

基于 PSS/E 的宁夏电网静态电压稳定研究

卢继平¹, 孙华利¹, 袁湘宁², 贺文², 项丽²

(1. 重庆大学高电压与电工新技术教育部重点实验室, 重庆 400044; 2 宁夏电力公司, 宁夏 银川 750001)

摘要: 宁夏电网是西北电网的重要组成部分, 在西北电网中属于受端。受负荷的迅猛增长的影响, 宁夏电网的电压稳定问题日益突出。根据宁夏电网 2006 年度运行方式, 对系统的静态电压稳定性进行分析。借助于 PSS/E 潮流分析程序, 计算了宁夏电网正常运行方式和预想事故下的有功裕度指标和灵敏度指标, 并排序比较指出宁夏电网的薄弱节点、薄弱区域和预想事故下系统电压稳定的削弱程度。分析所得结论将对电网安全运行和调度具有一定的指导作用。

关键词: PSS/E; 电压稳定; 灵敏度

Research on static voltage stability of Ningxia electric power grid based on PSS/E

LU Ji-ping¹, SUN Hua-li¹, YUAN Xiang-ning², HE Wen², XIANG Li²

(1. The Key Laboratory of High Voltage Engineering and Electrical New Technology, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. Ningxia Electric Power Company, Yinchuan 750001, China)

Abstract: Ningxia Electric Power Grid is at the power receive-side of NorthWest-China Electric System. With the fast development of economy, the power consumption in Ningxia region increases rapidly and constantly in recent years, therefore, the danger in voltage instability continuously exists. On the basis of operation schedule of Ningxia grid in 2006, the system static voltage stability is analyzed in this paper. By PSS/E power flow-analysis program, the criteria of the active power margin and the sensitivity for Ningxia network in terms of voltage stability analysis are calculated under both normal and fault prediction conditions separately. By comparison, the key nodes and the weak areas are indicated, and the system voltage stability under faults prediction is analyzed. The conclusions analyzed can be an instruction for secure operation and schedule.

Key words: PSS/E; voltage stability; sensitivity

中图分类号: TM712

文献标识码: A

文章编号: 1003-4897(2007)18-0025-05

0 引言

近年来, 电压失稳或崩溃事故的不断出现, 使电压稳定性问题的研究受到了高度重视。同时, 电压稳定研究特别是在静态电压稳定领域, 在近年来也获得了很大的进展。本文以宁夏电网静态电压稳定作为研究方向, 着重在确定电压稳定极限和薄弱区域方面作了相关的工作, 取得了一些具有实用价值的成果。本文针对宁夏电网的实际情况, 利用裕度和灵敏度指标, 对宁夏电网运行情况进行了深入分析, 以期弄清宁夏电网电压稳定性的现状及薄弱环节, 为宁夏电网更为安全经济地运行提供指导。

1 宁夏电网简介

宁夏电网位于西北电网的正北方, 是西北电网的重要组成部分, 由石嘴山、银川、银南、固原、中卫 5 个行政区域电网分网组成, 供电面积近 7 万平方公里。

截止至 2005 年底, 宁夏电网(统调)总装机容量为 5 009.5 兆瓦, 其中火电机组共 28 台, 总容量

为 4 475 兆瓦, 水电机组 15 台, 总容量 422.3 兆瓦, 风电机组 132 台, 总容量为 112.2 兆瓦^[1]。

近年来, 宁夏电网发展速度较快, 负荷增长持续保持在 20% 以上。由于用电负荷的迅猛增长, 发电供不应求, 宁夏电网目前是一个典型的受端电网, 每年均须从西北电网购入大量电量, 才能满足社会发展的用电需求。电力负荷迅速增长及负荷特性的变化削弱了宁夏电网自身平衡能力和无功的电压支撑能力, 电网电压稳定问题日益突出。

2 仿真工具

电力系统仿真软件 PSS/E (Power System Simulator for Engineering) 是由美国电力技术公司 PTI (Power Technologies Inc) 开发的一套仿真计算商业软件。可进行潮流、短路电流计算, 暂态稳定和中长期动态稳定分析。

3 预想事故的筛选

大规模电力系统发生各种类型故障的可能性繁多, 因此通过确定最严重的故障进行事故分析可以

有效地减小计算量以及分析的工作量。

造成电网电压不稳定的主要因素之一是系统不能满足无功功率的需要。问题的核心是通常在有功功率和无功功率流过输电网络的感性电抗时所产生的电压降。本文应用 PSS/E 软件提供的排序功能进行事故筛选, 其采用的排序计算公式为:

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

其中: X_i 是支路 i 的电抗, P_i 是支路的有功功率, L 是 PI 支路数。

PI 近似反映了在不同系统状态下的无功损耗。随着负荷的增加, 输电线路无功损耗也同时增加, 无功需求的增加通常会导致系统电压的下降^[2]。

宁夏电网 220 kV 节点 33 个, 330 kV 节点 12 个, 220 kV 线路 78 条, 330 kV 线路 24 条。本文对宁夏系统 220 kV 及 330 kV 线路三相断开故障电压稳定恶化严重程度排序, 排序结果将作为单一故障下电压稳定裕度计算的参考。取前 10 位列于表 1。

表 1 事故严重性排序

Tab.1 Rank of contingencies by severity

序号	线路名称	序号	线路名称
1	关帝—古城	6	石二—陶乐
2	大武口—步桥	7	石二—陶乐
3	正谊—步桥	8	新城—平吉堡
4	宁安—固原	9	掌政—月牙湖
5	关帝—迎水桥	10	月牙湖—徐家庄

4 稳定性分析

4.1 计算指标

本文采用了同时考虑灵敏度和灵敏度变化率的综合灵敏度指标 L_i ^[3]。

$$L_i = \Delta LM_i / \overline{\Delta LM} + LM_i / \overline{LM} \quad (2)$$

其中:

$$LM_i = dV_{Li} / dQ_{Li} \quad (3)$$

$$\Delta LM_i = LM_{i1} - LM_{i2} \quad (4)$$

式中: LM_i 为节点 i 的电压对负荷的灵敏度; LM_{i1} 为第一个状态下节点 i 的灵敏度值; LM_{i2} 为第二个状态下节点 i 的灵敏度值; ΔLM_i 为节点 i 的灵敏度变化率; \overline{LM} 为各节点的灵敏度的平均值; $\overline{\Delta LM}$ 为各节点的灵敏度变化率的平均值。

计算负荷裕度采用 K_p 指标:

$$K_p = (P_{\max} - P_0) / P_0 \times 100\% \quad (5)$$

4.2 正常运行状态

本文以 2006 年冬季负荷水平 4 322 MW 为分析断面, 采用恒功率负荷模型。因为采用恒功率模型的计算结果要比采用其它负荷模型的计算结果相对保守, 且灵敏度指标仅适用于恒功率模型^[4]。恒定 MVA 负荷模型近似表示了配电系统电压调节设备的作用。

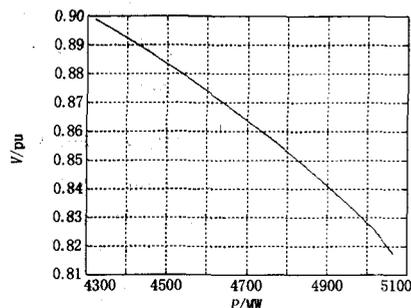


图 1 盐池 220 kV 母线 PV 曲线

Fig.1 PV curve of the Yanchi 220kV bus

从图中可以看出系统的极限传输功率为 5 068 MW, 可以得到在这样的网架条件下, 宁夏地区的电压稳定的总体裕度为:

$$K_p = (5068 - 4322.1) / 4322.1 \times 100\% = 17.26\% \quad (6)$$

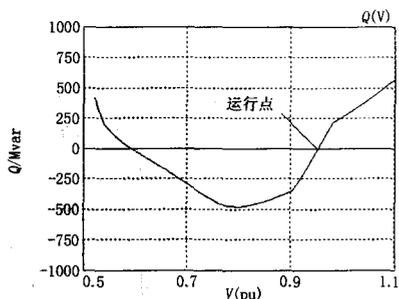


图 2 正谊 220 kV 母线 QV 曲线

Fig.2 QV curve of Zhengyi 220kV bus

图 2 QV 曲线底部左侧为不稳定区域, 从当前运行点到底部的纵坐标距离表示了该母线的最大可承受的无功负荷裕度, 对于复杂电网, 裕度的绝对值意义不大, 但各节点裕度的相对大小对识别薄弱环节和薄弱区域有重要意义, 对全部 220 kV 母线分别进行计算, 得到无功裕度排名。

从表中的数据可以知道, 通过对各节点灵敏度进行综合计算和分析之后, 在正常运行方式下电网中对无功需求变化最为敏感的节点主要是正谊、盐池、新城、黄河、大武口、步桥、小坝等, 但是从

电网的接线分布看来, 其区域主要集中在由银北地区的正谊、步桥、黄河等节点及银川、宁东地区的芦花、新城、东山、盐池等节点构成的两个区域。

表 2 正常情况无功裕度

Tab.2 Reactive margin in normal state

序号	母线名称	无功裕度 /Mvar	序号	母线名称	无功裕度 /Mvar
1.	盐池 220	179.1	6.	靖远 220	568.61
2.	迎水桥 220	484.3	7.	惠农 220	579.55
3.	五伏 220	507.5	8.	潮湖 220	584.59
4.	黄河 220	530.2	9.	落石滩 220	589.8
5.	灵州 220	551.2	10.	正谊 220	595.24

表 3 综合灵敏度

Tab.3 Synthetical sensitivity

序号	母线	L_i	序号	母线	L_i
1	盐池 220	5.9059	6	大武口 220	2.9182
2	正谊 220	5.7322	7	东山 220	2.5940
3	小坝 220	4.1689	8	五里坡 220	2.5609
4	新城 220	3.6130	9	步桥 220	2.5013
5	黄河 220	2.9182	10	芦花 220	2.5013

结合灵敏度指标以及对 QV 曲线的分析, 基本上可以得出电网的主要薄弱地区为由正谊、步桥、黄河、平西和盐池、东山、新城、芦花等节点形成的两个区域。但是从 QV 曲线的分析中还应该看到, 盐池缺少无功电源的支撑, 明显表现出缺乏对无功需求的进一步保障, 在此处应该加强无功补偿的能力。

盐池为系统最弱节点, 原因在于盐池处于电网末端, 又是单线直馈供电, 附近仅有灵州电厂, 但其发电机容量较小, 因此盐池负荷的增加将由其它电厂远距离传输, 使得盐池承受负荷增加的能力最弱, 成为系统的最弱节点。

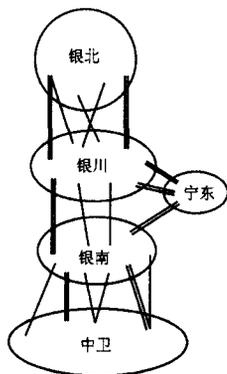


图 3 宁夏电网分区图

Fig.3 Subarea map of Ningxia Grid

4.3 断面出现故障情况

宁夏电网通过中卫、宁安、固原 330 kV 线路与

西北电网相连。计算中将与西北电网联络线等值为负荷。

将宁夏电网分为四个区域, 分别为银北地区、银川、宁东地区、银南地区、中卫地区, 主要涉及三个潮流断面。通过分别计算在这三个断面发生双重故障时宁夏电网的电压稳定裕度, 具体如下:

1) 银北—银川、宁东断面(断面一): 断开大武口—银川双回线路。

2) 银川、宁东—银南断面(断面二): 断开平吉堡—青铜峡 220 以及东山—五里坡线路。

3) 银南—中卫断面(断面三): 断开小坝—中宁二厂双回线路。

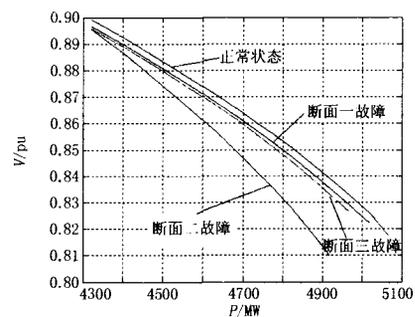


图 4 盐池 220 kV 母线 PV 曲线

Fig.4 PV curve of Yanchi 220kV bus

4.3.1 银北—银川、宁东断面故障

电网的极限传输功率为: $P_{cr} = 5\ 017.82\ \text{MW}$

全网负荷裕度: $K_p = 16.1\%$

4.3.2 银川、宁东—银南断面故障

电网的极限传输功率为: $P_{cr} = 4\ 918.9\ \text{MW}$

全网负荷裕度: $K_p = 13.81\%$

4.3.3 银南—中卫断面故障

电网的极限传输功率为: $P_{cr} = 968.142\ \text{MW}$

全网负荷裕度: $K_p = 14.95\%$

在正常运行状态下, 系统的极限传输功率为 5 068 MW, 系统负荷裕度指标为 17.26%, 三个潮流断面分别发生故障之后, 系统的极限传输功率分别下降为 5 017.8 MW, 4 918.9 MW 和 4 968.1 MW, 系统负荷裕度降为 16.1%, 13.81% 和 14.95%。可以看出, 由于网架结构的变化, 使得系统的极限传输功率发生了变化, 进而系统的负荷裕度有了很大的降低, 即系统带负荷的能力大为减弱。在这样的运行方式下, 系统电压稳定水平受到了威胁, 一旦发

生负荷的快速迅猛增长, 可能导致系统在来不及采取的措施的情况下, 易发生电压失稳事故。

表 4 无功裕度

Tab.4 Reactive margin

序号	银北—银川、宁东断面故障		银川、宁东—银南断面故障		银南—中卫断面故障	
	母线名称	无功裕度/Mvar	母线名称	无功裕度/Mvar	母线名称	无功裕度/Mvar
1.	盐池 220	177.97	盐池 220	151.58	盐池 220	177.66
2.	迎水桥 220	469.74	灵州 220	349.32	迎水桥 220	342.4
3.	五伏 220	472.37	东山 220	389.61	中二 B220	415.66
4.	黄河 220	492.31	五伏 220	404.61	关帝 220	419.84
5.	惠农 B220	534.25	黄河 220	417.92	恩和 220	430.8
6.	潮湖 220	537.86	惠农 B220	445.52	古城 220	452.18
7.	灵州 220	541.48	潮湖 220	448.29	五伏 220	481.94
8.	落石滩 220	541.92	落石滩 220	453.68	黄河 220	500.77
9.	大武口 B220	545.49	正谊 220	457.09	灵州 220	531.25
10.	正谊 220	545.55	步桥 220	458.53	惠农 B220	541.39

从表 4 中可以看出, 当断面发生故障时, 各节点的无功裕度发生了不同程度的变化, 断面一发生故障时, 相对于正常状态排名中的前十位, 节点无功裕度略有下降, 但整体排序上变化不大。断面二发生故障时, 银南地区向银川送电受到较大影响,

前十位节点无功裕度下降较大, 其中东山、灵州一带无功裕度下降较快。断面三发生故障时, 可以明显看到中卫地区迎水桥、中二、关帝、恩和无功裕度迅速下降, 形成新的薄弱区域。

表 5 综合灵敏度

Tab.5 Synthetical sensitivity

序号	银北—银川、宁东断面故障		银川、宁东—银南断面故障		银南—中卫断面故障	
	母线名称	L_i	母线名称	L_i	母线名称	L_i
1.	正谊 220	6.38917	盐池 220	8.38047	盐池 220	6.91721
2.	小坝 220	5.599168	正谊 220	4.636195	正谊 220	3.945119
3.	盐池 220	5.160502	新城 220	3.274427	五里坡 220	3.735709
4.	东山 220	2.266859	小坝 220	3.143263	东山 220	3.063768
5.	新城 220	2.210742	东山 220	3.090797	芦花 220	3.000481
6.	掌政 220	2.189794	大武口 B220	2.396796	新城 220	2.701277
7.	芦花 220	2.186765	黄河 220	2.337772	恩和 220	2.321558
8.	平西 220	2.09982	掌政 220	2.186933	掌政 220	2.262227
9.	关帝 220	2.032109	芦花 220	2.182952	银川 220	2.214762
10.	步桥 220	2.022152	平吉堡 220	1.996136	平西 220	2.154502

表 5 列出了三个断面分别发生故障时各节点综合灵敏度的排序, 从表中可以看到, 断面一发生故障时, 相对于正常状态, 进入前十的节点并没有太大变化, 这是因为银北与银川断面有七条联络线, 发生双重故障后银北地区仍然能够通过其它五条线路向银川地区供电。断面二发生故障时, 平吉堡、掌政、东山等节点的综合灵敏度及其排名上升较快, 盐池灵敏度数值增加较多, 说明这一断面故障对银川、宁东地区稳定性有较大影响, 银南地区向银川、宁东的供电受到较大影响。尤其对于盐池节点, 在这种运行方式下其电压稳定性更加恶化, 从而引发了全网的电压稳定问题。断面三发生故障时, 银南地区五里坡灵敏度排名上升较快, 同时, 灵敏度较

大节点向芦花、新城、掌政、银川等银川区域内节点集中, 这说明, 受到中卫地区向银南供电联络线路故障影响, 银南对银川地区的电源支撑能力减弱, 从而对银川和银南地区的电压稳定性都产生了一定影响。

4.4 线路和发电机出现单一故障

主要研究了以下两种单一故障的情况: 220 kV 及 330 kV 线路出现单一故障, 计算结果见表 6; 宁夏地区一台关键发电机故障的情况, 计算结果见表 7。

4.4.1 单回线故障

根据故障严重性排序结果, 对最为严重的六种

故障状态下的宁夏电网进行稳定性计算,如表 6。

表 6 单回输电线路故障电压稳定裕度

Tab. 6 Stability margin in single line fault

故障线路	功率极限/MW	裕度百分比
关帝—古城	4968.142	14.95%
大武口—一步桥	5017.824	16.1%
正谊—一步桥	5068	17.26%
宁安—固原	5017.824	16.1%
关帝—迎水桥	5068	17.26%
石二—陶乐	5068	17.26%

4.4.2 一台关键发电机退出运行

表 7 一台发电机故障全网电压稳定裕度

Tab. 7 Stability margin in one generator fault

故障发电机	功率极限/MW	裕度百分比
石二	4968.142	14.95%
马莲台	4918.953	13.8%
中二	5017.824	16.1%
大坝	4968.142	14.95%

仿真表明,一台关键发电机退出运行对全网的电压稳定会产生较大影响,尤其是马莲台电厂的一台发电机退出将导致全网的负荷裕度下降 3.46 个百分点,如果伴随有重要线路故障以及负荷的突然增加,将会使全网的电压稳定性严重恶化。

5 结语

根据宁夏的实际运行情况,采用裕度分析法和灵敏度分析法等手段,对宁夏电网的电压稳定性状态进行了详细的分析,主要研究了宁夏电网的关键线路和发电机出现永久故障而停运时的系统稳定裕

度。基于这些研究,给出了宁夏电网在电压稳定性方面存在的主要问题和相应的薄弱环节,为宁夏电网的改造和更为稳定的运行,提供了有益的信息。

参考文献

- [1] 2006 年度宁夏电力系统运行方式[Z].宁夏电力公司,2006.
Ningxia Power Grid Operation Regulation in 2006[Z].Ningxia Electric Power Corporation,2006.
- [2] Power System Simulator for Engineering (PSS/E) Users Manual[Z].2004.
- [3] 晏璐.基于BPA的北京电网电压安全稳定分析(硕士学位论文)[D].北京:华北电力大学,2005.
YAN Lu.Research on Voltage Safety and Stability of Beijing Electric Network Based on BPA,Thesis[D].Beijing:North China Electric Power University,2005.
- [4] 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. Voltage Stability and Its Control in Power System[M]. Beijing:China Electric Power Press,2004.

收稿日期:2007-03-23;

修回日期:2007-06-11

作者简介:

卢继平(1960-),男,博士,副教授,研究方向为电力系统自动化和电力系统继电保护;

孙华利(1983-),男,硕士研究生,研究方向为电力系统电压稳定;E-mail:shl2113@163.com

袁湘宁(1962-),男,硕士,高级工程师,从事电力市场交易管理工作。

(上接第 20 页 continued from page 20)

- XIN Cheng-shan. The Method of Equivalent Circuit Deriving for AT-fed Power Supply System[J]. Electric Railway,1999,(1):17-20.
- [5] 池云莉,何天键,梁嘉杰.电气化铁道系统概率潮流算法研究[J].电气化铁道,2004,(6):4-20.
CHI Yun-li, HE Tian-jian, LIANG Jia-jie. Research on Probabilistic Load Flow Algorithm of Electrified Railway[J]. Electric Railway,2004,(6):4-20.
- [6] Hill R J, Cevik I H. On-line Simulation of Autotransformer-fed AC Electric Railroad Traction Networks[J]. IEEE Trans on Veh Technol, 1993,42(3):365-372.
- [7] His P H, Chen S L, Li R J. Simulating on-line Dynamic Voltages of Multiple Trains Under Real Operating Conditions for AC Railways[J]. IEEE Trans on Power

Systems, 1999, 452-459.

- [8] Lee S H, Kim J O, Jung H S. Analysis of Catenary Voltage of an AT-Fed AC HSR System[J]. IEEE Trans on Veh Technol, 2004,53(6):1856-1862.

收稿日期:2007-03-14;

修回日期:2007-04-27

作者简介:

郭东(1982-),男,硕士研究生,研究方向为轨道交通牵引供电系统;E-mail:gdong_110@163.com

杨健维(1983-),女,硕士研究生,主要研究方向为电力系统继电保护;

何正友(1970-),男,教授,博士生导师,主要从事信号处理和信息理论在电力系统故障诊断中的应用、新型继电保护原理、配电网自动化等方向的研究工作。