

连续潮流与免疫遗传算法结合的静态电压稳定裕度计算

李娟, 陈继军, 司双

(东北电力大学电气工程学院, 吉林 吉林 132012)

摘要: 提出了一种将连续潮流和免疫遗传算法结合求解最大静态电压稳定裕度的方法。该方法将求解最大静态电压稳定裕度的目标函数作为抗原, 将调节系统电压的控制变量作为抗体; 基于连续潮流算法, 在考虑负荷静特性的条件下, 计算单个抗体的稳定裕度; 通过对抗体的亲和力和期望值的计算及遗传操作, 在全局范围内快速准确地得到系统的最大静态电压稳定裕度, 有效地摆脱了局部最优解。通过对 IEEE30 节点网络的计算, 验证了该方法可行且有效。

关键词: 静态电压稳定; 裕度; 连续潮流; 免疫遗传算法

Calculation of static voltage stability margin based on continuation power flow and immune genetic algorithm

LI Juan, CHEN Ji-jun, SI Shuang

(School of Electrical Engineering, Northeast Dianli University, Jilin 132012, China)

Abstract: A new method which combines continuation power flow and immune genetic algorithm is applied to solve the maximum static voltage stability margin. The method takes the objective function of solving the maximum static voltage stability margin as the antigen and takes control variables of conditioning system voltage as the antibody. The calculation of static voltage stability margin of a single antibody is based on continuation power flow and the static characteristics of load conditions are considered. By calculating the affinity and expectations of antibody and genetic manipulation, the maximum static voltage stability margin of system can be quickly and accurately achieved by the algorithm, which can avoid the influence of local extreme value. Through applying this method to IEEE 30-bus systems, it indicates that the proposed method is feasible and effective.

Key words: static voltage stability; margin; continuous power flow; immune genetic algorithm

中图分类号: TM712 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)18-0024-04

0 引言

电压稳定是当前电力系统研究分析的热点之一。由于电压崩溃而导致的电网瓦解事故近年来多次发生, 电压崩溃已成为威胁电力系统安全运行的重要问题之一。静态电压稳定分析能判断电力系统有多大的静态电压稳定裕度并指出采取何种合适的控制措施使电力系统运行在安全裕度之内, 可以作为调度运行人员判断电压稳定性的一种简单、快捷的工具, 预防电压崩溃事故的发生^[1]。

电压稳定裕度是静态电压稳定性分析的一个重要指标, 它度量了当前系统状态与发生电压崩溃不稳定状态的接近程度。求取静态电压稳定裕度的关键是确定电压崩溃点, 目前计算崩溃点的方法主要

有非线性规划法^[2-3]、直接法^[4-5]、连续法^[6-7]、近似法和优化法^[8]等。非线性规划方法是否有解对初值的依赖严重; 直接法直接求取分岔点, 计算速度快, 但它对非线性约束考虑不多, 得出的电压稳定裕度与实际差别较大; 连续法通过沿P-V曲线按一定步长逐步搜索崩溃点, 既可以得到负荷节点的P-V曲线, 还能随系统稳态运行状态的变化情况, 得到比较准确的电压稳定裕度。考虑到发电机电压、有载调压变压器分接头位置和无功补偿电容器投切组数等控制变量对电压稳定裕度的影响, 文献[9]提出了用遗传算法来解决控制变量的优化问题, 但因遗传算法容易出现早熟现象导致局部最优而造成该算法优化效率不高; 文献[10]提出了用免疫算法和内点法计算电压稳定裕度, 但未考虑控制变量发电机节点电压的改变和负荷特性的不同对电压稳定裕度的影响。

基金项目: 吉林省教育厅科研规划项目(200618)

本文提出了一种免疫遗传算法和连续潮流结合的最大静态电压稳定裕度计算方法, 并通过仿真验证该方法的有效性。

1 电压稳定裕度计算的数学模型

从系统给定运行状态出发, 按照某种模式, 通过负荷或传输功率的增长逐步逼近电压崩溃点, 则系统当前运行点到电压崩溃点的距离可定义为静态电压稳定裕度。静态电压稳定裕度越大, 则系统就越稳定。因此将目标函数取为静态电压稳定裕度最大, 即

$$\max \lambda \quad (1)$$

考虑负荷静特性影响的等式约束条件为:

$$(P_{Gi0} + k_i \lambda \sum_{j=1}^{N_{PQ}} P_{Lj0}) - P_{Li} - \quad (2)$$

$$V_i \sum_{j \in i} V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) = 0$$

$$Q_{Gi0} - Q_{Li} - \quad (3)$$

$$V_i \sum_{j \in i} V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) = 0$$

式中

$$P_{Li} = (1 + \lambda) P_{Li0} [a_n (\frac{V_i}{V_N})^2 + b_n (\frac{V_i}{V_N}) + c_n]$$

$$Q_{Li} = (1 + \lambda) Q_{Li0} [a_m (\frac{V_i}{V_N})^2 + b_m (\frac{V_i}{V_N}) + c_m]$$

$$k_i = P_{Gi0} / \sum_{j=1}^{N_{PV}} P_{Gj0}$$

$$a_n + b_n + c_n = 1, a_m + b_m + c_m = 1$$

其中: λ 为负荷水平; P_{Gi0} 为节点 i 在当前负荷水平为 $\lambda = 0$ 时, 发电机初始有功出力; P_{Li0} 、 Q_{Li0} 为额定电压 V_N 下节点 i 的有功和无功功率; V_i 为节点 i 的电压幅值; 系数 a_n 、 b_n 、 c_n 和 a_m 、 b_m 、 c_m 分别表示节点负荷中恒阻抗、恒电流和恒功率所占的比例; G_{ij} 、 B_{ij} 、 θ_{ij} 分别为节点 i 与 j 之间的电导、电纳和电压相角差。

不等式约束包括对状态变量和控制变量的约束, 分别如式 (4) 和式 (5) 所示。

$$\begin{cases} V_{\min} \leq V \leq V_{\max} \\ Q_{G\min} \leq Q_G \leq Q_{G\max} \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} V_{G\min} \leq V_G \leq V_{G\max} \\ Q_{C\min} \leq Q_C \leq Q_{C\max} \\ T_{\min} \leq T \leq T_{\max} \end{cases} \quad (5)$$

式 (4) 和式 (5) 中: 下标 “max”、“min” 分别表示上限和下限值; V 为 PQ 节点电压幅值; Q_G 为发电机无功出力; V_G 为 PV 节点的电压幅值; Q_C 为无功补偿设备投入容量; T 为有载调压变压器的变比。

为方便描述, 将式 (2) 和式 (3) 表示为:

$$f(\mathbf{X}, \lambda) = 0 \quad (6)$$

式中, \mathbf{X} 为由节点电压和相角组成的待求变量。由此可见, 静态电压稳定的数学模型可以简单地描述为: 在满足式 (4) ~ (6) 的条件下, 通过调整控制变量可以获得更为精确的最大静态电压稳定裕度。

2 免疫遗传算法和连续潮流结合的最大静态电压稳定裕度计算

2.1 免疫遗传算法

免疫遗传算法是基于生物免疫机制提出的一种改进遗传算法, 它将求解问题的目标函数对应为入侵生命体的抗原, 将问题的解对应为免疫系统产生的抗体。在解决实际问题时, 目标函数和约束条件作为抗原输入, 随后产生初始抗体群, 通过一系列遗传操作及抗体亲和度的计算, 在保持抗体多样性的情况下找出抗体种群中与抗原亲和力最大的抗体, 即为问题的解^[11]。

2.2 最大静态电压稳定裕度求取

2.2.1 初始抗体的形成

电压稳定裕度的大小主要与系统中可以调节电压水平的一系列连续和离散控制变量有关, 本文中的免疫遗传算法将这些控制变量作为抗体, 采用十进制整数编码, 其编码可表示为:

$$[V_G, Q_C, T_K] = [V_{G1}, V_{G2}, \dots, Q_{C1}, Q_{C2}, \dots, T_1, T_2] \quad (7)$$

其中: V_G 为 PV 节点的电压幅值的集合; Q_C 为无功补偿设备投入容量的集合; T_K 为有载调压变压器分接头位置的集合。

2.2.2 连续潮流法计算单个抗体的电压稳定裕度

计算静态电压稳定裕度的关键是临界点的求取, 本文采用连续潮流法^[9], 其求解过程主要包括参数化、预估、校正和步长控制等步骤。

(1) 预估

预估就是找出下一个解的近似值, 首先求出初始负荷水平 $\lambda = 0$ 时的潮流解 $(\mathbf{X}_0, \lambda_0)$, 从初始潮流解出发, 沿切线方向选择合适的步长 l 找出下一个解 $(\mathbf{X}_1, \lambda_1)$ 的近似解 $(\overline{\mathbf{X}}_1, \overline{\lambda}_1)$ 。

(2) 校正

以预估得到的近似解 $(\overline{X_1}, \overline{\lambda_1})$ 作为初值代入潮流方程式, 用牛顿法求解即可得到满足实际潮流方程的校正值 (X_1, λ_1) 。

(3) 步长控制

步长的选择是连续潮流计算的关键。在PV曲线比较平坦的地方, 选择较大的步长可以提高计算效率; 在接近临界点处, 选择较小的步长可以保证收敛性。所以设计步长的计算公式为:

$$l = \frac{r}{\|dx/d\lambda\|_2} \quad (8)$$

式中: r 为系数, 其初值为1~2的实数, 当潮流计算发散时, 采用第(4)步骤修改 l , 同时修改 $r = 0.5r$; $\|dx/d\lambda\|_2$ 为切向量的2范数。

(4) 终止迭代条件

当步长取为 l 且潮流计算发散时, 取 $l = 0.5l$, 直到步长小于给定值时停止计算。

每次迭代进行潮流计算时, 需检验发电机节点的无功功率是否越限, 如果越限, 则把PV节点转换为PQ节点处理, 同时修改雅可比矩阵。

2.2.3 亲和力和抗体浓度的计算

免疫系统中的抗原对应目标函数, 抗体对应优化问题的解。依据目标函数值决定抗原与抗体的结合力, 因此, 可以取目标函数 λ 来评价抗体 v 与抗原的亲和力, λ 越大亲和性就越高, 问题的解就与目标函数越匹配。抗体 v 与抗原的亲和力为:

$$A_v = \lambda_v \quad (9)$$

抗体与抗体之间的亲和力反映了抗体间的相似程度, 抗体 v 与抗体 w 之间的亲和力为:

$$B_{v,w} = 1/(1 + H_{v,w}) \quad (10)$$

式中, $H_{v,w}$ 为两个抗体之间的距离, 可以采用欧氏空间中2-范数计算。

抗体的浓度是指群体中相似抗体所占的比重, 某种抗体的浓度越大, 则说明这种抗体和其他抗体的相似度越高。即

$$C_v = \frac{1}{N} \sum_{w=1}^N K_{v,w} \quad (11)$$

式中: $K_{v,w} = \begin{cases} 1 & [B_{v,w} \in (\alpha, \beta)] \\ 0 & [B_{v,w} \notin (\alpha, \beta)] \end{cases}$, 其中 α 、 β 为

选定的阈值, N 为种群中抗体的个数。

2.2.4 记忆单元的形成

抗体记忆机制是免疫遗传算法的一个重要特点, 系统能在求解过程中保留一定规模的高适应度

的抗体形成记忆单元, 具体操作: a. 首次计算, 初始群体 N 全部在参数限制范围内随机产生, 并将群体中 λ_v 大的前 M 个个体存入记忆单元; b. 非首次计算, 首先对记忆单元中的个体和经算子操作产生的更新群体按 λ_v 大小一起排序, 然后选择前 N 个个体作为下一代的初始群体, 并将 λ_v 大的前 M 个个体写入记忆单元, 完成对记忆单元的更新过程。

2.2.5 抗体生存选择计算

抗体的促进和抑制就是根据抗体与抗原间的亲和力大小以及抗体的浓度高低来对种群中的抗体进行调节, 抗体亲和力越大则选择的概率越大, 浓度越大则选择概率越小, 这样既可以保留适应度高的个体, 又能确保个体的多样性, 从而可防止抗体群向单一化发展, 以维持抗体群的多样性, 进而防止陷入局部最优解。抗体的促进和抑制由抗体期望值表达:

$$S_v = A_v / C_v \quad (12)$$

可见抗体期望值越高则被选择的概率越大, 与抗原亲和度高而浓度低的抗体得到促进; 否则, 抗体得到抑制。将期望值低的抗体按照一定的概率淘汰, 再随机生成一部分新抗体, 以维持种群个体的总数不变。

2.2.6 交叉与变异

按照给定的概率进行交叉与变异, 交叉和变异操作与遗传算法相同, 交叉时, 交换两个抗体中随机交叉点之后的部分, 得到两个新的抗体; 变异时用新得到的变异编码替代抗体中随机变异点上的编码。

2.2.7 最大静态电压稳定裕度算法流程

用免疫遗传算法求取最大电压稳定裕度的算法流程如图1所示。其中由一系列单个抗体求得的稳定裕度值 λ_v 经迭代计算满足收敛条件后所获得的最优解即为最终目标函数值 λ 。

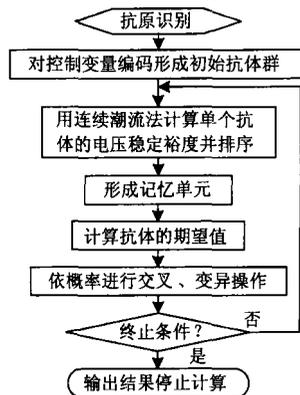


图1 免疫遗传算法流程图

Fig.1 Flow chart of immune genetic algorithm

3 算例结果与分析

本文以IEEE30节点系统为例, 分别采用连续潮流(CPF)、遗传算法(GA)与免疫遗传算法(IGA)求解系统的静态电压稳定裕度, 验证文中方法的性能。负荷增长方式采用各节点的 P 、 Q 保持初始工作点时功率因数和各节点间的比例不变, 同步增长, 多余负荷由发电机根据当前出力按比例分配。免疫遗传算法参数取值如下: 抗体群个体总数为80; 最大迭代次数为100; 记忆单元容量为20; 抗体浓度阈值 α 、 β 分别为0.5和0.9; 淘汰概率为0.2; 交叉概率为0.8; 变异概率为0.05。

某次计算IEEE30节点系统的初始和最终解曲线如图2所示, 由图可知, 由于初始种群产生的随机性, 电压稳定裕度处于发散状态, 只有少数抗体与抗原的亲合力较大、比较接近最优解。而经过免疫遗传算法寻优后电压稳定裕度值收敛于最优解附近极小的范围内。

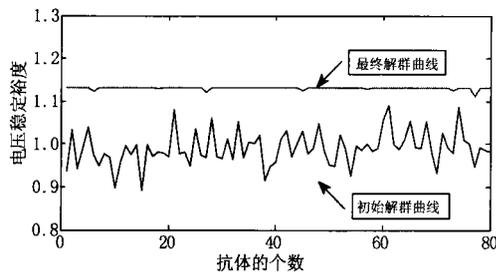


图2 IEEE30节点系统的初始与最终解群曲线 λ_v 比较

Fig.2 Comparison of λ_v curve of initial and final solution of IEEE 30-bus system

采用GA、IGA算法时各控制变量的最优解和最大电压稳定裕度如表1和表2所示(表中各变量为标么值)。

表1 IEEE30节点系统控制变量的最优解
Tab.1 Optimal solution of control variables of IEEE 30-bus system

节点号	控制变量	GA / p.u.	IGA / p.u.
2	V_2	1.050	1.055
5	V_5	1.040	1.040
8	V_8	1.040	1.045
11	V_{11}	1.020	1.015
13	V_{13}	1.060	1.065
10	Q_{10}	0.150	0.350
24	Q_{24}	0.100	0.200
4-12	T_{4-12}	1.050	1.050
6-9	T_{6-9}	0.950	1.000
6-10	T_{6-10}	0.975	1.000
28-27	T_{28-27}	1.000	0.975

表2 系统的静态电压稳定裕度

Tab.2 The static voltage stability margin of the test system

静态电压稳定裕度	CPF	GA	IGA
$\lambda / \text{p.u.}$	0.947 5	1.072 6	1.131 4

由表1和表2可知, 通过调整发电机节点电压、有载调压变压器分接头的位置及无功补偿的容量, 可以影响系统的静态电压稳定裕度。采用本文提出的方法比采用连续潮流和遗传算法得到的静态电压稳定裕度均有一定程度增加, 说明本文方法能在更大的区域内寻求到控制变量的最佳组合方式, 以实现静态电压稳定裕度的最大化。在实际系统中通过控制变量的优化调节, 使运行于某一状态的系统具有更大的稳定裕度, 对实际系统的运行控制具有更大的指导意义。

4 结论

本文提出了一种将连续潮流和免疫遗传算法结合求解最大电压稳定裕度的新方法。连续潮流法能较好克服潮流方程在极限点附近的病态, 免疫遗传算法能优化处理系统中各控制变量, 有效地摆脱局部最优解搜索到全局最优解, 求得更有利于指导系统实际运行的最大静态电压裕度, 为调度运行人员制定电压稳定控制的具体方案提供了有效的信息。

参考文献

- [1] 程浩忠. 电力系统电压崩溃的研究(上)[J]. 电力系统自动化, 1995, 19(11): 59-61.
CHENG Hao-zhong. Review of voltage collapse in electric power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 1995, 19(11): 59-61.
- [2] Van Cutsem T. A method to compute reactive power margins with respect to voltage collapse[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1991, 6(1): 145-153.
- [3] 郭瑞朋, 韩祯祥. 电压崩溃临界点计算的改进零特征根法[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(5): 64-66.
GUO Rui-peng, HAN Zhen-xiang. An improved zero eigenvalue method for point of collapse[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(5): 64-66.
- [4] 彭志炜, 胡国根, 韩祯祥. 电力系统平衡解流形的追踪与电压失稳分岔点的搜索[J]. 中国电机工程学报, 1998, 18(3): 173-177.
PENG Zhi-wei, HU Guo-gen, HAN Zhen-xiang. Tracing of the power system equilibrium solution manifold and searching for the instability bifurcation point[J]. Proceedings of the CSEE, 1998, 18(3): 173-177.
- [5] 刘永强, 严正, 倪以信. 基于辅助变量的潮流方程二次转折分岔点的直接计算法[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(5): 9-13.

(下转第 32 页 continued on page 32)

- Automation of Electric Power Systems, 2003, 27 (6): 13-18.
- [4] 陈启鑫, 康重庆, 程旭东, 等. 考虑阻塞管理的发电权交易模型及其网络流算法[J]. 中国工程电机学报, 2008, 28 (34): 106-111.
CHEN Qi-xin, KANG Chong-qing, CHENG Xu-dong, et al. Generation rights trade model and its network flow algorithm considering congestion management[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28 (34): 106-111.
- [5] 陈赞, 严正. 考虑节能减排与网络约束的发电权交易模型[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37 (12): 52-57.
CHEN Yun, YAN Zheng. Generation rights trade model based on energy-saving emission-reducing and network constraint[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37 (12): 39-42.
- [6] 肖健, 文福拴. 发电权交易的阻塞调度[J]. 电力系统自动化, 2008, 32 (18): 24-29.
XIAO Jian, WEN Fu-shuan. Congestion dispatch for generation rights trade[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32 (18): 24-29.
- [7] 郑欣, 蒋传文, 李磊, 等. 基于能耗和效益最优的发电权节能降耗分析[J]. 电力系统自动化, 2008, 32 (24): 39-42.
ZHENG Xin, JIANG Chuan-wen, LI Lei, et al. Analysis of generation rights trade based on optimization of energy-saving and efficiency[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32 (24): 39-42.
- [8] 张森林. 区域电力市场中月度撮合交易竞价机制研究 (一) 考虑输电价格和输电损耗折价的 MCP 结算机制[J]. 继电器, 2006, 34 (10): 50-52.
ZHANG Sen-lin. Research on matchmaking tradeoff competition mechanism in regional electricity market, part one: a MCP competition mechanism based on transmission price and loss[J]. Relay, 2006, 34 (10): 50-52.
- [9] 国家发展和改革委员会. 关于印发节能发电调度试点工作实施方案和实施细则 (试行) 的通知 (发改能源[2007]3523 号文) [S].
- [10] 张粒子, 陈之栩, 舒隽, 等. 东北区域市场中长期交易安全校核改进方法[J]. 电力系统自动化, 2007, 31 (8): 95-99.
ZHANG Li-zi, CHEN Zhi-xu, SHU Juan, et al. An improved security correction method for medium and long-term transaction of northeast electricity market[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31 (8): 95-99.
- [11] 庇古. 福利经济学[M]. 金镛, 译. 北京: 华夏出版社, 2007.

收稿日期: 2009-09-22

作者简介:

王雁凌 (1970-), 女, 副教授, 从事电力经济分析、电力市场运营理论与技术的研究工作; E-mail: yanling.wang@vip.sina.com

程倩 (1985-), 女, 硕士研究生, 主要从事电力市场方面的研究。

(上接第 27 页 continued from page 27)

- LIU Yong-qiang, YAN Zheng, NI Yi-xin. An auxiliary-variable-based direct Mmethod for computing quadratic turning bifurcation points of power flow equations[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23 (5): 9-13.
- [6] Iba K, Suzuki H, Egawa M, et al. Calculation of critical loading condition with nose cure using homotopy continuation method[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1991, 6 (2): 584-593.
- [7] Yorino N, Harada S, Cheng H Z. A method to approximate a closest loadability limit using multiple load flow solutions[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1997, 12 (1): 424-429.
- [8] 包黎昕, 张步涵, 段献忠, 等. 电压稳定裕度指标分析方法综述[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(8): 52-55.
BAO Li-xin, ZHANG Bu-han, DUAN Xian-zhong, et al. A summary of the state of the art of voltage stability margine indices[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23 (8): 52-55.
- [9] 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): 57-61.
HU Cai-e. Application of continuation power flow based genetic algorithm to analysis of static voltage stability[J]. Power System Technology, 2004, 28 (15): 57-61.
- [10] 史继莉, 邱晓燕. 基于免疫算法的电压稳定裕度计算[J]. 电力系统及其自动化学报, 2007, 19 (1): 79-82.
SHI Ji-li, QIU Xiao-yan. Voltage stability margine caculation based on immune algorithm[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2007, 19 (1): 79-82.
- [11] 刘科研, 盛万兴, 李运华. 基于改进免疫遗传算法的无功优化[J]. 电网技术, 2007, 31 (13): 11-16.
LIU Ke-yan, SHENG Wan-xing, LI Yun-hua. Reactive power optimization based on improved immunity Genetic algorithm[J]. Power System Technology, 2007, 31 (13): 11-16.

收稿日期: 2009-10-15; 修回日期: 2009-11-12

作者简介:

李娟 (1972-), 女, 副教授, 博士, 从事电力系统运行控制及 FACTS 研究;

陈继军 (1979-), 男, 硕士研究生, 从事电力系统电压稳定性研究; E-mail: ahfengyongli@126.com

司双 (1985-), 男, 硕士研究生, 从事电力系统运行控制及 FACTS 研究。