

# 交直流并联系统的电压稳定研究综述

张建设,张尧,张志朝,武志刚

(华南理工大学电力学院,广东 广州 510640)

**摘要:** 多直流馈入输电系统的出现给电压稳定研究带来了全新的课题,电压失稳有可能成为这类电网安全稳定运行的最大威胁。该文就交直流并联输电系统的电压稳定问题理论、方法和对策作出机理式探讨,按照电压稳定的静态和动态分类方法分别介绍了国内外有关单馈入和多馈入直流系统电压稳定性的研究现状,评价了研究方法,展望了未来研究方向和研究重点。

**关键词:** 交直流并联; 多直流馈入; 电压稳定; 分岔; 电压崩溃

**中图分类号:** TM712; TM72      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1003-4897(2005)02-0079-06

## 0 引言

在现代大电网中,随着电力系统联网容量的增大和输电电压的提高,输电功率的变化和高压线路的投切都将引起很大的无功功率变化,系统对无功功率、电压的调节和控制能力的要求越来越高。在某些紧急条件下,当系统无功功率储备不足时,会发生电压崩溃而使电力系统瓦解。近30年来,法国、比利时、瑞典、日本和美国等国都发生了因电压崩溃而引起的大停电事故<sup>[1]</sup>,类似事故在我国也多次发生<sup>[2]</sup>。因而,电压稳定问题引起许多国家电力部门的重视。

电力系统正朝着大电网大机组、超高压远距离、交直流并联输电的方向发展。与交流输电相比,直流输电具有非同步联络能力强、线路输送容量大、网损小、功率容易控制等优点<sup>[3]</sup>,在远距离大容量输电和大区联网两方面得到了广泛应用,世界范围内不断涌现出高压直流输电工程。天广直流输电工程的投运,使南方电网成为我国第一个交直流并联运行的互联电力系统,标志着我国的电力系统和超高压输电技术进入了一个新的发展阶段<sup>[4]</sup>。随着三峡工程的兴建和贯彻中央“西电东送、南北互补、全国互联”发展战略,我国将陆续兴建一批直流输电工程,届时将出现多直流馈入输电系统(Multi- In-feed Direct Current, MDC),即多条直流输电线路落点于同一交流电力系统的局面。到2004年和2005年,三峡至广东惠州、贵州安顺至广东肇庆的两条直流输电线路也将双极投入运行,将有两条嵌于同步

网和一条嵌于异步网中的直流输电线路落点于广东电网,届时南方电网不但是交直流并联运行,而且直流落点也都集中在广州附近的区域内,复杂情形在世界上也属罕见。

传统的交流电力系统中有关电压稳定问题尚未完全解决,多馈入交直流并联系统的复杂性又给电压稳定研究带来了全新的课题,电压失稳将成为这类电网安全稳定运行的最大威胁。然而,目前理论界对含有多直流馈入点的交直流并联系统可能面临的电压稳定问题却缺乏有针对性的理论分析和方法研究。本文从此角度展开讨论。

## 1 交直流并联系统电压稳定的研究

### 1.1 研究现状

电力系统经历了纯交流系统、单直流馈入和多直流馈入系统等发展阶段,因此国内外学者基本也是按这一次序研究电力系统的电压稳定性。

电压稳定是当前电力系统研究分析的热点之一。近年来,传统的纯交流系统的电压稳定研究已取得了一系列成果。根据研究对象、使用的数学模型和工具、考虑的时间框架的不同,电压稳定分析方法有不同的分类方法。按照数学模型分类主要有两类,一类是基于潮流方程的静态分析方法<sup>[5]</sup>,如潮流多解法、可行域分析法、最大功率法和灵敏度分析法等;另一类是基于微分方程的动态分析方法<sup>[6,7]</sup>,如小扰动分析法、时域仿真法、能量函数法和分岔混沌理论等。本文即按此分类来介绍交直流并联系统的电压稳定研究。

### 1.2 单直流馈入系统电压稳定性分析

直流系统的换流设备在换流过程中需要消耗大量的无功功率,一般情况下,整流侧所需无功约为所

**基金项目:** 国家自然科学基金重点项目(50337010); 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20020561004)

传输直流功率的 30% ~ 50%, 逆变侧则为 40% ~ 60%<sup>[3]</sup>, 这给电力系统带来了不利的负荷特性。由于电压失稳往往因系统无功不足引起, 因此与弱交流系统相连的 HVDC 系统是引起电压不稳定的一个因素。其中, 具有长距离直流输电线路的逆变站存在的问题最严重<sup>[1]</sup>。由于直流多种多样的控制方式和运行方式, 寻求一种评价交直流系统电压稳定性的方法相当复杂。为此, 国内外学者做了大量的研究工作, 取得了一定的理论成果<sup>[8-14]</sup>。

### 1.2.1 单直流馈入系统电压稳定的静态分析

静态分析方法不用求解微分方程, 因此分析起来相对简单, 主要有以下几种方法:

1) 最大功率法。可以借鉴求取纯交流系统  $P-V$  曲线的最大功率法来研究交直流并联系统的静态电压稳定性。当直流电流增加时, 直流功率随之增加, 但当达到某点时, 进一步增加直流电流会降低直流功率, 因为无功消耗的增加使交流电压及直流电压下降, 以致直流电压下降的程度大于直流电流增加的程度, 因而存在最大直流功率值, 相应有  $P_d - V_{ac}$  和  $P_d - I_d$  鼻形曲线<sup>[1]</sup>。可见, 受所联交流系统特性影响, 直流输送功率存在上限, 越限就不能输送, 该上限由交流系统的短路容量确定。

2) 短路比 (Short Circuit Ratio, SCR) 法。该方法用交流系统的强弱来衡量换流站交流母线的电压稳定性, 也就是把直流输送功率作为换流站交流母线的负载, 以短路比的大小来衡量交流系统带负载能力的强弱。文献 [8] 采用了一种快速评估交直流系统电压稳定性的方法, 文中基于不同 SCR 时直流功率传输能力, 认为交流母线  $SCR < 2$  的系统为极弱系统,  $2 < SCR < 3$  的系统为较强系统,  $SCR > 3$  的系统为强系统。该方法虽然可以计及换流站的无功补偿, 但无法考虑交流系统的无功功率特性和直流系统的控制特性对静态电压稳定性的影响, 所得结果只具有参考价值。

3) 电压稳定指标 (Voltage Stability Index, VSI) 判据法<sup>[9]</sup>。VSI 定义为传输一定直流功率下流出交流换流母线的无功对该处电压的导数。VSI > 0, 换流站交流母线电压静态稳定, 反之, 静态不稳定。该方法不需对雅可比矩阵进行大的修改, 实现较为容易, 且由于加入了直流控制方式, 因此可以对不同控制方式下的稳定性进行比较。但该方法并没有计及实际直流运行中的状态转换, 同时给出的 VSI 指标只能定性地判断系统是否稳定而不能确切地指出离失稳还有多远。

4) 延拓法。该法利用预测校正技术 (如切线法预测、局部参数法校正) 来搜索包含负荷参数的潮流方程解的路径, 通过控制适当的步长, 避免静稳临界点处雅可比矩阵奇异, 从而求出静态电压稳定极限。常见的连续潮流法便是一种延拓法。文献 [10] 提出了建立在延拓法基础上的交直流系统电压稳定的耦合分析方法, 仿真表明换流站无功补偿有利于电压稳定, 以 SVC 效果最好。直流输电对电压稳定的影响很复杂, 在合适的控制下, 交直流输电比单纯直流输电有利于电压稳定。

5) 崩溃点法。延拓法只能按给定负荷增长方式计算出静稳极限, 结果偏乐观。崩溃点法利用崩溃点处零特征根对应的左特征向量作为新的控制方向, 重新修正负荷增长方式迭代求解, 直至获取所有负荷增长方式下最临近崩溃的功率极限点。文献 [11] 把此法应用于交直流混合系统中, 由网络节点电位方程组及换流器控制方程推导出直流状态量与给定控制量及交流换流母线电压间的关系方程组, 在此基础上求出各直流系统变量, 再计算出交直流系统间的耦合关系, 然后用崩溃点法来计算系统的功率裕度。

### 1.2.2 单直流馈入系统电压稳定的动态分析

交直流并联系统是一个相当复杂的非线性动态系统, 其行为由一组非线性代数方程和微分方程来描述, 因而基于静态或准稳态模型的假设并不总能奏效。例如, 故障后的暂态过程中, 交流电压是不对称的且有可能畸变, 这就不适合使用准稳态模型了; 换相失败过程中阀的触发导通以及换流器动作行为均需要考虑动态模型<sup>[6]</sup>。在电压稳定研究中最近才开始考虑系统动态特性的影响, 如同步机、励磁系统、负荷、HVDC、分接头有载调节和自动发电控制等的动态特性, 这其中又以负荷特性和参数、无功电源和调压设备的动态特性对电压稳定性影响最大。考虑动态的研究方法有:

1) 特征分析法。属于小干扰稳定分析研究范畴, 该法通过求线性化状态方程的系数矩阵的特征值和特征向量, 进而计算特征值的相关因子和相关比, 可提供与系统稳定有关的大量有价值信息, 有助于分析失稳的原因, 找出预防失稳的对策, 已成为电力系统动态电压稳定分析的有效工具之一。

文献 [12] 在特征分析法的基础上, 建立了动态电压稳定分析的数学模型, 可考虑发电机、动态负荷、OLTC、HVDC 等动态元件, 并提出了完整的判断动态电压稳定性的算法。该算法还应用在一个 6 机

交直流并联系统中,研究了直流系统运行方式及控制参数对动态电压稳定性的影响。

2) 时域仿真法。一般用来考察大扰动下系统的暂态或中长期电压稳定性。该法将系统各元件模型根据元件间拓扑关系形成全系统模型,以稳态工况或潮流解为初值,求扰动下的数值解,即逐步求得系统各节点电压随时间变化的曲线,观察所设定域内电压变化情况。工程上的电压失稳判据一般是所考察节点电压(特别逆变站交流换流母线电压)幅值低于某一门槛值并持续一段时间(如 1 s),此门槛值没有明确的规定,根据需要一般可取 0.8 pu 或 0.75 pu。

该法还可仿真研究直流控制功能对换流站无功功率消耗和电压失稳的影响,如直流调制、依赖于电压的电流指令限制器(Voltage Dependent Current Order Limiter, VDCOL)等。

利用直流系统所连交流系统中某些运行参数的变化,对直流功率、直流电压、换流器吸收的无功功率进行自动调整,能发挥直流系统的快速可控性,改善交流系统的电压稳定性。文献[4]第一次采用了与已投入运行的天广直流控制保护系统基本一致的仿真模型,研究了天广非线性直流调制对改善交直流并联系统暂态稳定性的作用,并和常规的双侧频率功率调制作了比较,发现两种调制均能快速抑制交流系统的电压波动。

研究发现,VDCOL的整定值和动态特性对电压稳定性相当关键,低电压时减小直流电流是一种重要控制<sup>[1]</sup>。文献[13]仿真了太平洋 HVDC 连线 Cellib 换流站特性,发现无 AC-VDCOL 时直流电压崩溃;而采用 VDCOL 控制后可降低换流站 400 MW 的无功需求,使故障后直流电压迅速恢复。

3) DMPC (Dynamic Maximum Power Curve) 法。与静态分析的最大功率法不同,该法考虑发电机和励磁机参数、直流线路和控制装置动态等动态模型对最大传输直流功率的影响,当达到最大直流功率后,继续增加直流电流则可能导致电压崩溃或使运行状态恶化。文献[14]在 QMPC (Quasi - static Maximum Power Curve) 基础上提出考虑 HVDC 系统动态模型来求取 DMPC。该文根据直流电流指令调节速率把 DMPC 又分为快速 DMPC 和缓慢 DMPC 两种类型,并分析了系统参数对 DMPC 和 QMPC 的影响。必须指出,该文所得结论是针对其所提出简化单馈入模型的,对实际多馈入系统是否有鲁棒性还有待验证。

4) 分岔混沌理论<sup>[15~18]</sup>。分岔混沌理论广泛用于描述随参数变化的动态系统的轨迹结构的性质和变化。在分岔点处,系统参数变化导致失稳。大致的观点是:电力系统是强的非线性动力系统,重载情况下它的非线性特征越发明显,于是电压稳定问题与各种分岔(静态的、动态的、局部的、全局的)广泛联系起来。研究较多的是鞍结分岔(Saddle Node Bifurcation, SNB)、Hopf 分岔(Hopf Bifurcation, HB)和倍周期分岔(Period Doubling Bifurcation, PDB)等。一般认为,SNB 导致电压单调失稳,HB 导致电压周期振荡,PDB 的相继发生最后产生混沌<sup>[17,18]</sup>。分岔理论是对电压失稳机理的新解释,但目前为止,还未见有文献运用该法研究交直流并联系统的电压稳定性。

### 1.3 多直流馈入系统电压稳定性分析

“十五”末期,西部和三峡外送广东的电力将新增 1000 万 kW,将有 3 条直流输电线路同时落点于受端系统广东电网中,该系统是典型的联于弱交流系统的 MDC 系统,目前针对类似该系统模型的电压稳定性研究还比较少见。

与单直流馈入输电系统相比,MDC 系统在具有输送容量大和运行方式灵活的优点的同时,也将带来一系列技术和管理上的特殊问题,主要有以下几方面<sup>[19]</sup>:

1) 交直流系统间的相互作用更为复杂,不利情况下,交流系统中的某一故障可能导致多个换流站同时发生换相失败,将会威胁到整个系统的电压安全稳定运行。

2) 交流系统故障及切除后,过快的直流功率恢复使逆变站吸收大量的无功功率,有可能削弱电网的电压和无功支撑能力并引起系统发生暂态电压失稳,因此恰当的功率恢复方案(时间、地点、数量)需要研究。

3) 可采取的直流调制手段、待选的调制信号和控制策略更多,各直流系统的控制器间相互作用较强。如何选取恰当的调制方案并协调控制器间的作用以改善系统电压稳定性需仔细考虑。

由于落点集中的多个换流站间紧密的电气耦合,系统的无功功率调节问题和电压稳定问题远较纯交流系统和单馈入系统突出和复杂,它们的暂态行为会对互联电网的安全稳定运行产生重要影响。例如,在南方电网的受端系统广东电网中,各直流输电系统馈入到其中的功率均较大,各逆变站交流换流母线间的电气联系均较强,因而导致交直流系统

之间、直流与直流系统之间的相互作用很强。不利情况下,某些不良的相互作用可能会导致南方电网的电压稳定性下降,甚至会威胁到该网的安全稳定运行。

目前,已有少量文献涉及到 MDC 系统电压稳定性的研究。

Denis 等人基于雅可比矩阵特征值分解法研究了 MDC 系统的电压稳定性,本质上属于静态稳定研究范畴。文献 [20] 构造了简化双直流馈入模型系统,定义了基准功率比 (Power Base Ratio, PBR)、有效短路比 (Effective Short Circuit Ratio, ESCR) 的概念;利用特征值分解技术,推出了简化系统临界电压失稳的信息,并用 SMPOW 软件仿真了构造模型,证实了结论。针对上述模型,Denis 还在文献 [21] 中提出了标准最大功率曲线法 (Standard Maximum Power Curve, SMPC) 和模型最大功率曲线法 (Modal Maximum Power Curve, MMPC)。仿真发现该系统的 MPC 类似于单馈入系统,SMPC 法能给出特定系统或局部稳定评价,MMPC 法能给出广义系统或全局稳定评价,两者不等价,MMPC 法结果更趋保守。总而言之,该文也是从静态角度研究 MDC 系统电压稳定性的。

文献 [3] 介绍了基于单馈入直流简化模型的换流装置无功功率特性,不能简单应用于 MDC 模型中。由于电压与无功强相关性,研究多换流站的无功功率动态特性势在必行。文献 [22] 根据 MDC 系统中的无功功率和电压之间的关系,给出了双馈入直流输电系统换流母线电压稳定性评估的模型和算法,提出了电压调节系数耦合度的概念和提高换流母线电压稳定性的措施。

以上文献均从静态角度分析,针对大扰动并考虑系统动态的研究比较少。

系统论为分析大系统的动态行为提供了许多新的理论和方法,从随机涨落模型到序参数的提取方法和役使定理的应用,可望为交直流大电网电压稳定分析中的系统集成和化简、薄弱环节辨识以及达到和超过临界状态后系统的失稳行为分析提供全新的视角和研究手段。对于具有分层结构、含数量多种类少的子系统且子系统间存在复杂相互作用的多馈入交直流并联电力系统而言,运用系统论中的协同理论来分析可能取得突破性的成果,但目前该领域的研究几乎是空白。

如何从改变 MDC 系统的协调控制入手,利用直流系统的快速可控性和短时过负荷能力实施紧急

功率控制和直流调制,并结合 VDCOL 技术来分析和改善系统的电压稳定性,这一崭新的课题已显得非常紧迫和必要。

## 2 多直流馈入系统电压稳定研究的关键问题和未来研究方向

可以预见,为解决经济发达地区电力供应短缺问题,未来将会出现更多的直流输电工程特别是 MDC 系统的局面。因此,开展交直流并联系统特别是 MDC 系统电压稳定性研究势在必行。虽然国内外在这方面已有一定的研究成果,但都尚属起步阶段,未来需要研究的关键问题和研究方向归纳起来有以下几点:

1) 现有数学模型和分析方法的完善。如研究单馈入与多馈入模型的区别和联系,研究用于实际交直流并联系统的静态电压稳定分析方法实用稳定判据,研究将特征分析法用于分析 MDC 系统电压稳定性等。

2) 多直流换流站的无功动态特性及其随系统运行和直流调制方式的变化关系研究。电压失稳归根结底是由于无功支撑不够造成的,换流站无功特性分析在研究电压稳定中扮演重要角色。直流快速调制在提高并联交流系统功角稳定的同时有可能削弱电网的电压和无功支撑能力,需要研究系统受扰动或故障后合适的调制方案,以使其既有利于功角稳定又不危及电压稳定。

3) 应用分岔理论研究 MDC 系统电压稳定性。用非线性动力学的分岔理论来研究电压稳定问题,在一定程度上将动态稳定和静态稳定问题联系起来,并提供了统一的数学分析基础,是目前电压稳定研究的前沿领域。在计及换流站无功特性和直流调制后,交直流系统的电压稳定域、状态空间分岔模式和电压失稳判据的研究值得关注。

4) 基于系统论中协同理论的稳定分析方法有望在针对交直流混合系统的电压稳定薄弱环节、临界状态识别以及稳定控制对策研究中取得突破。必须找出可能导致电压崩溃的系统薄弱环节,如直流落点及其附近区域;分析电压失稳机理和失稳临界状态,并与功角稳定和频率稳定区别开来;分析直流系统对交流系统电压稳定域和失稳模式的影响;关键是寻求合理的预防和紧急控制措施,如直流紧急功率支援和 VDCOL 的机理及其对电压稳定性影响分析。

5) 在已取得相关理论成果的基础上,研制电压

稳定的实时监测软件,开发使用局部或全局电压稳定控制策略的新型控制装置。理论指导实践,实用化是最终目的。

### 3 结论

电压稳定是近 30 年来学术界的热点研究问题,本文针对南方电网出现的多直流馈入输电系统的背景,介绍了国内外有关交直流并联系统的电压稳定研究现状,评价了研究方法,最后展望了该领域今后的研究方向和关键问题。可以看出,目前理论界对含有多直流馈入点的交直流并联系统可能面临的电压稳定问题还缺乏有针对性的理论分析和方法研究,如何在已有研究成果的基础上填补这方面的研究空白,以迅速指导我国正日益开展的直流输电工程,值得电力科技工作者认真思考。

### 参考文献:

- [1] Taylor C W. Power System Voltage Stability [M]. McGraw-Hill, 1993.
- [2] 王梅义, 吴竞昌, 蒙定中. 大电网系统技术 [M]. 北京: 中国电力出版社, 1995.  
WANG Mei-yi, WU Jing-chang, MENG Ding-zhong Large Electric Power Network System Technology [M]. Beijing: China Electric Power Press, 1995.
- [3] 浙江大学. 直流输电 [M]. 北京: 水利电力出版社, 1985.  
Zhejiang University Direct Current Power Transmission [M]. Beijing: Hydraulic and Electric Power Press, 1985.
- [4] 荆勇. 交直流并联系统相互作用和运行安全特性的研究 (博士学位论文) [D]. 广州: 华南理工大学, 2003.  
JING Yong Research on Interaction and Operation Security Characteristics of AC/DC Hybrid Power Systems, Doctoral Dissertation [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2003.
- [5] 张尧. 电力系统静态电压稳定性与电压稳定控制的研究 (博士学位论文) [D]. 天津: 天津大学, 1993.  
ZHANG Yao Study of Static Voltage Stability and Control of Power System, Doctoral Dissertation [D]. Tianjin: Tianjin University, 1993.
- [6] Kundur P. Power System Stability and Control [M]. McGraw-Hill, 1994.
- [7] 余贻鑫. 电压稳定研究评述 [J]. 电力系统自动化, 1999, 23(21): 1-8.  
YU Yi-xin Review on Voltage Stability Studies [J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(21): 1-8.
- [8] 徐政. 联于弱交流系统的直流输电特性研究之一: 直流输电的输送能力 [J]. 电网技术, 1997, 21(1): 12-16.  
XU Zheng Characteristics of HVDC Connected to Weak AC Systems, Part One: HVDC Transmission Capability [J]. Power System Technology, 1997, 21(1): 12-16.
- [9] 徐政. 联于弱交流系统的直流输电特性研究之二: 控制方式与电压稳定性 [J]. 电网技术, 1997, 21(3): 1-4.  
XU Zheng Characteristics of HVDC Connected to Weak AC Systems, Part Two: Control Modes and Voltage Stability [J]. Power System Technology, 1997, 21(3): 1-4.
- [10] 周双喜, 吕佳丽. 直流输电对电压稳定性的影响. 清华大学学报, 1999, 39(3): 4-7.  
ZHOU Shuang-xi, LÜ Jia-li Influence of HVDC on Voltage Stability [J]. Journal of Tsinghua University, 1999, 39(3): 4-7.
- [11] 胡林献, 陈学允. 崩溃点法交直流联合系统电压稳定性分析 [J]. 中国电机工程学报, 1997, 17(6): 395-398.  
HU Lin-xian, CHEN Xue-yun Point of Collapse Methods Applied to Voltage Stability Analysis of AC/DC Power Systems [J]. Proceedings of the CSEE, 1997, 17(6): 395-398.
- [12] 刘明波, 等. 交直流并联系统动态电压稳定性分析 [J]. 电力系统及其自动化, 1999, 23(16): 27-30.  
LIU Ming-bo, et al Dynamic Voltage Stability Analysis of Parallel AC/DC Power Systems [J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(16): 27-30.
- [13] Bunch R, Kosterev D. Design and Implementation of AC Voltage Dependent Current Order Limiter at Pacific HVDC Intertie [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2000, 15(1): 293-299.
- [14] Denis Lee H A, et al Impact of Dynamic System Modeling on the Power Stability of HVDC Systems [J]. IEEE Trans on Delivery, 1999, 14(4): 1427-1437.
- [15] Claudio A C, et al On Bifurcations, Voltage Collapse and Load Modeling [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1995, 10(1): 512-522.
- [16] 彭志炜, 等. 应用分支理论研究电力系统电压稳定性 [J]. 电力系统自动化, 1997, 21(2): 42-44.  
PENG Zhi-wei, et al Using Bifurcation Theory to Analyze Power System Voltage Stability [J]. Automation of Electric Power Systems, 1997, 21(2): 42-44.
- [17] 金敏杰, 高金峰, 等. 一种典型电力系统模型的电压稳定分岔分析 [J]. 电力系统自动化, 2001, 25(21): 45-50.  
JIN Min-jie, GAO Jin-feng, et al Bifurcation Analysis for Voltage Stability of a Typical Power System [J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(21): 45-50.

- 50
- [18] 薛禹胜,周海强,顾晓荣. 电力系统分岔与混沌研究述评[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(16): 9-15.  
XUE Yu-sheng, ZHOU Hai-qiang, GU Xiao-rong A Review of Bifurcation and Chaos Researches in Power Systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(16): 9-15.
- [19] 杨卫东. 多馈入直流输电系统的控制策略研究(博士学位论文)[D]. 杭州:浙江大学, 2001.  
YANG Weidong Research on Control Strategies for Multi-infeed HVDC Systems, Doctoral Dissertation[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2001.
- [20] Lee D H A, et al Voltage Stability Analysis of Multi-infeed HVDC Systems[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1997, 12(3): 1309-1318.
- [21] Lee D H A, et al Power Stability Analysis of Multi-infeed HVDC Systems[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1998, 13(3): 923-931.
- [22] 欧开健,荆勇,任震. 多馈入直流输电系统换流母线电压稳定性评估模型和算法[J]. 电力自动化设备, 2003, 23(9): 23-26  
OU Kai-jian, JING Yong, REN Zhen Model and Algorithm for Assessing Voltage Stability at Commutation Buses in MDC System[J]. Electric Power Automation Equipment, 2003, 23(9): 23-26

收稿日期: 2004-05-08; 修回日期: 2004-06-26

作者简介:

张建设(1979-),男,博士研究生,主要研究方向为电力系统电压稳定分析; E-mail: epzhang@163.com

张尧(1948-),男,教授,博士生导师,长期从事电力系统运行分析与控制、电压稳定性研究等;

张志朝(1980-),男,硕士研究生,主要研究方向为电力系统电压稳定分析。

### Voltage stability study of parallel AC/DC power systems

ZHANG Jian-she, ZHANG Yao, ZHANG Zhi-chao, WU Zhi-gang  
(South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** The study of voltage stability about multi-infeed DC transmission systems is a new research field, so that voltage instability may probably threaten the security and stability of power grid. Some theories, methods and countermeasures of voltage stability in parallel AC/DC power systems are discussed in this paper. According to the static and dynamic classification methods for voltage stability, the research conditions of voltage stability single-infeed and multi-infeed DC power systems are introduced respectively. The research methods are evaluated, and what the research should focus on is prospected.

This project is supported by National Natural Science Foundation of China (50337010) and Research Fund for the Doctoral Program of High Education (20020561004).

**Key words:** parallel AC/DC; multi-infeed DC; voltage stability; bifurcation; voltage collapse

(上接第 70 页 continued from page 70)

- [15] 陈玉兰. 面向对象的变电站综合自动化系统及其微机继电保护的研究(硕士学位论文)[D]. 武汉:华中理工大学, 1997.  
CHEN Yu-lan Research of the Object Oriented Integrated Substation Automation System and Its Microcomputer-based Protection System, Thesis[D]. Wuhan: Huazhong University of Technology, 1997.

收稿日期: 2004-05-14; 修回日期: 2004-11-22

作者简介:

顾拥军(1973-),男,工程师,主要从事变电站自动化及发电厂自动化系统的工程应用研究及设计; E-mail: GYJ@sac-china.com

皮卫华(1977-),男,工程师,主要从事变电站自动化及发电厂自动化系统的工程项目管理。

### Application analysis of an anti mistake defense system in substation

GU Yong-jun<sup>1</sup>, PI Wei-hua<sup>1</sup>, YANG Cheng-sheng<sup>1</sup>, TA INeng-ling<sup>2</sup>

(1. Guodian Nanjing Automation Co., Ltd, Nanjing 210003, China; 2. Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

**Abstract:** Depart from the practical application of the anti-mistake defense system in substation, electrical circuit defense system, the micro computer-based program anti-mistake defense system and the anti-mistake defense system contained in substation automatic system are introduced in this paper. And their characteristics and realization methods are analysed respectively. It is pointed out that the factors such as management mode and operation custom should be taken into consideration when the anti-mistake defense is selected.

**Key words:** anti-mistake defense; substation automatic system; microcomputer-based program anti-mistake defense system