

潮流计算收敛性问题研究综述

李敏,陈金富,段献忠,代莹

(华中科技大学电气与电子工程学院,湖北 武汉 430074)

摘要: 阐述了研究电力系统潮流不收敛问题的重要意义,分析了潮流计算不收敛的两种可能性:潮流病态和潮流无解,然后分别从这两个方面进行了综述。文中通过对已有研究方法的比较,总结了其中的不足,并提出几点建议完善潮流计算不收敛问题的研究,最后指出了以后的研究重点。

关键词: 电力系统; 收敛性; 病态潮流; 潮流无解; 潮流调整

中图分类号: TM711 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2006)04-0074-06

0 引言

现代电力系统的迅速发展,逐步形成了以远距离、重负荷、大区联网为特点的大电网;另一方面,电力系统竞争机制的逐步引入,使电网中发、输电设备使用的强度较之前更加接近其极限值:对这样大型的重负荷电力系统来说,潮流计算易出现不收敛的情况。此时,系统规划和调度人员往往只能凭借经验对计算数据做出判断,反复调整方式或规划数据,从而得到潮流解。这种传统的人工依据经验的调整方法效率低下、工作强度大、效果也不明显,因此迫切需要解决潮流不收敛时的分析和调整问题。

为了对潮流计算不收敛的问题进行分析,可将电力系统稳态计算的多维参数空间(参数包括各节点的发电机出力、负荷大小、变压器分接头位置等所有可控制和调整的变量)分成三个区域:运行域、紧急域和不可行解域(如图1)。其中运行域和紧急域又合称为可行解域。关于潮流方程解的个数问题,田村康男教授在80年代对潮流多解问题作了深入的研究^[1-3],发现随着负荷水平的加重,潮流解的个数成对减少,直至无解。可行解域和不可行解域之间的边界用 Σ 表示,文[4]介绍了简单系统边界的求解方法。

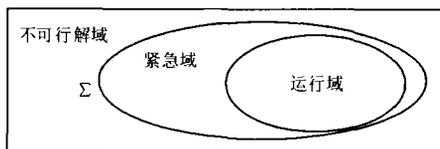


图1 潮流安全域

Fig 1 Power flow security regions

图1中,运行域对应潮流方程存在实数解,且能满足系统所有不等式约束条件的区域,该区域运用常规的牛顿法通常在迭代几次后可以很快收敛;紧急域对应虽然潮流方程有解,但是存在一个或多个不等式约束不满足的区域,在紧急域内的一点做潮流计算有可能出现发散的情况,这属于病态潮流计算问题;不可行解域即为潮流方程式无实数解的区域,实际的电力系统是不可能运行在该区域的,因此有必要对参数进行适当的调整,使其返回可行解域。

从以上的分析可知,潮流计算不收敛主要有两方面的原因:所采取的计算方法不完善,求不出解(通常对应于图1中的紧急域),这时可以通过提高计算方法的收敛性来得到潮流解;该方程组本身不存在实数解(对应于图1中的不可行解域),此时应调整发电机出力、变压器分接头甚至切除部分负荷等措施使参数回到可行解域。因此关于潮流计算不收敛的研究也朝着这两个方向进行,希望潮流计算在初始条件合理时能给出潮流解,在无解的情况下能给出最靠近出发条件的解,并能给出参数调整的措施,提供相关的数据供研究人员参考。

1 电力系统病态潮流计算方法

人们一直试图找到一种全局或者大范围收敛的方法来计算电力系统病态潮流,希望在解存在的情况下总是能收敛于潮流解。研究者提出的方法很多,主要可分为以下几类:改进牛顿法、最优乘法、非线性规划法、同伦法等。

1.1 改进牛顿法

牛顿法潮流^[5]是求解潮流方程最常用的方法,其要点是把非线性方程式的求解过程变成反复对相应的线性方程式进行求解的过程。牛顿法具有平方收敛特性,因此收敛速度快,但对初值要求较高。对

基金项目:高等学校优秀青年教师教学科研奖励计划资助项目;中国博士后科学基金资助项目

于重负荷病态潮流的计算,往往潮流解与初始值相差较大,而初始电压的选用不当易导致潮流不收敛;另外,电网的病态还表现为小阻抗支路的存在导致迭代发散。

文献[6]选用类似PQ分解法进行1~2次迭代,求出电压值作为牛顿法潮流的电压初值。文献[7]提出若系统因无功紧张或其它原因导致电压质量很差或有重载线路而节点间相角差很大时,先用高斯-塞德尔法迭代1~2次,以此迭代结果作为牛顿法的初值,或先用直流法潮流求解一次以求得一个较好的角度初值再转入牛顿法迭代。

文献[8,9]提出了重负荷节点导纳模型的潮流算法,对重负荷节点用导纳代替无功注入,改变了临界点附近雅可比矩阵的最小模特征值,较好地解决了重负荷病态潮流的收敛问题。

文献[10]对含有小阻抗支路系统潮流计算不收敛的原因进行了分析,认为此类系统潮流不收敛的原因是小阻抗支路使雅可比矩阵的数值条件变差所引起的。针对含有小阻抗支路系统的潮流计算,文献[11]提出不采用常规的电压初值(模值取1.0,相角取0.0),而采用小阻抗支路零功率法来选取牛顿法潮流计算电压初值,以提高牛顿法潮流的收敛性。文献[12]则提出采用变雅可比牛顿法解决含有小阻抗支路系统的潮流收敛性问题。

在电压稳定分析中对病态潮流的研究较多,文献[13,14]分别提出了两种不同的解决病态潮流的参数化方法,使潮流方程修正雅可比矩阵的奇异点转移,保证了潮流方程在临界点能够收敛。文献[15]对局部参数连续法作了改进,克服了雅可比矩阵在临界点附近的病态,改进后的算法能够有效保证连续潮流计算在临界点及其附近的收敛性。

通过对电力系统固有物理特性的分析,对牛顿法潮流计算所做的改进有效的弥补了其在病态潮流计算方面的不足,但都只是对某一个具体问题改进,针对性较强,并且增加了程序设计的复杂性;另外在出现发散和振荡现象时,很难判定这些现象出现的原因究竟是由于潮流算法本身不够完善而导致计算失败,还是在给定的运行条件下,非线性的潮流方程组本来就是无实数解的,更不能提供分析不收敛原因所需要的数据。

1.2 最优乘子法

最优乘子法潮流计算是数学规划原理同常规牛顿潮流算法的有机结合,将非线性代数方程组的求解问题转化为一个由潮流方程构成的函数的最小值

问题,因而从理论上控制了计算的收敛过程。同时,最优乘子法计入了Taylor级数二阶项,数值试验表明^[16],二阶项的计入能减少近似,提高牛顿法潮流的解算精度,改善收敛性能。

文献[17]提出了直角坐标系下带有最优乘子的牛顿潮流计算,岩本伸一应用参考文献[18]中非线性项的计算方法算出最优步长因子,即最优乘子。最优乘子牛顿潮流算法较好的解决了直角坐标系下病态潮流问题。文献[19]提出的正交变换阻尼因子法计算极坐标系病态潮流问题,将最优乘子法推广到极坐标系,并取得了较好的计算效果。

最优乘子法在常规牛顿潮流算法的基础上增加计算最优乘子的部分,从算法上保证了潮流计算永不发散,但是最优乘子法仍然存在对初值敏感的问题。针对这个问题,文献[20]提出了极坐标系准最优乘子方法,王宪荣等人通过多次数值实验,对求取准最优乘子的代数方程式的三个根进行了分析,选取合适的根作为准最优乘子,从而减轻了牛顿法对初值的敏感性。然而准最优乘子法在本质上依然没有摆脱潮流初值对牛顿法的影响,易收敛于局部最优解。

1.3 非线性规划法

对于病态潮流计算,该法将潮流方程转换为非线性规划的形式。在给定的运行条件下,潮流问题有解,则目标函数最小值就迅速趋近于零;如果从某一个初值出发,潮流问题不存在解,则目标函数就先是逐渐减小,但最后停留在某一个不为零的正值上。这便为给定条件下潮流问题的有解与无解提供了一个明确的判断途径^[17]。怎样快速有效的求解非线性规划方程式,是非线性规划方法解决病态潮流计算问题的难点。

文献[21]提出基于节点不平衡功率的病态潮流算法,将节点不平衡量作为目标函数,同普通的潮流计算相比较,计算量增加不大。然而在解方程式时仍采用高斯迭代方法,因而不能完全摆脱潮流初值的影响;另外,可以预先给出重负荷节点,以此作为不平衡节点以减小计算量。文献[22]采用进化策略法求解非线性规划方程式,算例表明进化策略法对于病态潮流的求解具有全局的收敛性,不足的是计算时间很长,是常规潮流计算的近千倍,因而也难以用于大规模电力系统。

非线性规划问题求解的好坏是该法用于病态潮流计算是否成功的关键,该问题的求解方法主要有简化梯度法、牛顿法、内点法^[23]和进化算法^[24]等。

总的来说,非线性规划法计算量大,虽有相对于最优乘子法更好的收敛性,但实用性不强。

1.4 其他算法

除了以上研究较多的病态潮流解法以外,一些研究者还把同伦法引入了病态潮流的计算。文献 [25] 应用大范围收敛的同伦方法求解病态潮流,取得了良好的效果。文献 [26] 提出了一种适合于潮流方程极坐标形式的同伦方程,对于解决潮流的病态问题取得了良好的效果。除此之外,一些学者还提出了病态潮流的校正措施,如文献 [27, 28] 中提出在邻近电压崩溃点处将系统鞍结分岔点的左特征向量作为最优控制方向。

2 电力系统潮流收敛性调整方法

以上的研究主要是在潮流有解的情况下提高计算的收敛性,即病态潮流的求解问题,并且取得了较好的效果;但如果潮流方程本身没有实数解,则需要通过校正措施使潮流方程进入可行解域。随着电力负荷和输电需求的迅速增长,潮流方程无解的情况将越来越受到研究和设计人员的重视。此时,需要关注的是怎样将一个无解的负荷水平经过最少的切除和调整(包括切除负荷,调整发电机出力、机端电压、有载调压变压器分接头等控制变量)使潮流方程有解。

文献 [29] 和 [30] 系统介绍了潮流无解的分析和调整措施。文 [29, 31] 提出了衡量方程式无解程度的尺度 d ——参数空间中希望得到的运行点 S (位于不可行解域) 和距离其最近的点 S^m (位于可行解域) 之间的欧几里德长度(如图 2),即

$$d = \sqrt{(S^m - S)^T (S^m - S)} \quad (1)$$

S 为系统节点功率注入量,潮流方程为

$$S = f(x) \quad (2)$$

而这两点之差 $(S^m - S)$ 作为参数最优调整的方向和大小。

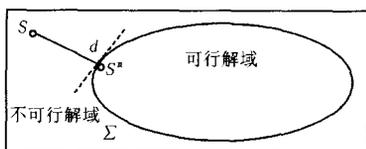


图 2 衡量潮流方程式无解程度的尺度 d

Fig 2 The distance providing a measure of the degree unsolvability

对于点 S^m 的求取, Overbye 提出了在直角坐标系下基于最优乘子牛顿潮流的迭代算法^[29],算法的

收敛速度取决于超平面在 S^m 点附近的曲率和距离 d 的大小。在极坐标下,同样可采用该算法^[32]。文献 [30] 在文献 [29] 的基础上,提出了潮流无解的实用化调整方法。该方法首先计算出距离 d 对所有调整手段 u 的灵敏度,

$$d_u = \gamma w^m [f(x^m) - S]_u \quad (3)$$

其中: w^m 为点 x^m 处雅可比矩阵零特征根对应的左特征向量。灵敏度求出之后,再综合考虑调整范围及经济因素,使用线性规划法得出最终的调整措施,文中通过简单的实例介绍了该调整方法。这样就克服了将 $(f(x^m) - S)$ 作为调整方向涉及很大数量调整手段的弊病,较为实用。

文献 [33] 提出“薄弱节点法”采用最小化潮流方法求出近似解,然后利用该解的信息通过灵敏度的计算找出电网的薄弱节点,从而给计算人员提供潮流调整的依据。文献 [34] 提出当由于大扰动或负荷节点功率增加而导致电压崩溃时,可通过灵敏度的计算来决定校正措施并得到可行解。

以上文献均采用灵敏度作为调整的依据,除此之外,将潮流无解问题作为非线性规划问题采用内点法求解也是较为常见的。如文献 [35] 中,将潮流无解问题看作是以下的非线性规划问题,

$$\begin{aligned} \text{Min } & g(z) \\ \text{s t } & \begin{cases} h(z) = 0 \\ a < z < b \end{cases} \end{aligned} \quad (4)$$

其中: z 为控制和状态变量,目标函数 $g(z)$ 设为所有母线的有功功率切除量,等式约束条件 $h(z) = 0$ 为潮流方程,并考虑了控制和状态变量的不等式约束条件。作者使用原对偶障碍函数内点法求解该非线性规划问题,计算时允许改变发电机有功出力、机端电压、有载调压变压器分接头等控制手段来尽量减少负荷的切除量。由于在迭代计算过程中不要求解潮流方程式,因此使用该法进行收敛性调整并不依赖于任何潮流算法的收敛性。

文献 [31] 同样使用原对偶内点法解决潮流方程的无解问题,由于文献 [31, 35] 均考虑了不等式约束,因此可将潮流从不可行解域直接调整到运行域,而文献 [29, 30] 则还需要在调整之后考虑所得解的合理性。另外,为了更好的模拟实际情况,还通过设置不等式约束来保证不中断重要负荷的电力供应,即可控制某个特定负荷不被切除^[31]。

在对收敛性调整结果的比较和分析上,文献 [31, 36] 提出采用有功和无功负荷的切除百分比来表示调整量。

$$alsi = \frac{P_{dior} - P_{dior}^{sup}}{P_{dior}} \cdot 100\% \quad (5)$$

$$rlsi = \frac{Q_{dior} - Q_{dior}^{sup}}{Q_{dior}} \cdot 100\%$$

实例证明^[31,36],采用原对偶内点法解决大规模电网潮流方程的无解问题是可行的,但由于计算矩阵维数多达节点数的几倍,需要较长的计算时间。

除了内点法和灵敏度类方法,于尔铿等在文献^[37]中提出了实用中潮流不收敛的调整措施:重新选择缓冲机位置、预先处理不平衡功率、用灵敏度方法处理电磁环网开断等。文中对华北、华中等电网的实际计算表明了调整的有效性。

总的来说,潮流无解问题理论上的研究相对较多,而实际应用方面的文献较少。文献^[37]虽然针对实际应用,但是需要较多的人工参与和分析判断,同时给出的调整办法具有较强的针对性,不便应用于大规模电力系统。文献^[30,36]考虑了实际应用中的一些问题,但本身计算繁琐,应用于大规模电力系统时计算时间较长。

3 讨论

现有的潮流计算不收敛问题的分析和调整研究很好地解决了一些问题,但是仍普遍存在着一定的局限性:

1) 在病态潮流计算中,最优乘子法虽然保证了潮流计算永不发散,但是仍有可能收敛于局部最优;非线性规划法虽然在形式上对解决病态潮流问题有很大的吸引力,但是非线性规划方程式的求解本身就是一个难点。

2) 潮流无解问题研究相对较少,但是其重要性已经在实际应用中显现出来。现有的值得肯定的内点法通常由于计算维数过多而难以在大型的电力系统中得到应用。

笔者认为做好潮流计算不收敛问题的分析和调整可以从以下几个方面考虑:

1) 潮流收敛性调整可以考虑更加精确的元件模型,如计入电压静态特性的负荷模型等,同时还应考虑调整的可行性和经济性;

2) 雅可比矩阵的奇异导致了潮流无解,而造成雅可比矩阵奇异的原因很多,由于分岔理论从数学上统一了导致雅可比矩阵奇异的各种原因,因此可以从这方面入手进行潮流无解问题的理论探索;

3) 为了提供全面的潮流信息,方便电网规划和分析计算人员,潮流计算要综合对潮流病态和无解

的考虑,在存在解时求出潮流解,无解时给出最合理的调整信息,避免孤立地考虑这两个问题;

4) 由于目前潮流收敛性调整主要依赖于人工经验,因此在利用计算机解决该问题时要求不仅能够自动给出近似解和调整措施,而且最好能在和计算人员的交互中按照人的判断进行调整。提供好的人机接口,是对算法很好的完善和补充;

5) 在计算的精度和速度之间寻找平衡点,既保证计算和调整的准确性,又不使计算和调整时间过长。

4 结语

潮流计算作为电力系统稳态计算的基础,其解具有十分重要的意义,求解过程中可能遇到的不收敛问题是潮流计算的重点和难点。目前解决病态潮流计算较为有效的最优乘子法和解决潮流无解问题的内点法都存在一定的局限性,因此在实用中碰到潮流不收敛的问题时,还尚未得到公认而满意的解决方法。潮流计算不收敛问题的分析和调整研究仍需要继续,而随着电力市场改革的推进和电力需求的增长,潮流无解时的调整问题无疑将受到研究者的重视。

参考文献:

- [1] Tamura Y, Nakanishi Y, Iwamoto Y. On the Multiple Solution Structure, Singular Point and Existence Condition in the Load Flow Multiple Solutions[J]. IEE Trans of Japan, 1980, 100(6): 337-344.
- [2] Tamura Y, Mori H, Iwamoto S. Relationship Between Voltage Instability and Multiple Load Flow Solutions in Electric Power Systems[J]. IEEE Trans on PAS, 1983, 102(5): 1115-1123.
- [3] Tamura Y, Sakamoto K, Tayama Y. Voltage Instability Proximity Index(VIPD) Based on Multiple Load Flow Solutions in Ill-conditioned Power Systems[A]. Proc of the 27th IEEE Conference on Decision and Control Austin(Texas): 1988. 2114-2118.
- [4] Hiskens IA, Davy R J. Exploring the Power Flow Solution Space Boundary[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2001, 16(3): 389-395.
- [5] Tinney W F, Hart C E. Power Flow Solution by Newton's Method [J]. IEEE Trans on PAS, 1967, 86(11): 1449-1460.
- [6] Stott B. Effective Starting Process for Newton-Raphson Load Flows [J]. Proc IEE, 1971, 118(8).
- [7] 诸骏伟. 电力系统分析(上册)[M]. 北京:中国电力出版社, 1995.
ZHU Jun-wei. Power System Analysis, Part One [M]. Beijing: China Electric Power Press, 1995.
- [8] Semlyen A, et al. Calculation of the Extreme Loading Condition of a Power System for Assessment of Voltage Stability [J]. IEEE

- Trans on PWRs, 1991, 6(1): 307-315.
- [9] 张尧, 宋文南, 贺家李. 邻近电压稳定极限的潮流和静稳极限算法[J]. 中国电机工程学报, 1994, 14(6): 17-23.
ZHANG Yao, SONG Wen-nan, HE Jia-li. An Algorithm for the Load Flow Solution Close to the Voltage Stability Limit and the Determination of Static Voltage Stability Limit[J]. Proceedings of the CSEE, 1994, 14(6): 17-23.
- [10] Tylavsky D J, Crouch P E, Jarriel L F, et al. The Effects of Precision and Small Impedance Branches on Power Flow Robustness[J]. IEEE Trans on PWRs, 1994, 9(1): 6-14.
- [11] 姚玉斌, 鲁宝春, 陈学允. 小阻抗支路对牛顿法潮流的影响及其处理方法[J]. 电网技术, 1999, 23(9): 28-31.
YAO Yu-bin, LU Bao-chun, CHEN Xue-yun. A Method to Deal with the Effect of Small Impedance Branches to Prevent Divergence in Newton Raphson Load Flow[J]. Power System Technology, 1999, 23(9): 28-31.
- [12] 姚玉斌, 刘东梅, 陈学允. 求解含有小阻抗支路系统潮流的一种新方法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2001, 33(4): 525-529.
YAO Yu-bin, LIU Dong-mei, CHEN Xue-yun. New Load-Flow Method to Deal with System with Small Impedance Branches[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2001, 33(4): 525-529.
- [13] Jean-Jumeau R, Chiang H D. Parameterizations of the Load Flow Equations for Eliminating Ill-conditioning Load Flow Solutions[J]. IEEE Trans on PWRs, 1993, 8(3): 1004-1012.
- [14] Chiang H D, Jean-Jumeau R. A More Efficient Formulation for Computation of the Maximum Loading Points in Electric Power System[J]. IEEE Trans on PWRs, 1995, 10(2): 635-646.
- [15] 郭瑞鹏, 韩祯祥. 电压稳定分析的改进连续潮流法[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(16): 13-16.
GUO Rui-peng, HAN Zhen-xiang. An Improved Continuation Power Flow Method for Voltage Stability Analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(16): 13-16.
- [16] 程浩忠. 利用最优乘子和潮流非线性方程确定静态电压稳定临界状态[J]. 电网技术, 1996, 20(1): 20-23.
CHENG Hao-zhong. Computation of the Critical State of Static-state Voltage Stability via the Application of Optimal Multiple Factor and Load Flow Equations Retaining Second Order Nonlinearity[J]. Power System Technology, 1996, 20(1): 20-23.
- [17] Iwamoto S, Tamura Y. A Load Flow Calculation Method for Ill-conditioned Power Systems[J]. IEEE Trans on PAS, 1981, 100(4): 1736-1743.
- [18] Iwamoto S, Tamura Y. A Fast Load Flow Method Retaining Nonlinearity[J]. IEEE Trans on PAS, 1978, 97(5): 1586-1599.
- [19] 刘广一, 胡锡龙, 于尔铿, 等. 电力系统病态潮流计算新算法[J]. 中国电机工程学报, 1991, 11(增刊): 27-36.
LIU Guang-yi, HU Xi-long, YU Er-keng, et al. A New Algorithm of Ill-conditioned Load Flow in Power Systems[J]. Proceedings of the CSEE, 1991, 11(s): 27-36.
- [20] 王荣荣, 包丽明, 柳焯. 极坐标系准最优乘子病态潮流解法研究[J]. 中国电机工程学报, 1994, 14(1): 40-45.
WANG Xian-rong, BAO Liming, LIU Zhuo. The Study of Ill-conditioned Load Flow Using Quasi-optimal Factor in Polar Coordinates[J]. Proceedings of the CSEE, 1994, 14(1): 40-45.
- [21] 王承民, 蒋传文, 侯志俭. 基于节点不平衡功率的病态潮流算法[J]. 上海交通大学学报, 2004, 38(8): 1283-1286.
WANG Cheng-min, JIANG Chuan-wen, HOU Zhi-jian. The Ill-conditioned Load Flow Algorithm Based on Node Lopsided Powers[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2004, 38(8): 1283-1286.
- [22] 鞠平, 张翠, 卫志农, 等. 电力系统潮流计算的模拟进化方法[J]. 河海大学学报, 1998, 26(5): 22-27.
JU Ping, ZHANG Cui, WEI Zhi-nong, et al. Computing Load Flow by Simulated Evolutionary Method[J]. Journal of Hohai University, 1998, 26(5): 22-27.
- [23] Mamoh J A, Zhu J Z. Improved Interior Point Method for OPF Problems[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1999, 14(3): 1114-1120.
- [24] Yuryevich J, Wong K P. Evolutionary Programming Based Optimal Power Flow Algorithm[J]. IEEE Trans on PS, 1999, 14(4): 1245-1250.
- [25] 陈礼义, 等. 一种大范围收敛的电力系统潮流解法——同伦延拓法[J]. 电力系统及其自动化学报, 1993, 5(1): 67-74.
CHEN Li-yi, et al. A Load Flow Algorithm with Global Convergence-homotopy Continuation Method[J]. Proceedings of the EPSA, 1993, 5(1): 67-74.
- [26] 周佃民, 廖培金. 电力系统病态潮流的同伦方法求解[J]. 电力系统及其自动化学报, 1999, 11(5-6): 67-71.
ZHOU Dian-min, LIAO Pei-jin. Homotopy Method for Ill-conditioned Power System Load Flow Calculation[J]. Proceedings of the EPSA, 1999, 11(5-6): 67-71.
- [27] 程浩忠, 祝达康, 张焰. 邻近电压崩溃点处的系统最优控制方向[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(21): 29-31.
CHENG Hao-zhong, ZHU Da-kang, ZHANG Yan. The Optimum Control Direction of Power Systems Near the Voltage Collapse Point[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(21): 29-31.
- [28] Dobson I, Lu L. Computing an Optimal 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.
- [29] Overbye T J. A Power Flow Measure for Unsolvable Cases[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1994, 9(3): 1359-1365.
- [30] Overbye T J. Computation of a Practical Method to Restore Power Flow Solvability[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1995, 10(1): 280-287.
- [31] Barboza L V, Salgado R. Restoring Solutions for Unsolvable Cases via Minimum Load Shedding for a Specified Direction[A]. The 22nd IEEE Power Engineering Society International Conference, 2001.
- [32] Barboza L V, Salgado R. Restoring Solutions of the Electric Network Equations: an Approach Based on the Minimum Distance[A]. Proceedings of the 2000 XIII Congresso Brasileiro de Automática, 2000. 169-174.
- [33] Dehnel M, Dommel H W. A Method for Identifying Weak Nodes

- 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

LI Min, CHEN Jin-fu, DUAN Xian-zhong, DAI 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:

李宏仲 (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 Jiao Tong 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