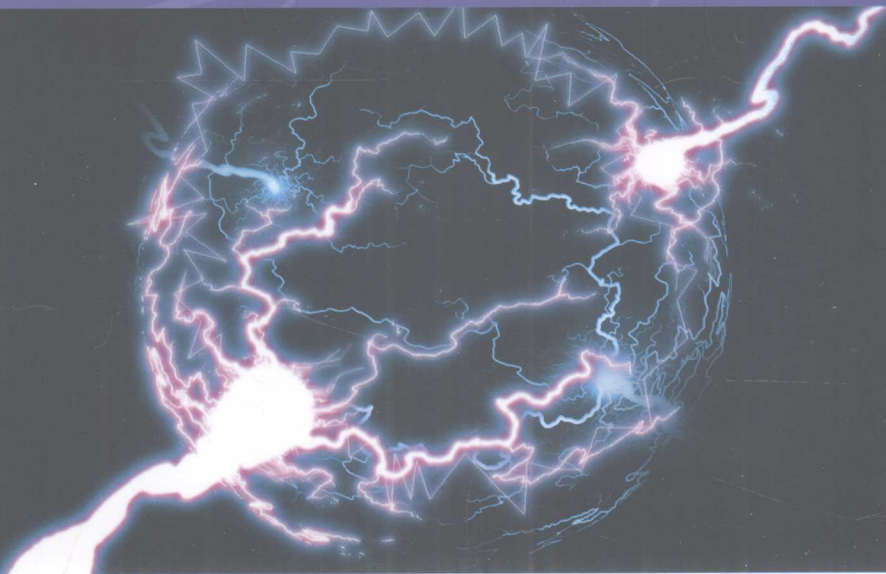


研究生教材

基于电压稳定的 电力系统可靠性评估

JIYU DIANYA WENDING DE
DIANLI XITONG KEKAOXING PINGGU

秦文萍 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

基于电压稳定的 电力系统可靠性评估

JIYU DIANYA WENDING DE
DIANLI XITONG KEKAOXING PINGGU

秦文萍 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

稳定性对可靠性的影响是复杂的电力系统运行问题。本书在论述基于电压稳定的电力系统可靠性研究的目的和意义、电力系统电压稳定性和可靠性基本分析方法的基础上,讨论了基于有功功率和无功功率的电力系统可靠性评估体系和方法;基于节点电压的系统可靠性评估及薄弱点识别方法;计及负荷随机变化的电压崩溃风险评估及薄弱点识别方法;基于模糊理论的电压稳定性评估方法;基于电压稳定的电力系统可靠性分析软件设计;基于负荷不确定性的静态电压稳定风险评估方法;计及无功功率的风电场综合可靠性模型、考虑风电最大消纳能力和无功平衡的发电系统可靠性评估方法等。

本书旨在强调无功功率对电力系统可靠性评估的影响,计及负荷变化的不确定性,从电压稳定角度评估系统风险、识别电网薄弱点,可作为电力系统可靠性、电压稳定性研究领域和新能源发电领域科研及工程技术人员的参考用书,也可供高等院校相关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

基于电压稳定的电力系统可靠性评估/秦文萍编著. —北京:
中国电力出版社, 2016. 10

研究生教材

ISBN 978-7-5123-9895-5

I. ①基… II. ①秦… III. ①电力系统—系统可靠性—
评估—研究生—教材 IV. ①TM711

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 247037 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2016 年 10 月第一版 2016 年 10 月北京第一次印刷
700 毫米×1000 毫米 16 开本 15.75 印张 223 千字
定价 48.00 元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究



前 言

电力系统失稳特别是电压崩溃，会导致部分、甚至大规模持久的负荷损失，直接影响电力系统运行的可靠性和经济性。无功功率与电力系统电压稳定及电压崩溃情况密切相关，对电力系统稳定运行具有重要意义。电压稳定性对可靠性的影响是复杂的电力系统运行问题，在大规模新能源接入电力系统的背景下，需要进一步深入分析其间的影响。

本书针对传统电力系统可靠性评估方法存在的不足，从系统无功功率和有功功率电源充裕度及电压稳定性的角度研究系统可靠性评估方法，研究负荷随机波动对基于电压稳定的系统可靠性的影响，旨在提供一些新的可靠性指标来表征系统运行可靠性水平和电压稳定裕度，识别电网薄弱点。全书主要内容包括电力系统电压稳定性和可靠性基本分析方法、基于有功功率和无功功率的电力系统可靠性评估、基于节点电压的系统可靠性评估及薄弱点识别、计及负荷随机变化的电压崩溃风险评估及薄弱点识别、基于模糊理论的电压稳定性评估方法、基于负荷不确定性的静态电压稳定风险评估、考虑风电最大消纳能力和无功平衡的发电系统可靠性评估、相关软件设计等内容。

本书是作者近几年研究工作的总结。感谢太原理工大学电气与动力工程学院“百人计划”特聘专家王鹏教授及学院韩肖清教授、宋建成教授对本书工作的精心指导；感谢硕士研究生孟繁华、赵维娟、任琛、刘志娟、白杨等同学的辛勤工作，感谢高山山、王钺、刘颖、李峰等同学在编辑过程中的帮助。由于作者水平和精力有限，书中存在不足之处在所难免，敬请广大读者加以批评指正。

编者著


2016年6月

主要符号表

$EEENS_P$	由有功功率短缺引起的电能不足期望值
$EEENS_Q$	由无功功率短缺引起的电能不足期望值
$EEENS_V$	由电压越限引起的电能不足期望值
$EVNS_P$	由有功功率短缺引起的无功不足期望值
$EVNS_Q$	由无功功率短缺引起的无功不足期望值
$EVNS_V$	由电压越限引起的无功不足期望值
ELC_P	由有功功率缺额引起的有功负荷切除期望值
ELC_Q	由无功功率缺额引起的有功负荷切除期望值
ELC_V	由电压越限引起的有功负荷切除期望值
EQC_P	由有功功率缺额引起的无功负荷切除期望值
EQC_Q	由无功功率缺额引起的无功负荷切除期望值
EQC_V	由电压越限引起的无功负荷切除期望值
$EVarS$	由无功功率不足导致的电压越限引起的无功补偿期望
LC_P	由于有功功率缺乏引起的有功负荷切除量
QC_P	由于有功功率缺乏引起的无功负荷切除量
LC_Q	由于无功功率电源缺乏引起的有功负荷切除量
QC_Q	由于无功功率电源缺乏引起的无功负荷切除量
LC_V	由于电压越限引起的有功负荷切除量
QC_V	由于电压越限引起的无功负荷切除量
$VarS$	由于无功功率不足导致的电压越限引起的无功功率希望补偿量
V^{\min}	95%额定电压
V^{\max}	105%额定电压
V^{und}	低电压切负荷阈值

V^{col}	电压崩溃（临近）点电压
MV	节点最低电压
BVC	节点电压变化
p_w	节点 w 成为最薄弱节点的概率
$EBVD$	节点电压降落期望
EBV	节点电压期望
p_{cz}	节点电压处于崩溃区域的概率
p_{rz}	节点电压处于临界区域的概率
p_{uz}	节点电压处于低电压区域的概率
p_{nz}	节点电压在正常区域的概率
MV_w	节点 w 的最低电压风险指标
MVP_w	节点 w 的最低电压概率风险指标
MVC_w	节点 w 的最大电压变化率风险指标
$MVCP_w$	节点 w 的最大电压变化率概率风险指标
MVS_w	节点 w 的最大电压灵敏度风险指标
$MVSP_w$	节点 w 的最大电压灵敏度概率风险指标
LGR	负荷增长率
$LGRP$	负荷增长率概率风险指标
$MinL$	最低负荷总量风险指标
$MaxL$	最高负荷总量风险指标
AL	平均负荷总量风险指标
LL	负荷损失风险指标
$\mu(V_{fw})$	样本 $f(1 \leq f \leq D)$ 中节点 w 的电压对于该负荷等级的平均电压的隶属度
V_{fw}	样本 f 、点 w 的电压
\bar{V}_w	该负荷等级节点 w 的电压平均值
D	抽样量
$E(U)$	系统电压质量

BWP	类间类内划分指标
ρ_{xy}	相关系数
I_{xy}	互信息量
D_p	负荷有功增长方向
D_q	负荷无功增长方向
$P_{collapse}$	全网平均有功负荷水平风险指标
$Q_{collapse}$	全网平均无功负荷水平风险指标
$Busrisk$	节点低压负荷风险指标
$linerisk1$	线路传输功率占比风险指标
$linerisk2$	线路功率传输极限裕度风险指标
$F(v_x)$	给定风速区间的累积概率
M	风电机组输出功率等分状态的个数
ΔQ_{BTL}	风机出口箱式变压器的无功损耗
ΔQ_{SUTL}	风电场升压站主变压器的无功损耗
ΔQ_{PLL}	风电场汇集线路的无功损耗
ΔQ_{SLL}	风电场送出线路的无功损耗
P_w	接入风电场容量
r	负荷峰谷差率
ϵ_G	发电机组的调节系数
$K_{emergency}$	系统事故备用率
P_T	发电机组开机容量



目 录

前言

主要符号表

第 0 章	绪论	1
	0.1 大型电压崩溃及停电事故的警示	2
	0.2 基于电压稳定的电力系统可靠性研究的目的和意义	3
	参考文献	5
第 1 章	电力系统电压稳定性和可靠性基本分析方法	8
	1.1 电压稳定性问题研究概述	8
	1.2 静态电压稳定临界点及计算方法	9
	1.3 电力系统可靠性评估方法及指标	13
	1.4 本章小结	21
	参考文献	21
第 2 章	基于有功功率和无功功率的电力系统可靠性评估	25
	2.1 基于有功功率和无功功率的可靠性评估体系	25
	2.2 计及无功功率的可靠性评估指标	27

2.3	功率短缺和电压越限问题解决策略	30
2.4	计及无功功率的可靠性评估	33
2.5	程序实现	38
2.6	算例分析	46
2.7	本章小结	63
	参考文献	65

第3章

	基于节点电压的系统可靠性评估及薄弱点识别	68
3.1	概述	68
3.2	节点电压稳定和崩溃	70
3.3	基于电压稳定性和可靠性的潮流算法研究	73
3.4	可靠性评估及电网薄弱点识别	86
3.5	算例分析	90
3.6	本章小结	96
	参考文献	97

第4章

	计及负荷随机变化的电压崩溃风险评估及薄弱点识别	100
4.1	负荷模型及变化方式	100
4.2	概率潮流算法	106
4.3	拉丁超立方抽样法	108
4.4	电压崩溃风险评估及系统薄弱点识别	109
4.5	算例分析	115
4.6	本章小结	125
	参考文献	126

第5章

	基于模糊理论的电压稳定性评估	129
5.1	基于模糊理论的电压稳定性评估流程	129

	5.2 对系统状态进行分级	130
	5.3 建立电压的模糊数学模型	131
	5.4 建立模糊电压指标	135
	5.5 通过自适应蒙特卡罗模拟法分析各系统状态等级的电压 质量	137
	5.6 算例分析	139
	5.7 本章小结	142
	参考文献	142
第 6 章	基于电压稳定的电力系统可靠性分析软件设计	144
	6.1 概述	144
	6.2 功能介绍	145
第 7 章	基于负荷不确定性的静态电压稳定风险评估	157
	7.1 不确定性负荷模型	157
	7.2 考虑负荷不确定性的静态电压稳定风险指标	164
	7.3 算例分析	167
	7.4 本章小结	187
	参考文献	190
第 8 章	考虑风电最大消纳能力和无功平衡的发电系统可靠性评估	192
	8.1 风电可靠性评估模型	193
	8.2 考虑有功功率调整的风电消纳能力分析	205
	8.3 算例分析	217
	8.4 本章小结	220

参考文献	221
附录 A: 改进的 IEEE 30 节点系统	224
附录 B: 某实际 220kV 电网系统	228
附录 C: 某 110kV 电网典型日负荷耗量数据	233
附录 D: 风电场参数	237



第 0 章

绪 论

由于电力需求的持续增长以及网络扩展的各种限制，世界上大多数电力传输网络越来越趋于高度紧张的状态。近年来，我国特高压及跨区输电系统进一步加强，能源基地向负荷中心远距离、大容量送电格局已初步形成，大受端电网的电压崩溃问题日益凸显。同时，新能源发电的大规模接入、工农业生产生活负荷的随机波动增强以及自然灾害的影响，给电网运行带来了更多的不确定性，同时也加大了电网运行和规划的难度。如何解决这些因素给电网稳定、可靠运行带来的问题，显得更为迫切。

电力系统失稳特别是电压崩溃，会导致部分、甚至大规模持久的负荷损失，直接影响电力系统运行的可靠性和经济性。稳定性对可靠性的影响是复杂的电力系统运行问题，特别是无功功率短缺对可靠性的影响问题，目前尚未得到相关研究部门的足够重视。

大型电力系统可靠性是用不间断地向用户提供合格电能的能力来衡量的^[1]。由于设备故障、负荷模式及运行条件的变化，这种能力通常是有限的。可靠性指标可以反映任何可能的负荷损失。可靠性分析的目的是从负荷随机变化以及补救措施的角度，评估系统各种事故发生的概率、频率、持续时间，用各种可靠性指标表征事故对用户和整个系统造成的影响程度，找到影响可靠性的关键因素，采取有效方法保证电力系统安全稳定运行^[2,3]。

电压不稳定是电力系统运行遇到的重要问题之一，会对社会经济和人民生活造成严重危害。世界范围内的一些电压崩溃事故促使人们在研究和预防电压不稳定方面进行了大量的工作。文献 [4] 揭示了电压崩溃的各种原因和情况。电压崩溃可以由一个突然的扰动或者通过参数的逐渐变化直至达到

稳定状态的极限而触发。在实践中，普遍的方法是将电压不稳定问题转换成潮流可行解分析，将可行性当作电压稳定性的标志^[5]。

如前所述，系统的不稳定可能导致系统负荷部分或全部丧失。如果这个概率是存在的，那么这个概率有多大？它如何影响电力系统的可靠性指标？为了降低系统不稳定性的风险，势必采取不同的补救措施，包括作为最后手段的切负荷^[6,7]。而切负荷的风险又会对可靠性指标造成哪些影响？目前，对这些问题的研究还很不充分。因此，基于电压稳定的电力系统可靠性评估和薄弱点识别对于保障电网安全稳定运行至关重要。

0.1 大型电压崩溃及停电事故的警示

近几十年来，国内外电网发生过几次大的停电事故，引起了电力界对电力系统电压稳定问题的更多关注^[4, 5, 8~12]，也使得电力系统的安全可靠运行问题变得越来越突出。如何评估电网在运行过程中特别是在故障状态和特殊运行方式下的可靠性已成为世界各国电力系统面临的紧迫任务。

(1) 2003年8月14日美加大停电。2003年8月14日，美国东部克利夫兰市郊一条线路跳闸引发连锁故障，造成潮流大规模无序转移，进而引起电压快速崩溃。事故造成6180万kW负荷损失，停电面积24000km²，263座电厂531台发电机停运（包括10座核电站19台核电机组），受影响区域的人口达5000万，最长停电时间29h，经济损失约300亿美元。

(2) 2008中国南方冰雪自然灾害引发大规模停电。2008年1月中旬至2008年2月上旬期间，中国南方数省遭遇了50年不遇的雨雪冰冻天气。在持续的低温冰冻天气侵袭下，电网输电线路频繁发生断线、倒塔、倒杆等严重事故，导致电网众多骨干电力输送线路被迫停运，不仅给国家造成了巨大的经济损失，还给人民生活带来了很大的不便。

(3) 2010年6月菲律宾大马尼拉区大停电。2010年6月26日，菲律宾大马尼拉区大部分地区和附近几个省发生大规模停电。停电造成大马尼拉区主要街道交通严重堵塞，三条高架电车停止运行，数以万计的乘客滞留在车

站内，导致交通混乱。

(4) 2010年7月巴塞罗那大停电。2010年7月23日，西班牙第二大城市巴塞罗那发生大面积停电，城市陷入严重混乱。有轨电车和2条地铁线停运，部分城际火车晚点，市内70%的交通信号灯熄灭，城市交通瘫痪，大部分地区生活、商业设施受到影响。停电还造成不少商店停业，一些医院暂停手术，市内移动电话的使用也受到一定影响。

(5) 2012年7月底印度大停电。2012年7月30日凌晨2时35分开始，印度400kV BinaGwalior输电线路跳闸，进而引起北部电网联络线连锁跳闸，导致北部电网崩溃。北部地区9个邦发生停电事故，逾3.7亿人受到影响。在上述地区恢复供电数小时后，于当地时间7月31日13时05分开始，位于Agra区域的泰姬陵附近变电站继电器故障导致线路严重过载，进而连锁跳闸，北部电网崩溃。当时东部电网正在向北部大量送电，东部电网随之崩溃，随后是同步互联的东北电网崩溃。印度包括首都新德里在内的东部、北部和东北部地区电网再次发生大面积停电事故。超过20个邦再次陷入电力瘫痪状态，全国6.7亿人失去电力供应，超过300列城际铁路关闭，东部地区200多煤矿工人受困，成为世界范围内规模最大的停电事故。

据统计，自1965年以来，世界范围内的重大停电事故超过60起。造成这些重大停电事故的原因除自然灾害外，主要有电力设备损坏、运行人员误操作和电力短缺等因素。大停电事故的发生总存在起始薄弱环节和连锁过程，有一定规律可循。为避免发生重大停电事故，克服各种不确定性因素对电力系统的不利影响，必须对电力系统在各种运行情况下的稳定性和可靠性进行综合评估并识别出系统薄弱点，在系统运行、管理过程中重点关注。

0.2 基于电压稳定的电力系统可靠性研究的目的和意义

电力系统正常运行的基本条件是安全与稳定^[13]。

安全 (security): 是指电力系统承受突然的扰动 (如短路或失去系统元件) 之后, 不间断地向用户提供电力, 要求频率、电压满足要求, 设备不超

过负荷承载能力。

稳定 (stability): 是指电力系统承受突然的扰动 (如短路或失去系统元件) 之后, 凭借自身固有的能力和控制设备的作用, 恢复到扰动前的运行状态, 或达到新的稳定运行状态的能力。

稳定破坏是电网安全最严重的形态, 只有在保持稳定的前提下, 才能实现电网不间断地向用户提供合格的电力。

电力系统中的安全性与稳定性问题关系如图 0-1 所示^[14, 15]。

对电压安全性的研究经历了确定性评估方法^[16, 17]、概率评估方法^[18]和风险评估方法^[19]三个主要阶段^[20]。确定性评估方法广泛应用于早期电力工业中, 该方法通常只重视最严重、最可信的事故, 所得结论过于保守。概率评估方法克服了上述不足, 但并不区分不同停电事故造成的经济损失。风险评估方法同时考虑故障发生概率和故障所造成的严重后果, 以两者乘积作为电压崩溃的风险指标^[21~23]。风险评估方法定量地抓住了事故的可能性和严重性两个重要因素, 并且引入了反映经济因素的风险指标^[24]。但故障所造成的严重后果是基于概率论的电压失稳风险评估的又一基本要素, 一般以货币为结算单位, 牵涉因素过于复杂, 各项货币化的经济指标难以准确计算^[25]。

和电压稳定性问题密切相关的一个重要因素是系统无功功率平衡。然而, 在传统可靠性评估中, 很少计及无功功率的影响, 发电机发出的无功功率通常表现为恒定的最大和最小值约束。几乎不考虑无功电源故障的情况, 也很少研究故障时网络运行变量越限的具体原因。在不考虑无功功率的作用时, 通常通过各种调控措施及有功功率负荷减载来解决或缓解网络运行变量越限问题。在现有技术中, 还没有相应代表无功功率短缺的可靠性指标。

因此, 本书基于无功功率和系统电压稳定及电压崩溃现象的密切关系, 研究无功功率对系统可靠性的影响; 针对电力系统中基于电压稳定的可靠性评估及薄弱点识别研究中存在的不足, 从系统无功和有功功率电源充裕度、电压稳定性和负荷随机变化的角度进一步对系统可靠性进行评估; 并研究了考虑风电最大消纳能力和无功平衡的发电系统可靠性评估问题。

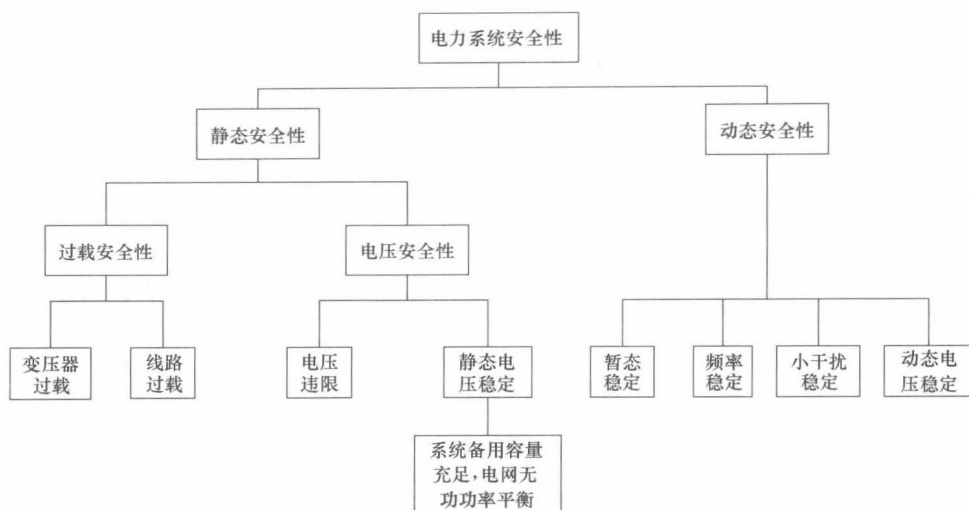


图 0-1 电力系统中安全性与稳定性问题关系

参 考 文 献

- [1] Ringlae R. J. , Albrecht Paul, Allan R. N. etc. Bulk power system reliability criteria and indices-trends and future needs [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1994, vol. 9 (1): 181-190.
- [2] Farmer F. R. Reliability evaluation of engineering systems: concepts and techniques [J]. 1983. Reliability Engineering, 1983, vol. 5 (1): 63.
- [3] R. Billinton, R. N. Allan. Reliability Evaluation of Power System [M]. Springer US, 1984.
- [4] Vu K. T. , Liu Chen-Ching. Shrinking stability regions and voltage collapse in power systems [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications, 1992, vol. 39 (4): 271-289.
- [5] Morison G. K. , Gao B. , Kundur P. Voltage stability analysis using static and dynamic approaches [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1993, vol. 8 (3): 1159-1171.
- [6] Kostcheev L. A. Automatic emergency control in electrical systems [J].

1990: 140.

- [7] P. Kundur. Power System Stability and Control [M]. 1993.
- [8] 周孝信, 郑健超, 沈国荣, 等. 从美加东北部电网大面积停电事故中吸取教训 [J]. 电网技术, 2003, 27 (9): 1.
- [9] 郭永基. 加强电力系统可靠性的研究和应用——北美东部大停电的思考[J]. 电力系统自动化, 2003, 27 (19): 1-5.
- [10] 刘有飞, 吴素农, 袁彦. 浅谈输电线路覆冰导致电力倒塔原因及相关建议 [J]. 华中电力, 2008, 21 (2): 71-72.
- [11] 清华大学电力系统不确定性分析课件 [PPT]. <http://wenku.baidu.com/view/d74e78-8083d049649b665861>.
- [12] 陈竟成, 黄瀚. 印度大停电事故分析与启示 [J]. 中国电力, 2012, 45 (10): 12-16.
- [13] 国家电力调度通信中心. 电力系统安全稳定导则 [J]. 2001.
- [14] 陆波, 唐国庆. 基于风险的安全评估方法在电力系统中的应用 [J]. 电力系统自动化, 2000, 24 (22): 61-64.
- [15] 余娟. 无功优化新模型和算法研究及其在电压稳定风险评估中的应用[D]. 重庆大学, 2007.
- [16] KeChen, Hussein A., Bradley M. E. etc. Aperformance-index guided continuation method for fast computation of saddle-node bifurcation in power systems [J]. IEEE Transactions onPower Systems, 2003, vol.18 (2): 753-760.
- [17] Hsiao-Dong Chiang, Jean-Jumeau R. Toward a practical performance index for predicting voltage collapse in electric power systems [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1995, vol.10 (2): 584-592
- [18] Obadina O. O., Berg G. J. Identifying electrically weak and strong segments of a power system from a voltage stability viewpoint [C]. IEEE Proceedings: Generation, Transmission and Distribution, 1990. vol.137 (3): 205-212.
- [19] Feng Z., Ajarapu V., Long B. Identification of voltage collapse through