

# 天津电网电压稳定研究

刘丽霞<sup>1</sup>, 黄志刚<sup>2</sup>, 李娟<sup>1</sup>, 龚成虎<sup>2</sup>, 李晓辉<sup>1</sup>, 刘树勇<sup>1</sup>

(1. 天津市电力公司技术中心, 天津 300384; 2. 天津市电力公司电力调度通信中心, 天津 300010)

**摘要:** 采用中国电科院开发的 PSD-VSAP 软件程序及 BPA 潮流稳定程序, 对 2009 年天津电网典型方式下的静态电压稳定性和暂态电压稳定性进行了深入研究, 对影响电压稳定性的几个因素包括地区无功补偿变化、运行方式变化、网络结构变化等进行了敏感性分析。结果表明天津电网 2009 年典型运行方式电压稳定性较好, 并指出了电压稳定相对薄弱区域。针对地区无功补偿变化、运行方式变化以及网络结构变化对天津电网电压稳定性的影响, 提出了建议。

**关键词:** 天津电网; 静态电压稳定; 暂态电压稳定; 无功补偿; 运行方式; 网络结构

## Research on voltage stability of Tianjin power grid

LIU Li-xia<sup>1</sup>, HUANG Zhi-gang<sup>2</sup>, LI Juan<sup>1</sup>, GONG Cheng-hu<sup>2</sup>, LI Xiao-hui<sup>1</sup>, LIU Shu-yong<sup>1</sup>

(1. Technology Center, Tianjin Electric Power Corporation, Tianjin 300384, China;

2. Dispatching & Communication Center, Tianjin Electric Power Company, Tianjin 300010, China)

**Abstract:** With the PSD-VSAP program and BPA program, static and transient voltage stability under the typical operation mode of Tianjin power grid in 2009 is analyzed in detail. And the sensitivity analysis for the influence of reactive power compensation, operation mode and power grid on voltage stability is carried out. The result indicates that in 2009 Tianjin power grid typical operation mode has a good voltage stability, and weak parts about voltage stability are showed. Finally, some suggestions of voltage stability problems under these effect factors are presented.

**Key words:** Tianjin power grid; static voltage stability; transient voltage stability; reactive power compensation; operation mode; power grid structure

中图分类号: TM712 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)12-0090-07

## 0 引言

近20年来,电压稳定一直是国际电力界最为关注的研究课题之一,《电力系统安全稳定导则》明确要求<sup>[1]</sup>,在规划和运行中需要对电压稳定性进行研究并采取预防控制措施以保证电压水平和电压稳定裕度。

天津电网处(北)京(天)津唐(山)电网的中心,是华北电网的重要组成部分,具有城市受端电网特点,担负着向直辖市供电的重要任务,它的安全和稳定运行直接关系到天津市以及整个华北地区电网的安全与稳定。由于近些年来天津经济呈持续高速增长的态势,天津电网的负荷增长迅猛,区外受电比例呈增长趋势,主网的稳定水平和受端电网的电压稳定问题将越来越突出,一旦发生电压失稳,将可能造成极大的经济损失和严重的社会影响。

诸多网省公司纷纷开展了电压稳定的分析计算工作<sup>[2-5]</sup>,说明了对电压稳定性的重视。天津电网也

曾开展过<sup>[6]</sup>,但仅局限于静态电压稳定分析,静态电压稳定分析和暂态电压稳定分析针对不同的研究目的和不同的优缺点,是互为补充的。同时随着天津电网的快速建设,天津电网结构变化比较大,本文采用中国电科院开发的PSD-VSAP软件程序及BPA潮流程序对天津电网2009年典型运行方式下的电压稳定性进行深入详细研究,详细分析研究了天津电网典型方式下的静态电压稳定性和暂态电压稳定性,对天津电网可能存在的电压稳定问题、电压薄弱环节等进行了深入的研究,并针对地区无功补偿变化、运行方式变化、网络结构变化等对电压稳定的影响进行了敏感性分析,指出了天津电网可能存在的电压稳定问题、电压薄弱环节,并就影响因素下的电压稳定问题给出了建议。

## 1 电压稳定分析方法及判据

### 1.1 静态电压稳定分析方法

电力系统电压稳定静态分析方法主要研究电力

系统在某运行点受到小扰动时节点电压的变化特性, 以及电力系统在某些元件停运情况下的电压稳定性。静态分析方法主要研究对象是电力系统潮流方程, 刻画电力系统电压稳定性的指标有很多<sup>[7-13]</sup>, 其中一个主要的指标是考虑系统在负载改变情况下, 确定系统当前运行点距电压崩溃点的距离, 即计算系统的负载裕度。该方法的计算工具主要是连续潮流方法, 其计算原理是利用估计和校正等算法来追踪计算电力系统在负荷改变的条件下电力系统运行平衡点, 在此过程中确定电压崩溃点。

本部分主要基于PSD-VSAP程序, 根据负荷增长方式的不同, 综合采用单负荷母线有功裕度指标和区域功率储备系数指标来全面评估天津电网的静态电压稳定性, 单负荷母线有功裕度指标是单个负荷节点的功率储备系数(裕度为标么值, 基准功率为100 MVA); 区域功率储备系数指标是全网的功率储备系数, 以电压稳定储备系数 $K_p$ 来表示。一般情况下, 正常运行方式下区域功率储备系数不低于8%, 即说明静态电压稳定程度较高。参照文献[14]中, 对于外受电力比重较小的区域电网, 考虑到本地区机组留有一定的旋转备用, 要求联络线输电功率要小, 但总的区域功率裕度系数应大于15%~20%。本文参照以上两个标准对天津电网静态电压稳定性给予评价。

电压稳定静态分析的另一种主要方法是模态分析<sup>[15-16]</sup>, 通过模态分析法计算获得相关因子等信息, 从而计算获得对电压稳定有重要影响的关键节点、线路和发电机等。运行人员在正常的调度和监控中, 应注意关键线路, 在系统发生大的扰动时, 减轻该线路上的负荷, 对于潮流方式作合理的调整, 同样, 关键机组对于系统的稳定起关键作用, 运行中应该考虑安排足够的无功储备以避免系统失去电压稳定。

## 1.2 暂态电压稳定分析方法

电力系统暂态电压稳定分析主要采用常规的时域仿真法, 其计算原理是利用计算机来计算获得电力系统在某一干扰下的时域响应曲线。仿真方法的一个优点是能计算得到电力系统中的多种变量在指定故障下的时间曲线, 如发电机功角、节点电压和系统频率等。通过这些信息可以直接判断系统在扰动下的稳定性, 复现实际电力系统故障下的过渡过程, 检验与校核有关保护和控制措施的作用。

此部分主要基于PSD-BPA潮流稳定程序。电压稳定失稳判据采用实用判据, 根据电压中枢点母线电压下降幅度和持续时间进行判别, 即动态过程中系统电压中枢点母线电压下降持续1 s低于限定值

0.75 p.u., 就认为系统电压不稳定, 但应区别由功角振荡导致电压大幅度波动造成的低电压和电压失稳造成的电压严重降低。

## 2 天津电网电压稳定分析研究

### 2.1 天津电网概况

2009年, 天津500 kV北郊~吴庄~板桥~滨海为单回环网结构, 北郊~东丽~滨海~芦台为双回500 kV结构, 天津500 kV电网全部合环运行。典型运行方式下, 计算负荷为7 600 MW, 通过500 kV联络线吴庄-霸州双回、板桥-黄骅双回、芦台-安各庄双回、盘山-新通州、北郊-安定从华北电网总受电942 MW, 受电比例12.4%。天津机组主力、自备及地方电厂总有功出力为7 252 MW, 无功出力1 974.3 Mvar, 发电功率因数为0.965, 旋转无功备用达到无功发电能力(按发电功率因数0.85计算)的56.1%, 无功储备比较充足。

### 2.2 静态电压稳定分析

#### (1) 单负荷母线有功裕度分析

通过单负荷母线有功裕度扫描结果, 当负荷按照恒定功率因数增长时, 天津电网负荷母线有功裕度较高。其中35 kV负荷母线有功裕度值在2.957~4.683 p.u.之间, 110 kV负荷母线的有功裕度值在3.486~12.521 p.u.之间。所有负荷母线的有功储备系数都在65%以上, 其中迎丰2#变110 kV负荷母线有功储备系数最低为67%。

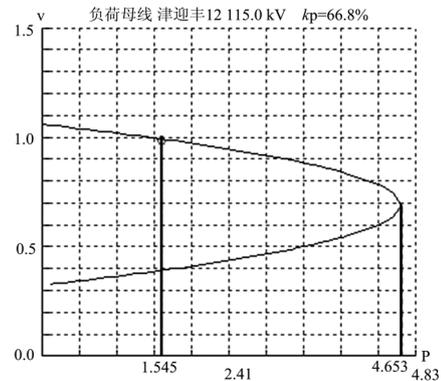


图1 迎丰2#变110 kV负荷母线的P-V曲线

Fig.1 P-V curve of Yingfeng 110 kV load bus

图1所示为迎丰2#变110 kV负荷母线的P-V曲线, 其中纵坐标为节点电压标么值, 横坐标为迎丰2#变的负荷水平(以标么值表示), 粗线所对应负荷水平分别为迎丰2#变110 kV母线正常方式下的负荷水平和极限功率, 分别为1.545 p.u.、4.653 p.u.。

#### (2) 区域功率储备系数分析

从区域功率储备系数扫描结果来看,2009 年典型运行方式下天津电网能承担的最大负载约为 10 700 MW,由正常运行方式下系统总的负荷为 7 600 MW 可以计算得出,电压稳定储备系数为 28.97%。

(3) 模态分析计算

对天津电网 2009 年典型运行方式进行模态分析,关键负荷母线、关键线路和关键发电机组的计算结果如表 1~3 所示。

表 1 2009 年天津电网典型运行方式负荷母线相关因子

Tab.1 Load bus participation factor of typical operation mode in 2009

序号	节点名	基准电压 / kV	相关因子
1	宝坻 2	115	-0.008 45
2	迎丰 2	115	-0.007 951
3	蓟县 1	115	-0.007 749
4	唐官屯 1	115	-0.007 217
5	港西 1	115	-0.007 041
6	八里铺 1	115	-0.006 992
7	迎丰 1	115	-0.006 623
8	大沽 2	115	-0.006 21
9	大沽 1	115	-0.006 188
10	八里台 1	37	-0.006 036

表 1 列出了相关因子排列靠前的关键负荷母线,其中相关因子排在最前面的是宝坻变电站和迎丰变电站的 110 kV 负荷母线。相关因子绝对值较大的负荷母线为电压稳定薄弱点。

表 2 为天津电网中关键线路参与因子计算结果

表 2 2009 年天津电网典型运行方式关键线路参与因子

Tab.2 Key lines participation factor of typical operation mode in 2009

500 kV 线路			
序号	节点名一	节点名二	参与因子
1	板桥	黄骅	0.222 103
2	吴庄	霸州	0.098 279
3	芦台	安各庄	0.092 176
4	板桥	滨海	0.049 446
5	新通	盘山	0.026 439
220 kV 线路			
序号	节点名一	节点名二	参与因子
1	吴庄 1	华苑	0.005 238
2	板桥 2	万年桥	0.004 332
3	海门	上古林	0.003 844
4	武清 1	北郊	0.002 221
5	八铺 1	平安城	0.001 97

果,500 kV 板桥-黄骅、吴庄-霸州、220 kV 吴庄-华苑、板桥-万年桥线路的参与因子较大。这些线路均为重载线路,其无功损耗变化比较敏感,在运行中需监控其潮流。

表 3 为天津电网参与因子排列靠前的关键发电机组,北疆、盘山电厂发电机组等是比较关键的发电机组,在运行控制中需监测其动态无功备用,同时加强其附近区域的无功补偿,提高机组的无功备用水平。

表 3 2009 年天津电网典型运行方式关键机组参与因子

Tab.3 Key generators participation factor of typical operation mode in 2009

序号	发电机组	参与因子	无功备用 / p.u.
1	北疆 G1	0.348 6	1.962
2	盘山 G4	0.199 9	0.075
3	盘山 G3	0.199 8	1.281
4	盘山 G2	0.189 8	1.631
5	盘山 G1	0.187 9	2.092
6	陈热 G9	0.148 1	1.259
7	杨厂 G5	0.144 9	1.259
8	军粮 GA	0.137 6	0.991
9	杨厂 G6	0.136 6	1.259
10	津能热电 G1	0.134 3	1.327

2.3 暂态电压稳定分析

选择比较严重的几个故障,对天津电网进行暂态电压稳定分析,观察天津电网暂态电压稳定情况。

(1) 单台发电机组失磁故障

发电机失去励磁是单一元件故障中比较严重的故障,发电机组失磁后,不仅丢失该发电机组的无功出力,而且还要从电网中吸收与其容量相当的无功功率,如果失磁机组不能迅速地从电网中解列,对电网的无功和电压会造成很大冲击。

通过计算可知,天津电网单台发电机组发生失磁,1 s 后切机,除失磁机组与电网解列外,对电网的频率没有多大影响,系统可以保持稳定,电压保持在较高的水平,天津电网 500 kV 及 220 kV 电压水平维持很好。图 2 为北疆电厂一台 1 000 MW 发电机组发生直接短路失磁故障后 1 s 后切除失磁机组,系统部分节点电压曲线,从图中可以看出,故障后电压恢复水平较高。

如果失磁保护装置不能及时切除失磁机组,使它从电网中解列,则 500 kV 和 220 kV 母线电压会剧烈地摆动。图 3 为北疆电厂一台 1 000 MW 发电机组发生直接短路失磁故障后不切机情况下部分节点电压曲线,可以看出故障后电压恢复水平有所降

低且剧烈摆动, 但仍能保持稳定运行。因此, 确保机组在失磁后能快速切机, 对于保证电网的电压稳定性是非常重要的。

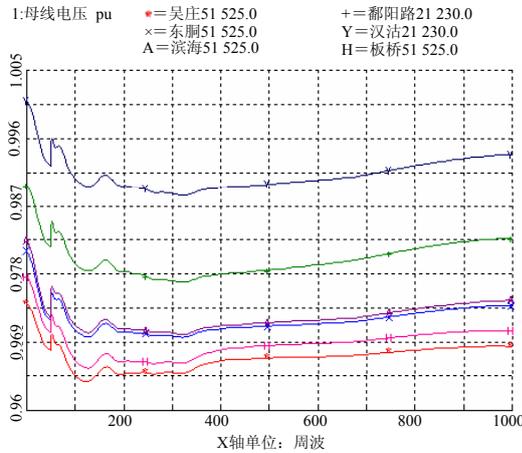


图2 北疆电厂一台机组失磁故障后1 s切机时部分节点电压曲线

Fig.2 Some node voltage curves when cutting the generator of Beijing power plant at one second after loss of excitation

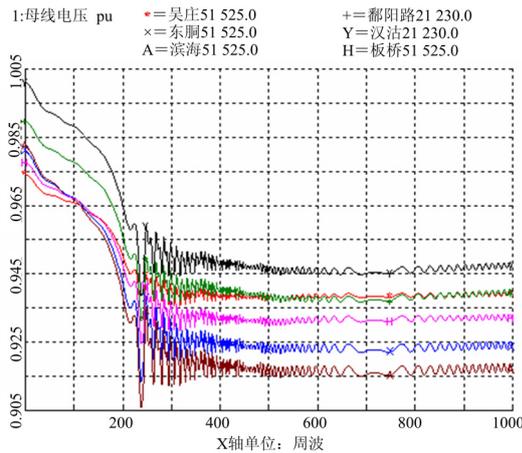


图3 北疆电厂一台机组失磁不切机时部分节点电压曲线

Fig.3 Some node voltage curves when not cutting the generator of Beijing power plant after loss of excitation

### (2) 电厂全停

天津电网接入 220 kV 及以上发电厂中机组全部跳闸, 计算中故障为 0 s 发电厂中机组全部切机。从电厂全停仿真结果可见, 故障后电压恢复情况较好, 最低在 0.95 pu 以上。天津电网在大容量电厂全停后可以保持稳定。图 4 为盘山电厂全停吴庄 500 kV 母线电压曲线, 从图中可以看出, 盘山电厂全停后吴庄 500 kV 母线电压水平恢复较高。

### (3) 500 kV 联变故障同时退出

天津电网 500 kV 站一台主变高压侧出口 0 s“三永”故障, 4.5 周波后站内主变均退出。最严重情况

是北郊 500 kV 站主变 N-2 故障后, 大孟庄 220 kV 母线最低电压为 0.64, 低于 0.75 p.u.的时间为 0.36 s, 满足系统稳定要求。北郊两台主变故障退出后主要节点的电压恢复情况见图 5。

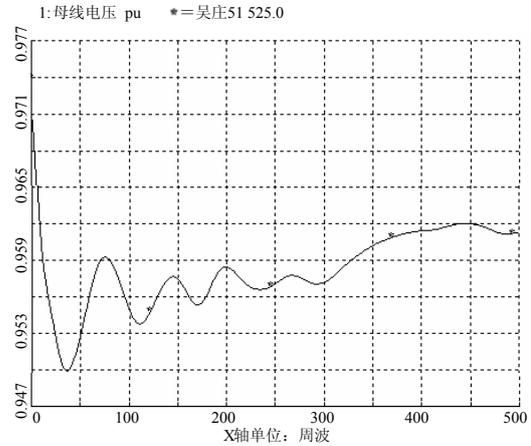


图4 盘山电厂全停吴庄 500 kV 母线电压曲线

Fig.4 Voltage curve of Wuzhuang 500 kV bus when shutting down of Panshan power plant

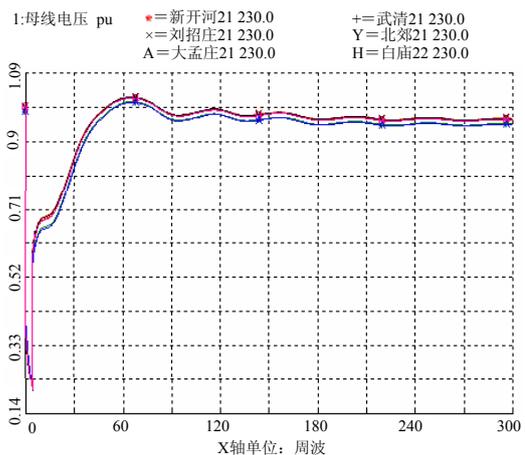


图5 北郊联变故障退出主要节点电压曲线

Fig.5 Voltage curves of some main node bus when the fault of the Beijiao transformers

## 2.4 影响电压稳定因素的敏感性分析

静态电压稳定性不但与地区负荷的轻重有关, 同时与无功补偿、电网运行方式、网络结构等都有很大关系。无功补偿水平的高低直接影响到系统的正常运行电压水平和系统内无功储备的多少; 而负荷过重必然导致潮流输送过程中无功损耗的增大; 电网运行方式及网络结构变化则会使得电网的无功调用能力变差, 造成局部地区无功缺乏, 使电压稳定性变坏。

本节在 2009 年典型运行方式基础上, 主要进行地区无功补偿变化、运行方式变化、网络结构变化

对电压稳定性影响的敏感性分析，以全面分析天津电网电压稳定情况。其中， $K_{pmin}$  值为天津电网内单个负荷节点功率裕度的最小值；最大负荷水平为天津电网所有负荷节点按负荷功率因数恒定过渡方式求出的天津电网能承担的最大负荷水平，以  $P_{max}$  表示；区域功率储备系数指标，以  $K_p$  表示；无功备用为天津电网内发电机组极限无功出力与机组实际无功出力的差值。

2.4.1 地区无功补偿变化对电压稳定性的影响

2009 年天津电网典型运行方式下，负荷功率因数为 0.984。天津电网总的无功负荷为 1 426 Mvar，正常方式下，发电机无功出力为 1 974 Mvar，发电机功率因数运行在 0.96 以上，无功备用相对充足。

无功补偿装置的投入和退出用无功负荷的减少和增加来近似，通过负荷功率因数的改变进行描述，考虑负荷功率因数降至 0.97 和 0.952 的两种情况下，天津电网的静态电压稳定性。

静态电压稳定分析计算结果如表 4 所示。

表 4 不同无功补偿容量对电压稳定性的影响  
Tab.4 Effects on voltage stability of reactive power compensation

方式	$K_{pmin} / \%$	$P_{max} / MW$	$K_p / \%$	无功备用 / Mvar
正常运行方式	66.8	10 786	29.54	2 242
功率因数降至 0.970	63.4	10 471	27.42	1 781.6
功率因数降至 0.952	59	10 039	24.30	1 322.4

由计算结果可以看出，虽然当减少无功补偿容量的情况下，天津电网功率裕度均有不同程度的降低，但仍然很高，原因是由于天津电网与华北电网联系紧密，当天津电网降低无功补偿容量比例较小时，对天津电网电压稳定的影响并不明显，但无功备用下降较多，当降低无功补偿到一定程度时，对天津电网电压稳定性影响较大，电网的负载裕度下降较多，同时部分机组无功出力已满发，电压支撑及电压调节能力减弱。因此应保证负荷侧无功补偿装置的投入，进一步加强对电网的无功补偿措施和电源建设，提高无功备用，减少区间无功流动以及对外部地区无功资源的依赖。

2.4.2 运行方式变化对电压稳定性的影响

计算条件：在天津电网 2009 年典型运行方式的基础上，电网的网络结构不变，天津电网负荷不改变，改变天津地区机组出力，使天津电网受电断面输电线路潮流加重。

具体计算方式：方式一：送电方式，天津电网机组全开，河北地区机组减出力，通过送电断面天津电网向外网总送电 1 760 MW；方式二：送电断面输送潮流较重的运行方式，受电断面潮流为 5 100 MW；方式三：采用受电断面的暂稳极限潮流 6 100 MW 为实际电网运行中所允许的最大运行潮流，研究这种状况下电网的静态电压稳定性。

各方式天津电网电压稳定分析结果见表 5。

表 5 潮流运行方式变化对电压稳定性的影响  
Tab.5 Effects on voltage stability of operation mode

方式	$K_{pmin} / \%$	$P_{max} / MW$	$K_p / \%$	无功备用 / Mvar
正常方式	66.8	10 786	29.54	2 242
方式一	68	10 818	29.75	3 403
方式二	63	9 465	19.70	449
方式三	57	8 556	11.17	12

从以上分析结果可看出，在负荷水平和电网结构不变的情况下，当天津送电断面输电线路潮流过重的情况下，天津地区无功备用明显下降，电压稳定性大幅度降低。电压稳定性大幅度下降的主要原因是在正常运行方式下，当受电断面上潮流加重时，无功损耗大大增加，使得天津地区的无功备用大幅度下降，因此天津电网的电压支撑能力有较大下降，电压稳定性裕度明显降低。因此，要严格关注送电断面的运行潮流，以防止在大的扰动情况下发生电压失稳现象。

2.4.3 网络结构变化对电压稳定性的影响

本小节主要分析 500 kV 输电线路 N-2 故障后方式的静态电压稳定性，研究对天津电网静态电压稳定性影响较大的故障形式。

500 kV 输电线路 N-2 故障后开断方式的静态电压稳定性计算结果见表 6。

表 6 500 kV 输电线路 N-2 开断方式的静态电压稳定性  
Tab.6 Static voltage stability of 500 kV transmission lines N-2 operation mode

方式	$K_{pmin} / \%$	$P_{max} / MW$	$K_p / \%$	无功备用 / Mvar
正常方式	66.8	10 786	29.54	2 242
黄板 N-2	66.1	9 755	22.09	1 915
吴霸 N-2	66.5	10 384	26.81	2 088
安芦 N-2	66.6	10 490	27.55	2 027
盘通、安北开断	66.8	10 621	28.44	2 260
芦台-滨海 N-2	66.7	10 708	29.03	2 149

由以上计算结果可以看出，相对来讲，板桥-

黄骅双回线事故后开断对电压稳定性影响较大, 由于正常方式下板桥—黄骅双回线潮流较重, 板桥—黄骅单回或双回线同时掉闸, 必然造成大量潮流转移, 造成无功损耗增大, 使作为受端电网的天津电网的无功备用降低, 同时电压稳定裕度降低。总体来看, 天津电网 500 kV 线路 N-2 故障方式对静态电压稳定性影响不大, 均有较高的电压稳定裕度, 说明天津电网网络结构较强, 同时由于天津电网与周边地区联系紧密, N-2 元件的退出对于网络的结构影响不大, 天津电网 2009 年典型运行方式对 500 kV 输电线路 N-2 故障具有较强的抵御能力, 电压稳定性不会造成决定性的破坏。

### 2.5 天津电网电压稳定分析研究小结

通过对 2009 年天津电网典型运行方式静态电压稳定分析、暂态电压稳定校核、影响因素的敏感性分析可知:

(1) 2009 年典型运行方式下天津电网具有较高的功率裕度指标, 各负荷节点有功储备系数都在 65% 以上, 满足正常负荷波动的需求。2009 年典型运行方式下天津电网能承担的最大负载约为 10 700 MW, 电压稳定储备系数为 28.97%, 电压稳定程度较高。相对薄弱环节主要集中在北部宝坻及蓟县、南部迎丰、唐官屯及港西等地区, 这些地区缺少电源支持, 无功电力相对缺乏。500 kV 板桥—黄骅、吴庄—霸州输电线路、220 kV 吴庄—华苑、板桥—万年桥线路对系统无功变化的影响较大, 在运行中需监控其潮流。对无功损耗影响较大的机组主要是北疆电厂、盘山电厂的机组, 在运行中应注意适当保留一定的无功备用。

(2) 经过暂态电压稳定校核可知, 网络的鲁棒性较好, 有可靠裕度, 电压稳定程度较高, 具备比较充足的旋转无功备用。说明了天津电网 2009 年典型运行方式比较稳定。

(3) 通过分析地区无功补偿变化、运行方式变化、网络结构变化对电压稳定性的影响, 建议应保证负荷侧无功补偿装置的投入, 进一步加强对电网的无功补偿措施和电源建设, 提高无功备用, 减少地区间无功流动以及对外部地区无功资源的依赖, 同时要严格关注送受断面的运行潮流, 以防止在大的扰动情况下发生电压失稳现象。

## 3 总结

本文采用 PSD-BPA 及 PSD-VSAP 软件, 综合应用单负荷母线裕度指标、区域负荷裕度指标、模态分析等方法, 对天津电网 2009 年典型运行方式的电压稳定性进行了详细深入分析研究, 并进行了暂

态电压稳定分析, 分析结果表明, 天津电网 2009 年典型运行方式电压稳定性较好, 系统无功补偿配置充足, 预留动态无功备用较多, 系统抵御严重故障冲击的能力较强。通过对影响因素的分析可知, 地区无功补偿变化、运行方式变化以及网络结构变化均对天津电网电压稳定性有很大影响。随着天津电网的快速建设, 天津电网结构变化比较大, 天津电网电压稳定工作越发重要, 建议进一步提高重视程度, 及时发现电网中存在的问题, 提出改正措施预防电压不稳定的发生。

### 参考文献

- [1] 中华人民共和国国家经济贸易委员会. DL 755-2001 电力系统安全稳定导则[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.  
China Economic and Trade Commission. DL 755-2001 guide on security and stability for power system[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004.
- [2] 陈辉祥, 王仲鸿, 崔文进, 等. 广东电网电压稳定研究[J]. 电力系统自动化, 2004, 28 (7): 86-89.  
CHEN Hui-xiang, WANG Zhong-hong, CUI Wen-jin, et al. Research on voltage stability of Guangdong power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28 (7): 86-89.
- [3] 卢继平, 孙华利, 袁湘宁, 等. 基于 PSS / E 的宁夏电网静态电压稳定研究[J]. 继电器, 2007, 35 (18): 25-29.  
LU Ji-ping, SUN Hua-li, YUAN Xiang-ning, et al. Research on static voltage stability of Ningxia electric power grid based on PSS / E[J]. Relay, 2007, 35 (18): 25-29.
- [4] 梁才浩, 段献忠, 何仰赞, 等. 广西电网静态电压稳定性分析[J]. 电力自动化设备, 2004, 24 (7): 45-49.  
LIANG Cai-hao, DUAN Xian-zhong, HE Yang-zan, et al. Steady state voltage stability analysis for Guangxi power grid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24 (7): 45-49.
- [5] 武寒, 祝瑞金. 华东大受端电网电压稳定性研究之我见[J]. 华东电力, 2006, 34 (8): 1-5.  
WU Han, ZHU Rui-jin. Voltage stability of large receiving-end grid of East China [J]. East China Electric Power, 2006, 34 (8): 1-5.
- [6] 贾宏杰, 李鹏, 宿吉峰, 等. 天津电网电压稳定性分析[J]. 电网技术, 2002, 26 (7): 42-45.  
JIA Hong-jie, LI Peng, SU Ji-feng, et al. Voltage stability study on Tianjin power system[J]. Power System Technology, 2002, 26 (7): 42-45.
- [7] 傅旭, 王锡凡. 一种新的节点静态电压稳定指标及切负荷算法[J]. 电网技术, 2006, 30 (10): 9-14.  
FU Xu, WANG Xi-fan. A new index of nodal static voltage stability and load shedding method[J]. Power

- System Technology, 2006, 30 (10): 9-14.
- [8] 邱晓燕, 邱红兵. 基于潮流计算的电压稳定性指标的比较研究[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2002, 34 (6): 95-98.  
QIU Xiao-yan, QI Hong-bing. Comparative study of voltage stability indices based on load flow calculation[J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2002, 34 (6): 95-98.
- [9] 李国庆, 王威, 贾伟, 等. 基于负荷裕度灵敏度的电压稳定控制方法[J]. 电机与控制学报, 2002, 6 (2): 173-178.  
LI Guo-qing, WANG Wei, JIA Wei, et al. The control method for voltage stability based on the loading margin sensitivity[J]. Electric Machines and Control, 2002, 6 (2): 173-178.
- [10] 江伟, 王成山, 余贻鑫, 等. 电压稳定裕度对参数灵敏度求解的新方法[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26 (2): 13-18.  
JIANG Wei, WANG Cheng-shan, YU Yi-xin, et al. A new method to compute the sensitivity of loading margin to voltage collapse with respect to parameters[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26 (2): 13-18.
- [11] Greene S, Dobson I, Alvarado F. Sensitivity of the loading margin to voltage collapse with respect to arbitrary parameters[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1997, 12(1): 262-272.
- [12] 包黎昕, 张步涵, 段献忠, 等. 电压稳定裕度指标分析方法综述[J]. 电力系统自动化, 1999, 23 (8): 52-60.  
BAO Li-xin, ZHANG Bu-han, DUAN Xian-zhong, et al. A summary of the state of the art of voltage stability margin indices[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23 (8): 52-60.
- [13] 周双喜, 姜勇. 电力系统电压静态稳定性指标述评[J]. 电网技术, 2001, 25 (1): 3-7.  
ZHOU Shuang-xi, JIANG Yong. Review on steady state voltage stability indices of power systems[J]. Power System Technology, 2001, 25 (1): 3-7.
- [14] 马世英, 印永华, 李柏青, 等. 我国互联电网电压稳定评价标准框架探讨[J]. 电网技术, 2006, 30 (17): 7-13.  
MA Shi-ying, YIN Yong-hua, LI Bai-qing, et al. A research on voltage stability evaluation criteria for interconnected power grid in China[J]. Power System Technology, 2006, 30 (17): 7-13.
- [15] Kundur P. Power system stability and control[M]. New York: Graw-Hill, 1994.
- [16] 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.  
ZHOU Shuang-xi, ZHU Ling-zhi, GUO Xi-jiu, et al. Power system voltage stability and control[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004.

收稿日期: 2009-08-07; 修回日期: 2009-09-04

作者简介:

刘丽霞 (1981-), 女, 硕士, 工程师, 主要从事电网规划及电力系统稳定分析计算工作; E-mail: liulixia0808@126.com

黄志刚 (1978-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事电网方式分析计算工作;

李娟 (1982-), 女, 硕士, 主要从事电网稳定及电力系统分析计算工作。

(上接第 89 页 continued from page 89)

- [8] 李秋燕. 地区调度操作票专家系统的研究和开发(硕士学位论文)[D]. 南京: 东南大学, 2006.  
LI Qiu-yan. Research and development on regional dispatching operation instructions expert system, thesis [D]. Nanjing: Southeast University, 2006.
- [9] 李恩晶. 电网调度操作票专家系统中知识表示和推理机制的研究(硕士学位论文)[D]. 南京: 东南大学, 2005.  
LI En-jing. Study of knowledge representation and inference engine in power network dispatching command order sheet expert system, thesis[D]. Nanjing: Southeast University, 2005.
- [10] 刘晶. 通用型操作票专家系统知识表示的实用化研究(硕士学位论文)[D]. 保定: 华北电力大学, 2006.  
LIU Jing. Practical research of universal order sheet expert system based on knowledge expression, thesis [D]. Baoding: North China Electric Power University, 2006.
- [11] 廖小平. 变电站倒闸操作智能设计与模拟平台的研究与实践(博士学位论文)[D]. 武汉: 华中科技大学, 2005.  
LIAO Xiao-ping. Research and development of intelligent design and simulation platform for substation switching operation, doctoral dissertation [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2005.

收稿日期: 2009-08-07; 修回日期: 2009-09-14

作者简介:

何锡点 (1981-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为机器学习、电力系统综合自动化; E-mail: hexidian@xjgc.com

李江林 (1967-), 男, 高级工程师, 长期从事电力系统自动化领域的研究与开发工作;

李献伟 (1978-), 男, 助理工程师, 长期从事电力系统自动化领域的研究与开发工作。