)、(2) 写成矩阵和向量形式, 即等式约束为

$$0 = \mathbf{H}(\mathbf{X}, K, \lambda) \quad (4)$$

式中, \mathbf{X} 为系统的状态变量, 即电压幅值和相角。

1.2 优化数学模型

静态电压稳定裕度是在负荷以某种方式增长直到发生电压崩溃时的负荷水平与当前负荷水平之差^[7,11-15]。在负荷增长过程中崩溃点的负荷水平与系统中的一些控制变量所处的位置相关, 通过对控制变量 K 进行优化, 可使得静态电压稳定裕度增大, 完善 $\lambda - V$ 曲线图。

在此, 目标函数为静态电压稳定裕度最大, 即电压崩溃时的负荷水平与当初的负荷水平之差。

$$\max |\lambda_{lim} - \lambda_0| \quad (5)$$

等式约束条件为式 (4), 状态变量的不等式约束为

$$U_{min} \leq U \leq U_{max} \quad (6)$$

控制变量的不等式约束条件为

$$\begin{cases} U_{Gmin} \leq U_G \leq U_{Gmax} \\ K_{nmin} \leq K_n \leq K_{nmax} \end{cases} \quad (7)$$

式 (6) 中, U 、 U_{min} 、 U_{max} 分别为 PQ 节点当初电压及其下限与上限值; 式 (7) 中, U_G 、 U_{Gmin} 、 U_{Gmax} 分别为 PV 节点当初电压及其下限与上限值, K_n 、 K_{nmin} 、 K_{nmax} 为变压器分接头当初值及其下限与上限值。

2 遗传模拟退火算法在静态电压稳定中的应用

2.1 遗传算法

遗传算法既可以适用于连续性变量也能很好地处理离散变量, 能够提供一种求解复杂系统优化问题的框架, 对问题的种类有很强的鲁棒性^[16], 但在运行早期个体差异较大, 当采用经典的轮盘赌方式选择, 后代产生个体数与父个体适应度大小成正比, 因此在早期容易使个别好的个体的后代冲斥整个种群, 造成早熟; 在遗传算法后期, 适应度趋向一致, 优秀的个体在产生后代时, 优势不明显, 从而使得个体种群进化停滞不前。

2.2 模拟退火法

模拟退火算法来源于固体退火原理^[17-19]。用固体退火模拟组合优化,将内能 E 模拟为目标函数值 f , 温度 T 演化成控制参数 t , 即得到解组合优化问题的模拟退火算法^[18-19]。由模拟退火原理可知,其计算过程简单、通用、鲁棒性强,适用于并行处理,可用于求解复杂的非线性优化问题,但如果降温过程足够缓慢,得到的解的性能会比较好,与此相对的是收敛速度太慢;如果降温过程过快,很可能得不到全局最优解。

2.3 遗传和模拟退火法综合策略

根据其两种算法的不同特点,可将遗传算法与模拟退火法相结合,构造新的重组策略。在温度高时(遗传算法的前期),适应度相近的个体产生的后代概率相近;而当温度不断下降后,拉伸作用加强,使适应度相近的个体适应度差异放大,从而使得优秀的个体优势更明显,同时可以确保在全局范围内寻找最优解。此综合策略主要包括编码法则、参数确定、种群初始化、适应度值、遗传操作等步骤^[18-20](图2)。

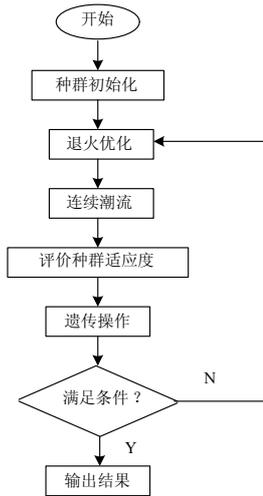


图2 遗传退火算法流程图

Fig.2 Flow chart of GSA

2.3.1 编码与种群初始化

由文献[16]可知,染色体的长度影响优化算法过程和结果,所以在优化计算中,通过控制变量值的范围与精确度的要求确定染色体的长度,这种编码规则简明有效。

遗传算法和模拟退火都不依赖于初始值,所以随机产生 pop_size (pop_size 为种群大小) 个作为初始种群,为了克服遗传算法陷入局部极值而导致早熟现象出现的可能性增加,本文规定 $pop_size = \eta \times M$ (η 为 1.0~2.0 之间的实数),即至少有 M 个样本,才能使得初始群体在空间集

中均匀分布。

2.3.2 温度参数的控制

温度参数是退火算法的关键参数之一,主要包括起始温度的选取、温度的下降方法和停止温度的确定等^[17-19]。模拟退火算法的全局搜索性能也与退火速度密切相关。一般来说,同一温度下的“充分”搜索(退火)是相当必要的,但这需要计算时间。实际应用中,要针对具体问题的性质和特征设置合理的退火平衡条件,本文采用如下所示的降温方式: $T(k+1) = \alpha T(k)$, 通过每一温度的迭代和温度的下降,最后满足终止条件而停止。

2.3.3 群体更新的 Metropolis 准则

采用 Metropolis 判别准则产生下一代群体中 $n-1$ 个个体^[17]。在父代群和子代群中,分别随机选取个体 i 和 j , i 和 j 竞争进入下一代群体的准则采用 Metropolis 判别准则,即 i 和 j 被选取的概率为^[16]:

$$p(i) = \begin{cases} 1, & f(i) \geq f(j) \\ \exp(\frac{f(i)-f(j)}{T}), & f(i) < f(j) \end{cases} \quad (8)$$

$$p(j) = \begin{cases} 0, & f(i) \geq f(j) \\ 1 - \exp(\frac{f(i)-f(j)}{T}), & f(i) < f(j) \end{cases} \quad (9)$$

其中: $f(i)$ 、 $f(j)$ 分别为 i 和 j 的适应度; T 为温度值。

2.3.4 适应度计算

遗传算法以个体适应度的大小来评定个体的优胜劣汰,从而决定其遗传机会的大小。结合本例实际情况,直接用式(5)作为个体适应度,并且在迭代计算中要满足式(6)、(7)的约束条件。

2.3.5 遗传算子操作

此过程包含选择、基因重组、变异。初始种群产生后,经过适应度值的计算后,根据代沟 ρ (ρ 为选择个体占种群个体的比例) 采用经典轮盘赌方式选择规模为 $\rho \times pop_size$ 个新的种群用来繁殖子代,再利用精英策略从父代中选择 $(1-\rho) \times pop_size$ 个最优个体补充到子代中,这样可以保证子代的最佳个体绝不比父代最佳个体差。由遗传算法操作可知,基因重组或变异可采用多点操作或单点操作,多点交叉往往会破坏一些好的基因组合,为了将破坏降至最低提高计算效率,本例采用单点法进行重组或变异。

3 算例仿真

本算例是 IEEE 9、IEEE 14 节点电力系统,其

系统结构如图 3 所示。

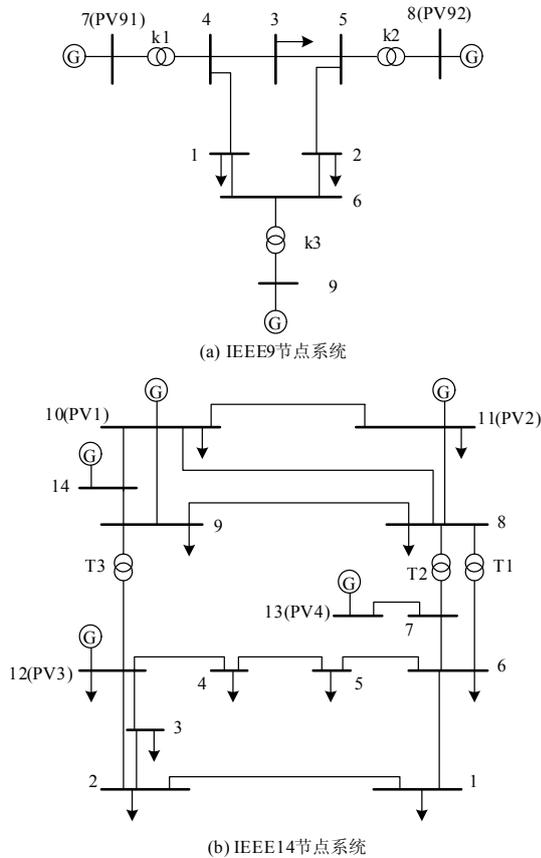


图 3 系统结构

Fig.3 System structure

本文分别用连续潮流法、基于连续潮流的遗传算法、基于连续潮流的遗传与退火综合法分别对 IEEE 9、IEEE 14 节点系统以电压稳定裕度为目标函数进行电压稳定分析，以所有 PV 节点电压、K1、K2、K3、T1、T2、T3 分接头为优化参数。PV 节点电压是连续优化变量，变压器分接头为离散变量，采用所有负荷同时增长，PV 节点发电机也相应增加出力的方式。仿真结果如表 1、表 2、图 4、图 5 和图 6 所示。

表 1 IEEE 9 节点系统的稳定裕度

Tab.1 Stability margin of IEEE 9 bus system

算法	静态电压稳定裕度	最优代数 / 总代数	PV 节点值	
	$\lambda_{lim}-\lambda_0/pu$		PV91/pu	PV92/pu
连续潮流(CPF)	0.746 5	无	1.025	1.025
基于 CPF 的遗传算法	0.764 3	45/50	1.048	1.008
基于 CPF 的遗传退火法	0.797 5	36/50	1.05	1.009

表 2 IEEE 14 节点系统的稳定裕度

Tab.2 Stability margin of IEEE 14 bus system

算法	静态电压稳定裕度	PV 节点值			
	$\lambda_{lim}-\lambda_0/pu$	PV1/pu	PV2/pu	PV3/pu	PV4/pu
连续潮流(CPF)	2.881	1.045	1.01	1.07	1.09
基于 CPF 的遗传算法	2.974 5	1.05	1.05	1.049	1.049
基于 CPF 的遗传退火法	3.110 26	1.05	1.05	1.05	1.049

从表 1、表 2 的对比结果可知，本文提出的基于 CPF 的遗传退火综合法得到的静态稳定裕度比前两者算法的稳定裕度有所提高，达到其临界点时，IEEE 9 节点、IEEE 14 节点系统稳定裕度值分别为 $\lambda_{0lim} = 0.797 5$ 、 $\lambda_{14lim} = 3.110 26$ ，这是因为当控制变量变化时，如在有载调压变压器优化作用下，由于不同的 PV 节点在系统中权重不一样，随着 PV 节点的优化，电网的某些结构发生变化，从而有利于提高静态电压稳定裕度；并且从表 1 可得，基于 CPF 的遗传退火综合法寻优最佳代数比基于 CPF 的遗传算法小。

由图 4、图 5 知，随着运行代数的增加，目标值也逐渐增大，当到达一定代数后，变化减小，稳定裕度值趋向稳定；且对比图 4、图 5 可得，由于在 CPF 的遗传算法中插入模拟退火法，因此改进了曲线收敛特性，提高了收敛速度，有效地克服遗传算法“过早收敛”问题，继续向全局最优解方向搜索，从而提高了电压稳定裕度值。

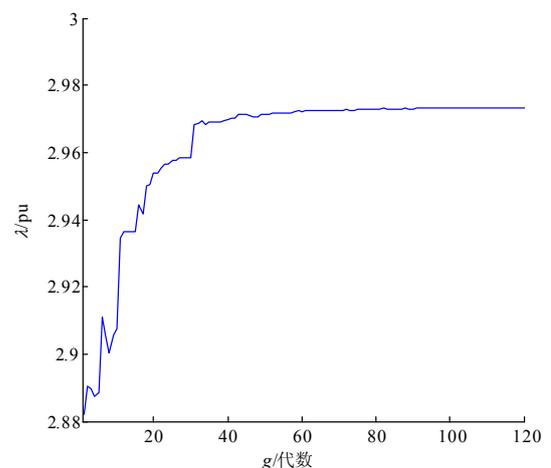


图 4 IEEE 14 基于 CPF 的遗传算法 $\lambda - g$

Fig.4 $\lambda - g$ of IEEE 14 bus system using CPF based genetic algorithm

图 6 (a)、图 6 (b) 分别为 IEEE 9、IEEE 14 系统结构中负荷节点 2、负荷节点 5 在不同算法中

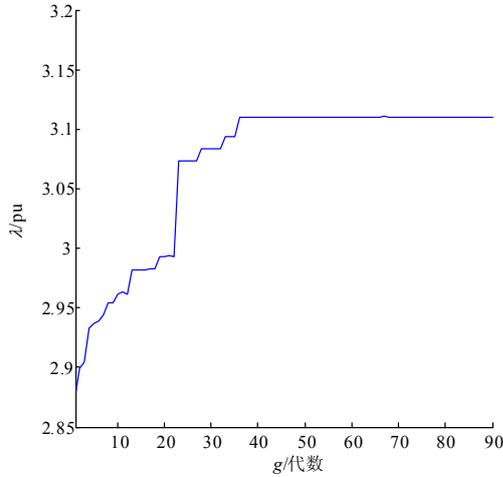


图 5 IEEE 14 基于 CPF 的遗传退火法 $\lambda - g$

Fig.5 $\lambda - g$ of IEEE 14 bus system using CPF based genetic annealing

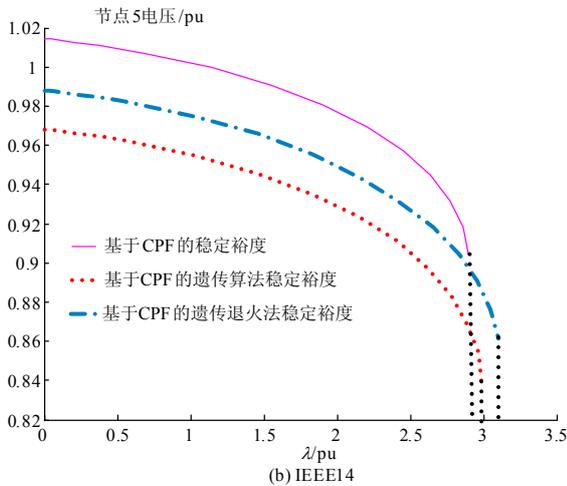
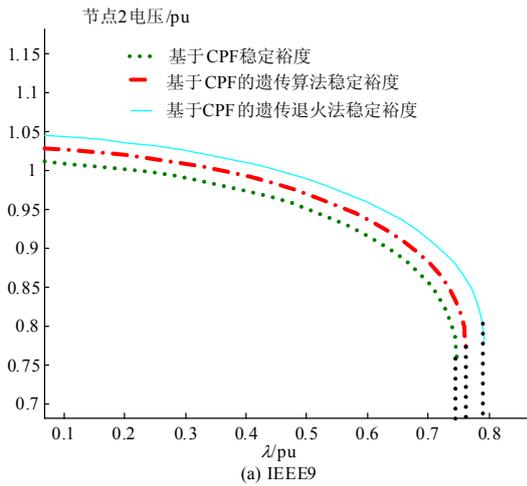


图 6 不同算法下的稳定裕度

Fig.6 Different algorithm's stability margin

的 $\lambda - V$ 图, 随着负荷水平的增加, 负荷节点电压相应地降低, 直到电压崩溃点 (与纵坐标轴平行的虚线为崩溃点)。

4 结语

本文在静态电压稳定分析的优化数学模型下, 考虑了不等式约束条件, 采用了负荷恒功率增长方式, 同时发电机按照不同比例有功功率相应增长, 使计算更符合实际。

通过本文优化算法可以有效地提高系统的稳定裕度, 不需要额外的投资, 经济实用。

本文算法物理概念明确, 收敛性好。将模拟退火算法融合到遗传算法, 充分考虑了种群竞争优胜劣汰分布程度, 有效地改善了寻优能力, 并很好地克服了控制变量的离散性与连续性相混合难以处理的问题。对 IEEE 9、IEEE 14 节点系统的仿真计算结果表明本方法在提高电压稳定裕度上的有效性。

参考文献

- [1] 周双喜, 朱凌志, 郭锡玖, 等. 电力系统电压稳定性及其控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
ZHOU Shuang-xi, ZHU Ling-zhi, GUO Xi-jiu, et al. Power system voltage stability and control[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004.
- [2] Taylor C W. 电力系统电压稳定[M]. 王伟胜, 译. 北京: 中国电力出版社, 2002.
Taylor C W. Power system voltage stability[M]. WANG Wei-sheng, trans. Beijing: China Electric Power Press, 2002.
- [3] IEEE/CIGRE Joint Task Force on Stability Term and Definitions. Definition and classification of power system stability[J]. IEEE Transaction on Power Systems, 2004, 19 (2) : 1388-1390.
- [4] 王冰, 游振华, 韩学军, 等. 考虑负荷静态电压特性的重负荷节点静态电压稳定分析[J]. 继电器, 2007, 35(11): 21-23.
WANG Bing, YOU Zhen-hua, HAN Xue-jun, et al. Steady-state voltage stability analysis of heavy load node considering the steady-state load characteristics[J]. Relay, 2007, 35(11): 21-23.
- [5] 侯明. 不同负荷模型对电压稳定分析的影响研究[D]. 天津: 天津理工大学, 2007.
HOU Ming. Studies on effect of different load models on voltage stability[D]. Tianjin : Tianjin University of Technology, 2007.
- [6] 张伯明, 陈寿孙, 严正. 高等电力网络分析[M]. 2版. 北京: 清华大学出版社, 2007.

- ZHANG Bo-ming, CHEN Shou-sun, YAN Zheng. Advanced analysis of power system[M]. Second edition. Beijing: Tsinghua University Press, 2007.
- [7] 胡彩娥. 应用基于连续潮流算法的遗传算法进行静态电压稳定分析[J]. 电网技术, 2004, 28(15): 57-58.
- HU Cai-e. Application of continuous power flow based genetic algorithm to analysis of static voltage stability[J]. Power System Technology, 2004, 28(15): 57-58.
- [8] 王秀婕, 李华强, 李波, 等. 基于连续潮流法及内点法的交直流负荷裕度算法[J]. 继电器, 2006, 34(22): 22-23.
- WANG Xiu-jie, LI Hua-qiang, LI Bo, et al. An algorithm for voltage stability assessment of AC/DC power system based on continuation method and interior point theory[J]. Relay, 2006, 34(22): 22-23.
- [9] 徐晓春, 万秋兰, 顾伟, 等. 在线电压稳定分析中快速连续潮流的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(14): 37-39.
- XU Xiao-chun, WAN Qiu-lan, GU Wei, et al. Application of fast continuation power flow for on-line voltage stability analysis[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(14): 37-39.
- [10] Venkataramana Ajjarapu, Colin Christy. The continuation power flow: a tool for steady state voltage stability analysis[J]. IEEE Trans on PWRS, 1992, 7(1): 416-419.
- [11] 赵兴勇, 张秀彬, 何斌. 优化有载调压变压器改善电压稳定性的新算法[J]. 高电压技术, 2007, 33(10): 170-173.
- ZHAO Xing-yong, ZHANG Xiu-bin, HE Bin. Novel algorithm of improving voltage stability by optimizing modification of OLTC[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(10): 170-173.
- [12] 潘晓杰, 刘涤尘, 任冲, 等. 一种研究电压稳定的有载调压变压器模型[J]. 高电压技术, 2006, 32(2): 21-22.
- PAN Xiao-jie, LIU Di-chen, REN Chong, et al. OLTC model for studying voltage stability[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(2): 21-22.
- [13] 孙华东, 汤涌, 马世英. 电力系统稳定的定义与分类述评[J]. 电网技术, 2006, 30(17): 32-34.
- SUN Hua-dong, TANG Yong, MA Shi-ying. A commentary on definition and classification of power system stability[J]. Power System Technology, 2006, 30(17): 32-34.
- [14] 赵万明, 黄彦全, 谌贵辉. 电压稳定静态分析方法综述[J]. 电气开关, 2009(1): 1-3.
- ZHAO Wan-ming, HUANG Yan-quan, CHEN Gui-hui. Overview on static analysis method of voltage stability[J]. Electric Switchgear, 2009(1): 1-3.
- [15] Chiang H D, Flueck A J, Shah K S, et al. CPFLOW: a practical tool for tracing power system steady-state stationary behavior due to load and generation variations[J]. IEEE Trans. on PWRS, 1995, 10(2): 623-634.
- [16] 王小平, 曹立明. 遗传算法—理论、应用与软件实现[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2002.
- WANG Xiao-ping, CAO Li-ming. Genetic algorithms theory, applications and software[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2002.
- [17] 王正林, 龚纯, 何倩. 精通 MATLAB 科学计算[M]. 北京: 电子工业出版社, 2007.
- WANG Zheng-lin, GONG Chun, HE Qian. Proficient in MATLAB scientific computing[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2007.
- [18] 胡宁, 赵东标, 杨勇生, 等. 遗传算法与模拟退火算法混合策略模糊控制的研究[J]. 江苏理工大学学报, 1998, 19(1): 55-56.
- HU Ning, ZHAO Dong-biao, YANG Yong-sheng, et al. The study of control based on the combination strategy of genetic algorithm and simulated annealing algorithm[J]. Journal of Jiangsu University of Science and Technology, 1998, 19(1): 55-56.
- [19] 周辉, 王击, 罗安, 等. 克隆遗传算法与模拟退火法相结合配电网重构[J]. 继电器, 2007, 35(7): 41-43.
- ZHOU Hui, WANG Ji, LUO An, et al. Distribution network reconstruction based on the combination of CGA and SA[J]. Relay, 2007, 35(7): 41-43.
- [20] 邢文训, 谢金星. 现代优化计算方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- XING Wen-xun, XIE Jin-xing. Modern optimization method[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005.

收稿日期: 2010-06-03; 修回日期: 2010-07-08

作者简介:

吴昊(1982-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统电压稳定分析与控制; E-mail: wuhwul@126.com

卫志农(1962-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统运行分析与控制、电网规划与自动化;

王成亮(1981-), 男, 工程师, 研究方向为发电机进相运行、电网规划。