

# 基于 PSS/E 的电力系统电压稳定性分析

段建民<sup>1</sup>, 张 焰<sup>1</sup>, 范习辉<sup>1</sup>, 周 坚<sup>2</sup>, 曹 路<sup>2</sup>, 蒋逸静<sup>2</sup>

(1. 上海交通大学 电子信息与电气工程学院, 上海 200030;

2. 华东电网公司, 上海 200025)

**摘要:** 提出了应用 PSS/E 潮流和动态仿真模块分析电力系统电压稳定的方法。利用 PSS/E 中的潮流计算模块, 能有效判断系统电压是否稳定, 并求出系统电压稳定裕度及影响电压稳定的弱节点、弱支路和弱区域; 利用 PSS/E 软件的状态空间仿真模块和扩展时段仿真模块, 可对电力系统进行动态仿真, 找出影响系统电压稳定的关键因素。最后以一大型电网为例, 分析计算说明该软件在电力系统电压稳定性方面的应用情况。

**关键词:** 电压稳定; PSS/E 软件; 仿真

**中图分类号:** TM 712

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1006-6047(2005)06-0034-04

## 0 引言

电力系统电压稳定性分析要解决以下问题: 判断系统在某一运行状态下, 电压是否稳定; 给出系统在当前运行点的稳定裕度, 也即当前运行点离电压不稳定的距离; 找出系统中电压稳定的薄弱节点、支路和区域。

PSS/E 是美国 PTI 公司开发的一套用于分析电力系统稳态性和动态性的仿真计算软件, 是优化的数据结构与一系列较为完善计算工具的结合体。用户可以通过交互直接利用这些计算工具, 或按照一定顺序将这些工具结合起来, 解决处理电力系统潮流计算、故障分析、网络等值和动态仿真等问题。PSS/E 的优化数据结构使其能够适用于大规模电力系统的分析计算, 不会因为系统过大而产生维数灾和计算效率等问题。

尽管 PSS/E 高度模块化的结构使其能完成很多的分析计算功能, 但它本身不是专门为解决电力系统电压稳定性问题而设计开发的<sup>①</sup>。本文充分利用 PSS/E 自身已具有的功能模块, 提出了一个基于 PSS/E 的电压稳定的研究方法。通过实例计算表明, 该方法实用性好, 求解速度快。

## 1 电力系统电压稳定性分析

对于电压稳定性问题, 目前比较成熟的是静态分析方法, 研究的目标是判断系统在各种运行状态下能否保持电压稳定、系统电压失稳的极限以及影响系统电压稳定的关键节点、支路等。本文基于 PSS/E 软件所具有的一些功能, 用基于潮流计算的静态分析方法评价系统电压稳定性并找出影响电压稳定性的薄弱环节。

电压不稳定极易在系统重载情况下发生, 其发展演变过程持续时间较长, 因而可以采用静态的分析方法研究。但从本质上而言, 电压不稳定的发生变化过程为动态过程, 系统中所有动态元件包括发电机及其控制系统、动态负荷、有载调压变压器以及无功补偿设备等都对电压稳定性起着重要作用, 特别是在研究因电压过低而导致系统动态稳定性破坏时, 静态的分析方法显然已不能满足需要, 需要用动态方法进行研究<sup>[1]</sup>。本文应用 PSS/E 本身所包含的状态空间仿真和扩展时段仿真功能对系统进行仿真, 根据动态分析找出系统电压稳定的薄弱环节。

### 1.1 电力系统电压稳定裕度指标

根据文献[1]可知, 当系统达到静态稳定极限时, 潮流方程的雅可比矩阵奇异, 由此可以判断系统电压稳定情况。

对一个给定的运行点求系统电压稳定裕度时, 首先必须求得系统的电压稳定临界点。在实际中, 电网运行人员往往更关心在保持电压稳定性前提下系统所能承担的负荷大小。因此可采用系统最大负荷能力作为系统的电压稳定裕度。文献[2]指出, 当采用恒功率负荷模型时, 最大负荷功率值就等于雅可比矩阵奇异时的负荷功率极限值。可以认为电压稳定的临界点就对应于系统负荷到达最大值时的运行状态。仿真计算时, 按一定增长方式逐步增加系统负荷并计算相应的潮流方程雅可比矩阵, 通过判断其是否奇异判断系统是否到达电压稳定的临界点。

### 1.2 电压稳定弱母线识别

电压失稳通常从一条或几条母线开始并波及整个系统, 所以识别易于发生电压失稳的薄弱母线是很重要的。通常可用特征值分析法识别, 也可用节点电压对无功注入的一阶或二阶灵敏度识别<sup>[3]</sup>。

大型电力系统的数据量大、约束条件多,考虑到程序的运行效率和可靠性,本文充分利用 PSS/E 自身已具有的功能,应用一种改进的一阶灵敏度指标确定系统中电压稳定的灵敏母线。

母线电压幅值对母线无功功率的一阶灵敏度可表示为

$$S_{QU}^i = \frac{\partial U_i}{\partial Q_i} \frac{Q_i^{\text{base}}}{U_i^{\text{base}}} \quad (1)$$

式中  $Q_i^{\text{base}}$  和  $U_i^{\text{base}}$  分别为母线  $i$  的无功功率和电压基准值。

$S_{QU}^i$  的绝对值越大,表明随着无功负荷增长,系统越不能为该母线提供充足的无功功率支持,较之其他母线,该母线的电压下降速度会更快。因此应该选择在  $S_{QU}^i$  绝对值大的母线处安装无功补偿装置以提高系统的电压稳定性<sup>[4,5]</sup>。但如果该母线的负荷较轻,则在这些母线上安装无功补偿设备将不能有效降低线路上无功功率的传输,从而不能降低由于无功功率传输而造成的无功功率损耗<sup>[6]</sup>。为了给无功补偿装置的安装位置提供更合理的依据,本文采用改进的灵敏度指标。改进的方法是用母线无功功率负荷因子  $W_Q^i$  来平衡:

$$W_Q^i = Q_i / \sum_{k=1}^{N_L} Q_k \quad (2)$$

改进后的电压/无功一阶灵敏度指标为

$$W S_{QU}^i = W_Q^i \times S_{QU}^i = \frac{\partial U_i}{\partial Q_i} (Q_i / \sum_{k=1}^{N_L} Q_k) \frac{Q_i^{\text{base}}}{U_i^{\text{base}}} \quad (3)$$

式中  $N_L$  为负荷节点数; $Q_i^{\text{base}}$ 、 $U_i^{\text{base}}$  分别为基本运行点的无功负荷、节点电压;式中所有量均为标么值。

### 1.3 电压稳定弱支路识别

当系统中有设备故障停运时,可能会因为线路潮流的变化而使系统无功损耗增加,进而导致整个系统无功功率的缺失。考虑到电压和无功的强联系,无功缺失会引起系统电压的严重跌落,进而可能会导致整个系统的电压失去稳定<sup>[7]</sup>。因此可以通过系统在  $N-1$  下的总无功功率损耗大小判断系统的弱支路。若系统在切除一条支路后的无功功率损耗越大,则说明该支路对系统电压稳定性的影响越大。

## 2 PSS/E 的功能及分析电压稳定性的应用

PSS/E 是一种电力系统分析计算软件包,可用于进行包括潮流、故障分析,网络等值和动态仿真等计算。软件包还提供了二次开发的 Iplan 语言,可用于在 PSS/E 的标准计算程序不能满足要求时引入自己的子程序来解决特定问题和进行后续开发。

为完成前述的电压稳定性分析计算任务,可以利用 PSS/E 中的 FNSL, RANK, STRT, RUN, MSTR,

MRUN, ALTR 等功能模块。其中 FNSL 是潮流计算功能,它应用完全耦合牛顿-拉夫逊迭代法求解在给定运行工况下满足边界条件的潮流。FNSL 功能将一个加速因子应用到发电机母线的电压调节上,克服了当牛顿法遇到无功极限时可能引起的稳定问题。

当按照某种方式增加系统负荷时,每增加一次负荷,用 FNSL 功能计算一次系统潮流,并检查其返回值,当返回值是 5 时,说明系统潮流方程的雅可比矩阵奇异,系统达到电压稳定的临界点。这时的系统负荷就是系统为保证电压稳定性所能承受的最大负荷,由此也就得到了系统的电压稳定裕度。

选择不同的负荷增长方式,就会得到不同的电压稳定临界点。本文考虑两种负荷增长的方式:一为全网节点的有功功率和无功功率同比例增加;二为只有选择区域内节点的有功功率和无功功率增加。在方式二中,通过比较不同区域的最大负载能力,可以找到系统中影响电压稳定性的薄弱区域。

RANK 在 PSS/E 中具有预想事故排序功能,用来估算断开指定支路后不同标准下的预想事故严重性。RANK 功能提供了两套不同的排序标准。一是支路负荷的过载排序,另一个是节点电压的降低排序。为了找出影响系统电压稳定性的弱支路,可以选用节点电压标准。在电压排序中,性能指数  $PI$  定义如下:

$$PI = \sum_{i=1}^L X_i P_i^2 \quad (4)$$

式中  $X_i$  为支路  $i$  的电抗; $P_i$  为支路  $i$  的有功潮流; $L$  为参与计算无功损耗指标的支路集合。

STRT 是状态空间动态仿真初始化模块, RUN 是状态空间仿真模块, ALTR 是动态数据更改模块。当系统动态模型建好后,首先用 STRT 对动态模型初始化,使其与初始条件运行点一致,然后用 ALTR 对系统施加一扰动或开关操作,最后再用 RUN 对系统进行指定时间段的动态仿真。

MSTR 是延长时段动态仿真初始化模块, MRUN 具有延长时段动态仿真功能。MSTR, MRUN 和 ALTR 一起使用可以对系统进行从几秒到几分钟的仿真。它们与状态空间动态仿真 STRT 和 RUN 的区别主要在于:状态空间仿真中使用的是显式积分技术,而延长时段仿真中使用的是隐式积分算法。在多次迭代中使用显示积分技术会将浮点运算的舍入误差累积,最终可能导致仿真结果不准确。

## 3 应用 PSS/E 的流程图

利用 PSS/E 进行电力系统电压稳定性静态分析和动态仿真的流程分别如图 1 和图 2 所示。

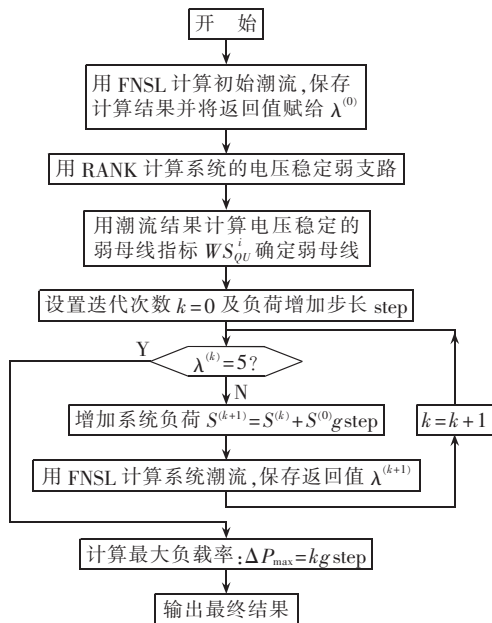


图 1 电压稳定静态分析流程

Fig.1 The flowchart of static voltage stability analysis

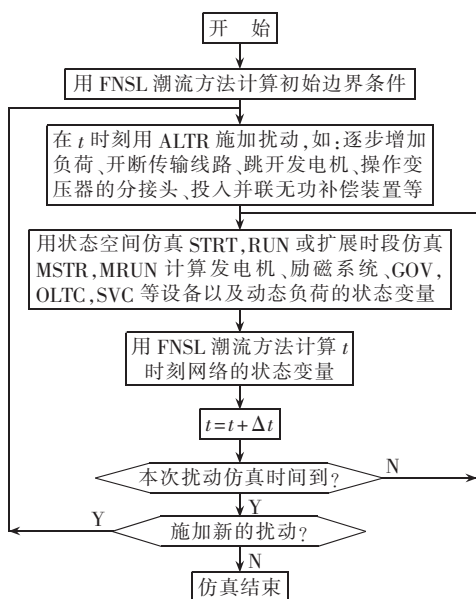


图 2 动态仿真流程

Fig.2 The flowchart of dynamic simulation

## 4 算例结果分析

以 PSS/E 软件应用到我国某区域大型电力系统电压稳定性的分析计算中为例。该系统共有 2 445 条母线, 1 110 条支路, 288 台发电机, 57 个区域。取 2003 年夏季高峰负荷为计算用负荷。因篇幅有限, 原始数据及系统图略。

在夏季高峰负荷情况下, 应用 PSS/E 中的 FNSL 功能计算该区域电力系统潮流, 仅经过 2 次迭代就收敛了, 表明系统电压稳定。

当全网同比例增加节点的有功和无功负荷时, 全网最大负载率仅能达到 1.2%, 并且有几个重负荷

区内的节点电压偏低。

为了找到该系统中电压稳定的弱区域, 对全网各个区域按前述的方式二增加负荷, 得到全网不同的最大负载率, 结果如表 1 所示(只列出排在前 10 位的区域信息)。

表 1 排序在前 10 位的电压稳定弱区域  
Tab.1 The first 10 weak voltage stability zones

区域号	有功缺额 /MV·A	无功缺额 /MV·A	稳定裕度 /%
580	-951.254	227.011	3.6
570	162.457	349.075	3.6
540	-73.889	-250.833	7.2
510	-1 203.773	-263.568	10.8
350	-1 712.864	199.694	12.6
310	-1 491.802	-261.462	12.6
340	-1 065.290	-129.164	12.6
100	-2 520.111	-490.411	14.4
200	-2 194.430	-362.006	14.4
610	650.347	-86.956	14.4

从表 1 中可以看出, 系统电压稳定的弱区域多是功率缺额大、负荷重的区域, 如 580, 540 和 510 等区域。但也不完全如此, 如表 1 中 570 号区域, 该区不存在功率缺额, 但其电压稳定裕度仍很低。这说明电压稳定性不仅与功率缺额有关, 还与电网的网架结构和线路的输送能力等因素有关。

影响该系统电压稳定性的薄弱节点以及弱支路分别列在表 2 和表 3 中(只列出排序在前 20 位的弱节点和弱支路)。

从表 2 中可以看出, 电压偏低的节点其电压对无功功率的灵敏度指标也较大(绝对值)。还可看出排在前面的电压稳定的弱节点多集中在表 1 中的弱区域。这也说明用不同方法求出的结果是一致的。

从表 3 中可以看出, 影响电压稳定性的弱支路多是那些弱区域内的线路或者是区内与区外之间的联络线。这些线路多是重载线路, 一旦这些线路故障或断开, 对系统的电压稳定性会产生很大的影响。

在动态仿真方面, 本文暂仅对单一扰动进行仿真。将系统扰动分为弱支路故障开断(包括线路和变压器)以及发电机故障开断。仿真时间定为 5~20 s。开断线路信息见表 4, 电压监视点信息见表 5。限于篇幅原因, 这里仅给出一种扰动(切除一条线路)下所选择的电压监视点的电压仿真曲线如图 3 所示。

根据图 3 以及 PSS/E 中的 PSSPLT 绘图分析可知: 电压在扰动之初即有大幅度的波动, 直到 8.4 s, 然后在 8.4~11.6 s 之间小幅度波动, 11.6 s 时开始快速下降, 接着持续振荡, 最后在 11.82 s 时网络潮流开始出现收敛困难。

通过对比各种扰动下的节点电压动态仿真结果表明, 580, 570 和 540 区域为电压稳定的薄弱区域。



表 2 排序在前 20 位的电压稳定弱节点

Tab.2 The first 20 weak voltage stability buses

母线号	电压等级/kV	$WS_{Qu}$	区域号	电压幅值/p.u.
57215	37	-0.015 627 8	570	0.953 926
58255	37	-0.014 251 7	580	1.022 297
58215	37	-0.013 777 3	580	1.009 665
58256	230	-0.013 702 2	580	1.009 944
58254	115	-0.013 420 4	580	1.009 665
57214	115	-0.013 409 3	570	1.009 944
58246	230	-0.013 209 3	580	0.956 369
57217	230	-0.013 009 5	570	1.024 158
57216	230	-0.013 009 5	570	1.012 261
58585	37	-0.012 816 2	580	1.012 231
58216	230	-0.012 796 6	580	1.012 261
58245	37	-0.012 654 8	580	1.012 231
58284	115	-0.012 586 9	580	0.956 275
58286	230	-0.012 543 9	580	0.956 275
58287	230	-0.012 543 9	580	0.956 275
58247	230	-0.012 532 0	580	0.956 275
58244	115	-0.012 379 7	580	0.956 029
58217	36	-0.012 188 1	580	0.956 029
58214	115	-0.012 185 3	580	1.081 225
58231	230	-0.012 133 6	580	1.036 955

表 3 排序在前 20 位的电压稳定弱支路

Tab.3 The first 20 weak voltage stability lines

首端母线号	所在区域	受端母线号	所在区域	支路号
90150	900	90210	900	1
90150	900	90210	900	2
50231	540	50251	580	1
50251	580	50264	580	1
50261	580	50264	580	1
50009	520	50271	520	1
90100	900	90150	900	1
90100	900	90150	900	2
90100	900	90150	900	3
30400	340	40350	470	1
40400	440	40500	430	1
70000	700	70500	700	1
40400	440	90200	900	1
40400	440	90200	900	2
50201	530	50271	520	1
30300	310	80500	800	2
40500	430	40600	480	1
70500	700	80500	800	1
53235	330	40350	470	1
50218	700	80500	800	2

表 4 开断的线路

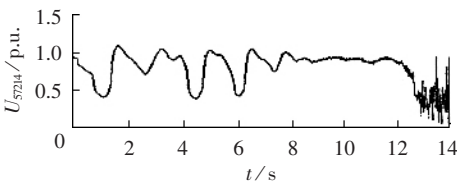
Tab.4 The breaking line

首端母线	母线名称	区域	受端母线	母线名称	区域	回路号	稳定裕度/%
50231	ZSHL_525	540	50251	ZOHB_525	580	1	0.0

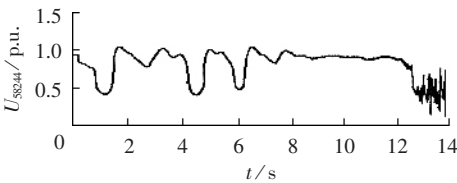
表 5 电压监视点

Tab.5 The supervisory point

母线编号	母线名称	地区名称	临界点电压/p.u.	$S_{Qu}$	$WS_{Qu}$
57214	ZLM_115	570	0.820 976	-35.016 95	-0.149 933 0
58244	ZCHX_115	580	0.910 874	-23.431 06	-0.091 204 2



(a) 母线 57214 电压



(b) 母线 58244 电压

图 3 电压仿真曲线

Fig.3 The simulated voltage curves

系统受到扰动以后,这些地区的电压波动最大,特别是在扰动之初就出现比较大的电压变化。而这一结论与前面表 1 中用静态方法研究的结果相吻合。

### 5 结语

通过研究以及对实际电力系统的分析计算表明,采用本文所提出的分析方法,能充分利用 PSS/E 软件功能对电力系统进行电压稳定性研究。由 PSS/E

的潮流计算模块可以很方便地得出系统在某种运行状态下能否保持电压稳定以及与电压稳定临界点的距离。将潮流计算模块和预想事故排序模块结合起来则可以找出系统中电压稳定的薄弱母线、支路和区域。通过 PSS/E 的状态空间仿真和扩展时段仿真模块,可以对系统内各区域电网以及区际联络线进行切除线路的动态仿真,通过比较各种扰动情况下的电压变化曲线,同样也可以找出系统电压稳定的弱节点、弱支路和弱区域。

### 参考文献:

[1] 周双喜,朱凌志,郭锡玖,等. 电力系统电压稳定性及其控制[M]. 北京:中国电力出版社,2004.  
 [2] AJJARAPU V,BATTULA S. Effect of load modeling on steady state voltage stability electric machines and power systems[J]. **Transactions on Power Systems**,1995,23(5): 43-49.  
 [3] 段献忠,何仰赞,陈德树. 论电力系统电压稳定几种实用判据和安全指标[J]. 电力系统自动化,1994,18(9):36-41.

DUAN Xian-zhong, HE Yang-zan, CHEN De-shu. On some

(下转第 65 页 continued on page 65)

(上接第 37 页 continued from page 37)

- practical criteria and security indices for voltage stability in electric power system [J]. **Automation of Electric Power Systems**, 1994, 18(9):36-41.
- [4] 段献忠,袁 骏,何仰赞. 电力系统电压稳定灵敏度分析方法[J]. 电力系统自动化, 1997, 21(4):9-12.
- DUAN Xian-zhong, YUAN Jun, HE Yang-zan. Sensitivity analysis method of voltage stability in power systems[J]. **Automation of Electric Power Systems**, 1997, 21(4):9-12.
- [5] 袁 骏,段献忠,何仰赞,等. 电力系统电压稳定灵敏度分析方法综述[J]. 电网技术, 1997, 21(9):7-10.
- YUAN Jun, DUAN Xian-zhong, HE Yang-zan, et al. Summarization of the sensitivity analysis method of voltage stability in power systems[J]. **Power System Technolo-**

y, 1997, 21(9):7-10.

- [6] TAYLOR C W. 电力系统电压稳定[M]. 王伟胜译. 北京:中国电力出版社, 2002.
- [7] KUNDUR P. 电力系统稳定与控制[M]. 周孝信, 宋永华, 李兴源, 等译. 北京:中国电力出版社, 2002.

(责任编辑:李育燕)

---

作者简介:

段建民(1978-),女,安徽马鞍山人,硕士研究生,研究方向为电力系统电压稳定性分析;

张 焰(1958-),女,安徽合肥人,教授,博士研究生导师,主要从事电力系统分析、电力系统规划和可靠性等领域的科研与教学工作;

范习辉(1976-),男,河南信阳人,博士后,研究方向为电力系统分析和电力市场。

## Power system voltage stability analysis based on PSS/E

DUAN Jian-min<sup>1</sup>, ZHANG Yan<sup>1</sup>, FAN Xi-hui<sup>1</sup>,

ZHOU Jian<sup>2</sup>, CAO Lu<sup>2</sup>, JIANG Yi-jing<sup>2</sup>

(1. Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China; 2. East China Electric Power Group Corporation, Shanghai 200025, China)

**Abstract:** A method of using PSS/E's power flow and dynamic simulation modules to analyze power system voltage stability is presented. The power flow calculation module is used to estimate the power system voltage stability, to calculate the stability margin and to find out the weak voltage stability buses, lines and zones. The state-space simulation module and the extended term simulation module are applied in power system voltage stability dynamic simulation to find out the key factors affecting voltage stability. Calculation of a large power system shows the application of PSS/E in power system voltage stability analysis.

**Key words:** voltage stability; PSS/E software; simulation