

基于 SVD 理论对四川电网电压静稳的实证研究

吴国梁¹, 刘俊勇², 陈谦²

(1. 南京供电公司, 江苏 南京 210008; 2 四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

摘要: 将奇异值分析 (Singular Value Decomposition, SVD) 法应用于四川电网电压静稳的实证研究, 针对四川电网 2003 年运行参数进行计算分析, 得到系统距离电压崩溃点程度的有效信息, 并找出了系统的薄弱点和最灵敏控制方向, 从而为运行人员提供了调控决策依据。经过四川省调度部门的实际验证, 证明了本方法的分析结论完全符合系统实际情况。

关键词: 电压静态稳定; 奇异值; 四川电网

中图分类号: TM711 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2005)15-0045-04

0 引言

伴随着现代电力系统的发展, 近几十年来世界范围内出现了很多电压稳定问题, 一个典型的例子就是 1983 年 12 月发生在瑞典的电压崩溃事故, 调查结果表明由于电压失稳导致几条主干线相继断开, 并最终导致了大面积的停电事故^[1]。因电压失稳而导致频繁的停电事故引起了专家、学者的高度重视, 并对电压静态稳定的机理和控制做了大量的研究工作, 提出了一系列的计算分析方法。然而, 2003 年美国加州又发生了震惊世人的“8.14”大停电, 这次大停电再次说明我们对电压稳定问题的重视和研究远远不够。

基于潮流计算的静态分析方法是目前电力系统电压稳定分析的主要方法。其中状态分析方法即基于最小奇异值分解法能找出电力系统的薄弱环节, 以便运行人员采用相应措施改善电力系统的电压稳定性^[2]。针对四川电网实际情况, 我们为四川省电力调度中心开发了基于奇异值分析法和连续潮流法的电压静态稳定分析软件, 在实际应用中取得了良好的效果。以下重点介绍基于奇异值分析法对四川电网 2003 年电压静态稳定情况的具体分析计算及结果分析。

1 奇异值分解 (SVD) 法

1.1 理论依据和数学模型

Venikov 首先提出将潮流雅可比矩阵奇异作为电压不稳定的判据^[3]。系统的潮流方程可以描述为:

$$Y_s = J_r X \quad (1)$$

式中: $Y_s = [Q_{1s} \ P_{1s} \dots \ V_s^2 \ P_{rs} \dots]^T$ R^m 为节点

注入矢量的偏差量或称控制变量的摄动量; $X = [e_1 \ f_1 \dots \ e_r \ f_r \dots]^T$ R^m 为状态矢量的摄动量; J_r $R^m \times m$ 是系统收敛潮流对应的雅可比矩阵, $m = 2(N - 1)$ 。由于雅可比矩阵的奇异意味着雅可比矩阵 J_r 的逆矩阵不存在, 这可以用来解释潮流解对小扰动的无限灵敏度, 该工作点就是电压崩溃临界点, 也叫做奇异点。最小奇异值反映了当前工作点电压静态稳定程度, 也可以看作当前工作点到静稳极限的距离; 对应于最小奇异值的左奇异向量反映了控制变量 (有功、无功注入) 的最灵敏方向。

奇异值分解的另外一个重要性质是当矩阵增加一行时, 最大奇异值增加, 最小奇异值减少。发电机无功出力越限时, 该节点由 PV 节点转化为 PQ 节点, 对应的潮流雅可比矩阵增加一行一列, 因而其雅可比矩阵的最小奇异值减小, 说明该系统的电压静态稳定性进一步降低。从另外一个角度看, 当系统中出现 PV 节点转化为 PQ 节点时, 该转化过程本身已表明系统的无功供应能力进一步恶化, 即系统的电压静态稳定性进一步降低。

我们下面介绍矩阵的奇异值分解理论及本程序对该理论的实际应用^[5]:

在数学上, 奇异值分解实际上是“对称矩阵正交相似于对角矩阵”的推广。设 A $R^m \times n$, 则存在单位正交矩阵 U 和 V , 而且

$$V^T A U = \begin{bmatrix} \sum & & & 0 \\ & \theta & & \\ & & & \end{bmatrix}$$

式中: $\sum = \text{diag}(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_r)$, 且 $\sigma_{\max} = \sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_r = \sigma_{\min} > 0$; $\sigma_1^2, \sigma_2^2, \dots, \sigma_r^2$ 是正半定矩阵 $A^T A$ 的非负特征值, r 为矩阵的秩, 且有:

$$\sigma_{r+1} = \sigma_{r+2} = \dots = \sigma_n = 0$$

矩阵 A 的奇异值即为 $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n$; U 的列向量为 A 的右奇异向量, V 的列向量为 A 的左奇异向量。

由以上介绍可知, A 的奇异值就是 $A^T A$ 的特征值 λ_i ($\lambda_i > 0$) 的平方根 $\sigma_i = \sqrt{\lambda_i}$, A 的右奇异向量就是 $A^T A$ 的单位正交右特征向量, 左奇异向量就是 AA^T 的单位正交右特征向量。

1.2 算法^[4]

1) 采用改进的平方根法对 $(J^T J - qE)$ 进行三角分解, $(J^T J - qE) = LDL^T$, 式中, L 为单位下三角阵, D 为对角阵。

2) 求解 σ_{\min} 及其右奇异向量 U_{\min}

$$LY^{(k)} = Z^{(k)} \quad \text{取 } Z^{(0)} = (1, 1, \dots, 1)^T \quad (2)$$

$$DL^T W^{(k+1)} = Y^{(k)} \quad (3)$$

$$Z^{(k+1)} = W^{(k+1)} / \max(W^{(k+1)}) \quad (4)$$

$$|(\max(W^{(k+1)}) - \max(W^{(k)}))| < \epsilon \quad \text{迭代终止}$$

计算电压静稳裕度: $U_{\min} = Z^*$;

$$\sigma_{\min} = (q + 1 / \max W^*)^{1/2} \quad (5)$$

3) 求解左奇异向量 $V_{\min} = J U_{\min} / \sigma_{\min}$ 。

2 SVD 算法的实际工程应用及结果分析比较

2.1 计算网络、运行方式的选择

此次计算四川电网电压稳定采用 2003 年数据共取了 473 个节点 (丰大方式) 和 475 个节点 (枯大方式), 所生成的雅可比矩阵为 $2(N-1)$ 维, 即 944 (或 948) 维, 普通的计算方法计算量很大, 计算时间很长, 并不适合实际工程应用。因此我们采用了矩阵稀疏化处理, 计算结果表明, 潮流计算速度和奇异值计算速度得到了极大提高。利用以上计算方法, 我们针对四川电网主要做了三个方面的工作: 分析当前系统距离电压不稳定点的距离或电压稳定裕度; 分析引发系统发生电压不稳定的薄弱点、薄弱区域; 分析防止系统发生电压不稳定的控制策略。

我们针对以下两种运行方式进行奇异值分解计算。

2.2 枯大运行方式计算分析

根据 2003 年电力电量平衡的结果, 枯水期四川电网将面临缺电局面, 要求火电厂基本上全天满发, 日调节水库则按低谷平段蓄水, 高峰顶峰的方式运行。枯大方式下, 按照日调节水电站以 50% 的装机容量为最大出力, 季调节水电站以 75% 的装机容量为最大出力的标准来看, 具有可调度出力的电站主

要有宝珠寺电站、二滩电站、铜街子电站、龚嘴电站和江油电厂。本部分结合连续潮流算法 (负荷增长模式选择四川地区所有负荷节点按初始负荷大小比例增长, 负荷功率因数保持不变), 输入四川电网 2003 年枯大方式数据计算, 逐步增加系统负荷并逐次计算系统最小奇异值及其对应的奇异向量直至电压稳定极限点, 可以看到系统的最小奇异值在逐渐减小 (如图 1 所示), 即对应的系统电压静态稳定裕度随之逐步减小, 直至最小奇异值趋近于零 (枯大方式下计算的最小奇异值 $\sigma_{\min} = 2.078661E-02$), 可以认为系统此时已经达到电压静态稳定极限; 同时当图 1 中的奇异值趋近于零时, 我们通过连续潮流算法得出系统潮流计算不再收敛的结论, 这也从侧面验证了系统的 $P-V$ 曲线正趋近崩溃点。

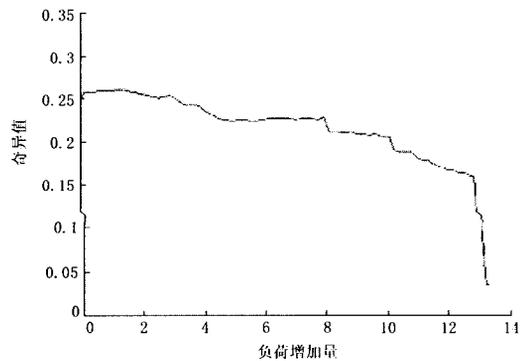


图 1 全网负荷增加时奇异值的变化情况

Fig 1 The minimum singular characteristics change when load adding

图 2 显示系统到达电压稳定极限时的奇异向量。

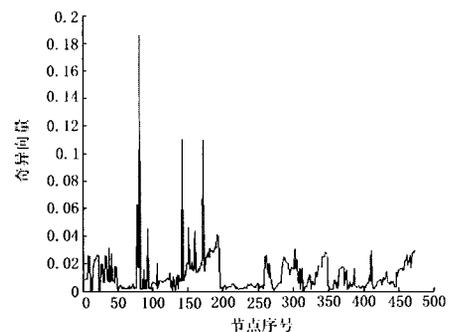


图 2 电压静稳极限点系统的奇异向量

Fig 2 V of the steady-state voltage stability margin

枯大方式下在电压稳定极限点附近最小奇异值 $\sigma_{\min} = 2.078661E-02$, 表 1 列出 σ_{\min} 对应的 10 个最大奇异向量值。

表 1 对应最小奇异值的最灵敏的 10个负荷节点

Tab 1 The ten most sensitive value load nodes corresponding to the minimum singular

负荷节点名称	奇异向量值
袁家坝 1	1. 280 692E - 02
白石岩 1	1. 250 689E - 02
新广兴 2	1. 205 225E - 02
永兴 1	0. 011 992 9
天明 1	1. 192 637E - 02
安县 1	1. 186 742E - 02
五里堆 1	0. 011 865 5
大康 1	1. 181 835E - 02
江油 2	1. 170 672E - 02
古城 1	1. 170 089E - 02

通过分析表 1 中对应于最危险失稳模式的全网最薄弱的 10个负荷节点对应的奇异向量值可以得出如下结论:系统的薄弱区主要位于两个区域,一是四川电网成都负荷中心的五里堆、古城、永兴、青白江、蓉东及其附近;二是川北地区袁家坝、白石岩、新广兴、江油、大康及附近。由上面分析结果也可以看出江油电厂和成都电厂等火电机组对枯大方式下电网安全运行的重要贡献,因此在该运行方式下应该尽量避免由于事故、缺煤导致的火电机组停运;避免由于四川地区煤质差导致的火电机组减出力运行等情况的出现。在系统接近静态稳定极限时,通过调节袁家坝 1、白石崖 1 等节点所在区域的控制变量可以使系统迅速恢复到稳定状态。当在以上区域按比例增加一倍无功补偿量时得到该有功负荷水平下的最小奇异值 $\sigma_{\min} = 3. 056 261E - 01$,可以看到系统迅速远离危险状态。

2.3 丰大运行方式

依据四川电网 2003 年负荷预测,2003 年最高负荷出现在丰水期的 7~8 月份,水电大发的同时,较多火电开机运行,具有可调度出力的电站、电厂主要有:白马新厂、宝珠寺电站、嘉陵成厂、华能成厂、江油电厂、广安电厂。负荷增长方式选择四川地区的所有负荷节点按基本运行方式下负荷大小的比例增长,功率因数维持恒定。

本部分结合连续潮流算法输入四川电网 2003 年丰大方式数据计算,逐步增加系统负荷并逐次计算系统最小奇异值及其对应的奇异向量直至电压稳定极限点,可以看到系统的最小奇异值在逐渐减小(如图 3 所示),即对应的系统电压静态稳定裕度随之逐步减小,直至最小奇异值趋近于零(丰大方式下计算的最小奇异值 $\sigma_{\min} = 2. 562 318E - 02$),可以认为系统此时已经达到电压静态稳定极限。

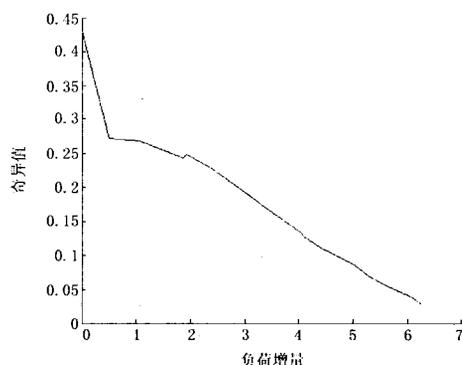


图 3 全网负荷增加时奇异值的变化情况

Fig 3 The minimum singular characteristics change when load increase

图 4 显示出系统到达电压稳定极限时的奇异向量。

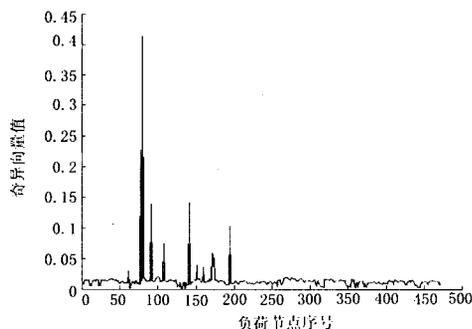


图 4 电压静稳极限点系统的奇异向量

Fig 4 V of the steady-state voltage stability margin

如图 4 所示,当系统已经达到电压静态稳定极限时(对应于系统的最小奇异值 $\sigma_{\min} = 2. 562 318E - 02$),最大的 10个奇异向量元素对应的 10个负荷节点即系统的最薄弱或者说控制变量(有功、无功注入)对应的最灵敏的 10个节点如表 2 所示。

表 2 对应最小奇异值的最灵敏的 10个负荷节点

Tab 2 The ten most sensitive load nodes corresponding to the minimum singular value

负荷节点名称	奇异向量值
大面铺 1	1. 089 706E - 02
新二村 1	1. 423 156E - 02
古城 1	1. 167 695E - 02
五里堆 1	0. 011 533 6
孟家 1	1. 093 295E - 02
昭觉寺 1	0. 969 734E - 02
什邡 1	0. 918 155E - 02
永兴 1	0. 867 606E - 02
清白江 1	0. 723 948E - 02
新市 1	0. 711 231E - 02

通过分析表 2 可知,枯大方式下对应于最危险

失稳模式的全网最薄弱的 10 个负荷节点对应的奇异向量值反映出如下问题:系统的薄弱区主要位于四川电网成都负荷中心的大面铺、古城、新二村、青白江、五里堆、昭觉寺及其附近。以上问题的深层次原因分析如下:由于宝珠寺电站、二滩电站等国家大中型重点建设项目的投产,四川电网发电装机容量增加很快,尤其是水电装机比重大幅增长,目前,四川电网水电装机容量已占总装机容量的 60%左右;二滩电站投产后,二滩电力主送方向由规划设计阶段的重庆方向改为四川成都方向,四川电网不得不将大容量水电经过长距离输电线路,送电到负荷中心;同时为考虑到电网的经济效益,尽可能地多发水电,减少弃水,需要安排大量的火电机组停运;但容量的水电厂远离负荷中心,以成都为负荷中心的受端电网火电机组大量停运,必将削弱负荷中心的电源支撑,导致了四川电网的安全稳定问题十分突出,特别是电压稳定问题成为制约向四川南北送电能力和火电机组最小开机方式的重要因素之一。

当系统趋近电压稳定极限时,针对表 2 中对应于最危险失稳模式的全网最薄弱的 10 个负荷节点所在区域增加无功补偿,尤其是增加以成都为负荷中心的无功支撑可以使系统迅速回到稳定状态。

在以上区域按比例增加一倍无功补偿量时得到该负荷水平下的最小奇异值 $\lambda_{\min} = 2.556282E - 01$, 可以看到系统迅速远离危险状态。

3 结论

本文采用奇异值分解(SVD)法对四川电网 2003 年数据进行电压静稳计算得到不同运行方式、不同负荷增量下的奇异值和奇异向量信息,并分析了系统的稳定裕度和薄弱节点的分布,提出使系统迅速远离崩溃点的有效控制方案;针对以上对应于最危险失稳模式的全网最薄弱的 10 个负荷节点所

在区域增加无功补偿的结果显示,系统迅速远离了不稳定状态。该结论在实际工程应用后表明和四川电网实际情况相一致,因而具有较强的实用性。

参考文献:

- [1] IEEE Publication 90TH0358-2PWR. Voltage Stability of Power Systems Concepts Analytical Tools and Industry Experience[A]. IEEE Service Center New Jersey: 1990.
- [2] Walve K. Modelling of Power System Components at Severe Disturbances[Z]. CIGRE Report, 1986 38-48.
- [3] Venikov V A, Stroeve V A, Idelchick V I, et al Estimation of Electrical Power System Steady-state Stability in Load Flow Calculations[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1975, 94(3): 1034-1041.
- [4] 冯治鸿,刘取,倪以信,等. 多机电力系统电压静态稳定分析——奇异值分解法[J]. 中国电机工程学报, 1992, 12(3): 10-19.
FENG Zhi-hong, LU Qu, NI Yi-xin, et al Analysis of Steady-state Voltage Stability in Multimachine Power Systems by Singular Value Decomposition Method[J]. Proceedings of the CSEE, 1992, 12(3): 10-19.
- [5] 蒋正新,施国梁. 矩阵理论及其应用[M]. 北京:北京航空学院出版社, 1998.
JIANG Zheng-xin, SHI Guo-liang The Matrix Theory and Its Application[M]. Beijing: Beijing Aviation University Publishing Company, 1998.

收稿日期: 2004-11-24; 修回日期: 2005-03-22

作者简介:

吴国梁(1975-),男,硕士研究生,从事电力系统分析,电力市场研究和开发工作; E-mail: wuguoliang028@126.com

刘俊勇(1963-),男,教授,博导,主要从事电力系统分析、电力市场等方面的研究工作;

陈谦(1979-),男,硕士研究生,从事电力系统分析、电力市场研究和开发工作。

Singular value decomposition method applied to Sichuan Power Grid

WU Guo-liang, LU Jun-yong, CHEN Qian, HOU Zhi-hong
(Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: Singular value decomposition method is applied to analyse steady-state voltage stability of Sichuan Power Grid. This paper collects the information of the steady-state voltage stability margin and the weakness nodes, and ensures most sensitive control direction by calculating and analyzing the parameter of Sichuan Power Grid in 2003. This method provide decision-making gist for the operator. The conclusion is in accordance with fact of system by Sichuan Electric Company.

Key words: voltage static stability; singular value; Sichuan Power Grid