

## 电压失稳预防校正控制初探

孙静<sup>1</sup>, 张斌<sup>2</sup>, 杜明星<sup>3</sup>(1. 北京航空航天大学自动化科学与电气工程学院, 北京 100083; 2. 陕西省电力公司调度中心, 陕西 西安 710048;  
3. 安康供电局, 陕西 安康 725000)

**摘要:** 国内外重大停电事故的发生进一步显示了研究电压稳定问题的重要性, 其主要研究目的之一是探求预防电压失稳的控制策略。首先介绍了预防电压失稳的常用控制措施及其功能特点, 然后提出在工程应用中预防电压失稳的控制方案, 最后利用 VSAT 仿真工具对 BCH (B.C. Hydro) 系统进行了电压稳定仿真分析。仿真结果进一步验证了研究电压失稳的预防校正控制措施是一项具有重要意义的工作。

**关键词:** 电力系统; 电压稳定; 控制措施; 预防校正控制; 紧急控制

## Study on preventive and corrective control of voltage instability

SUN Jing<sup>1</sup>, ZHANG Bin<sup>2</sup>, DU Ming-xing<sup>3</sup>(1. School of Automation Science and Electrical Engineering, Beihang University, Beijing 100080, China;  
2. Dispatching Center of Shaanxi Electric Power Corporation, Xi'an 710048, China;  
3. Ankang Power Supply Bureau, Ankang 725000, China)

**Abstract:** The importance of voltage stability research is further recognized from the fact of some severe and widespread blackouts, and one of the research purposes is to explore control measures for preventing voltage instability. In this paper, general control measures to prevent voltage instability and their functions are introduced firstly. Then the controlling strategy to prevent voltage instability in applications is proposed. And finally the simulation of voltage stability based on BCH (B.C. Hydro) system is carried out by VSAT analytical tool. The simulating results testify that the study on preventive and corrective control measures for voltage instability is an important and valuable work.

**Key words:** electric power systems; voltage stability; control measures; preventive and corrective control; emergency control

中图分类号: TM712 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2007)17-0052-06

## 0 引言

电力网络的大范围互联使原本复杂的大规模非线性电力系统的稳定性分析更为困难。近些年来国际上发生的严重的电压崩溃事故让电力系统研究和运行人员更加意识到了电压问题对电力系统安全运行的重要性。目前对电压问题的研究方向主要有电压失稳机理研究、电压稳定安全指标的计算、防止电压失稳事故的控制措施研究以及电压稳定与功角稳定之间的联系等等。虽然电压稳定研究还没有形成统一的理论体系, 但是在理论研究方面<sup>[1~11]</sup>和应用方面都取得了很大的进展<sup>[12]</sup>。

所有电压稳定研究的最终目的之一就是在系统发生电压失稳时如何快速而有效地做出相应的决策, 来防止事态的进一步发展, 不至于造成电压崩溃, 从而给人民生活带来不便和经济损失。这首先

需要探讨电压崩溃的机理以及它与系统中其它问题的相互联系<sup>[7~11]</sup>, 从而得到相应实用而有效的静态和动态的安全评估指标, 然后根据评估指标判定系统的稳定性, 并给出对应失稳的优化预防校正控制措施, 严重情况下需要给出紧急控制策略。虽然现在许多研究人员对电压稳定进行研究, 并且取得了令人瞩目的成果, 但是相对功角稳定研究来讲, 对于电压稳定缺乏全面而深入的认识, 并且没有形成成熟的理论体系和分析方法<sup>[4,5]</sup>。另外, 所有的理论和研究方法需要面向实际工程应用需要, 因此对各种安全评估指标和控制策略的准确性、快速性及实用性都提出了更高的要求。

本文首先介绍了三种预防电压失稳控制措施的功能, 并给出了预防校正控制方案的流程图, 然后指出本文所采用的 VSAT 电压安全分析工具的主要功能特点和预防校正控制策略搜索步骤等, 最后对

BCH (British Columbia Hydro) 系统进行了仿真验证分析。

## 1 预防电压失稳的控制方法

一旦判断系统电压失稳或电压不安全,则在此种情况下,需对系统进行预防校正控制,如果系统进一步恶化,就需要采取紧急控制措施。故一般分为预防、校正和紧急控制措施三种。

预防措施在规划阶段完成,主要研究系统的无功补偿问题;校正措施在系统的运行阶段执行,其作用是防止电压失稳状态的出现,该措施主要依赖于系统的无功-电压调整,如电压无功优化控制;紧急措施则是在系统电压失稳过程就应该开始实施,这时校正措施已无法阻止电压失稳的进一步发展,为避免电压崩溃而必须采取紧急措施,其主要手段为甩负荷,是防止电压不稳定问题的第三道防线。

### 1.1 三种控制措施的功能

#### 1.1.1 预防措施

对于电压失稳的对策之一是系统要有比较充足的无功备用,一般都要在负荷中心就近配备无功电源和在关键母线处配有无功补偿器等。由于并联电容器/电抗器存在无功出力随负荷点电压下降而减少的不利现象,最好是采用先进的动态无功补偿装置,可解决动态情况下的无功快速跟踪补偿问题。无功补偿装置的容量、安装地点和类型的选择必须保证系统在最大负荷水平下能够满足电压稳定运行要求。

#### 1.1.2 校正措施

如果对于所有故障,所采用的预防控制不足以使运行点保持电压安全运行,进而将对每一严重故障寻找必须的校正控制措施,并在故障发生后采取这些校正控制措施(如投入电容器和切负荷等)来防止系统电压不安全运行情况的进一步恶化。

目前常用的可行校正控制措施有:发电机和 SVC 电压控制、电容器和/或电抗器的投入、有载调压变压器(OLTC)分接头调节以及切负荷等。可见,可选择的控制措施方式多样化,故对于每一种电压失稳所需采用的校正控制策略是这几种控制措施协调组合的结果,因此最优控制方案的确定也是一个比较有意义的研究问题。

#### 1.1.3 紧急措施

对于严重故障,仅靠预防校正控制难以确保电压稳定性,这时需要采用紧急控制措施,如切负荷、OLTC 紧急控制等。切负荷控制要求具有快速的决策能力、满意的控制精度和较好的适应能力,常采用的试凑法由于需要进行大量的暂态稳定性计算,

难以取得快速的最佳控制效果。OLTC 紧急控制包括分接头调节闭锁和分接头逆调节。

在某些预想的事故情况下,通过采取对应的预防控制措施可以使系统仍然保持稳定。由于不管扰动发生与否,预防控制措施一直实施着,故从经济和应用角度来看不是最优的控制方式。另外,对于较严重故障来说,仅靠预防控制难以保证电压稳定性,这时需要采用校正控制策略,更严重情况下,得采取紧急控制措施。

### 1.2 预防电压失稳的控制过程

具体的预防电压失稳的控制过程如图 1 所示。

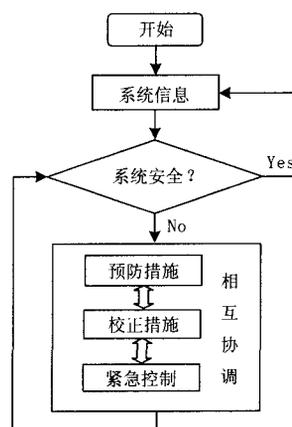


图 1 预防电压失稳的控制流程图

Fig.1 Control procedure for preventing voltage instability

从这个流程图中可以看出,预防电压失稳的控制需要三部分:

- 1) 系统信息的获取;
- 2) 电压失稳的判定;
- 3) 控制措施的确定。

下面分别进行详细讨论。

#### 1.2.1 系统信息的获取

系统信息指的是系统的运行状况信息,这是进行电压稳定分析的必需数据信息,如系统的潮流信息以及对应的动态数据信息(若对系统进行动态电压稳定分析的话,必须提供),等等。对于离线分析,系统信息可以根据实际运行需要而提供的典型网络结构的潮流数据和动态数据,以此来分析对应系统的电压稳定性;也可以是从当前实际运行系统(如 EMS 等)中的某一典型断面得来的潮流信息。而对于在线分析,系统信息主要是从当前运行系统(如 EMS 等)中传送过来的实时断面数据。系统信息的完整性和准确性决定着电压稳定分析结果的质量。

#### 1.2.2 电压失稳的判定

电压失稳的判定也就是对于电压稳定性的评

估, 涉及到确定一种有效而准确的安全评估指标。目前研究人员提出了许多静态和动态安全评估方法, 它们各具优缺点, 但还没有一个完全精确、实用且被完全认可的安全指标。

运行人员不仅需要知道电压稳定与否, 还需要了解电压稳定的程度。建立高精度且易于计算的电压稳定指标将能提供系统电压稳定裕度信息。电压稳定指标一般分为裕度指标和状态指标两类。已提出的安全指标主要有: 各类灵敏度指标、潮流雅可比矩阵奇异指标、最小模特征值指标、负荷状态空间中潮流多解间的距离指标、临界电压指标和裕度指标  $\Delta P$ 、 $\Delta Q$  和  $\Delta V$ 。裕度指标的线性性很好, 但涉及临界点的求取, 因为潮流雅可比矩阵奇异给计算带来困难。状态指标只用到当时系统运行状态信息, 计算简单, 但线性性差。

### 1.2.3 预防电压失稳的控制措施的确定

首先试图找到最佳的预防控制, 这些控制动作将在事故发生前实施。如果对于所有故障所确定的预防控制不足以使运行点保持电压安全运行, 将对每一严重故障寻找必须的校正控制措施, 并在故障发生后采取这些校正控制措施(如投入电容器和切负荷等)来防止系统电压失稳情况的进一步恶化。如果校正控制还不能保证系统电压稳定运行, 则需要采取紧急电压控制措施。

控制措施的选择也是一个复杂的问题, 其中既需要电压失稳机理的深入认识以及电压稳定评估等方面的进一步完善, 也涉及到控制和数学等理论应用以及计算机技术的发展等多学科的交叉。

## 2 利用 VSAT 分析工具来确定电压失稳事故预防校正策略

本文主要利用加拿大 Powertech 公司开发的 DSA PowerTools ([www.powertechlabs.com](http://www.powertechlabs.com)) 计算分析软件中的 VSAT 来对系统进行电压失稳事故预防策略研究。下面主要介绍此计算软件能够实现的几个重要功能, 并给出其实现预防策略搜索的过程。

### 2.1 VSAT 分析软件的功能特点

#### 2.1.1 模态分析

Gao、Morison 和 Kundur 提出的模态分析或特征值分析方法与灵敏度分析法类似, 但模态分析提供了更多的信息。每一运行条件下的电压稳定特性可通过计算一组简化雅可比矩阵  $J_R$  的最小特征值以及它们所对应的特征向量来求得<sup>[13]</sup>。每一特征值以及对应的特征向量决定了电压稳定的一种模式。由特征值可确定这个模式电压稳定与否。通过计算  $J_R$  的特征向量而得到的母线、支路和发电机的参与

情况可表明物理元件与每个模式的关联度。如果求得模式具有小的且负的特征值的话, 则说明此模式是电压稳定临界模式。在电压稳定临界模式下的母线、支路和发电机参与情况可用于确定预防校正控制措施实施的地点。

#### 2.1.2 用灵敏度方法决定控制策略

灵敏度计算在电力系统分析中占据着很重要地位, 是电力系统网络设计、电力系统规划以及电力系统分析与控制的重要基础和理论依据。灵敏度指标一般是网络中某一参量变化量与扰动量之比。在本文中采用电压安全性破坏与控制措施的比值作为灵敏度指标来搜索最优的控制方法。

#### 2.1.3 快速的故障筛选

通常情况下, 系统可能发生的故障有很多, 但其中仅少数对电压稳定是危险的。故障筛选功能就是被设计为专门识别那些比较危险的故障。VSAT 的故障筛选功能模块不使用任何近似(线性化或推断), 而是根据它们实际的电压稳定裕度来对它们进行准确的分类。

#### 2.1.4 电压稳定裕度的计算

基态和大量故障情况下的快速电压稳定裕度计算, 可以计算包含发电机容量(capability)曲线、随电压变化而变化的负荷以及不同有功调度方案的基于 V-P 和 Q-V 曲线的电压稳定裕度。

### 2.2 预防校正控制策略搜索步骤

本文主要采用灵敏度方法来搜寻最佳控制方案, 其中灵敏度指标为电压安全性破坏与控制措施之比。下面给出这个过程的实现步骤:

#### 2.2.1 预防控制

1) 如果系统的运行点本身是不稳定的(即潮流方程无解), 就需要找到对应的最佳控制措施;

2) 找到消除系统(故障前或后)电压越限的最佳控制措施;

3) 找到消除系统(故障前或后)电压稳定裕度破坏的最佳控制措施。检验每一控制措施是否造成电压越限。若是的话, 则去掉此控制措施并搜索其他可行的控制措施;

4) 找到消除系统(故障前或后)无功储备不足的最佳控制措施。检验每一控制措施是否造成电压越限或电压稳定裕度破坏, 若是, 则去掉此控制措施并搜索其他可行的控制措施。

#### 2.2.2 校正控制

如果采取可行的预防控制措施不足以消除所有稳定破坏, 单独验证每一故障情况, 并搜索最优的控制策略来消除系统的稳定破坏, 其策略搜索过程与上面的预防控制措施的搜索过程相似, 不再赘述。

### 2.2.3 紧急控制

如果预防校正控制措施均不能使系统恢复电压稳定, 则需要采取紧急控制。在紧急情况下, 断开优先级低的负荷是避免电压崩溃最常用且有效的方法。

### 3 实例仿真

本文利用 VSAT 软件对 BCH (British Columbia Hydro 的缩写, 是加拿大最大的电力公司之一) 系统某一典型仿真算例进行电压稳定性分析, 并给出系统出现电压失稳情况的电压失稳事故预防校正控制策略。此系统包括 1397 条母线和 233 台发电机, 分为 5 个地区 (area), 35 个分区 (zone)。系统地理接线如图 2 所示。

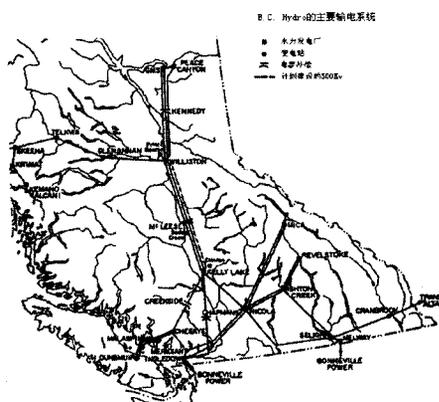


图 2 B.C. Hydro 系统的地理接线图

Fig.2 Interconnection diagram of B.C. Hydro system

一个典型的仿真算例是计算 1400 节点的东部功率传输极限, 主要分析由供电区 (包括分区 (zone) 5 和 6) 向负荷区 (主要指地区 (area) 1) 供电的负荷增长极限问题 (包括分析一些典型故障情况下的负荷增长极限)。这个典型仿真算例的示意图如图 3 所示。

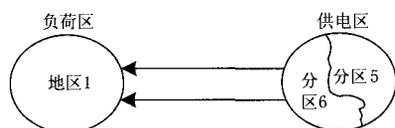


图 3 仿真算例的示意图

Fig.3 Diagram of the simulation scenario

计算结果表明, 地区 1 的负荷水平可以从基本运行情况下的 7665.8 MW 最大增加到 8265.8 MW (功率传输步长设为 100 MW), 而若再继续增加 100 MW (即到 8365.8 MW) 时则会出现某些故障情况下系统不满足电压稳定条件的情况。且再继续增长到 8380.8 MW 时系统的供电区 (分区 5 和 6)

达到了其发电上限, 并停止计算。因此, 当前系统运行状态下的功率极限是 600 MW 的输电电力。同时也显示, 负荷区的负荷水平增加到 8365.8 MW 时在某些严重故障情况下系统不能达到电压稳定要求, 故在此运行点上, 需要分别对这些故障情况下的系统确定相应的预防校正控制措施。主要工作:

1) 设定一些可行的预防校正控制措施。比如, 在此算例中, 根据系统的实际情况可采取的控制措施有: ① 切负荷。此算例中, 可在负荷区 (地区 1) 中进行切负荷操作 (第一次切除 3%、第二次切除 5%、第三次切除 10% 及第四次切除 20%), 并且仅作为校正控制方式来考虑。② 并联电容补偿。此算例中设在编号为 1300 到 2000 的母线上可投入并联电容补偿, 既可作为预防控制方式也可作为校正控制方式。

2) 最后用灵敏度方法可得到此种情况下建议的事故预防控制措施以及相应的所有设定故障情况下的校正控制策略。针对此算例所得到最终的控制策略如下:

#### <<Preventive controls>>

Device	Device ID	controlled	Pre-Value	New-Value
Shunt	1966 B1966 25.2	Admittance	10.8000	13.2000
Shunt	1863 B1863 12.6	Admittance	1.8000	11.4000
Shunt	1959 B1959 25.2	Admittance	0.0000	3.0000
Shunt	1816 B1816 12.6	Admittance	0.0000	19.2000
Shunt	1918 B1918 25.2	Admittance	0.0000	12.0000
Shunt	1915 B1915 25.2	Admittance	0.0000	5.4000
Shunt	1970 B1970 25.2	Admittance	0.0000	4.8000
Shunt	1971 B1971 25.2	Admittance	0.0000	4.2000
Shunt	1839 B1839 12.6	Admittance	0.0000	8.7000
Shunt	1906 B1906 25.2	Admittance	0.0000	3.0000
Shunt	1943 B1943 25.2	Admittance	0.0000	4.8000

#### <<Corrective control>>

Contingency: CC41  
There is no violation

Contingency: CC42

Device	Device ID	Controlled	Pre-Value	New-Value
Load	LSG 1	MW&MVAR	8663.4814	8403.5732

Contingency: CC81

Device	Device ID	Controlled	Pre-Value	New-Value
Load	LSG 1	MW&MVAR	8663.4814	8403.5732

Contingency: CC82

Device	Device ID	Controlled	Pre-Value	New-Value
Load	LSG 1	MW&MVAR	8663.4814	8403.5732

Contingency: CC87  
There is no violation

Contingency: A 4

Device	Device ID	Controlled	Pre-Value	New-Value
Load	LSG 1	MW&MVAR	8663.4814	8403.5732

Contingency: A 8

Device	Device ID	Controlled	Pre-Value	New-Value
Load	LSG 1	MW&MVAR	8663.4814	8403.5732

从上面所得的计算结果可知,在这个极限运行点(负荷水平增大到 8365.8 MW 时),在无故障时,可以在如上的 11 条母线上增加给定值的电容补偿,可以使系统达到电压稳定运行要求。并且在此运行点上,有 5 种故障情况将会破坏系统电压稳定性,若采取所给出的对应切负荷量即可使系统满足电压稳定条件。也就是说,通过采取如上所建议的预防校正控制方法即可使本仿真算例的功率传输极限再增大 100 MW(即达到 700 MW)。

下面给出系统的功率极限运行结果以及对应的预防校正控制策略(如图 4)。

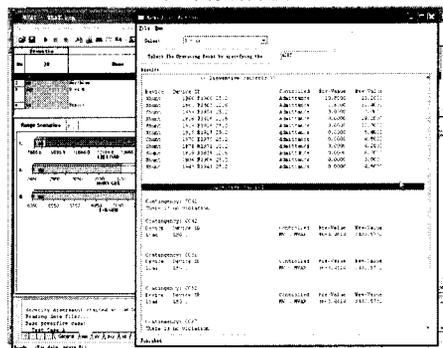
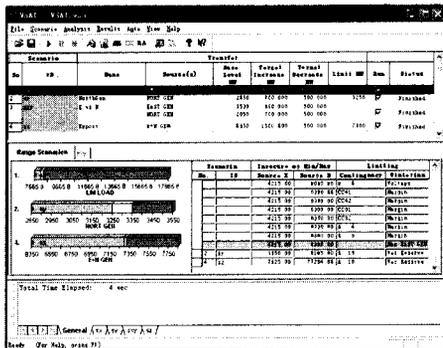


图 4 系统的运行结果显示

Fig.4 Operating results of the system

另外,下面给出系统在未采取控制措施和采取了建议的预防措施后 9 条母线上的 P-V 曲线(图 5)。

4 结论

本文在简述了预防电压失稳的控制方法及控制

方案后,又给出用于电压稳定分析的 VSAT 工具的主要功能以及预防电压失稳控制措施的搜索步骤,最后通过对 BCH(British Columbia Hydro)系统的电压稳定分析,主要给出了某一典型算例情况下的

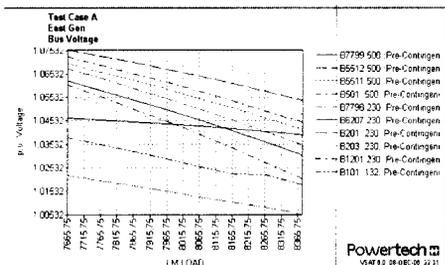
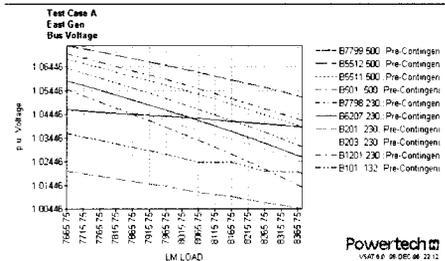


图 5 采取控制措施前后系统的 P-V 曲线

Fig.5 P-V curves with and without control measures

功率极限分析结果及在运行极限点上的基本运行情况和某些故障情况下所建议的预防和校正控制措施。从仿真结果可以看出,对于无故障情况下的系统在采取了适当的电容补偿等预防控制措施后可以增大向负荷区供电的功率,并且通过采取恰当的校正控制措施可防止系统在某些故障条件下电压失稳,从而说明了对电压失稳预防校正控制研究具有重要意义。

参考文献

[1] 张维莉. 电力系统静态电压稳定性分析与校正控制研究: [D].南京: 河海大学, 2006.  
ZHANG Wei-li. The Steady-State Voltage Stability Analysis and Corrective Control Research of Power System[D]. Nanjing: Hohai University, 2006.

[2] 李欣然, 贺仁睦, 章健,等. 负荷特性对电力系统静态电压稳定性的影响及静态电压稳定性广义实用判据[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(4): 26-30.  
LI Xin-ran, HE Ren-mu, ZHANG Jian, et al. Effect of Load Characteristics on Power System Steady-State Voltage Stability and the Practical Criterion of Voltage Stability[J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 1999, 19(4): 26-30.

[3] 傅旭, 王锡凡, 杜正春. 电力系统电压稳定性研究现

- 状及其展望[J]. 电力自动化设备, 2005, 25(2): 1-9.
- FU Xu, WANG Xi-fan, DU Zheng-chun. Survey of Power Systems Voltage Stability Study[J]. Electric Power Automation Equipment, 2005, 25(2): 1-9.
- [4] 苏永春, 程时杰, 文劲宇, 等. 电力系统电压稳定性及其研究现状(一)[J]. 电力自动化设备, 2006, 26(6): 97-101.
- SU Yong-chun, CHENG Shi-jie, WEN Jin-yu, et al. Power System Voltage Stability and Its Present Investigation (I)[J]. Electric Power Automation Equipment, 2006, 26(6): 97-101.
- [5] 苏永春, 程时杰, 文劲宇, 等. 电力系统电压稳定性及其研究现状(二)[J]. 电力自动化设备, 2006, 26(1): 97-100.
- SU Yong-chun, CHENG Shi-jie, WEN Jin-yu, et al. Power System Voltage Stability and Its Present Investigation (II)[J]. Electric Power Automation Equipment, 2006, 26(7): 97-100.
- [6] Morison G K, Gao B. Voltage Stability Analysis Using Static and Dynamic Approaches[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1993, 8(3): 589-597.
- [7] 段献忠, 何仰赞, 陈德树. 电压崩溃机理探讨[J]. 电力系统及其自动化学报, 1991, 3(2):1-6.
- DUAN Xian-zhong, HE Yang-zan, CHEN De-shu. The Research for Voltage Collapse Mechanism[J]. Proceedings of the Electric Power System and Automation, 1991, 3(2):1-6.
- [8] van Cutsem T. Voltage Instability: Phenomena, Countermeasures, and Analysis Methods[J]. Proceedings of the IEEE, 2000, 88(2): 208-227.
- [9] VU K T, LIU Chen-ching, Taylor C W, et al. Voltage Instability: Mechanisms and Control Strategies[J]. Proceedings of the IEEE, 1995, 83(11): 1442-1455.
- [10] Taylor C W. Power System Voltage Stability [M]. New York McGraw-Hill, 1994.
- [11] 张琳. 电力系统静态电压安全评估[D]. 南宁:广西大学, 2005.
- ZHANG Lin. Static Voltage Security Assessment of Power Systems[D]. Nanning: Guangxi University, 2005.
- [12] 罗玉孙, 徐泰山, 许剑冰, 等. Windows 98/NT下的 FASTEST—NARI暂态稳定分析软件包[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(18):36-38.
- LUO Yu-sun, XU Tai-shan, XU Jian-bing, et al. FASTEST-NARI Transient Stability Analysis Software Package in Windows98/NT[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(18):36-38.
- [13] Gao B, Morison G K, Kundur P. Voltage Stability Evaluation Using Modal Analysis[J]. Trans on Power Systems, 1992, 7(4):1529-1542.

收稿日期: 2007-02-09; 修回日期: 2007-03-31

作者简介:

孙静(1975-), 女, 博士, 主要从事混杂电力系统的综合集成建模与智能优化控制及电力系统稳定性分析方面的研究工作; E-mail: speez@126.com

张斌(1976-), 男, 硕士, 从事电网调度、电能质量分析及电压无功控制的研究工作;

杜明星(1975-), 女, 大专, 助理工程师, 长期从事变电运行工作。

(上接第 34 页 continued from page 34)

参数地址、选择合适的功能码并且注意特殊应用功能的实现等方面问题, 就可以在电力系统中更好的使用 Modbus 协议, 从而使产品的互操作性更好, 更具有市场竞争力。

#### 参考文献

- [1] GB/Z 19582.1-2004 基于 Modbus 协议的工业自动化网络规范 第 1 部分: Modbus 应用协议[S].  
GB/Z 19582.1-2004, Modbus Industrial Automation Network Specification Part 1: Modbus Application Protocol[S].
- [2] GB/Z 19582.2-2004, 基于 Modbus 协议的工业自动化网络规范, 第 2 部分: Modbus 协议在串行链路上的实现指南[S].  
GB/Z 19582.2-2004, Modbus Industrial Automation Network Specification Part 2: Modbus Protocol Implementation Guide Over Serial Link[S].
- [3] GB/Z 19582.3-2004, 基于 Modbus 协议的工业自动化网络规范, 第 3 部分: Modbus 协议在 TCP/IP 上的实现指南[S].  
GB/Z 19582.3-2004 Modbus Industrial Automation Network Specification Part 3: Modbus Protocol Implementation Guide Over TCP/IP[S].
- [4] 贺春, 任春梅, 张冉. MODBUS 协议在电动机保护装置中的应用[J]. 继电器, 2006, 34 (12): 73-76.  
HE Chun, REN Chun-mei, ZHANG Ran. Application of MODBUS Protocol in Motor Protection Equipment[J]. Relay, 2006, 34 (12): 73-76.

收稿日期: 2007-01-04; 修回日期: 2007-05-17

作者简介:

张海源(1973-), 男, 硕士, 主要研究方向为电力系统电气工程、通信规约及规约测试;

任春梅(1980-), 女, 本科, 主要研究方向为电力系统规约测试和系统测试; E-mail: chunmeir@ncqtr.com

张冉(1982-), 男, 本科, 主要研究方向为电力系统规约测试和系统测试。