



国家骨干高职院校工学结合创新成果系列教材

电力系统分析技术 及应用

主 编 邓海鹰 左江林
主 审 程文钢



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn



国家骨干高职院校工学结合创新成果系列教材

电力系统分析技术 及应用

主 编 邓海鹰 左江林

副主编 黄丽娟 邱 红

主 审 程文钢



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书介绍了电力系统正常运行和故障条件下的分析技术,以及电网安全、优质、经济运行等方面的相关内容,包括认知电力系统、潮流计算、电力系统的无功功率平衡与电压调整及监视、电力系统对称短路计算及应用、电力系统不对称短路计算及应用、电力系统频率调整、电力系统的经济运行、电力系统稳定分析,并利用电力仿真软件PWS (PowerWorld Simulator) 提供了可视化的工程案例。

本书可以作为高职高专电力技术类相关专业的教材和行业培训教材,也可供电力系统相关工程技术人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

电力系统分析技术及应用 / 邓海鹰, 左江林主编

— 北京: 中国水利水电出版社, 2015. 8

国家骨干高职院校工学结合创新成果系列教材

ISBN 978-7-5170-3521-3

I. ①电… II. ①邓… ②左… III. ①电力系统—系
统分析—高等职业教育—教材 IV. ①TM711

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第189497号

书 名	国家骨干高职院校工学结合创新成果系列教材 电力系统分析技术及应用
作 者	主编 邓海鹰 左江林 主审 程文钢
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (发行部)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京瑞斯通印务发展有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 13.75印张 326千字
版 次	2015年8月第1版 2015年8月第1次印刷
印 数	0001—2000册
定 价	32.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

国家骨干高职院校工学结合创新成果系列教材

编 委 会

主 任：刘延明

副主任：黄伟军 黄 波 皮至明 汪卫星

委 员：张忠海 吴汉生 凌卫宁 陆克芬

邓海鹰 梁建和 宁爱民 黄晓东

陈炳森 方 崇 陈光会 方渝黔

况照祥 叶继新 许 昕 欧少冠

梁喜红 刘振权 陈治坤 包才华

秘 书：黄燕春

PREFACE

The fundamental purpose of this text is to introduce to vocational students several projects, and their associated tasks, in order to further their education in the design, planning and operations of electric power grids. In particular, this text will guide students through their tasks with the assistance of a personal computer and the power system analysis software called *PowerWorld Simulator*.

In this text, the teaching of PowerWorld Simulator is combined with the teaching of power system analysis. Through this text, students will become proficient in both. Actual tasks are delivered through this text, which will guide students and allow them to acquire relevant theoretical knowledge.

I am the President and co-founder of PowerWorld Corporation. The software was originally created by Thomas J. Overbye, professor at the *University of Illinois at Urbana - Champaign*, to be used for educational purposes. PowerWorld Simulator has been designed to be a user-friendly and visual analysis tool, suitable for power system education. However, it is also one of the most powerful and widely used power system analysis packages in the world, used by numerous power companies world-wide, including several in China. Through the use of PowerWorld Simulator, students will learn the same tool used by power system engineers to do the relevant analysis.

PowerWorld Simulator was originally introduced in 1994, and used mostly as an educational tool. By 1996, the software had been commercialized through the formation of PowerWorld Corporation, which was founded by Professor Overbye, myself, and two other professors. The interactive and graphical design of the tool made it popular among both students and practicing engineers doing analysis of real power systems. PowerWorld Simulator retains its excellent characteristics that make it suited for education, but has evolved over the years to become an industry leading tool in power system analysis. It is used all

over the world by practicing engineers for many different power system analysis tasks, including power flow, contingency analysis, real – time visualization, sensitivity analysis, PV/QV analysis, transfer capability calculations, optimal power flow (market analysis), transient stability, and the analysis of geomagnetically induced currents (the effect of solar storms) on the power grid.

In this text, the tasks associated with PowerWorld Simulator are listed below:

1. Write a county power grid operation report—learning modeling and power flow calculation methods both by hand and by using PowerWorld Simulator.
2. Provide short – circuit calculations result for the selection of transformer breaker—learning balanced short – circuit calculations calculation methods both by hand and by using PowerWorld Simulator.
3. Provide short – circuit calculations result for transmission line relay—learning unbalanced short – circuit calculations calculation methods both by hand and by using PowerWorld Simulator.

The authors of this text are from Guangxi College of Water Resources and Electric Power. They have been applying PowerWorld Simulator to the study of power system analysis since 2008. They have had a good relationship with PowerWorld Corporation since that time and are proficient in its use and deliver in this text an effective training tool on how to use the software.

It is hoped that this text, based on the experiments combining the PowerWorld Simulator engineering software with teaching process, can provide an effective and convenient channel for Chinese students to learn the technology of power system analysis.

Project one of this text is intended to introduce students to the power system. The associated tasks are to introduce the power grid and to draw an online diagram of the power system.

Project two of this text is to learn about power flow analysis. Tasks are to model a system by hand, model a system in the PowerWorld Simulator software, and to carry out the power flow analysis both by hand and by using the PowerWorld Simulator software. A written report of the operating situation of the grid will be produced by the students.

Project three will teach the students about how to regulate the voltage in a

power grid. The tasks are to learn the method of regulating the voltage of a bus, and then to carry out that complex voltage regulation using a model in PowerWorld Simulator.

Project four will introduce the subject of balanced short – circuit calculations, and project five will introduce the subject of unbalanced short – circuit calculation. In both cases, the student will be asked to carry out the short – circuit analysis by hand and by using PowerWorld Simulator.

In Project six, students will learn about frequency regulation of a power grid. Project seven will discuss the economics of power grid operation, and project eight will address the stability of the grid.

It is hoped that through the use of this text and the associated PowerWorld Simulator software, students will become more educated on power system analysis techniques and learn some of the relevant theories behind the operations of electric power grids.

Mark J. Laufenberg, Ph. D.
President
PowerWorld Corporation

序

本书为学生设置了若干个与电网设计、规划、运行相关的项目。特别需要指出的是，本书中部分任务将由学生通过个人计算机，使用一个叫 PowerWorld Simulator 的电力系统分析软件完成。

在这本书中，PowerWorld Simulator 软件的教学将与电力系统分析的教学相结合，通过学习本书，学生将会同时将两者熟练掌握。本书提供了许多工程中的实际案例，这将会引导学生去学习相关的理论知识。

我是 PowerWorld 公司的总裁和创始人之一。公司产品 PowerWorld Simulator 最初是由 Illinois 大学 Urbana - Champaign 分校的 Thomas J. Overbye 教授开发的，原本是用于教学的。我们将 PowerWorld Simulator 软件设计为一个用户友好的可视化分析工具，这个特点非常适合电力系统分析的教学。同时，这个软件还是世界上功能最强大、使用最广泛的电力系统分析软件包之一，被全球大量的电力公司所使用，中国同样也有我们的用户。通过使用这个软件，学生们将会像实际的工程师那样用同样的软件来开展电力系统相关的分析。

PowerWorld Simulator 是 1994 年开发出来的，当时主要用作教学。1996 年，Overbye 教授、我和其他两位教授成立了 PowerWorld 公司，并将软件转为了商业化用途。由于具有交互界面友好和图形化操作的特点，这个软件受到了需要进行实际电网分析的学生和工程师们的欢迎。这个软件的优越性不仅能使其满足教学用途，而且这些年还发展成为业界领先的电力系统分析工具，它被世界的电力工程师用于开展各种系统分析任务，包括潮流计算、暂态分析、实时可视化、灵敏度分析、PV/QV 分析、传输能力计算、最优潮流（电力市场分析）、暂态稳定和地磁感应电流（太阳风暴的影响）对电网的分析等。

在本书中，与 PowerWorld Simulator 相关的项目设置如下：

(1) 完成一个县级电网的运行方式报告的撰写。由此学习潮流计算的知识，并在 PowerWorld Simulator 中开展建模和潮流计算的方法。

(2) 为变压器的断路器选择提供短路计算结果。由此学习三相短路计算

和在 PowerWorld Simulator 开展三相短路计算的方法。

(3) 为线路保护整定提供短路计算结果。由此学习不对称短路计算和在 PowerWorld Simulator 开展不对称短路计算的方法。

本书的作者是来自广西水利电力职业技术学院的老师。他们自 2008 年起, 就已经将 PowerWorld Simulator 软件全面应用到电力系统分析课程中, 并与我们 PowerWorld 公司建立了良好的合作关系, 他们精通该软件的使用并会在本书中介绍如何使用它。

希望这本基于在教学过程中使用 PowerWorld Simulator 软件经验编写的教材能为中国学生学习和掌握电力系统分析技术提供一条有效的、便捷的通道。

项目 1 是认知电力系统。

项目 2 是潮流计算, 相关的任务包括: 电力元件建模 (手算), 电力软件 PowerWorld 建模, 手算简单电网的潮流分布, 利用电力软件 PWS 开展潮流分析, 撰写分析报告。

项目 3 是电力系统的无功功率平衡与电压调整及监视, 相关的任务包括: 学习电压调整的措施和利用电力软件 PowerWorld Simulator 开展综合调压计算, 制定调压措施。

项目 4 和项目 5 分别是电力系统对称短路计算及应用和不对称短路计算及应用。在这两个项目中均要求学生完成手动短路计算和利用电力软件 PowerWorld Simulator 计算短路电流的任务。

项目 6 是电力系统频率调整。

项目 7 是电力系统的经济运行。

项目 8 是电力系统稳定分析。

希望通过使用本教材, 学生能熟练掌握电力系统分析技术并学到一些电力系统运行背后相关的理论。

美国 PowerWorld 公司总裁

Mark J. Laufenberg 博士

前言

“电力系统分析技术及应用”是电力类高职高专学生的一门专业核心课程。本课程主要介绍电力系统正常运行和故障条件下的分析技术,以及电网安全、优质、经济运行等方面的相关内容。本教材在传统的理论推导、分析、计算之余,提供了实际电网的数据,补充了与本课程相关的丰富的工程案例,同时引入了 PowerWorld 软件,向学生展示了使用软件开展电气计算的新世界,由此降低了学习的难度。同时将学习重点由“计算方法”向“结果分析”转变,从而与实际岗位需求更为贴近,也更符合高职学生的学习特点。

本教材总结了广西水利电力职业技术学院电力工程系“电力系统分析”课程组三十年来三代教师的教学经验以及近年来开展教学改革与创新的成果,是校企合作、工学结合的产物。教材编写遵循由浅入深、由易到难、循序渐进的认识规律并顾及高职学生的接受能力;强调以学生发展为中心,帮助学生学会学习,把创新素质的培养贯穿于教学中。本课程开发组实地调查了多家电力企业,举行了多次课程开发论证会,分析了典型工作任务,提炼了能力、素质和知识的要求,编制了课程标准。选取实际工程项目为载体,注意课程标准与工作标准对接,课程内容与工作内容对接,以真实应用驱动,开展项目化教学。本书项目1由邓海鹰执笔;项目2由黄丽娟、王玲执笔;项目3由莫铭瑞、汪通云执笔;项目4由邱红执笔;项目5由左江林、贺正凯执笔;项目6由谢锡锋执笔;项目7由张志刚、左江林执笔;项目8由张婧、游义刚执笔。本书由邓海鹰、左江林担任主编并负责全书统稿,由广西电网公司调度中心程文钢高工担任主审。程文钢高工对本书进行了认真细致的审阅,给出了宝贵的意见和建议。特别要说明的是,在我们成为 PowerWorld Simulator 软件正式用户在工程中使用该软件,以及将软件全面引入课程教学的过程中,美国 PowerWorld 公司给予了大力支持和帮助,同意我们在教学过程中使用教育版软件并编写相应教材,公司总裁 Mark J. Laufenberg 博士还热情地为本书撰写了序言予以推介,给予我们极大的鼓励,谨在此表示衷心感谢。

本书编写过程中,得到了广西电网调度中心、广西电网武鸣供电公司、广西水利电业集团蒙山供电分公司、广西容县电力有限公司、黔西南民族职

业技术学院等企业和学校的大力支持和帮助。本书部分材料与内容引自相关院校和科研单位编写的教材、专著或文章，编者在此一并致谢。在开展课程改革以及教材的编写过程中，还得到了高文建教授级高工、张宏亮高工、孙艳博士、王庆红博士、陈光会高工，以及江发枝、陈明周、覃乾振等专家的关心与帮助，罗宇强工程师承担了大量的排版及整理工作，在此谨表衷心的感谢。

使用本书的读者可以从美国 PowerWorld 公司网址 (<http://www.powerworld.com/download-purchase/demo-software>) 下载到 PowerWorld Simulator 软件的教育版用于学习，还可以从我们的教学网站 <http://124.227.192.170:8818/suite/portal/portalView.do?fwcid=portal&feature=portalCourse&action=view&comeFrom=courseList&siteKey=0&courseKey=64561> 找到相关的学习资料。

限于编者水平，本书疏漏与不妥之处在所难免，请读者批评指正，以便再次印刷时更正。编者的电子邮箱是 dhy_gx@163.com。

编者

2014 年 9 月

目 录

PREFACE

序

前言

项目 1 认知电力系统	1
任务 1.1 认知电力系统的构成	1
任务 1.2 确定电气设备和电力网的额定电压	3
任务 1.3 认知电力系统的接线方式	8
任务 1.4 认知电力负荷	9
任务 1.5 认知电力线路的结构	13
项目 2 潮流计算	20
任务 2.1 简单电力系统手动建模	20
任务 2.2 电力系统的 PWS 建模	34
任务 2.3 认识功率损耗和电压降落	43
任务 2.4 简单电力系统的潮流计算	48
任务 2.5 利用 PWS 分析电力系统潮流	50
项目 3 电力系统的无功功率平衡与电压调整及监视	54
任务 3.1 无功功率与电压管理	54
任务 3.2 电力系统的无功功率平衡	57
任务 3.3 电压调整	62
任务 3.4 PWS 综合调压措施与电压-无功监视	73
项目 4 电力系统对称短路计算及应用	80
任务 4.1 为无限大容量电源供电系统的设备选型提供校验数据	80
任务 4.2 为有限大容量电源供电系统的设备选型提供校验数据	92
任务 4.3 为多电源供电系统的设备选型提供校验数据	97
任务 4.4 利用电力软件 PWS 进行对称短路计算	102
任务 4.5 在 PWS 软件中应用运算曲线计算短路电流值	105
项目 5 电力系统不对称短路计算及应用	110
任务 5.1 认识对称分量法	110
任务 5.2 电力元件的序参数及序网络的绘制	116
任务 5.3 不对称短路的分析计算	122

任务 5.4 利用电力软件 PWS 进行不对称短路计算	133
项目 6 电力系统频率调整	138
项目 7 电力系统的经济运行	150
任务 7.1 认识电力网的电能损耗	150
任务 7.2 认识电力系统有功负荷的经济分配	164
任务 7.3 认识电力系统无功功率的最优分布	170
项目 8 电力系统稳定分析	174
任务 8.1 认识电力系统静态稳定	174
任务 8.2 认识电力系统暂态稳定	180
附录	191
参考文献	204

项目1 认知电力系统

任务1.1 认知电力系统的构成

1.1.1 学习目标

- (1) 掌握电力系统、动力系统、电力网的基本概念。
- (2) 掌握电力系统的运行特点及对电力系统的基本要求。

1.1.2 任务分析

电力系统是从事电力行业相关工作首先要了解的一个基本概念，必须对其组成有正确的理解。现代的电力系统都是联合运行的系统，在技术和经济上有许多明显的优越性。对电力系统运行的基本要求可概括为“安全、优质、经济、环保”。

1.1.3 知识学习

1. 电力系统的组成

电能是现代社会不可或缺的能源，人们在生产和生活中大量使用着各种各样利用电能工作的设备。由于电能在传输、控制、转换等方面的便捷性，使得电能的应用越来越广泛。通常人们是把电能的生产输送、分配和使用的各个功能环节或部门统称为电力系统。

图1.1所示为一个简单电力系统的电力生产和使用过程示意图。首先是在发电厂内，由汽轮机、发电机将其他形式的能源转化为电能，然后通过升压变压器将电压升高，经过高压输电线路将电能输送到用电地区或城市的变电所，由其中的降压变压器使电压下降，再通过电压较低的配电线路分配给各个用户来进行用电。

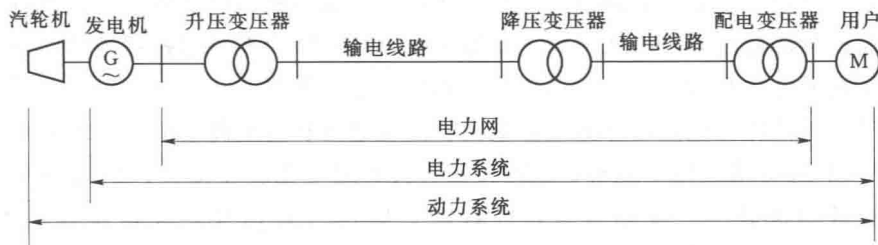


图 1.1 动力系统、电力系统、电力网示意图

通过图1.1，可以得到以下几个重要的概念：

- (1) 电力系统。除锅炉、汽轮机或水轮机等动力部分以外的一个由发电机、变压器、输配电线路和用户电器等各种电气设备连接在一起而形成的生产、输送分配和消耗电能的



整体称为电力系统。

(2) 动力系统。如果将上述的电力系统加上各种类型发电厂中的动力部分，如热力部分（锅炉汽机）、水力部分、原子能反应堆部分等就统称为动力系统。

(3) 电力网。一般所说的电力网是指在上述电力系统中去掉发电厂的发电机部分和末端的用电设备后所剩余的部分。换言之，由各种电压等级的变压器和输、配电线路所构成的用于变换和输送、分配电能的部分即称为电力网。

现代的电力系统都是由许许多多的发电厂、变电站和输电线路相互连接在一起构成联合运行的系统，很少有孤立运行的电力系统。图 1.2 所示为有多个电源的电力系统示意图。

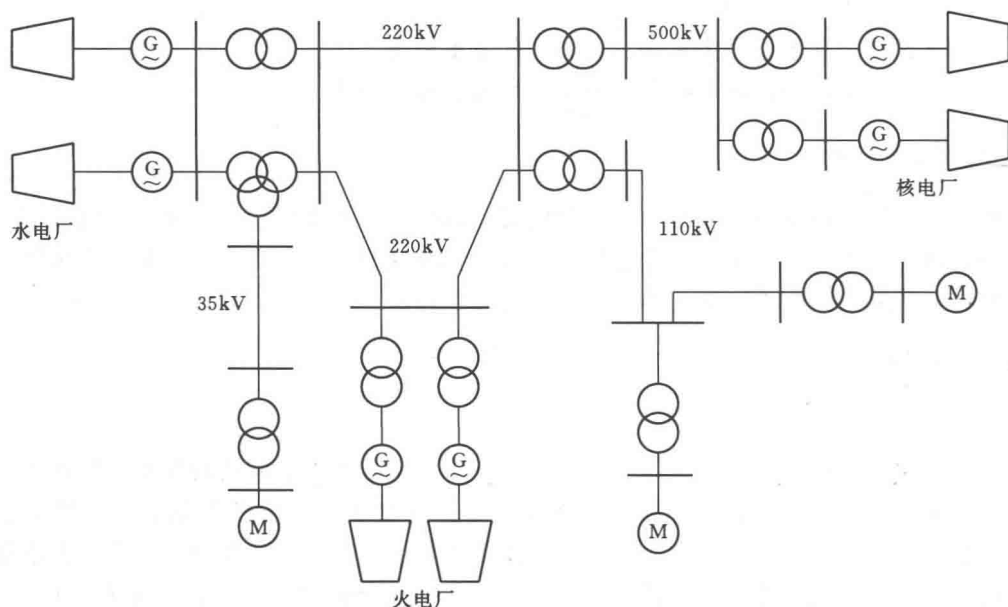


图 1.2 有多个电源的电力系统示意图

联合运行的电力系统在技术和经济上比孤立运行的电力系统有许多明显的优势，如：可以更充分地利用能源提高经济效益；能够采用大型机组以降低造价和燃料消耗，加快建设速度；各部分之间可以互相调剂支援电量，从而减少系统总备用容量；还可以利用地区时差及水火电之间的调节，取得错峰和调峰效益，等等。

为便于分析计算，电网可分为地方电网、区域电网和远距离输电网。地方电网电压较低（110kV 以下），输送功率较小，线路较短，计算时可作较多简化；区域电网则一般电压较高，输送功率较大，线路较长，计算时只能作一定简化；远距离输电网电压在 330kV 及以上，输电线路长度超过 300km，计算时一般不能简化。

按电压的高低，电网又可以分为低压网（1kV 以下）、中压网（1~10kV）、高压网（35~220kV）、超高压网（330~750kV）、特高压网（1000kV 及以上）。高压直流（HVDC）通常指的是 $\pm 600\text{kV}$ 及以下的直流电压等级， $\pm 600\text{kV}$ 以上的电压称为特高压直流（UHVDC）。



2. 电力系统运行生产的特点

(1) 电力系统的电能生产、输送、分配和使用过程是同时进行,缺一不可的。由于目前尚不能大量地、廉价地存储电能,所以发电厂生产出的电能等于用户所消耗的电能和输送分配过程中的电能损耗之和。简而言之,用户及网络消耗多少电能,电厂就只能生产多少电能,反之亦然。

(2) 电力系统的运行生产与国民经济及人民生活关系密切,影响重大。作为当今社会的主要能源,电能的使用无处不在。如果电能供应不足或中断将直接影响工业农业生产,给人民生活带来诸多不便。如国内外发生的几次大面积停电事故都造成了十分巨大的经济损失。

(3) 电力系统运行中发生变化的速度很快,即过渡过程非常短暂。电力系统中各元件的投、切和电能输送过程几乎都在瞬间进行,即电力系统从一种运行状态过渡到另一种运行状态的过程非常短暂。如用户端出现负荷增加或减少以及发生短路事故等变化时,在电源端马上就有相应的反应。

3. 对电力系统的基本要求

(1) 保证安全可靠地供电。安全可靠地供电是电力系统首先要满足的要求,因为一旦供电中断将使工农业生产停顿,社会生活混乱,甚至会危及人身和设备的安全,造成十分严重的后果。

(2) 保证合格的电能质量。电气设备对电能也有质量指标的要求,如果电能质量不合格,用电器将不能正常使用。电能质量主要由交流电的频率、电压和波形等指标来衡量,供给用户的电能必须保证在规定的额定值允许变化范围内。

(3) 力求系统运行的经济性。电力系统的运行生产与其他生产企业一样也要考虑经济效益。电力系统应在保证可靠性和良好质量的同时,力争降低生产成本。电力系统运行的经济性可从合理分配各发电厂间的负荷、降低燃料消耗率和厂用电率、降低电力网的电能损耗等多个方面来考虑。

总之,对电力系统的基本要求可简单概括为安全、优质、经济。

1.1.4 练习

- (1) 动力系统、电力系统、电力网的定义是什么?
- (2) 电力系统运行有什么特点及要求?

任务 1.2 确定电气设备和电力网的额定电压

1.2.1 学习目标

- (1) 掌握额定电压的概念及额定电压的分类方法。
- (2) 能够根据若干已知条件确定主要电气设备的额定电压。
- (3) 熟悉各级电压电力网的适用范围。



1.2.2 任务分析

生产厂家在制造和设计电气设备时都是按一定的电压标准来执行的,电气设备也只有运行在这一标准电压附近,才能具有最好的技术性能和经济效益。电力线路输送电能应当考虑经济性。对应于一定的输电容量和输电距离,必然存在一个在技术和经济上都较为合理的电压等级。

1.2.3 知识学习

1.2.3.1 额定电压的概念

电力系统标准电压是国家有关部门根据技术经济比较而规定的,通常也称为电压等级,或称为标准电压或者电网额定电压,有的还称为用电设备额定电压,它们的含义完全相同。规定标准电压是为了使电力设备能标准化、系列化制造,便于设备的运行、维护、管理等。电力系统中的发电机、变压器、线路、用电设备等都有明确的额定电压值,当它们在额定电压下运行时,其技术与经济性能将达到最好的效果。对于公共交流电力系统,我国在 GB/T 156—2007《标准电压》中的推荐值见表 1.1。

表 1.1

电力系统各元件额定电压

单位: kV

电力线路和用电设备 额定电压	电力线路 平均额定电压	交流发电机 额定电压	变压器额定电压	
			一次绕组	二次绕组
3	3.15	3.15*	3 及 3.15	3 及 3.15
6	6.3	6.3	6 及 6.3	6.3 及 6.6
10	10.5	10.5	10 及 10.5	10.5 及 11
		13.8*	13.8	
		15.75	15.75	
		18*	18	
(20)		(20)	(20)	
35	37		35	38.5
(66)	(69)		(66)	(72.6)
110	115		110	121
220	230		220	242
(330)	(345)		(330)	(345 或 363)
500	525		500	525 或 550
750	788		750	825
1000	1050		1000	1050 或 1100

注 1. 表中所列均为线电压值。

2. 带“*”的数字为发电机专用。

3. 括号内的电压仅适用于特殊地区。

4. 水轮发电机允许用非标准电压。