

考虑负荷静特性的基于奇异值分解法静态电压稳定分析

吴华坚¹, 李兴源¹, 贺洋¹, 郑景轩², 王韬³, 弭磊⁴, 刘仁杰⁴

(1. 四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065; 2. 四川攀枝花供电局, 四川 攀枝花 617000;
3. 浙江省德清供电局, 浙江 德清 313200; 4. 长江电力股份有限公司, 湖北 宜昌 443002)

摘要:随着电网规模的不断扩大,电压崩溃事故的频发,电力系统电压稳定性问题已经受到越来越多的关注,逐渐成为电力界的一个研究热点。电压稳定又称负荷稳定,负荷特性是电压稳定研究的关键问题。在总结前人研究成果的基础上,就奇异值分解法应用于考虑负荷静特性的电力系统进行静态电压稳定分析做了一些探索性工作。首先概述了电压稳定问题研究的历史和现状,阐述了电压失稳的机理并对各种静态以及动态电压稳定分析方法进行了介绍。接着介绍了奇异值分解法。奇异值分解法的数学理论严谨,判别指标准确、简洁、实用。在奇异值分解法的基础上,运用电压稳定指标在 IEEE14 节点和 IEEE39 节点标准系统中进行了仿真验证,对各个指标进行了物理意义分析,证实了方法的正确性。对系统采用了不同的负荷模型进行电压稳定分析,得出了关于考虑了负荷模型的实际系统分析的有用结论。最后,基于奇异值分解法得出的结论,提出了预防电压失稳、防止电压崩溃、提高系统电压稳定性的控制措施。

关键词:电力系统;静态电压稳定;奇异值分解法;静态负荷模型

Abstract: As power system becoming larger and larger, the frequency of voltage collapse accidents becomes higher and higher. So voltage stability of power system has been focused on by more and more people and become a hot topic in power industry. Voltage stability is also called load stability, and the research of load characteristics is the key. Based on the former achievements, some work has been done that how singular value decomposition method can be applied to static voltage stability analysis based on static load model. Firstly, it gives an introduction to the history and the current situation of voltage stability problem and the principle of voltage instability, as well as all kinds of voltage stability analysis methods, both static and dynamic. Then the singular value decomposition is introduced. The mathematical theory of singular value decomposition method is very rigorous, and the criteria of voltage stability are precise, concise and practical. The fourth chapter validates SVD method through IEEE 14 buses standard system and IEEE 39 buses standard system, and the physical meanings of all criteria are analyzed, which proves SVD method practical. The standard system based on different load model has been analyzed using SVD method, and some conclusions have been gotten that are useful to practical systems. At last, based on the conclusions, some measures are given to avoid the voltage instability or voltage collapse and to improve the voltage stability of power system.

Key words: power system; static voltage stability; SVD method; static load model

中图分类号: TM732 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-6954(2009)03-0005-04

电力系统是一个十分庞大的复杂的非线性系统。随着电网规模不断扩大,电力系统的电压稳定问题变得越来越突出。20世纪70年代后世界上许多国家发生了电压失稳事故,造成了巨大的经济损失和社会影响。这类事故的共同特征是当系统发生扰动时,系统的频率和角度基本维持不变,而某些节点的电压持续快速下降,造成电压崩溃,最终导致系统瓦解。中国经济正处于飞速发展时期,电网常处于满负荷运行

状态,这对电压稳定是十分不利的。因此,借鉴国内外的研究经验和实际教训,加快对电压失稳发生的机理和控制措施的研究,减少和避免电压崩溃事故的发生,具有十分重要的意义。

但迄今为止,电压稳定的研究存在许多难题,如负荷模型的建立,各种元件的动态过程及其相互影响等。伴随着国内外电网的互联、直流输电以及 FACTS技术的应用,电力系统又呈现了一些新的特点,这些因素很大程度上增加了维持电力系统电压稳定的难度,容易造成电压不稳定,因此对其的分析和

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(2004CB217901); 国家科技支撑计划项目(2008BAA13B01); 国家电网公司项目

控制研究迫在眉睫。

电力系统是一个复杂的非线性动力系统,它的动态行为被归结为一个非线性微分-差分-代数方程组 (DDAE)。可以认为,所有电压稳定问题及相关问题的研究都是围绕电力系统的 DDAE 的基本性质展开的。由于侧重点不同,分析方法也不同,主要分为静态电压稳定分析和动态电压稳定分析。静态电压稳定分析方法主要是通过代数方程来计算分析。其理论上认为电压稳定是一个潮流方程是否存在可行解的问题,因而把临界潮流看作是电压稳定的极限;另一方面,由于静态分析技术比较成熟,易于给出电压稳定裕度指标及对状态量的灵敏度信息。而动态电压稳定分析主要是通过微分-代数方程来计算分析。

这里以电力系统电压稳定分析为研究方向,考虑负荷的静特性对电压稳定的影响,就奇异值分解法在电压稳定分析中的应用作了详细的论述。并通过实际算例分析了不同的负荷模型对电力系统电压稳定的不同影响,得出了一些有用的结论。

1 奇异值分解法

设 $A \in R^{m \times n}$, A 的奇异值 δ_i 定义为矩阵 $A^T A$ 的特征值 $\lambda_i (\geq 0)$ 的算术平方根,即 $\delta_i = \sqrt{\lambda_i}^{[2]}$ 。 A 的右奇异向量就是 $A^T A$ 的单位正交右特征向量。 A 的左奇异向量就是 AA^T 的单位正交右特征向量。

设 $A \in R^{m \times n}$, 则存在单位正交矩阵 U 和 V , 使得

$$V^T A U = \begin{bmatrix} \Sigma & 0 \\ 0 & Q \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $\Sigma = \text{diag}(\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_r)$, 且 $\delta_{\max} = \delta_1 \geq \delta_2 \geq \dots \geq \delta_{\min} \geq 0$ 。

则 A 的奇异值分解为

$$A = V \Sigma U^T \quad (2)$$

矩阵的奇异性程度可以用条件数来表示,满秩矩阵的条件数为

$$\text{Con}(A) = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{\min}} \quad (3)$$

式中: σ_{\max} 和 σ_{\min} 是矩阵 A 的最大和最小奇异值。如果 A 奇异, 则 $\sigma_{\min} = 0$ 且 $\text{Con}(A)$ 为无穷大。显然, $\text{Con}(A) \geq 1$ 。对于方阵 A 如果 $\text{Con}(A)$ 接近 1, 那么 A 远离奇异; 而如果 $\text{Con}(A)$ 是大的, 那么矩阵 A 接近奇异。如果 $\text{Con}(A) > \text{Con}(B)$, 则认为矩阵 A 比 B 矩

阵更奇异。

根据线性系统理论对于 $A X = b$ $A \in R^{n \times n}$, A 是非奇异的, 而 $b \in R^n$ 。在对矩阵 A 进行奇异值分解之后, 线性系统的解可以写成

$$X = A^{-1} b = (V \Sigma U^T)^{-1} b = \sum_{i=1}^n \frac{u_i v_i^T}{\sigma_i} \quad (4)$$

由式 (4) 可以得知, 如果 σ_i 充分小的话, 则矩阵 A 或向量 b 的微小变化就会引起 X 大的变化。

2 基于奇异值分解的电压稳定性分析

若一个系统除了平衡节点外, 总共有 n 个节点, PV 节点数为 m 。在正常运行条件下, 方程的线性化形式为

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta U \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{p\theta} & J_{pU} \\ J_{q\theta} & J_{qU} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta U \end{bmatrix} \quad (5)$$

对 J 进行奇异值分解, 可以得到

$$J = V \Sigma U^T = \sum_{i=1}^{2n-m} v_i \delta_i u_i^T \quad (6)$$

如果 J 非奇异, 则有功功率和无功功率注入的微小变化对 $[\Delta Q \ \Delta U]^T$ 的影响可以写成

$$\begin{bmatrix} \Delta Q \\ \Delta U \end{bmatrix} = J^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \Sigma^{-1} u_i v_i^T \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad (7)$$

当一个奇异值几乎为零时, 系统接近于电压崩溃点, 系统响应完全由最小奇异值 δ_{n-m} 和它相应的奇异向量 v_{n-m} 和 u_{n-m} 所决定。则

$$\begin{bmatrix} \Delta Q \\ \Delta U \end{bmatrix} = \frac{u_{n-m}}{\delta_{n-m}} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = v_{n-m} \quad (8)$$

由式 (8) 可以得出结论, 因为最小奇异值充分小, 所以功率注入的微小变化可以引起电压大的变化。因此, 有关左、右奇异值向量 v_{n-m} 和 u_{n-m} 可以说明如下:

1) 在 u_{n-m} 中最大的表列值 (元素) 指示最灵敏的节点电压 (临界电压)。因此, 弱节点可以通过右奇异向量来识别。

2) 在 v_{n-m} 中最大的表列值相当于有功和无功功率注入变化最灵敏的方向, 因此, 从左奇异向量可以获得最危险的负荷和发电量的变化模式。

3) 在式 (8) 中, 提供了节点电压处功率注入变化的典型模式。

4) 在式 (9) 中, 提供了节点电压和角度改变的典型模式。

5)左奇异向量还可以提供关于通过不同运行区域的传输功率(界面功率)对电压稳定性的影响。借助左奇异向量分析可以选择出弱传输线。

弱节点的识别和排序是根据与最小奇异值对应的右奇异向量的元素 u_{n-m} 进行的。如前提出的,在 u_{n-m} 中的最大表列值指示最灵敏的节点电压,所以节点强弱程度的指标可以定义为

$$LC_j = U_j / \delta_{n-m} \quad j \in \{1, 2, \dots, n-m\} \quad (9)$$

3 静态负荷模型分析

在以潮流计算为基础的稳态分析中,负荷模型大多采用静态负荷模型,在电力系统动态仿真中,静态负荷模型一般适用于电压扰动不太复杂,且扰动幅度不太大的长过程分析中。

(1)传统指数模型

$$\begin{cases} P = P_0 \left(\frac{V}{V_0}\right)^a \\ Q = Q_0 \left(\frac{V}{V_0}\right)^b \end{cases} \quad (10)$$

(2)多项式模型

$$\begin{cases} P = P_0 \left[A_m \left(\frac{V}{V_0}\right)^m + \dots + A_1 \left(\frac{V}{V_0} + A_0\right) \right] \\ Q = Q_0 \left[B_m \left(\frac{V}{V_0}\right)^m + \dots + B_1 \left(\frac{V}{V_0} + B_0\right) \right] \end{cases} \quad (11)$$

通常高次项的负荷很少,所以多项式模型又通常写为:

$$\begin{cases} P = P_0 \left[A_2 \left(\frac{V}{V_0}\right)^2 + \dots + A_1 \left(\frac{V}{V_0} + A_0\right) \right] \\ Q = Q_0 \left[B_2 \left(\frac{V}{V_0}\right)^2 + \dots + B_1 \left(\frac{V}{V_0} + B_0\right) \right] \end{cases} \quad (12)$$

其中, $A_2 + A_1 + A_0 = 1$, $B_2 + B_1 + B_0 = 1$ 。这个模型又称为 ZIP 模型。

在电压稳定性分析及其他电力系统仿真计算中,最常用的静态负荷模型是 ZIP 模型。由于多项式模型使用较灵活,可以形成不同的组合,所以这里将采用 ZIP 模型。

4 仿真分析

为了检验奇异值分解法的有效性以及分析不同的负荷特性对静态电压稳定的影响,本章将选两个 IEEE 的标准系统,分别为 IEEE 14 节点和 IEEE 39

节点系统进行编程分析。

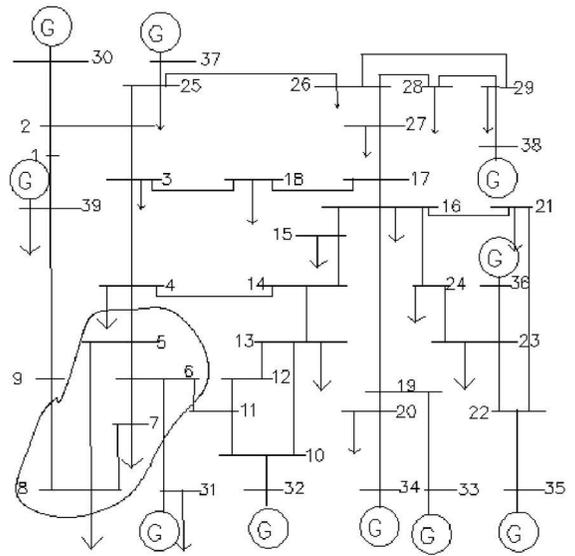


图 1 节点标准系统结构图

表 1 指标比较

节点编号	工况状态	临界状态
1	0.001 26	0.331 98
2	0.001 49	0.804 13
3	0.000 020 2	2.035 7
4	0.004 33	4.908 5
5	0.006 816 6	7.558 1
6	0.006 891	7.760 3
7	0.007 074 1	9.592 1
8	0.006 909 8	8.671 4
9	0.003 096 9	2.768 5
10	0.004 384 5	4.346 4
11	0.005 060 9	5.404 1
12	0.005 235 7	5.157 4
13	0.004 538 4	4.330 9
14	0.003 925 7	4.058 5
15	0.000 694	2.106 8
16	0.000 384	1.284
17	0.000 21	1.383 1
18	0.000 164	1.635 8
19	0.000 36	0.447 44
20	0.000 194	0.256 65
21	0.000 842	0.889 88
22	0.000 677	0.459 63
23	0.000 76	0.478 35
24	0.000 594	1.157 8
25	0.001 793 3	0.594 42
26	0.000 127 3	0.746 32
27	0.000 034 9	1.048 4
28	0.000 336	0.380 82
29	0.000 356	0.259 8

维持发电机和其他节点负荷不变,增加 7 号节点

的负荷水平, 负荷增长方式采用恒功率因数的负荷增长方式:

$$P_7^{n+1} = P_7^n + \frac{2.338}{0.8 \times n} \quad (13)$$

$$Q_7^{n+1} = Q_7^n + \frac{0.84}{0.8 \times n} \quad (14)$$

其中, n 表示增加的次数。

表 2 弱区域内节点实际电压水平

U_5	U_6	U_7	U_8
0.732 3	0.729 54	0.662 97	0.689 69

由表 1 和图 1 可以看出, 随着负荷的加重, 大多数 PQ 节点的 LC 指标都增大, 其中, 由 5、6、7、8 号节点所构成的区域内的 LC 指标都超过了 7.5, 而最弱节点 7 号节点的 LC 指标甚至超过了 9.5, 电压已经很不稳定。从表 2 中也可以清楚地看出, 弱区域内的实际电压水平已经降了很多。这说明随着负荷的增长, 某些薄弱节点会构成一个薄弱区域, 整个区域内的电压都会有不同程度的下降, 从而对区域的稳定构成威胁。而用最小奇异值和指标可以很好地对薄弱节点和薄弱区域进行识别, 从而有利于运行人员根据这些指标做出相应的操作以利于系统稳定运行。

在上面的分析当中, 考虑的是恒功率负荷模型下的电压稳定分析。然而在实际的系统中, 负荷模型不可能只有恒功率部分, 还包括恒阻抗和恒电流部分, 而且不同组合的负荷模型对系统的电压稳定的影响肯定是有差别的, 在这部分中就将选取三个不同的负荷模型组合, 来分析它们对系统电压稳定的影响。采用的负荷增长不变。

下面再比较上面所选的三个不同组合的模型下系统的稳定极限。

系统的负荷模型选用 ZIP 模型, 通过选取三个不同的二次项、一次项和常数项系数值, 确定三个用于仿真的系统, 具体参数如表 2 所示。

由表 2 可以看出, 当恒阻抗和恒电流部分所占比重越大的时候, 系统的功率极限也就越大, 系统就可以抵抗越大的负荷增长, 系统也就越稳定。

表 3 系统不同负荷模型极限功率比较

负荷模型	有功极限 (标么值)
$A_2 = B_2 = 0.1, A_1 = B_1 = 0.2, A_0 = B_0 = 0.7$	20.559
$A_2 = B_2 = 0.2, A_1 = B_1 = 0.3, A_0 = B_0 = 0.5$	25.274
$A_2 = B_2 = 0.3, A_1 = B_1 = 0.5, A_0 = B_0 = 0.2$	39.849

5 结 论

系统的稳定裕度可以通过最小奇异值 δ_{min} 来判断, 奇异值越接近于零, 说明系统越接近崩溃点, 也就越不稳定。随着负荷的增加, 最小奇异值 δ_{min} 逐步减小, 而且减小的速度越来越快。当系统重载的时候, 系统的节点电压会下降, 随着重载程度的加大, 有更多的节点会变成薄弱节点。在某些系统中, 一些相邻的若干个薄弱节点会构成几个薄弱区域。在这些区域中, 呈现出区域内的节点电压比其他节点的电压水平低很多。当 ZIP 模型中三个部分的系数取不同值的时候, 对于相同的负荷增长, 电压的水平存在差异。从上面的仿真中可以看出, 当恒阻抗和恒电流部分所占比重越大的时候, 系统的功率极限也就越大, 系统就可以抵抗越大的负荷增长, 系统也就越稳定。所以在实际系统的电压稳定分析时, 应该考虑分析时的实际静态负荷模型, 从而更准确地进行电压稳定分析。

参考文献

- [1] 王梅义, 吴竟昌. 大电网系统技术 (第二版) [M]. 北京: 中国电力出版社, 1995.
- [2] 周双喜, 朱凌志, 郭锡玖, 王小海. 电力系统电压稳定性及其控制 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [3] CIGRE Task Force 38.02.10. Modeling of Voltage Collapse Including Dynamic phenomena [J]. Electra, 1993(147): 71-77.
- [4] 吴国梁. 基于 SVD 理论对四川电网电压静稳的实证研究 [D]. 四川大学, 2005, 5.
- [5] 段献忠, 何仰赞, 陈树德. 电压崩溃机理探讨 [J]. 电力系统自动化学报, 1991, 3(2): 1-7.
- [6] 傅旭, 王锡凡, 杜正春. 电力系统电压稳定性研究现状及其展望 [J]. 电力自动化设备, 2005, 25(2): 1-9.
- [7] 潘文霞, 陈允平, 沈祖诒. 电力系统电压稳定性研究综述 [J]. 电网技术, 2001, 25(9): 51-54.
- [8] 陈敏, 张步涵, 段献忠, 胡德封. 基于最小奇异值灵敏度的电压稳定薄弱节点研究 [J]. 电网技术, 2006, 30(24): 36-39.
- [9] 李兴源, 王秀英. 基于静态等值和奇异值分解的快速电压稳定性分析方法 [J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(4): 1-5.
- [10] 冯治鸿, 刘取, 倪以信, 黄眉. 多机电力系统静态稳定性分析——奇异值分解法 [J]. 中国电机工程学报, 1995.

(下转第 13 页)

和适应能力;对中期负荷预测的试验同样证明运用 HHT 的方法比直接预测的效果好,如果进行深入研究,考虑经济、人口、气候和电价等影响因素应该能达到比较高的预测效果。

参考文献

[1] 孙洪波,徐国禹,秦翼鸿.模糊理论在电力系统符合预测中的应用[J].重庆大学学报,1994,17(1):18-22

[2] 陈章潮,顾洁.模糊在上海浦东新区电力负荷预测中的应用[J].系统工程理论与实践,1995(1):63-68.

[3] Kadil MS, El-Debelky SM, Hasanien NE. Long-term Load Forecasting for Fast Developing Utility Using a Knowledge-based Expert System. IEEE Trans on Power Systems 2002, 17(2): 491-496.

[4] Bhattacharya TK, Basu TK. Medium Range Forecasting of Power System Load Using Modified Kalman Filter and Walsh Transform [J]. International Journal of Electrical Power and Energy System, 1993, 15(2): 257-262.

[5] Sfetsos A. Short-term Load Forecasting with a Hybrid Clustering Algorithm [J]. IEEE Proceedings Communications 2003, 150(3): 257-262.

[6] 王东生,曹磊.混沌、分形及其应用[M].中国科学技术出版社,1995.

[7] 吴小明,邱家驹,张国江,等.软计算机方法和数据挖掘在电力系统负荷预测中的应用[J].电力系统及其自动化学报,2003,15(1):1-4.

[8] 徐军华,刘天琪.基于小波分解和人工神经网络的短期负荷预测[J].电网技术,2004,28(8):30-33.

[9] Zhihui ZHU, Yunlian SUN, Huangqiang LI. Hybrid of EMD and SVMs for Short-Term Load Forecasting [J]. IEEE International Conference on Control and Automation 2007, 5. 30-6. 1, 1044-1047.

[10] 李媛媛,牛东晓,乞建勋,刘达.基于因散经验模式分解的电力负荷混合预测方法[J].电网技术,2008,32(8):58-62.

[11] 胡国胜,陈一天.基于 HHT 变换的电机故障信号频率分析[J].电力学报,2005,20(4):327-330.

作者简介:

白玮莉(1986-),女,硕士研究生,研究方向为 HHT 在电力系统中的应用。

(收稿日期:2009-03-24)

(上接第 8 页)

12(3): 10-19.

[11] 韩祯祥,曹一家.电力系统的安全性及防治措施[J].电网技术,2004,28(9):1-6.

[12] 鞠平,马大强.电力系统负荷建模[M].北京:水利电力出版社,1995.

[13] 李欣然,贺仁睦,章健,等.负荷特性对电力系统静态电压稳定性的影响和静态电压稳定性广义实用判据[J].中国电机工程学报,1999,19(4):23-30.

[14] 程浩忠.电力系统电压崩溃临界状态的近似算法[J].电力系统自动化,1996,20(5):14-18.

[15] 鞠平.电力系统负荷建模理论与实践[J].电力系统自动化,1999,23(19):1-7.

[16] Sekine Y. and Yokoyama A. A Static Voltage Stability Index Based on Multiple Load Flow Solutions of Bulk Power System Voltage Phenomena[J]. Voltage Stability and Security, 1989, (5): 65-72.

[17] 段献忠.电压稳定问题的机理和建模及实用算法研究

[D].华中理工大学博士学位论文,1992

[18] IEEE Power System Stability Subcommittee. Special Publication Voltage Stability Assessment Produces and Guides Final Draft 1999.

[19] 刘天琪,邱晓燕.电力系统分析[M].北京:科学出版社,2005.

[20] H. D. Chiang and F. F. Wu. Stability of Nonlinear Systems Described by a Second-Order Vector Differential Equation [J]. IEEE Trans on CAS 1998, 35(6): 703-711.

作者简介:

吴华坚,男,硕士研究生,主要从事电力系统稳定分析和控制及其高压直流输电系统的分析和研究工作;

李兴源,男,教授,博士生导师,主要从事电力系统稳定分析和控制及其高压直流输电研究;

贺洋,男,硕士研究生,主要从事电力系统电压稳定分析及控制。

(收稿日期:2009-03-06)