

基于模态技术和 Q-U 曲线的一种电压稳定性指标

韩光¹, 丁晓群¹, 刘小波¹, 冯磊²

(1. 河海大学电气工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 山东泗水供电公司, 山东 泗水 273200)

摘要: 结合电力系统自身的特点和要求, 利用稳态运行情况下电力系统中的信息, 采用模态分析技术和 CPF 法得出关键节点的 Q-U 曲线和临界电压。并在此基础上, 利用一个新的电压稳定性指标 $(U/U_{cr})^2$, 来分析故障情况下系统的电压稳定性。用 IEEE39 母线系统进行了仿真计算, 结果表明该方法计算速度快, 准确性好, 适用于在线电压稳定性分析。

关键词: 电压稳定性指标; 模态分析; 连续潮流法

中图分类号: TM71 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2006)06-0021-03

0 引言

近年来, 国内外发生过多起与电压稳定性相关事故, 使得电压稳定性问题日益受关注。许多学者用不同的方法构造出多种电压稳定性指标来研究电压稳定问题。文献 [1] 从传统的牛顿拉夫逊潮流 (NR) 法来估计电力系统电压稳定极限; 文献 [2] 提出了衡量节点电压的奇异值法; 文献 [3] 在文献 [2] 的基础上, 利用静态等值方法求出电力系统等值参数, 并对单个负荷节点进行电压稳定性分析, 比较后得出最小奇异值; 文献 [4] 将灵敏度指标分为状态变量指标和输出变量指标, 并给出了统一的计算方法; 文献 [5] 在线路稳定因子的基础上, 利用电压方程的有解判别式, 提出了三种适用于就地电压控制的节点电压稳定指标; 文献 [6] 提出了一种基于网损灵敏度的二阶指标。

本文结合电力系统自身的特点和要求, 将模态分析技术和 Q-U 曲线结合起来, 得出关键节点的临界电压, 利用一种新的 $(U/U_{cr})^2$ 指标, 对故障情况下的系统稳定性进行分析, 当其值低于阈值时, 就认为系统是不稳定的, 需要采取一定的电压预防、校正控制措施。

1 新的电压稳定性指标

1.1 模态分析

模态分析^[1,7]技术是利用系统静态模型, 从电压和无功的关系来分析电压稳定性的。通过计算雅可比矩阵的特征值及其左右特征向量, 每一个特征值与电压/无功功率变化模式相关, 其特征值的大小提供了距离电压不稳定的相对量度, 而特征向量用来描述模态, 它提供关于网络元件和发电机在每一

个模式中的参与程度, 以及在此模式下各节点的灵敏度。其右特征向量中的最大元素指示最灵敏的电压幅值(关键节点), 左特征向量中的最大元素对应了无功功率注入的最灵敏方向(关键发电机)。将某一模式下的参与因子定义为对应的左特征向量和右特征向量的乘积。

$$Pk_i = \mu_i \nu_i \quad (1)$$

式中: i 为某一模态; μ_i 为右特征向量; ν_i 为左特征向量。

i 模态下, 节点的参与因子值越大, 表明此节点处电压-无功的灵敏度越大, 越容易从此节点开始电压失稳。

模态分析一般有两种失稳模式, 一种模式为局部失稳模式, 只有少量节点有大的参与因子, 所有其他节点的参与因子接近于零; 另一种为全局失稳模式, 许多节点具有小但是类似的参与因子。

本文将全局模式下的最小特征值和在此模式下最大参与因子所对应的节点作为关键节点。对 IEEE10 机 39 节点系统进行仿真计算, 分析系统在稳态和两种故障情况下的关键节点。

1.2 Q-U 曲线

当系统处于临界状态时, 常规的潮流计算方法是不收敛的。为了求出临界点的极限电压和极限功率, 克服接近稳定极限运行状态时的收敛问题, 本文利用连续潮流 (CPF) 法来求解。从初始的稳定工作点开始, 随着负荷的缓慢变化, 不断求解潮流方程, 从而绘制出完整的 Q-U 曲线。它通过增加一个未知数和一个方程形成 $n+1$ 维的扩展雅可比矩阵, 使得新矩阵在原雅可比矩阵奇异的地方不再奇异, 从而得出临界电压和极限功率。

连续潮流基本方程为:

$$f(x) + b = 0 \quad (2)$$

其中: $x \in R^n$; $f(x)$ 为 n 维函数向量; b 为负荷增长方向, $b \in R^n$; 为实参变量, 从物理的角度说, 它实际上在一定程度上代表着系统的负荷水平。

详细的介绍见文献 [8]。由于无功和电压联系紧密, 所以本文采用了 Q - U 曲线进行分析, 通过 CPF 法的求解, 得出关键节点的临界电压 U_{cr} 。

1.3 电压稳定性指标

电压稳定性指标是对系统接近电压崩溃程度的一种度量, 根据定义的指标来确定系统在某一故障下是不是电压稳定。

本文所提出的电压稳定性指标是将故障情况下的电压和临界电压比值的平方, 即 $(U/U_{cr})^2$ 作为衡量电压稳定性的指标, 取平方是为了将此差异放大。根据系统情况, 设置一个阈值 U_0 。计算流程如下:

1) 在某一运行工况下, 利用模态分析技术选取此系统的关键节点;

2) 作出关键节点的 Q - U 曲线;

3) 计算出此关键节点的临界电压 U_{cr} ;

4) 当系统发生故障时, 计算故障情况下该点的电压值;

5) 计算 $(U/U_{cr})^2$ 值;

6) 当 $(U/U_{cr})^2$ 值低于阈值时, 就认为该故障下系统处于电压不稳定状态, 需要采取预防 校正控制措施。

当系统的运行工况发生改变时, 重新开始步骤一 的计算。

对系统的某一运行工况, 只用计算一次 Q - U 曲线, 然后计算故障潮流下该节点的电压, 得到 $(U/U_{cr})^2$ 值, 通过与阈值的比较, 就可以来分析系统是否处于电压稳定状态, 若不稳定, 则需要采取相应的预防 校正控制措施, 像调节发电机出力, OLTC 的动作, 投切电容器和电抗器, 严重情况下, 还需要切负荷等措施。本方法可以作为在线电压稳定性分析一种指标, 它计算时间短, 准确性高, 具有较好的实用价值。

2 算例

本文采取 IEEE10 机 39 节点系统, 进行仿真计算:

1) 模态分析

本文对初始稳定状态和两种故障情况, 一是线路 BUS - 21 和 BUS - 16 之间发生断线故障; 二是线路 BUS - 14 和 BUS - 4 之间发生断线故障, 进行模

态分析, 得出全局模式下的最小特征值。三种情况下对应的最关键节点都为 12 号节点。可见在故障情况和初始稳态时, 最关键节点的变化不大, 故可以选取稳态时的最关键节点作为分析节点。见表 1。

表 1 三种情况下的参与因子

初始稳定状态		故障一		故障二	
节点号	参与因子	节点号	参与因子	节点号	参与因子
12	1.000	12	1.000	12	1.000
7	0.617	14	0.636	7	0.616
8	0.596	7	0.619	14	0.602

从表 1 中, 选取初始稳定状态下的 12 节点作为关键节点。

2) Q - U 曲线

根据模态分析得出的 12 节点, 用 CPF 法绘出该点初始稳态时的 Q - U 曲线, 见图 1。

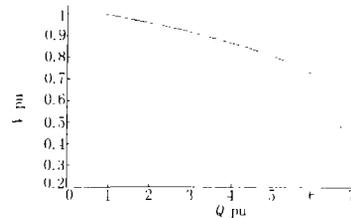


图 1 12 号节点的 Q-U 曲线

Fig 1 Q-U curve at bus 12

其对应的临界电压 U_{cr} 为 0.54。

3) 电压稳定性指标计算

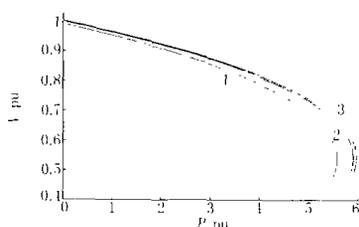
设置了 10 种故障, 根据潮流计算得出电压值, 由 $(U/U_{cr})^2$ 公式计算出各种故障下的指标, 见表 2。

表 2 12 号节点在各种故障下的电压值

故障类型 (断线故障)	节点电压	指标值
BUS13 - BUS10	0.991 3	3.370
BUS11 - BUS6	1.000 3	3.431
BUS8 - BUS7	0.999 2	3.424
BUS4 - BUS3	0.988 3	3.350
BUS15 - BUS14	0.995 9	3.401
BUS27 - BUS17	0.998 9	3.422
BUS21 - BUS16	0.997 7	3.414
BUS18 - BUS17	0.997 6	3.413
BUS24 - BUS23	0.997 3	3.411
BUS26 - BUS25	0.997 4	3.412

可见在这 10 种故障情况下, 当设置阈值 U_0 为 3.400 时, BUS4 - BUS3 断线故障和 BUS13 - BUS10 断线故障为严重故障, 其中 BUS4 - BUS3 断线故障最严重。下面做出几种故障下的 P - V 曲线图, 见文献 [9], 如图 2。

从图 2 中可以看出, 在故障一情况下, 对应的临



注:曲线 1 为 bus4 - bus3 断线故障; 2 为 bus21 - bus16 断线故障; 3 为初始稳态

图 2 12 号节点在三种情况下的 P-V 曲线

Fig 2 P-V curves of three conditions at bus 12

界有功功率值最小,其电压裕度值也最低。本文方法不需要绘制每个故障下的 P-V 曲线,仅需要计算故障时的电压值,这样可以使计算时间明显减少,其结果与常规求取极限有功功率的电压稳定性裕度指标是一致的。所以本文给出的指标可以作为在线电压稳定性分析的一种工具。

3 结论

通过本文的仿真计算,可以得出以下结论:

1) 利用模态分析技术得出关键节点,其效果较好;

2) 由于无功和电压联系紧密,所以采用了 Q-U 曲线,利用 CPF 法进行计算,克服了常规潮流临界点计算不收敛问题;

3) $(U/U_{cr})^2$ 指标与常规电压稳定裕度指标(极限有功功率)比较,分析结果是一致的;

4) 该方法计算速度快,准确性好,可以用于在线电压稳定性分析,具有一定的实用价值。

参考文献:

- [1] Taylor C. Power System Voltage Stability [M]. New York: McGraw-Hill, 1994.
- [2] 徐志文,栾兆文,樊涛,等. 衡量节点电压稳定的奇异值法和稳定指标 [J]. 电力系统自动化, 1997, 21 (8): 42-44.
XU Zhi-wen, LUAN Zhao-wen, FAN Tao, et al The Singular Value Method for Estimating Node Voltage Stability and Stability Index [J]. Automation of Electric Power Systems, 1997, 21 (8): 42-44.
- [3] 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): 5-8.
LI Xing-yuan, WANG Xiu-ying Fast Voltage Stability Analysis Methods Based on Static Equivalence and Singular Value Resolution [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23 (4): 5-8.
- [4] 段献忠,袁骏,何仰赞,等. 电力系统电压稳定性灵敏度分析方法 [J]. 电力系统自动化, 1997, 21 (4): 9-12.
DUAN Xian-zhong, YUAN Jun, HE Yang-zan, et al Sensitivity Analysis Methods on Voltage Stability of Electric Power Systems [J]. Automation of Electric Power Systems, 1997, 21 (4): 9-12.
- [5] 孙晓钟,段献忠,何仰赞. 负荷节点电压稳定性就地安全指标研究 [J]. 电力系统自动化, 1998, 22 (9): 61-64.
SUN Xiao-zhong, DUAN Xian-zhong, HE Yang-zan Local Voltage Stability Security Index Research on Load Nodes in Power System [J]. Automation of Electric Power Systems, 1998, 22 (9): 61-64.
- [6] 姜勇,周双喜,朱凌志. 基于系统网损灵敏度的二阶指标研究 [J]. 电力系统自动化, 2000, 24 (10): 16-18.
JIANG Yong, ZHOU Shuang-xi, ZHU Ling-zhi Second Order Index Based on System Loss Sensitivity [J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24 (10): 16-18.
- [7] Gao B, Morison G K, Kundur P. Voltage Stability Evaluation Using Modal Analysis [J]. IEEE Trans on PWS, 1992, 7 (4): 1529-1536.
- [8] Chiang H D, Flueck H J, Shah K S, et al CPFLOW: a Practical Tool for Tracing Power System Steady State Stationary Behavior Due to Load and Generation Variations [J]. IEEE Trans on PWS, 1995, 10 (2): 623-624.
- [9] 邱晓燕,李兴源,林伟. 在线电压稳定性评估中事故筛选和排序方法的研究 [J]. 中国电机工程学报, 2004, 24 (9): 54-59.
QIU Xiao-yan, LI Xing-yuan, LIN Wei Method for Contingency Screening and Ranking for On-line Voltage Stability Assessment [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24 (9): 54-59.

收稿日期: 2005-07-12

作者简介:

韩光 (1982-),男,硕士研究生,研究方向为电压稳定性;

E-mail: han5123@sohu.com

丁晓群 (1956-),男,教授,从事人工智能在电力系统中的应用、电气设备故障诊断及配电网自动化领域的教学和科研工作;

刘小波 (1979-),男,硕士研究生,研究方向为电力系统运行与控制。

An index of voltage stability based on modal analysis and Q-U curve

HAN Guang¹, DING Xiao-qun¹, LIU Xiao-bo¹, FENG Lei²

(1. School of Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Sishui Power Supply Company, Sishui 273000, China)

Abstract: Modal analysis technique and CPF method are used to acquire Q-U curve and threshold voltage of the key node in stability condition. Based on the analyzed voltage, a new voltage stability index $(U/Y_{cr})^2$ is used to analyse voltage stability of contingency condition. IEEE 39-bus system simulation shows that the method is fast, accurate and suitable for on-line voltage stability analysis.

Key words: voltage stability index; modal analysis; CPF method