

分岔理论在电力系统电压稳定研究中的应用述评

李宏仲¹,程浩忠¹,朱振华²,李树静²

(1.上海交通大学电气工程系,上海 200030; 2.山东电力研究院,山东 济南 250014)

摘要: 首先简要介绍了分岔的基本概念,然后从静态分岔和动态分岔两个方面,评述了分岔理论在电压稳定研究中的应用情况。重点介绍了鞍节分岔点和 Hopf分岔点的求取算法,分析了各种算法的优缺点,并简要介绍了奇异诱导分岔在动态电压稳定分析中的应用情况,最后对分岔理论在电压稳定研究应用中的前景进行了展望。

关键词: 电力系统; 电压稳定; 分岔理论; 鞍节分岔; Hopf分岔; 奇异诱导分岔

中图分类号: TM712 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2006)04-0069-05

0 引言

分岔是非线性科学研究的一种现象,主要研究当一组微分方程所描述的解的动态特性与方程所含参数的取值相关,并随着参数取值的变化而发生的改变,包括系统一些重要特性,例如稳定性、稳定域和平衡点的变化。

电压稳定问题是非线性分岔理论引入电力系统分析的一个切入点。1989年, I Dobson提出了鞍节分岔点导致电压崩溃的机理解释^[1],并在此基础上继续应用鞍节分岔点理论来分析电压稳定问题^[2~4],力图从特征值的角度,计算和解释鞍节分岔点。此后,文[5]指出仅仅考虑鞍节分岔点对于电力系统稳定分析来说是不够的,作者沿用 H. D. Chiang的实例模型进行计算,结果发现系统在到达鞍节分岔点之前就已经发生了其它类型的分岔从而失稳。H. G Kwatny较为全面和严谨地从理论上研究了局部分岔的应用表现^[6,7]。从这些文献所反映出的研究现状来看,众多学者将电力系统视为一个非线性动力系统,将电压稳定视为结构性稳定问题,而分岔现象正是引起电压失稳的主要原因之一。因此,对于分岔点的求取就成为电压稳定分析中一个重要的研究方向。对于这一问题,国际上已经较好地掌握了相关的数学工具^[5~7],并有着较成熟的软件开发经验和实践成果^[8,9];而国内近几年在分岔理论的深入研究和软件编程方面也取得了长足的进展^[10~12]。

1 分岔理论的基本概念^[13~15]

如下式所示的非线性动力系统,

$$\dot{x} = f(x, \mu), x \in R^n, \mu \in R^p \quad (1)$$

其形态(包括平衡点的数目、稳定特性、轨道的拓扑结构)在一定的 μ 值处会发生突变,不能从一种流连续地变形为另一种流,这就是分岔,而对应的 μ 值及状态变量值则称为分岔点。分岔理论主要包括静态和动态两个方面。静态分岔指的是平衡点的数目和稳定性随参数变化而发生的变化,如鞍节分岔。动态分岔则是对系统结构稳定性的否定,对于结构不稳定的系统,一个小扰动就可能破坏轨线的拓扑等价。Hopf分岔是最基本也最具有代表性的动态分岔。另外,奇异诱导分岔也是电压稳定动态分析中经常涉及到的动态分岔之一。下文将从动态和静态两个方面分别介绍分岔点的求解方法。

2 动态分岔理论在电压稳定研究中的应用

2.1 Hopf分岔分析^[15~17]

电压稳定问题可以用如下的微分代数方程组来表述:

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x, y, \mu) \\ 0 = g(x, y, \mu) \end{cases} \quad (2)$$

其中: x 是描述各种元件动态行为的状态向量; y 是节点电压向量; μ 为分岔参数向量; g 是网络方程,即潮流方程。

目前在电压稳定的分岔分析中多数考虑的是平衡点附件电力系统拓扑结构的变化,往往将电力系统各种元件的动态行为用平衡点来模拟,得到以下的平衡点方程组:

基金项目:上海市重点科技攻关(041612012)计划

$$\begin{cases} 0 = f(x, y, \mu) \\ 0 = g(x, y, \mu) \end{cases} \quad (3)$$

进一步简写为一般形式:

$$(u, \mu) = 0 \quad (4)$$

其中: u 为状态向量, μ 为分岔参数向量。

Hopf分岔是指微分代数方程组的雅可比矩阵 $J_u = \partial f / \partial u$ 的一对共轭特征值的实部由负变正时, 在非双曲平衡点附近出现的分岔, 其对应的失稳模式是周期性的振荡发散失稳。根据其规范形的系数又可区分为超临界分岔和亚临界分岔。超临界分岔对应着稳定极限环, 亚临界分岔对应着不稳定的极限环, 亚临界分岔会严重限制电压稳定域的大小^[17]。

2.2 Hopf分岔点的求取方法^[18]

目前研究 Hopf分岔的主要方法有直接法和连续法两种方法。

1) 直接法

文[19]认为对于平衡点方程 $(u, \mu) = 0$, 满足下列方程的平衡点即为 Hopf分岔点。

$$\begin{cases} (u, \mu) = 0 \\ \det(j I_{n,m} - J_u) = 0 \end{cases} \quad (5)$$

其中:

$$I_{n,m} = \begin{bmatrix} I_n & 0_{n \times m} \\ 0_{m \times n} & 0_m \end{bmatrix} \quad (6)$$

直接求解式(5)即可得到 Hopf分岔点, 但每次迭代都需要求解 (u, μ) 的二阶导数, 工作量大。另外此法也不能得到平衡解流形的全部信息。

2) 连续法

这类方法主要是连续追踪平衡解流形, 同时判别流形上的平衡点是否为 Hopf分岔点, 判别的方法有两种: 一是逐点计算出随控制参数变化的系统雅可比矩阵的所有特征值, 进而判断是否有共轭特征值穿越虚轴, 以此来确定是否出现 Hopf分岔; 二是根据 Hurwitz判据, 通过特征多项式的系数构成的一系列 Hurwitz行列式符号的变化来搜索 Hopf分岔点。前者由于要逐点计算雅可比矩阵的所有特征值, 计算量大; 后者对于高维系统, 构造特征多项式的各项参数本身就是十分困难的。

2.3 奇异诱导分岔分析

Zaborsky和 Venkatasubramanian等人首先提出并证明了奇异诱导分岔定理^[20, 21]。在文献[20, 21]中, 作者把中心流形理论应用到微分代数方程组对应的奇异摄动常微分方程组上完成了这一证明。此后, Bendmo le在他的博士论文中也对此进行了证

明^[22]。文献[23]给出了奇异诱导分岔的一般性定义:

定义1 假设对所有的 $\mu \in R$, 式(2)都有平凡平衡点, 且关于平衡点的线性化都有一特征曲线 (μ) , 如果对于某两序列 $(\mu_n), (\mu_n) \subset R$, μ_n 单调递增收敛于 μ_0 (记为 $\mu_n \rightarrow \mu_0$), μ_n 单调递减收敛于 μ_0 (记为 $\mu_n \rightarrow \mu_0$) 则有如下性质:

1) 当 $n \rightarrow \infty$ 时, (μ_n) 和 (μ_n)

2) 对任意 n , $\text{Re}[\lambda(\mu_n)] / \text{Re}[\lambda(\mu_0)] < 0$

则称 μ_0 为一个奇异诱导分岔点。

奇异诱导分岔主要描述了带参数的线性化微分代数方程组的特征值有极点的情形。奇异诱导分岔分析曾经是电压稳定研究的热点, Canizares^[24]等学者依此理论研究了励磁顶值等非线性环节对电压稳定性的影响; 王庆红等人提出了当系统参数发生变化的情况下搜索奇异诱导分岔点的方法, 并利用改进的奇异诱导分岔定理对无阻尼和带阻尼情况下电力系统中发生的奇异诱导分岔现象进行了详细的分析^[12, 23]。目前学术界已经普遍认为奇异诱导分岔是导致电力系统电压失稳的三种分岔形式之一^[16, 25, 26]。

除了 Hopf分岔和奇异诱导分岔以外, 在电压稳定研究中涉及到的动态分岔还包括闭轨分岔、同宿(或异宿)分岔等等。这些分岔的求取则更加复杂和困难, 众多文献中多以简单系统为例来进行验证说明。而动态分岔对电压失稳的影响则更是说法众多, 有的学者甚至认为在一定条件下, Hopf分岔一般不会出现在电压崩溃现象中^[27]。

而随着理论研究的进一步深入, 目前也出现了一些较为可靠的应用动态分岔理论的电压稳定分析软件。例如美国电科院(EPR I, USA)已推出的稳定性分析商业软件 PSAPAC中所包含的针对电力系统小扰动稳定性分析的工具软件, 就计及了鞍节分岔和 Hopf分岔的对系统稳定性的影响^[28]。动态分岔理论对于揭示动态电压稳定的机理有着不可估量的作用, 是一个值得深入研究的方向。

3 静态分岔理论在电压稳定研究中的应用

3.1 鞍节分岔分析

在电压稳定的静态分岔分析中, 一般不考虑元件的动态特性, 此时平衡点方程的最简形式就是潮流方程。如前文所述, 电力系统静态分岔分析中的主要研究对象是鞍节分岔点。

鞍节分岔指得是平衡方程的雅可比矩阵的一个

实特征值由负变正时发生的分岔。在静态分析中,一般将潮流方程的雅可比矩阵做为主要的研究对象。在鞍节分岔点处,由于出现了零特征值,潮流方程雅可比矩阵奇异,导致潮流计算不收敛;而此零特征值对应的左右特征向量则包含了关于分岔性质、系统响应和控制措施的有效性等有价值的信息。其中,右特征向量表明在状态空间中由于鞍节分岔而导致系统演变时其状态所沿的方向,利用该方向可以确定引发鞍节分岔现象、造成系统电压失稳的最危险的扰动形式;而左特征向量则表明哪个状态对零特征值有着显著的影响,即为了控制分岔对哪些状态控制更为有效,从而找到消除鞍节分岔现象,提高电压稳定裕度的控制措施^[16]。

对于鞍节分岔点目前的求解方法主要有连续法、直接法和非线性规划法三种方法。

3.2 鞍节分岔点的求取方法

1) 连续法

连续法主要是利用连续潮流从系统初始状态开始追踪潮流的解曲线,直至PV曲线的拐点(鼻尖点),也就是鞍节分岔点。

连续潮流首先对常规潮流方程进行参数化处理,得到如下所示的扩展方程组:

$$\begin{cases} f(x, \lambda) = g(x) - b = 0 \\ P(x, \lambda) = 0 \end{cases} \quad (7)$$

其中: $g(x) = 0$ 为常规潮流方程; b 为表示节点注入功率变化方向的向量; λ 为节点注入变化参数。式(7)中的第二个方程就是参数化方程。目前主要有弧长参数化和局部参数化两种方法。

由于添加了一维参数化方程,式(7)的雅可比矩阵在鞍节分岔点并不奇异,从而解决了常规潮流雅可比矩阵在鞍节分岔点奇异,以及在分岔点附近雅可比矩阵病态造成的潮流计算不收敛问题。连续潮流可以完整地刻画出系统的PV曲线,准确求得鞍节分岔点。

目前最常用的连续潮流方法是预测-校正方法,其主要思想是:从潮流解曲线的一个已知点 (x_0, λ_0) 开始,通过预测环节,在给定的节点注入功率的变化步长下,利用切线法或者插值法获得解曲线上下一点 (x_1, λ_1) 的近似值 $(\bar{x}_1, \bar{\lambda}_1)$;然后通过校正环节求得 (x_1, λ_1) 的准确值;如此循环求解,直至达到鞍节分岔点^[29]。

利用连续潮流求取鞍节分岔点,可以方便地计及各种不等式约束,而且鲁棒性较好,但是对预测环节的步长控制要求比较严格,而且计算量大,难以实

现在线计算。

2) 直接法

直接法从鞍节分岔的定义出发,认为满足下列条件时,系统即处于鞍节分岔点^[30-35]。

$$\begin{cases} f(x, \lambda) = 0 \\ f_x v = 0 \\ v^T v = 1 \end{cases} \quad (8)$$

其中, v 为雅可比矩阵零特征值对应的特征向量。式(8)中第一组方程为增广的潮流方程;第二组方程表示潮流方程雅可比矩阵 f_x 在分岔点处有一零特征值;第三组方程是对向量 v 的规范化。

显然,求解式(8)即可求得鞍节分岔点。但是对于一个 n 维系统来说,式(8)就是一个 $(2n+1)$ 维的方程组。对于大型电力系统来说,直接求解这样一个方程组计算量是非常大的。此外在鞍节分岔点处潮流方程的雅可比矩阵奇异也给数值计算带来了困难。

为了解决上述问题,文[34]对求解鞍节分岔点的特征方程组进行了重新参数化,引入了新的参数,将 $(2n+1)$ 维的特征方程组降维为 $(n+1)$ 维,并给出了鞍节分岔点的测试函数,然后利用连续性方法,逐步跟踪到鞍节分岔点。文[35]在此基础上,进一步提出潮流解曲线在鞍节分岔点附近可以用二次型曲线来近似描述。因此利用潮流方程解曲线上的两或三个点,可以近似估计出鞍节分岔点的位置。文[36]提出利用分块矩阵方法来进行求解以简化计算。文[37]中通过引入辅助变量和辅助方程,将高维方程组简化为两个小规模方程组,以此来实现对原方程组的简化求解。

总之,直接法一般都采用变换方法来简化对式(8)的求解,同时克服因潮流雅可比矩阵在分岔点处奇异给数值计算带来的困难,但是这往往会对原方程组的稀疏性造成不同程度的破坏。直接法必须在消除雅可比矩阵在分岔点处奇异与其原有稀疏性的破坏之间取得一定程度的平衡^[38]。

相对于连续法而言,直接法的计算速度较快,目前已经成功地运用到了实际系统中,但是由于直接法不便于计及各种不等式约束,因此所得出的结果具有一定的局限性。

3) 非线性规划法

非线性规划法将电压稳定极限点,即分岔点的求解转化为一个非线性优化问题,其优化目标是在满足系统各种约束的情况下,如何确定电力系统中(整个系统或系统中特殊区域、特殊节点)负荷增量

的最大值^[39,40]。该方法可以很方便地计及各种等式和不等式约束,并从一定程度上避开了潮流雅可比矩阵在分岔点处奇异给数值计算带来的困难。而且可以将众多成熟的非线性规划方法直接引入分岔点的求解中来。

综上所述,鞍节分岔点的三种求解方法各有优劣:连续法和非线性规划法可以方便地计及各种约束,计算结果较为准确,但是计算量大、速度慢,难以在线应用;直接法计算速度快,但是鲁棒性差,而且难以有效计及不等式约束。但这三种方法之间又互相联系,文[34]提出的直接法中也用到了连续潮流;而文[41]更是直接证明了直接法从本质上讲是非线性规划在不考虑各种约束条件下的一种特例。因此,深入研究三种方法之间的内在联系,兼顾三者的优点,取长补短,找出一种求解鞍节分岔点的混合方法也是一个很有价值的研究方向。

4 分岔理论在电压稳定分析研究中的展望

目前,国内外学者在将分岔理论引入电压稳定分析方面已经取得了长足的进展,尤其在静态分岔方面,已经出现了在实际系统中得到应用的成功范例。然而由于电力系统的特殊性和分岔理论的自身特点,该领域还有许多问题有待进一步深入研究。

1) 在目前的研究当中,众多学者往往受电力系统按照静态、动态的分类来进行研究的影响,将静态、动态分岔现象割裂开来分别进行研究。而实际上,静态分岔和动态分岔对电压稳定的影响是纠合在一起的,文[16]中提出电压稳定所决定的可行域的边界通常是由鞍节分岔、Hopf分岔和奇异诱导分岔三个分岔空间组成的。因此电压稳定的分岔分析方法应具有统一性,可以同时研究静态和动态分岔问题。

2) 相对于静态分岔,电压稳定的动态分岔分析方法仍处于理论探索阶段。而分岔理论本身是一套统一的数学分析方法,在动态分岔分析研究中,静态分岔分析的一些数学思想是值得借鉴的。此外,还应该加强对分岔理论分析方法的实用化研究,尽量降低计算量。在精确求得分岔点的基础上,进一步找出对电压稳定影响最大的最危险的分岔方向也是很有实际应用价值的。

3) 利用分岔理论深入研究电力系统动态元件对电压稳定的影响,通过研究动态元件在失稳过程中的共性来解释电压失稳的机理,理清电压失稳与功角失稳之间的关系,力争构造出合理可靠的动态

电压稳定性判别指标。

4) 作为远景规划,在深入开展电压稳定分岔分析的基础上,应该积极研究、探索电力系统中的混沌现象,力争从非线性动力学的角度出发,对电力系统这一典型的非线性非自治系统的稳定问题做出合理的解释。

参考文献:

- [1] Dobson I, Chiang S D. Towards a Theory of Voltage Collapse in Electric Power Systems[J]. System & Control Letters, 1989, 13: 253-262.
- [2] Dobson I. Observations on the Geometry of Saddle Node Bifurcation and Voltage Collapse in Electrical Power Systems[J]. IEEE Trans on Circuit and Systems-I, 1992, 39(3): 240-243.
- [3] Dobson I, Lu L. New Methods for Computing a Closest Saddle Node Bifurcation and Worst Case Load Power Margin for Voltage Collapse[J]. IEEE Trans PWRs, 1993, 8(3): 905-913.
- [4] Dobson L, LU Liming. Computing an Optimum Direction in Control Space to Avoid Saddle Node Bifurcation and Voltage Collapse in Electric Power Systems [J]. IEEE Trans on Automatic Control, 1992, 37(10): 1616-1620.
- [5] Tan CW, Varghese M, Varaiya P, et al. Bifurcation, Chaos, and Voltage Collapse in Power Systems[J]. Proceedings of the IEEE, 1995, 33(11): 1484-1496.
- [6] Kwatny H G. Static Bifurcation in Electric Power Networks: Loss of Steady-State Stability and Voltage Collapse[J]. IEEE Trans on CAS, 1986, 33(10): 981-991.
- [7] Kwatny H G, Fischl R F, Nwankpa C O. Local Bifurcation in Power Systems: Theory, Computation, and Application [J]. Proceedings of the IEEE, 1995, 83(11): 1456-1483.
- [8] Kwatny H G, YU Xiao-ming, Nwankpa C. Local Bifurcation Analysis of Power Systems Using MATLAB [A]. Proc of 4th IEEE Conf on Control Applications Albany: 1995. 57-62.
- [9] Ajjarapu V. Application of Bifurcation and Continuation Methods for the Analysis of Power System Dynamics[A]. Proc of 4th IEEE Conf on Control Applications Albany: 1995. 52-56.
- [10] 贾宏杰,余贻鑫,李鹏. 电力系统环面分岔与混沌现象 [J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(8): 6-10.
JIA Hong-jie, YU Yi-xin, LI Peng. Torus Bifurcation and Chaos in Power System [J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(8): 6-10.
- [11] 王庆红,周双喜. 电力系统奇异摄动模型霍夫分岔分析 [J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(8): 1-6.
WANG Qing-hong, ZHOU Shuang-xi. Hopf Bifurcation Analysis of Power System Singularly Perturbed Ordinary Differential Model [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(8): 1-6.
- [12] 王庆红,周双喜,胡国根. 电力系统微分代数模型奇异诱导分岔点的搜索及其理论分析 [J]. 电网技术, 2003, 27(11): 14-17.
WANG Qing-hong, ZHOU Shuang-xi, HU Guo-gen. Tracing of Singularity Induced Bifurcation in Power System Differential Algebraic Equation Model and Its Theoretical Analysis [J]. Power Sys-

- tem Technology, 2003, 27(11): 14-17.
- [13] 陈予恕,唐云.非线性动力学中的现代分析方法[M].北京:科学出版社,2002.
CHEN Yu-shu, TANG Yun. Modern Analysis Method in Nonlinear Dynamics[M]. Beijing: Science Press, 2002.
- [14] 胡海岩.应用非线性动力学[M].北京:航空工业出版社,2003.
HU Hai-yan. Applied Nonlinear Dynamics[M]. Beijing: Aeronautics Industry Press, 2003.
- [15] 陆启韶.分岔与奇异性[M].上海:上海科技教育出版社,1995.
LU Qi-shao. Bifurcation and Singularity[M]. Shanghai: Shanghai Technology and Education Press, 2003.
- [16] 余贻鑫.电压稳定研究述评[J].电力系统自动化,1999,23(21): 1-8.
YU Yi-xin. Review on Voltage Stability Studies[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(21): 1-8.
- [17] 薛禹胜,周海强,顾晓荣.电力系统分岔与混沌研究述评[J].电力系统自动化,2002,26(16): 9-15.
XUE Yu-sheng, ZHOU Hai-qiang, GU Xiao-rong. A Review of Bifurcation and Chaos Researches in Power System[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(16): 9-15.
- [18] 彭志炜.基于分岔理论的电力系统电压稳定性的研究[D].杭州:浙江大学,1998.
PENG Zhi-wei. Research on Power System Voltage Stability Based on Bifurcation Theory[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 1998.
- [19] Roose D, Hlavacek L. A Direct Method for the Computation of Hopf Bifurcation Points[J]. SIAM J Applied Mathematics, 1985, 45: 879-894.
- [20] Venkatasubramanian V, Schattler H, Jaborszky J. Local Bifurcations and Feasibility Regions in Differential-algebraic Systems[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 1995, 40(12): 1992-2013.
- [21] Venkatasubramanian V. Singularity Induced Bifurcation and the Van de Pol Oscillator[J]. IEEE Trans on Circuits and Systems I, 1994, 41(11): 765-769.
- [22] Beardmore R E. A Study of Bifurcation in Singular Differential Equations Motivated by Electrical Power System, Doctoral Dissertation[D]. London: Brunel University, 1999.
- [23] 王庆红,周双喜.电力系统微分代数模型奇异诱导分岔分析[J].中国电机工程学报,2003,23(7): 18-22.
WANG Qing-hong, ZHOU Shuang-xi. Singularity Induced Bifurcation in Power System Differential Algebraic Model[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(7): 18-22.
- [24] Canizares C A, Alvarado F L. Point of Collapse and Continuation Methods for Large AC/DC Systems[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1993, 7(1): 1-8.
- [25] 余贻鑫,王成山.电力系统稳定性的理论与方法[M].北京:科学出版社,1999.
YU Yi-xin, WANG Cheng-shan. Theory and Method of Power System Stability[M]. Beijing: Science Press, 1999.
- [26] Venkatasubramanian V, Schattler H, Jaborszky J. Voltage Dynamics: Study of a Generator with Voltage Control, Trans, and Matched WM Load[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 1992, 37(11): 1717-1733.
- [27] 曹国云,王冲,陈陈.中心流形方法降维分析电压崩溃中的Fold分岔[J].中国电机工程学报,2002,22(7): 40-43.
CAO Guo-yun, WANG Chong, CHEN Chen. Center Manifold Method to Simplify the Analysis of Fold Bifurcation Associated with Voltage Collapse[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(7): 40-43.
- [28] Kundur P, et al. Small Signal Stability Analysis Program, Version 3.1[Z]. Final Report on EPRI TR-101850-V2R1, 1994.
- [29] 王成山,李国庆,余贻鑫,等.电力系统区域间功率交换能力的研究(一)连续型方法的基本理论及应用[J].电力系统自动化,1999,23(3): 23-26.
WANG Cheng-shan, LI Guo-qing, YU Yi-xin, et al. Study on Transmission Transfer Capability of Inter Connected Electric Power Systems (I): Basic Theory of Continuation Method and Its Application[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(3): 23-26.
- [30] Seydel R. Numerical Computation for Branch Points in Nonlinear Equations[J]. Numerische Mathematik, 1979, 33: 981-991.
- [31] Ajjarapu V. Identification of Steady-state Voltage Stability in Power System[J]. Int J Energy Syst, 1991, 33: 43-46.
- [32] Capaneto E G, Chicco G, et al. A Newton-Raphson Method for Steady State Voltage Stability Assessment[J]. Proc Bulk Power Syst, MD: 1991, 341-345.
- [33] Chiang H D, Jumeir R J. A More Efficient Formulation for Computation of the Maximum Loading in Electric Power System[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1995, 10(2): 635-646.
- [34] Rene J J, Chiang H D. Parameterizations of Load-flow Equation for Eliminating Ill-conditioning Load Flow Solution[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1993, 8(3): 1004-1012.
- [35] 王成山,江伟,江晓东.一种新的电力系统鞍型分叉点计算方法[J].中国电机工程学报,1999,19(8): 20-24.
WANG Cheng-shan, JIANG Wei, JIANG Xiao-dong. A New Computation Method for Saddle-node Bifurcation Point of Power System[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(8): 20-24.
- [36] 曾江,韩祯祥.电压稳定临界点的直接计算法[J].清华大学学报(自然科学版),1997,37(S1): 91-94.
ZENG Jiang, HAN Zhen-xiang. Direct Method for Calculating Critical Point of Voltage Stability[J]. Journal of Tsinghua University, Sci & Tech, 1997, 37(S1): 91-94.
- [37] 刘永强,严正,倪以信,等.基于辅助变量的潮流方程二次转折分岔点的直接算法[J].中国电机工程学报,2003,23(5): 9-13.
LIU Yong-qiang, YAN Zheng, NI Yi-xin, et al. An Auxiliary-variable-based Direct Method for Computing Quadratic Turning Bifurcation Points of Power Flow Equations[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(5): 9-13.
- [38] 郭瑞鹏,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): 63-66.
GUO Rui-peng, HAN Zhen-xiang. An Improved Zero Eigen Value Method for Point of Collapse[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(5): 63-66.

(下转第 79 页 continued on page 79)

- in Nonconvergent Load Flows[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1989, 4(2): 801-807.
- [34] Cutsem T V. An Approach to Corrective Control of Voltage Instability Using Simulation and Sensitivity [J]. IEEE Trans on PWRs, 1995, 10(2): 616-622.
- [35] Granville S, Melo J C O, Melo A G C. Application of Interior Point Methods to Power Flow Unsolvability [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1996, 11(2): 1096-1103.
- [36] Barboza L V, Salgado R. Unsolvability Power Flow Analysis—An Approach Based on Interior Point Non-linear Optimization Methods [A]. IEEE Porto Power Tech Conference Porto (Portugal): 2001.
- [37] 于尔铿, 潘毅, 王宪荣, 等. 电力系统潮流收敛性的实用性改进 [J]. 电网技术, 1995, 19(1): 23-26.
- YU Er-keng, PAN Yi, WANG Xian-rong, et al. Practical Improvements upon Convergence of Load Flow Calculation [J]. Power System Technology, 1995, 19(1): 23-26.

收稿日期: 2005-06-27

作者简介:

李敏 (1982 -), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为最优潮流、电力系统规划; E-mail: lin_in_8899@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;

段献忠 (1966 -), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统分析, FACTS 技术及信息技术应用。

A study of load flow calculation when power flow does not converge to a solution

L IM in, CHEN Jin-fu, DUAN Xian-zhong, DA I Ying

(College of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: The importance of non-convergence in load flow calculation is discussed and two possibilities when power flow does not converge to a solution are analyzed. The two possibilities are ill-conditioned power flow and unsolvable power flow. Then a survey from these two aspects is made. After introducing the differences of the existing methods in the literature, the disadvantages of these methods are concluded later. As a result, several suggestions are proposed to improve the research on this problem. At last, this paper points out the key problems in the future.

This project is supported by the Teaching and Research Award Program for Outstanding Young Teachers in Higher Education Institutions of MOE, PRC and Supported by China Postdoctoral Science Foundation.

Key words: power system; convergence; ill-conditioned power flow; power flow unsolvable; load flow rectification

(上接第 73 页 continued from page 73)

- [39] 郭瑞鹏, 韩祯祥. 基于对数障碍函数的电压崩溃临界点改进算法 [J]. 电力系统自动化, 1999, 23(7): 9-11.
- GUO Rui-peng, HAN Zhen-xiang. An Improved Algorithm for Calculating Critical Point of Voltage Collapse Based on Logarithmic Barrier Functions [J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(7): 9-11.
- [40] 韦化, 丁晓莺. 基于现代内点理论的电压稳定临界点算法 [J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(3): 27-31.
- WEI Hua, DING Xiao-ying. An Algorithm for Determining Voltage Stability Critical Point Based on Interior Point Theory [J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(3): 27-31.
- [41] 郭瑞鹏, 韩祯祥, 王勤. 电压崩溃临界点的非线性规划模型及算法 [J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(4): 14-17.
- GUO Rui-peng, HAN Zhen-xiang, WANG Qin. Nonlinear Programming Model & Algorithm for Point of Collapse [J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(4): 14-17.

收稿日期: 2005-06-29; 修回日期: 2005-08-10

作者简介:

李宏钟 (1977 -), 男, 博士研究生, 研究方向为电力系统电压稳定与无功优化; E-mail: temp2003@sjtu.edu.cn

程浩忠 (1962 -), 男, 教授, 博导, 研究方向为电力系统电压稳定, 电网规划和电能质量;

朱振华 (1977 -), 男, 工程师, 研究方向为电力系统高电压技术。

Review on application of bifurcation theory in power system voltage stability

LI Hong-zhong¹, CHENG Hao-zhong¹, ZHU Zhen-hua², LI Shu-jing²

(1. Dept of Electrical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China;

2. Shandong Electric Power Research Institute, Jinan 250014, China)

Abstract: The basic conception of bifurcation is introduced. The applications of static and dynamic bifurcation in voltage stability are discussed respectively. The methods to calculate saddle node bifurcation and Hopf bifurcation are analysed. The application of the singularity induced bifurcation theory in dynamic voltage stability analysis is proposed. The study direction of bifurcation theory applied in power system is predicted.

Key words: power system; voltage stability; bifurcation theory; saddle node bifurcation; Hopf bifurcation; singularity induced bifurcation