



国家电网公司
STATE GRID
CORPORATION OF CHINA

大电网在线分析 理论及应用

国家电力调度控制中心 编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

014060301

TM727
45



国家电网公司
STATE GRID
CORPORATION OF CHINA

大电网在线分析 理论及应用



国家电力调度控制中心 编

TM727
45



北航

C1747459



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

根据“三集五大”建设要求，国家电力调度控制中心在省级以上调控机构全面开展了在线安全稳定分析系统的建设及深化应用工作。为满足安全分析工程师培训的需要，国家电力调度控制中心组织相关单位编写了《大电网在线分析理论及应用》一书。

全书共 10 章，分别为电力系统简介、电力系统安全稳定问题、电力系统主要元件模型、电力系统安全稳定分析技术、在线安全稳定分析及辅助决策系统、在线分析基础数据、在线安全稳定分析技术、在线分析辅助决策技术、在线安全稳定分析研究态、在线安全稳定分析系统应用实例。

本书可供调控机构运行人员培训使用，还可作为电力职业院校及新入职员工的教学参考资料。

图书在版编目（CIP）数据

大电网在线分析理论及应用 / 国家电力调度控制中心编.

北京：中国电力出版社，2014.5

ISBN 978-7-5123-5744-0

I. ①大… II. ①国… III. ①电网—在线—分析
IV. ①TM727

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2014）第 067029 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>）

北京博图彩色印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2014 年 5 月第一版 2014 年 5 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 18.75 印张 451 千字

印数 00001—3000 册 定价 98.00 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

编 委 会

主 任 张智刚

副 主 任 王玉玲 李 丹

委 员 舒治淮 董 昱 胡超凡 葛 睿

编写组组长 董 昱

编写组副组长 胡超凡 葛 睿

成 员 冯长有 郑晓雨 金一丁 刘 东

赖宏毅 游大宁 徐奇峰 陈存林

王正风 杨 超 于 洋 汤 伟

赵选宗 郑 翔 彭 伟 祁 鑫

摆世彬 史东宇 邱 健 查显煜

张 恒 刘韶峰

序言

近年来,随着特高压输电技术的全面推广,电网进入了特大型交直流混联电网的新时期,电网特征、运行特性都将发生重大变化。特高压直流送受端系统相互作用、交直流系统相互耦合、特高压系统与 500kV 电网相互制约的问题更加明显,大电网稳定风险进一步增加;西南水电及华北、东北、西北新能源基地逐步向外延伸,500kV 层面电源远距离、大容量送电规模持续增长,区域电网稳定裕度呈下降趋势,清洁能源季节性、随机性特点的影响日益显著,潮流复杂多变,电网控制难度进一步增加;用电侧分布式电源、微电网的接入、大用户直供全面开展对电网实时运行也带来较大压力。面对这些挑战和压力,深入推进调控运行业务转型,构建以电网分析在线化为核心的调控运行体系势在必行。

为更好适应电网发展和业务转型的要求,自 2010 年起,国家电力调度控制中心在省级以上调控机构全面开展了在线安全稳定分析系统的建设及深化应用工作。在各单位不懈努力下,国家电网调控机构在线分析工作的机制建设、功能建设、队伍建设、实际应用等方面取得了长足进步。为进一步提高调控运行人员电网分析水平,国家电力调度控制中心组织相关单位编写了《大电网在线分析理论及应用》一书。本书涵盖了当前调控运行人员从事电网分析工作中涉及的主要内容,全书理论联系实际,循序渐进地讲解了在线安全分析工作中的重点与难点,突出了调控运行人员应当掌握的电网分析基础理论和在线安全分析技术手段,具有较强的针对性和指导性。

各单位本着高度负责的态度,坚持认真细致地工作,广泛征求行业专家和调控运行专业人员的意见,经过九次全面修编和多次审核,最终完成本书。本书的出版,有助于调控运行人员把握特高压互联电网运行特性、洞察电网运行机理;有助于推进新形势下调控运行专业管理和学习培训工作;有助于提升调控运行人员综合素质,全面推进调控业务转型升级。

张智刚

2014 年 2 月 26 日

前言

随着特高压电网的快速发展,各区域电网电气联系日趋紧密,断面间耦合关系更加复杂,安全稳定水平相互制约,同时,用电负荷的快速增长与新能源的大规模接入,给电网潮流方式与安全稳定特性带来了较大影响;另外,随着国家电网“大运行”体系建设的全面推进,调控运行专业正处于发展和转型的关键时期,在线安全稳定分析作为“大运行”体系的核心应用之一,为调控运行人员掌握电网运行特性、准确定位运行风险、有效处置电网故障提供了全面的分析手段与坚实的技术支撑。调控机构安全分析工程师应依托智能电网调度控制与分析技术的最新发展,深入了解特高压互联系统特性,不断提升自身业务水平,切实提升驾驭大电网安全运行的能力。

为满足安全分析工程师培训的需要,国家电力调度控制中心组织相关单位编写了《大电网在线分析理论及应用》一书。本书结合实际运行系统,涵盖了稳定分析基本理论、在线分析基本框架、在线数据、在线分析及辅助决策技术、研究态模块等多方面内容,重点介绍了在线安全稳定分析核心功能的基本概念、核心算法、关键参数、核心指标等。本书可供各省级以上调控机构运行人员培训使用,还可作为电力职业院校及新入职员工的教学参考资料。

全书共10章,其中第1章电力系统简介、第2章电力系统安全稳定问题由东北电力调度控制分中心负责编写;第3章电力系统主要元件模型、第9章在线安全稳定分析研究态由宁夏电力调度控制中心负责编写;第4章电力系统安全稳定分析技术由浙江电力调度控制中心负责编写;第5章在线安全稳定分析及辅助决策系统由山东电力调度控制中心负责编写;第6章在线分析基础数据由国家电力调度控制中心负责编写;第7章在线安全稳定分析技术由安徽电力调度控制中心负责编写;第8章在线分析辅助决策技术由华中电力调控分中心负责编写;第10章在线安全稳定分析系统应用实例由中国电力科学研究院与南瑞集团有限公司(国网电力科学研究院)负责编写。全书由国家电力调度控制中心担任主审。

本书编写工作得到华北电力调控分中心、西北电力调控分中心、重庆电力调度控制中心、辽宁电力调度控制中心等单位的大力支持,在此表示衷心感谢。

由于条件和水平所限,书中难免疏漏之处,恳请各位专家读者斧正。

编 者

2014年3月

目录

序言
前言

1 电力系统简介

1.1 概述	2
1.1.1 电力系统基本概念	2
1.1.2 电力系统生产特点	3
1.1.3 电力系统基本结构	3
1.2 世界电力系统发展历史	5
1.2.1 电力系统的发展	5
1.2.2 国外典型电网	6
1.3 中国电力系统发展历史	6
1.3.1 中国电网的发展	6
1.3.2 特高压交直流联网	8
1.3.3 中国现代电网现状和特点	10
1.3.4 中国未来电网发展趋势	10
参考文献	11

2 电力系统安全稳定问题

2.1 概述	13
2.1.1 稳定问题的提出	13
2.1.2 稳定研究的内容	13
2.1.3 稳定性分类	14
2.2 特高压交直流互联电网稳定性	15
2.2.1 特高压交直流互联电网运行特点	15
2.2.2 特高压互联电网的稳定性要求	15
2.3 国内外电网典型稳定事故	16
2.3.1 华中电网 7·1 事故	16
2.3.2 美加 8·14 大停电	16

2.3.3 印度 7·30 大停电	17
参考文献	19

3 电力系统主要元件模型

3.1 常规发电机组模型简介	21
3.1.1 同步电机简化模型及参数简介	21
3.1.2 原动机及调速器模型简介	26
3.1.3 励磁系统模型简介	28
3.2 风电和光伏电站模型	31
3.2.1 风电模型及参数	31
3.2.2 光伏电站模型简介	33
3.3 变压器模型简介	37
3.3.1 变压器 Γ 型模型及参数	37
3.3.2 变压器 Π 型模型及参数	38
3.4 线路模型简介	39
3.4.1 分布参数模型	39
3.4.2 集中参数模型	39
3.5 负荷模型简介	40
3.5.1 静态特性模型	41
3.5.2 动态特性模型	42
3.6 直流系统建模简介	43
3.7 常用柔性输电设备建模	48
参考文献	51

4 电力系统安全稳定分析技术

4.1 潮流计算	53
4.1.1 潮流计算简介	53
4.1.2 电力系统潮流计算常见问题及解决方法	55
4.2 静态安全分析	56
4.2.1 基本概念	56
4.2.2 常用算法	56
4.2.3 提高系统静态安全的措施	57
4.2.4 电网算例	57
4.3 短路电流分析	58
4.3.1 基本概念	59
4.3.2 常用算法	60
4.3.3 限制短路电流措施	62

4.3.4	电网算例	62
4.4	小干扰计算分析	63
4.4.1	基本概念	63
4.4.2	常用算法	64
4.4.3	提高稳定性的相关措施	66
4.4.4	电网算例	66
4.5	电压稳定计算分析	67
4.5.1	基本概念	67
4.5.2	常用算法	68
4.5.3	提高电压稳定性的相关措施	69
4.5.4	电网算例	69
4.6	静态稳定计算分析	72
4.6.1	基本概念	72
4.6.2	常用算法	72
4.6.3	提高稳定性的相关措施	74
4.6.4	电网算例	74
4.7	暂态稳定计算分析	75
4.7.1	常用算法	75
4.7.2	提高稳定性的相关措施	76
4.7.3	电网算例	77
4.8	中长期稳定分析	78
4.8.1	中长期稳定概述	78
4.8.2	中长期稳定分析特点	78
参考文献		79

5 在线安全稳定分析及辅助决策系统

5.1	概述	81
5.1.1	电网稳定分析发展历程	81
5.1.2	国内外在线安全分析应用现状	81
5.1.3	在线安全分析特点及作用	84
5.2	国家电网公司在线安全稳定分析系统	85
5.2.1	系统简介	85
5.2.2	模块功能	86
5.2.3	并行计算技术	89
5.2.4	异常消缺流程	97
参考文献		98

6 在线分析基础数据

6.1 调度机构计算数据	100
6.2 在线分析基础数据形成	101
6.2.1 在线数据构成	101
6.2.2 在线数据形成过程	101
6.2.3 状态估计	102
6.2.4 在线数据整合	106
6.3 在线数据校验及维护	112
6.3.1 模型和数据校验	112
6.3.2 模型维护流程	113
参考文献	116

7 在线安全稳定分析技术

7.1 在线静态安全分析	119
7.1.1 基本概念	119
7.1.2 关键参数	119
7.1.3 核心算法	119
7.1.4 核心指标	121
7.1.5 算例分析	121
7.2 在线静态稳定分析	122
7.2.1 基本概念	122
7.2.2 关键参数	122
7.2.3 核心算法	122
7.2.4 核心指标	123
7.2.5 算例分析	123
7.3 在线短路电流分析	123
7.3.1 基本概念	123
7.3.2 关键参数	124
7.3.3 核心算法	124
7.3.4 核心指标	126
7.3.5 算例分析	126
7.4 在线小干扰分析	126
7.4.1 基本概念	126
7.4.2 关键参数	127
7.4.3 核心算法	127
7.4.4 核心指标	128

7.4.5	算例分析	129
7.5	在线电压稳定分析	130
7.5.1	基本概念	130
7.5.2	关键参数	131
7.5.3	核心算法	131
7.5.4	核心指标	132
7.5.5	算例分析	132
7.6	在线暂态稳定分析	132
7.6.1	基本概念	132
7.6.2	关键参数	133
7.6.3	核心算法	134
7.6.4	核心指标	139
7.6.5	算例分析	139
7.7	在线稳定裕度评估	140
7.7.1	基本概念	140
7.7.2	关键参数	141
7.7.3	核心算法	141
7.7.4	核心指标	142
7.7.5	算例分析	142
7.8	在线结果共享内容	142
	参考文献	148



8 在线分析辅助决策技术

8.1	概述	151
8.1.1	基本概念	151
8.1.2	数学描述	151
8.1.3	并行计算技术	152
8.2	在线静态安全辅助决策	152
8.2.1	基本概念	152
8.2.2	基本模型	153
8.2.3	基本算法及流程	154
8.2.4	核心指标	155
8.2.5	具体算例	155
8.3	在线短路电流辅助决策	157
8.3.1	基本概念	157
8.3.2	基本模型	157
8.3.3	求解算法及流程	158
8.3.4	核心指标	159

8.3.5	具体算例	160
8.4	在线小干扰稳定辅助决策	161
8.4.1	基本概念	161
8.4.2	数学模型	162
8.4.3	求解算法及流程	162
8.4.4	核心指标	166
8.4.5	具体算例	166
8.5	在线电压稳定辅助决策	168
8.5.1	基本概念	168
8.5.2	基本模型	169
8.5.3	求解算法及流程	169
8.5.4	核心指标	170
8.5.5	具体算例	170
8.6	在线暂态稳定辅助决策	171
8.6.1	基本概念	171
8.6.2	数学模型	172
8.6.3	求解算法及流程	172
8.6.4	核心指标	179
8.6.5	具体算例	180
8.7	在线预防控制的综合辅助决策	183
8.7.1	基本概念	183
8.7.2	数学模型	183
8.7.3	求解算法及流程	184
8.7.4	核心指标	186
8.7.5	基本算例	186
8.8	紧急状态辅助决策	188
8.8.1	基本概念	188
8.8.2	数学模型	188
8.8.3	求解算法及流程	188
8.8.4	核心指标	190
8.8.5	基本算例	191
	参考文献	192



9 在线安全稳定分析研究态

9.1	概述	195
9.1.1	基本概念	195
9.1.2	模块功能	202
9.2	信息交互技术	203

9.2.1	交互流程	203
9.2.2	信息交互通道技术	204
9.2.3	潮流串行调整技术	206
9.2.4	在线安全分析标准操作程序 SOP	207
9.3	算例分析	210
9.3.1	计算内容	211
9.3.2	计算参与单位	211
9.3.3	计算断面	211
9.3.4	计算流程	211
9.3.5	计算结果	212

10 在线安全稳定分析系统应用实例

10.1	中国电力科学研究院在线安全稳定分析系统	215
10.1.1	实时态模块介绍	215
10.1.2	研究态模块介绍	230
10.2	南瑞集团有限公司（国网电力科学研究院）在线安全稳定分析系统介绍	241
10.2.1	实时态模块介绍	241
10.2.2	研究态模块介绍	266

1

电力系统简介

1.1 概述

1.1.1 电力系统基本概念

电力系统指由生产、变换、输送、分配、消费电能的发电机、变压器、电力线路和各种用电设备（一次设备）以及测量、保护、控制等智能装置（二次设备）组成的统一整体。发电机把其他形式能量（包括机械能、太阳能、风能等）转化为电能，电能经变压器和电力线路输送并分配到用户，经电动机、电炉、电灯、电化工业设备等设备又将电能转化为机械能、热能和光能等其他形式能量。基本概念见表 1-1，其相互关系如图 1-1 所示。

表 1-1 基本概念表	
名 称	定 义
动力系统	动力系统是电力系统和发电厂动力部分的总和。其中发电厂动力部分包括火电厂锅炉、汽轮机，水电厂水库、水轮机，核电厂核反应堆、风电场的风机、光伏电站的光伏元件等
电源	电源是提供电能的装置，将其他形式的能量转换成电能
电力网	输送、变换和分配电能的部分称为电力网络（简称电网），包括输电网和配电网

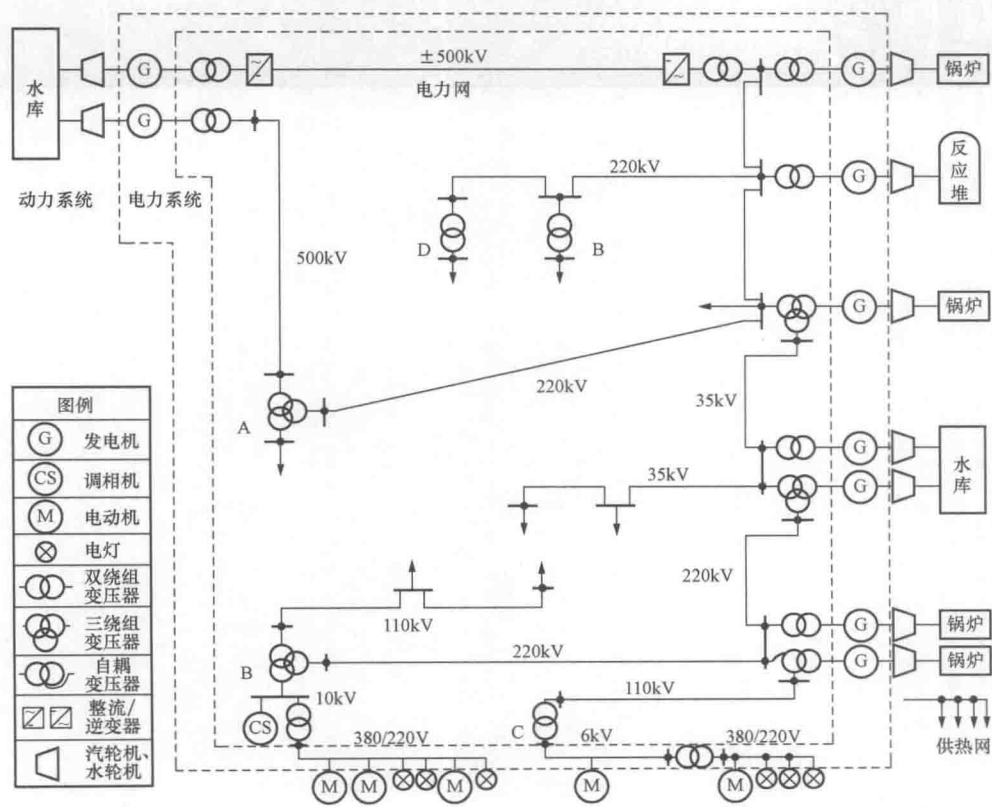


图 1-1 动力系统、电力系统、电力网络示意图

1.1.2 电力系统生产特点

电能也是一种商品，但它的生产、输送和消费较其他商品有明显的特殊性，这主要表现在电力生产的同时性、整体性、快速性、连续性和实时性，见表 1-2。

表 1-2 电力生产主要特点

特 点	含 义
同时性	发电、输电、配电、用电同时完成，电能不能大量储存，需要多少，发多少
整体性	发电厂、变压器、高压输电线路、配电线路和用电设备在电网中形成一个不可分割的整体，缺少任一环节，电力生产都不可能完成；相反，任何设备脱离电网都将失去意义
快速性	电能输送过程迅速，其传输速度与光速相同，发、供、用电都是在一瞬间实现
连续性	电力生产需要实时、连续的监视与调整
实时性	电网事故发生迅速，涉及面广，需要实时安全监视调整和控制

1.1.3 电力系统基本结构

电力系统是将自然界的一次能源通过发电机转化成电能，再经变电站升压后通过输电线路将电能供应给各用户。为实现这一功能，电力系统在各环节和不同层次还具有相应的信息与控制系统，对电能的生产过程进行测量、调节、控制、保护、通信和调度，以保证用户获得安全、经济、优质的电能。

发电厂是生产电能的工厂，把各种一次能源转换为电能。靠燃煤、石油等化学能源驱动涡轮机发电的机构称火电站，靠水力发电的机构称水电站，靠核燃料发电的机构称核电厂，靠太阳能、风力和潮汐发电的新能源电站。发电厂中主要发电设备是发电机，它是将其他形式的能源转换成电能的机械设备，工作原理都基于电磁感应定律和电磁力定律。其构造的一般原则是：用适当的导磁和导电材料构成互相进行电磁感应的磁路和电路，以产生电磁功率，达到能量转换的目的。主要有以下三种分类方式，见表 1-3。

表 1-3 发电机分类表

分类方式	类 型	特 点
按驱动动力	汽轮发电机	利用汽轮机驱动发电，由锅炉产生的过热蒸汽进入汽轮机内膨胀做功，使叶片转动而带动发电机发电
	风力发电机	依靠风力带动发电机转动产生电流，无需消耗额外能源，是一种无污染的发电机
	水力发电机	利用水流落差产生动力带动发电机发电，又称水轮发电机
	燃油发电机	依靠柴油或汽油燃烧产生动力而带动发电机组的。在某些服务行业或小型加工业中，遇到停电，可启动燃油发电机发电，起到应急作用以维持正常工作
按电能方式	直流发电机	将机械能转换为直流电能的发电机
	交流发电机	将机械能转化为交流电能的发电机，分为同步发电机和异步发电机两种。同步发电机又分为隐极式同步发电机和凸极式同步发电机两种
按励磁方式	有励磁发电机	有励磁发电机的励磁方式为他励式，整流装置在发电机组的定子上
	无励磁发电机	无励磁发电机的励磁方式为自励式，整流装置在发电机组的转定子上

变电站是电力系统中变换电压、接受和分配电能、控制电力流向和调整电压的电力设施，通过其中的变压器将不同电压等级电网联系起来。按变压器的性质和作用分为升压变电站和