

基于 PSASP 的廊坊电网静态电压稳定性分析

张建华, 张国华, 杨京燕

(电力系统保护与动态安全监控教育部重点实验室(华北电力大学), 北京 102206)

摘要: 廊坊电网位于华北电网的京津唐地区, 是典型的负荷中心, 随着负荷和系统规模的增加, 电压稳定问题逐渐严重, 因此对廊坊电网进行电压稳定性分析具有重大的现实意义。首先介绍了电力系统综合分析程序 PSASP 电压稳定分析模块的算法原理; 然后基于 PSASP 对廊坊电网进行了静态电压稳定性分析, 指出了廊坊电网中的薄弱母线、薄弱区域; 计算了廊坊电网主要输电线路的静稳极限; 对计算结果进行了分析, 得出一些有意义的结论。计算结果为廊坊电网的运行和调度、对系统的电压稳定性监控提供了依据。

关键词: PSASP; 静态电压稳定性; 模态分析; 薄弱区域; 裕度

An analysis of static voltage stability for Langfang power system based on PSASP

ZHANG Jian-hua, ZHANG Guo-hua, YANG Jing-yan

(Key Laboratory of Power System Protection and Dynamic Security Monitoring and Control under Ministry of Education, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: Langfang power grid is a typical load center, lying in the district of Beijing-Tianjing-Tangshan in North China power grid. With the increase of loads and components in Langfang power system, voltage problem become more and more serious. So it is very significant to carry out an analysis of voltage stability for Langfang power system. Firstly, the principle of modal analysis algorithm used in PSASP is introduced. Secondly, an analysis of static voltage stability for Langfang power system based on PSASP is carried out. Thirdly, weak buses and areas in Langfang power system are indicated, static stability limits of the main transmission lines in the power grid are also calculated. Finally, some useful conclusions are drawn through analysis on the results. Some significant suggestions can be offered for the system operation and dispatching, as well as the monitoring and control of the voltage stability.

This project is supported by National Natural Science Foundation of China(No.50877026).

Key words: PSASP; static voltage stability; modal analysis; weak area; margin

中图分类号: TM712 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)05-0065-06

0 引言

近年来, 国内外电力系统多次发生电压崩溃事故^[1-7], 使得电压稳定问题的研究在世界范围内引起广泛的关注^[8-17]。电力系统电压稳定性分析要解决以下问题^[15]: 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。

电压稳定性是电力系统稳定性的一个分支。电压稳定性, 有的文献又称负荷稳定性。到目前为止,

在电压稳定性尤其是在静态电压稳定性分析研究方面, 虽然取得了很大的进展, 但与功角稳定研究相比, 关于电压稳定的理论体系, 特别是在动态机理方面, 还没有完全建立。所以目前在实际电网电压稳定分析中, 应用较多的还是静态分析方法^[18]。

电力系统分析综合程序 PSASP (Power System Analysis Software Package) 是中国电力科学研究院自主研发的一套功能强大、使用方便的电力系统分析大型软件包, 在最新的版本中, 增加了电压稳定性分析模块^[19]。本文基于 PSASP, 对廊坊电网进行了静态电压稳定性分析; 指出了系统中的薄弱节点、薄弱区域; 计算了廊坊电网主要输电线路的静态传输极限。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50877026)

1 基于 PSASP 的静态电压稳定分析的数学原理

1.1 潮流方程雅可比矩阵的特征结构分析

设潮流方程功率式的修正方程^[19]为:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = J_s \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中: J_s 为常规潮流雅可比矩阵, $\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix}$ 为功率不

平衡向量, $\begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix}$ 为电压不平衡向量。若令 $\Delta P = 0$, 则可得系统负荷无功功率与节点电压的增量关系为:

$$\Delta Q = (L - JM^{-1}N)\Delta V = J_R \Delta V \quad (2)$$

系统的电压稳定性可由计算 J_R 的特征值与特征向量判定。这就是模态分析法判别电压稳定性的基本原理。对 J_R 进行特征值分解可得:

$$J_R = \eta^{-1} \Lambda \eta \quad (3)$$

令 $\xi = \eta^{-1}$, 则有

$$J_R = \xi \Lambda \eta \quad (4)$$

其中: $\Lambda = \text{diag}\{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n\}$, $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ 为 J_R 的特征值; η 为 J_R 的左特征向量; ξ 为 J_R 的右特征向量。将式(4)代入式(2)可得:

$$\Delta V = \xi \Lambda^{-1} \eta \Delta Q \quad (5)$$

$$\text{或 } \Delta V = \sum_i \frac{\xi_i \eta_i}{\lambda_i} \Delta Q \quad (6)$$

其中: η_i 为左特征向量阵 η 的第 i 行; ξ_i 为右特征向量 ξ 的第 i 列。由式(5)得出:

$$\eta \Delta V = \Lambda^{-1} \eta \Delta Q \quad (7)$$

令 $\eta \Delta V = \Delta v$, $\eta \Delta Q = \Delta q$, 则有:

$$\Delta v = \Lambda^{-1} \Delta q \quad (8)$$

式中 Δv , Δq 分别为模态电压 v 和模态无功 q 变化量。由式(8), 对第 i 个模式有:

$$\lambda_i \Delta v_i = \Delta q_i \quad (9)$$

这里 λ_i 可以认为是第 i 个模态无功对模态电压的灵敏度。当 λ_i 很小或接近于零, 表明模态无功的微小变化会导致模态电压的急剧变化, 也就是系统接近于不稳定。因而, 可以认为电压崩溃实际上对应于模态电压崩溃。

1.2 薄弱节点和薄弱区域的确定

由式(6)可得负荷母线 k 的 $V-Q$ 灵敏度近似为:

$$\frac{\partial V_k}{\partial Q_k} = \sum_i \frac{\xi_{ki} \eta_{ik}}{\lambda_i} \quad (10)$$

由式(10)可见, $V-Q$ 灵敏度并不取决于单个电压崩溃模式, 而是 $V-Q$ 变化的所有模式的联合效应。联系到系统薄弱节点、薄弱区域的判别问题, 引入“母线参与因子”:

$$p_{ki} = \xi_{ki} \eta_{ik} \quad (11)$$

这里 p_{ki} 决定了 λ_i 在母线 k 对 $V-Q$ 灵敏度的影响。由于 J_R 近似为一个实对称阵, 故其特征值基本为实数。因此, 判定系统薄弱节点的问题就是寻找 J_R 的最小模特征值(主导特征值)以及与此最小模特征值相关的各节点参与因子的最大者。

需要进一步说明的是, 由于电压崩溃对应于模态电压崩溃, 故可根据电压稳定极限点处与 J_R 的主导特征值相关的各节点参与因子来初步判别系统的失稳方式: 如果在电压稳定极限点处模态分析结果得出的薄弱区域为一负荷区域, 则可判定此时系统将发生单调电压失稳; 如果在电压稳定极限点处模态分析结果得出的薄弱节点为一发电机节点, 则应特别注意系统发生单调角失稳的情况, 此时可在电压稳定极限点进一步用基于系统状态方程的严格的小干扰特征值分析方法判别系统的失稳方式。

2 实例计算分析

2.1 廊坊电网概况

廊坊电网位于京津唐负荷中心, 随着电网规模的增加, 负荷急剧增长, 电压稳定问题凸显严重, 因此对廊坊电网进行静态电压稳定分析是调度运行人员十分关心的问题^[20]。截至 2007 年夏季, 廊坊电网共有 10 个 220 kV 变电站, 夏季正常方式下最大负荷水平为 1800 MW + j289 MVar。廊坊电网在结构上分为南北两部分, 北部电网以三河电厂为电源支撑, 规模很小; 南部电网以安定和霸州两个 500 kV 变电站为电源支撑点, 共有 7 个 220 kV 变电站, 是典型的负荷中心^[20]。本文主要以廊坊南部电网为例, 进行电压稳定性分析。为了表述方便, 在后面的分析说明中, 都用“廊坊电网”特指廊坊南部电网。

2.2 负荷模型和发电机出力方式的确定

在进行电压稳定性计算时, 负荷模型采用 40% 恒阻抗+60%恒功率的静态负荷模型, 不考虑负荷的频率特性^[21]。负荷增长方式^[22]为: 全系统各负荷保持当前状态时的功率因数和比例不变, 同步增长至

电压稳定极限点; 发电机出力按照当前状态的比例不变, 同步增长; 在迭代过程中, 若发电机无功出力越界, 则将 PV 节点转化为 PQ 节点。

2.3 电网薄弱母线和薄弱区域的确定

PSASP 采用模态分析方法来判断系统的薄弱节点和薄弱区域。分别在初始稳态运行点和电压稳定极限点进行模态分析, 求出各节点对主导电压失稳模式的参与因子, 根据参与因子的大小可确定系统的薄弱节点和薄弱区域。参与因子越大则表明该节点的功率变化对电压稳定性影响越大, 也就说明

此节点越薄弱。表 1 列出了初始和极限运行状态下节点参与因子的计算结果。其中“牛驼 11”表示牛驼变电站的母线, 第一个“1”表示母线的电压等级为 110 kV, 如果为“2”则表示母线的电压等级为 220 kV; 第二个“1”表示母线编号, 其他母线名称表示方法与此类似。图 1 标出了两种方式下确定的薄弱区域, 其中虚线内的节点表示初始运行状态下的薄弱母线, 实线内的节点表示极限运行状态下的薄弱母线, 由这些节点分别连接形成的区域即为薄弱区域。

表 1 廊坊电网母线参与因子计算结果

Tab.1 Results of buses' participating for Langfang power system

基态参与因子($P_{ki} \times 10^{-3}$)				电压稳定极限点时参与因子($P_{ki} \times 10^{-3}$)			
母线名称	P_{ki}	母线名称	P_{ki}	母线名称	P_{ki}	母线名称	P_{ki}
牛驼 11	0.591	新镇 11	0.306	胜芳 12	0.454	王文 11	0.313
新钢 11	0.547	龙河 22	0.276	清河 11	0.454	广安 11	0.311
毕家坊 12	0.539	广安 21	0.266	前进 11	0.452	大城 11	0.311
后奕 11	0.536	策城 21	0.248	辛章 11	0.451	大城 12	0.311
胜芳 11	0.528	大屯 21	0.247	东段 11	0.451	大尚屯 11	0.308
新利 12	0.527	新镇 21	0.241	策城 11	0.449	留各庄 11	0.306
新利 11	0.526	牛驼 12	0.125	策城 12	0.449	大屯 21	0.237
许庄 11	0.518	固安 11	0.122	胜宝 11	0.441	龙河 22	0.235
辛店 11	0.516	刘家园 11	0.117	码头 12	0.437	大屯 11	0.214
大尚屯 12	0.507	王希 11	0.116	新利 11	0.371	梨园 11	0.214
康仙 11	0.496	后奕 12	0.110	新利 12	0.370	梨园 12	0.214
康仙 12	0.496	王希 12	0.110	胜芳 11	0.370	薛营 12	0.214
清河 12	0.493	永清 12	0.109	辛店 11	0.369	薛营 11	0.214
毕家坊 11	0.476	码头 11	0.103	许庄 11	0.367	新源 11	0.214
码头 12	0.471	永清 11	0.103	康仙 11	0.365	廊坊 11	0.214
清河 11	0.470	廊坊 12	0.084	康仙 12	0.365	万庄 12	0.210
胜宝 11	0.467	化营 11	0.084	新钢 11	0.364	路南 11	0.206
王文 12	0.467	万庄 11	0.083	策城 21	0.363	新源 12	0.205
王文 11	0.467	董站 12	0.083	毕家坊 12	0.362	龙河 11	0.187
胜芳 12	0.459	龙河 11	0.082	牛驼 11	0.360	龙河 12	0.187
文安 11	0.457	龙河 12	0.082	后奕 11	0.358	董站 11	0.186
文安 12	0.457	董站 11	0.082	康仙 21	0.349	路南 12	0.186
大尚屯 11	0.456	路南 12	0.082	新镇 21	0.341	董站 12	0.186
留各庄 11	0.455	路南 11	0.044	张庄 21	0.340	廊坊 12	0.186
澎尔湾 12	0.454	新源 12	0.043	广安 21	0.338	万庄 11	0.185
张庄 11	0.452	廊坊 11	0.041	澎尔湾 11	0.334	化营 11	0.185
东段 11	0.449	万庄 12	0.041	清河 12	0.333	永清 11	0.176
辛章 11	0.448	大屯 11	0.040	大尚屯 12	0.332	永清 12	0.167
大城 11	0.448	梨园 11	0.040	张庄 11	0.331	码头 11	0.166
大城 12	0.448	梨园 12	0.040	文安 11	0.331	后奕 12	0.165
前进 11	0.446	薛营 12	0.040	文安 12	0.331	王希 12	0.165
策城 11	0.443	薛营 11	0.040	澎尔湾 12	0.330	刘家园 11	0.160
策城 12	0.443	新源 11	0.040	新镇 11	0.329	固安 11	0.160
广安 11	0.441	张庄 21	0.029	毕家坊 11	0.329	牛驼 12	0.158
澎尔湾 11	0.330	康仙 21	0.026	三村 11	0.322	王希 11	0.141
三村 11	0.317			王文 12	0.313		

从表 1 和图 1 中可以得出如下结论:

(1) 初始运行状态下, 电网最薄弱的母线是牛驼 11, 最薄弱区域是由牛驼 11、后奕、新利 12、胜芳 11、毕家坊 12、新钢 11、康仙 11、康仙 12、辛店 11、许庄 11 这些母线确定的区域(如图 1 中虚线内的区域); 电压稳定极限点时, 最薄弱的节点是胜芳 12, 最薄弱的区域是由码头 12、胜宝 11、胜芳 11、胜芳 12、东段 11、策城 11、策城 12、辛章 11、前进 11、清河 11 这些母线确定的区域(如

图 1 中实线内的区域)。从实际系统的运行来看, 这些薄弱区域内母线所带的负荷都比较重, 低电压现象比较严重。

(2) 随负荷增加过程中, 电网的最薄弱母线和最薄弱区域发生了改变, 则说明电网的薄弱母线可能随负荷的变化而发生转移。系统运行人员不仅仅要监控当前运行状态下的薄弱母线, 更要监控薄弱母线的转移情况。

(3) 从表 1 中可以看出, 同一变电站内两条

母线的电压稳定性可能不同，例如初始运行状态下的胜芳 11 和胜芳 12 排序差距较大，这是因为在变电站内这两条母线都是单母运行，只在事故或者检修的方式下才会合母运行，两条母线所带负荷和网络结构不同，因此电压稳定性也不同。这也说明，运行方式对母线电压稳定性的薄弱程度影响很大。

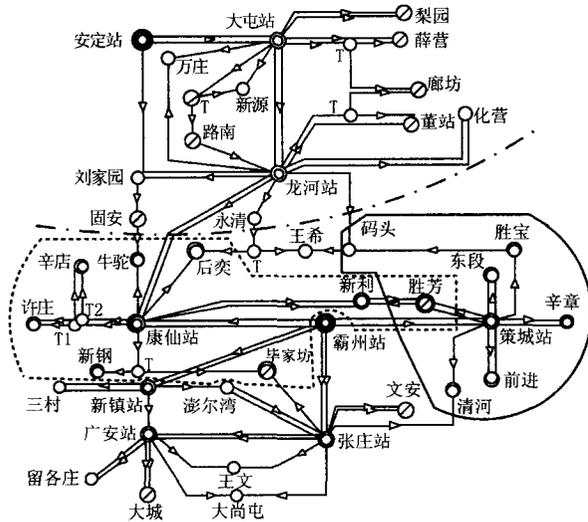


图 1 廊坊电网薄弱母线和区域的确定

Fig.1 Determination of weak buses and areas for Langfang power system

(4) 从表 1 中可以看出，廊坊电网主网中初始和极限运行状态下最薄弱的节点都是 110 kV 的母线，而 220 kV 的母线排序都比较靠后。这就说明电网一旦失稳，最先崩溃的节点同其所在的电压等级没有关系，电网可能从低电压等级的母线最先开始电压失稳。

(5) 从表 1 中可以看出，初始和极限两种状态下图 1 中点划线以上母线的参与因子都比较小，相对来说母线承受扰动的能力比较强，不容易发生电压失稳。结合实际电网，点划线以上的母线所带负荷都较轻，网络结构稀疏，而且有安定 500 kV 变电站的电源支撑，无功电压情况良好。

(6) 以初始运行状态为例，牛驼 11 母线所带负荷为 19.7 MW，清河 11 母线所带负荷为 32.4 MW，但是牛驼 11 比清河 11 更薄弱，这说明，母线电压稳定的薄弱性不仅仅同所带负荷大小有关，还同网络结构有关系。

(7) 从表 1 和图 1 中还可以看出，在初始运行状态时，电压稳定性最薄弱的节点分布比较零散；而在电压稳定极限点时，最薄弱的节点分布比较集中。这说明，在电压稳定极限点时，一旦薄弱节点电压失稳，其他相邻节点也可能相继失稳，造成更

严重的连锁失稳现象。这也符合实际运行系统中，连锁故障大都发生在负荷比较重的区域。

2.4 主要输电线路极限传输功率的计算

霸州和安定两个 500 kV 变电站是廊坊电网的电源点，通过 220 kV 线路向廊坊电网输送功率。因此，各 220 kV 线路的极限传输功率是运行人员关心的问题。设线路基态传输功率为 P_0 ，电压稳定极限点时传输功率为 P_{max} ，定义线路的传输裕度为 K_P ，则有：

$$K_P = P_{max} - P_0 \quad (12)$$

基于电力系统综合分析程序 PSASP，本文计算了廊坊电网各 220 kV 线路的功率传输极限，如表 2 所示。图 2 为裕度最大的线路“安定 21—大屯 21”的 PV 曲线图。图 3 为裕度最小的线路“张庄 21—广安 21”的 PV 曲线图。

表 2 线路传输极限计算结果

Tab.1 Results of transmission line limits

线路名称	P_0 /MW	P_{max} /MW	K_P /MW
安定 21—大屯 21	151	201	51
大屯 21—龙河 22	110	149	38
霸州 21—策城 21	184	215	30
霸州 21—康仙 21	148	175	27
霸州 21—张庄 21	92	111	18
霸州 21—新镇 21	64	77	14
新镇 21—广安 21	43	51	8
张庄 21—广安 21	29	36	7

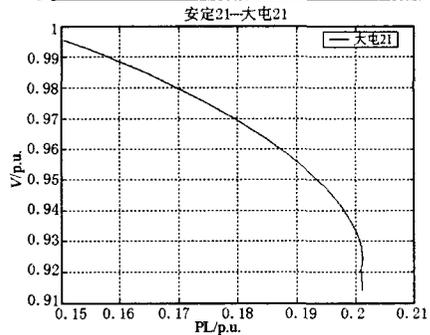


图 2 线路“安定 21—大屯 21” PV 曲线图

Fig.2 PV curve of the line Anding21-Datun21'

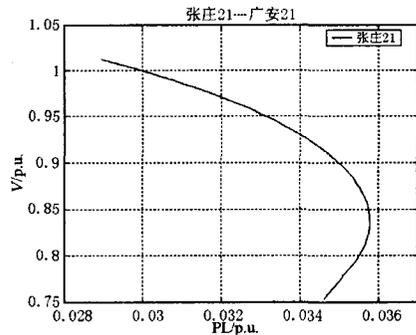


图 3 线路“张庄 21—广安 21” PV 曲线图

Fig.3 PV curve of the line Zhangzhuang21-Guangan21'

由表 2、图 2、图 3 可以得出如下结论:

(1) 线路“安定 21—大屯 21”、“大屯 21—龙河 22”的传输裕度较大,而其他线路的裕度较小;结合图 1 从地理位置上来看,这两条线路都位于廊坊电网的北部,而北部(图 1 点划线上部)是电压稳定性的坚强区域。因此,尽管这两条线路的初始传输功率也很大,分别为 150 MW 和 110 MW,但是所处区域中电压稳定性较为坚强,因此裕度也比较大。

(2) 廊坊电网南部的(图 1 点划线下部)线路裕度都比较小,这些线路所处区域是廊坊电网电压稳定性薄弱区域。霸州站作为廊坊电网南部的电源点,充当着南部地区供电枢纽的作用,它所连线路较多,初始状态时线路传输潮流就很大;在负荷急剧增加的过程中,霸州站不能够提供足够的无功功率,区域内母线容易发生电压失稳,因此线路的传输裕度也较小。

(3) 比较图 2 和图 3 可以看出,线路“安定 21—大屯 21”的传输裕度远大于线路“张庄 21—广安 21”,但是在电压稳定极限点,母线“张庄 21”的电压最低可以降到大约 0.75,而母线“大屯 21”的电压只能降到大约 0.91。因此,即使是裕度较大的线路,运行人员也应该注意监控两端母线的电压波动情况。

3 总结

通过对廊坊电网的电压稳定性分析,可以得出如下有意义的结论:

(1) 廊坊电网北部地区的电压稳定性好于南部地区。母线的电压稳定性不仅同所带负荷轻重有关系,而且同母线在网络中的位置、电网的运行方式有关。

(2) 在负荷增加的过程中,电压稳定的薄弱区域有可能发生转移,运行人员不仅要监控当前运行状态下最薄弱的母线,更要注意电压稳定极限点时最薄弱母线的运行状态。

(3) 线路的功率传输裕度较大,但有可能线路两端母线的电压波动范围较小,运行人员也应该密切监控这些线路或母线的运行情况。

(4) 电力系统综合分析程序 PSASP 的分析计算结果与电网运行实际相吻合,为电网规划和安全稳定运行提供了依据。

参考文献

[1] 唐斯庆,张弥,李建设,等.海南电网 9·26 大面积停电事故的分析与总结[J].电力系统自动化,2006,

30(1): 1-7,16.

TANG Si-qing, ZHANG Mi, LI Jian-she, et al. Review of Blackout in Hainan on September 26: Causes and Recommendations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30 (1): 1-7, 16.

[2] 傅书遒. IEEE PES 2004 会议电网安全问题综述及防止大面积停电事故建议[J]. 电力系统自动化, 2005, 29 (8): 1-4.

FU Shu-ti. Summary on Power System Security Problems on 2004 IEEE PES Meeting and Recommendation for Developing Defense Measures[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(8): 1-4.

[3] 薛禹胜. 时空协调的大停电防御框架: (一) 从孤立防线到综合防御[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(1): 8-16. XUE Yu-sheng. Space-time Cooperative Framework for Defending Blackouts: Part one from Isolated Defense Lines to Coordinated Defending[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(1): 8-6.

[4] 印永华,郭剑波,赵建军,等.美加“8·14”大停电事故初步分析及应吸取的教训[J]. 电网技术, 2003, 27(10): 8-12.

YIN Yong-hua, GUO Jian-bo, ZHAO Jian-jun, et al. Preliminary Analysis of Large Scale Blackout in Interconnected North America Power Grid on August 14 and Lessons to Be Drawn[J]. Power System Technology, 2003, 27(10): 8-12.

[5] 唐葆生. 伦敦南部地区大停电及其教训[J]. 电网技术, 2003, 27(11): 1-6.

TANG Bao-sheng. Blackout in South of London and Its Lessons[J]. Power System Technology, 2003, 27(11): 1-6.

[6] 何大愚. 一年以后对美加“8.14”大停电事故的反思[J]. 电网技术, 2004, 28(21): 1-5.

HE Da-yu. Rethinking Over ‘8.14’ US-canada Blackout After One Year [J]. Power System Technology, 2004, 28(21): 1-5.

[7] 刘永奇,谢开. 从调度角度分析 8.14 美加大停电[J]. 电网技术, 2004, 28(8): 10-15, 45.

LIU Yong-qi, XIE Kai. Analysis on Blackout of Interconnected North America Power Grid Occurred on Aug.14, 2003 from the Viewpoint of Power System Dispatching[J]. Power System Technology, 28(8): 10-15, 45.

[8] 陈为化,江全元,曹一家,等. 电力系统电压崩溃的风险评估[J]. 电网技术, 2005, 29(19): 6-11.

CHEN Wei-hua, JIANG Quan-yuan, CAO Yi-jia, et al. Risk Assessment of Voltage Collapse in Power System[J]. Power System Technology, 2005, 29(19): 6-11.

[9] 戴剑锋,王海超,周双喜,等. 基于负荷裕度随机特性的电压失稳概率问题研究[J]. 中国电机工程学报,

- 2006, 26(13): 26-30.
DAI Jian-feng, WANG Hai-chao, ZHOU Shuang-xi, et al. A Study on Probability of Voltage Instability Based on the Stochastic Characteristic of Load Margin Index[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(13): 26-30.
- [10] 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.
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): 1-5.
- [11] 潘雄, 徐国禹. 基于最优潮流并计及静态电压稳定性约束的区域间可用输电能力计算[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(12): 86-91.
PAN Xiong, XU Guo-yu. OPF Based ATC Calculation with Static Voltage Stability Constraints[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(12): 86-91.
- [12] 赵晋泉, 江晓东, 张伯明. 一种在线电力系统静态稳定增强控制算法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(8): 7-12.
ZHAO Jin-quan, JIANG Xiao-dong, ZHANG Bo-ming. An On-line Enhancement Control Algorithm for Static Stability in Power System[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(8): 7-12.
- [13] 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): 50-55.
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): 50-55.
- [14] 郭瑞鹏, 韩祯祥. 电压崩溃临界点计算的改进零特征根法[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(5): 63-66.
GUO Rui-peng, HAN Zhen-xiang. An Improved Zeor Eigen Value Method for Point of Collapse[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(5): 63-66
- [15] 冯志鸿, 周双喜. 大规模电力系统失稳区的确定方法[J]. 中国电机工程学报, 1997, 17(3): 152-156.
FENG Zhi-hong, ZHOU Shuang-xi. Determination of Voltag Collapse Areas in Large Scale Power System[J]. Proceedings of the CSEE, 1997, 17(3): 152-156.
- [16] Canizares C A, Mithulananthan N, Berizzi A, et al. On the Linear Profile of Indices for the Prediction of Saddle-node and Limit-included Bifurcation Points in Power Systems[J]. IEEE Trans on Circuits and System-I: Fundamental Theory and Applications, 2003, 50(12): 1588-1595.
- [17] Flueck A J, Dondeti J R. A New Continuation Power Flow Tool for Investigating the Nonlinear Effects of Transmission Branch Parameter Variations[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2000, 15(1): 223-227.
- [18] 李钦, 孙宏斌, 赵晋泉, 等. 静态电压稳定分析模块在江苏电网的在线应用[J]. 电网技术, 2006, 30(6): 11-17.
LI Qin, SUN Hong-bin, ZHAO Jin-quan, et al. On-line Application of Static Voltage Stability Analysis Module in Jiangsu Power System[J]. Power System Technology, 2006, 30(6): 11-17.
- [19] PSASP电压稳定用户手册[Z]. 北京: 中国电力科学研究院, 2005.
- [20] 廊坊供电公司调度所. 2007年度廊坊电网运行方式分析报告[Z]. 2006.
- [21] 张东霞, 汤涌, 张红斌, 等. 负荷模型应用和研究调查报告[R]. 北京: 中国电力科学研究院, 2004.
- [22] 周双喜, 朱凌志, 郭锡玖, 等. 电力系统电压稳定性与控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.

收稿日期: 2008-09-18; 修回日期: 2008-10-09

作者简介:

张建华(1952-), 男, 教授, 博士生导师, 输配电系统研究所所长, 主要研究方向为电力系统安全和可靠性分析;
张国华(1979-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为电力系统安全和可靠性分析. E-mail:tigerzhang2000@126.com

(上接第 55 页 continued from page 55)

- [6] 王伟, 周林, 徐明. 有源电力滤波器控制方法综述[J]. 继电器, 2006, 30(2):81-85.
WANG Wei, ZHOU Lin, XU Ming. Control Methods of Active Power Filter[J]. Relay, 2006, 30(2):81-85.
- [7] 钟金亮. 有源电力滤波器的变结构控制策略研究[D]. 杭州: 浙江大学, 1998.
- [8] 戴先中. 多变量非线性系统的神经网络逆系统控制方法[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [9] 高为炳. 变结构控制的理论及设计方法[M].北京: 科学出版社, 1996.

收稿日期: 2008-04-23; 修回日期: 2008-06-05

作者简介:

黄崇鑫(1983-), 男, 硕士研究生, 研究方向为现代电力电子技术电力系统中的应用; E-mail:huangchongxin128@126.com

王奔(1960-), 男, 教授, 研究方向为电力系统非线性和变结构控制;

邹超(1983-), 男, 硕士研究生, 研究方向为新型直流输电以及电力系统稳定。