

〔苏〕M.H. 罗札诺夫 著

电力系统可靠性

王德生 郭永基 译

水利电力出版社

Надежность
электроэнергетических
систем

内 容 提 要

本书专门研究电力系统可靠性问题, 主要包括: 电力系统元件的可靠性指标; 接线可靠性原理; 运行可靠性原理; 统一电力系统基本结构的可靠性估计; 基本系统网络的可靠性估计; 配电网络可靠性估计。

本书可供高等院校有关专业师生及研究生参考, 也可供电力系统设计、规划、科研、运行及管理部门专业人员参考。

М. Н. Розанов

Надежность электроэнергетических систем

Энергоатомиздат 1984

电力系统可靠性

[苏] М. Н. 罗札诺夫 著

王德生 郭永基 译

*

水利电力出版社出版、发行

(北京三里河路6号)

各地新华书店经售

水利电力出版社印刷厂印刷

*

787×1092毫米 32开本 7.625印张 167千字

1988年6月第一版 1988年6月北京第一次印刷

印数0001—4440册 定价: 1.75元

ISBN 7-120-00331-3/TM·68



译 者 的 话

随着电力系统的发展,对可靠性的要求越来越高,由于电力系统连续工作、环境严苛、结构复杂等原因,提高它的可靠性始终是一个迫切需要解决的课题。本书专门介绍苏联近年来研究电力系统可靠性的成果。书中分三个层次——统一电力系统、联合电力系统、配电网络——介绍了电力系统可靠性的分析计算方法和提高可靠性的措施,这些方法和措施可用于解决设计和运行问题。

本书俄文本第一版于1974年出版,第二版于1984年出版。中译本是根据1984年版译出的。

王德生高级工程师翻译了本书的前言、绪论及第一、二、三章,郭永基副教授翻译了第四、五、六章并编写了主要名词中俄对照表。

译 者

1985.12.10于北京

前 言

必须从结构和运行方式的角度来分析可靠性的原因，首先是由于统一电力系统(ЕЭС)和联合电力系统(ОЭС)的主网之间的联络线的传输能力有限制，当元件发生故障或者损失发电容量时将导致稳定破坏而使事故扩大，此外由于为提高电力系统可靠性而装设的反事故控制的迅猛发展也招致事故的发生。

与1974年的版本不同的是，当时只讲结构可靠性，第二版则试图既考虑结构可靠性又考虑运行可靠性，也就是考虑电力系统并联运行的稳定问题。此外，1974年版本的资料来源于作者及其所指导的工作。本书则结合一些单位（直流研究所，全苏电工研究所，苏联联合电力系统中调局等）的一系列研究成果以及全苏科学讲习班的论文集《大电力系统可靠性的方法问题》来说明本课题的现状。

作者向本书的评阅人——技术科学博士茨维特科夫(Е.В.Цветков)表示感谢，他的意见帮助改进了本书内容，同样感谢科学技术副博士顾克(Ю.Б.Гук)，因为他花了很多时间校订手稿。读者如对本书提出意见和希望，作者将表示感激，来信请寄出版社：113114，莫斯科，М—114，什柳佐瓦亚堤岸街·10·

作 者

目 录

译者的话

前言

绪论 电力系统可靠性问题的一般评述	1
B.1 近代电力系统的特点	1
B.2 可靠性优化课题的提出	7
B.3 在设计和运行时对可靠性的考虑	14
第一章 电力系统元件的可靠性指标	23
1.1 可靠性的基本指标	23
1.2 可靠性的辅助指标	27
1.3 计划检修指标	28
1.4 可靠性指标和计划检修指标的定量估计	29
1.5 电网元件可靠性的比较	37
1.6 继电保护和自动装置可靠性指标的特点	39
1.7 为解决运行课题确定元件的故障频率	40
1.8 架空线路绝缘水平的模拟以及对其可靠性的评价	42
第二章 接线可靠性的基本原理	46
2.1 计算接线可靠性的基本公式	46
2.2 利用断路器的简化故障模型计算配电装置的可靠性	55
2.3 利用断路器故障的完全模型计算配电装置的可靠性	61
2.4 用统计实验法计算损失的数学期望值	73
第三章 运行可靠性基本原理	81
3.1 运行可靠性概念及对它的要求	81
3.2 提高稳定和反事故控制措施的一般特性	92

3.3	在电站-系统接线图中的反事故控制	96
3.4	两个弱联系互联系统的反事故控制	101
第四章	统一电力系统基本结构的可靠性估计	107
4.1	问题的提出	107
4.2	最简单情况下电量不足期望值的确定	109
4.3	在集中电力系统中用余量系数法确定期望电量 不足	112
4.4	用统计试验法确定电力系统的期望损失	120
4.5	考虑可靠性时发电机组安装容量的选择	126
4.6	远距离输电线强迫停运对电力系统的经济合理机 组安装容量的影响	128
4.7	在事故性的功率不平衡时弱联系的电力系统的可 靠性	134
第五章	基本系统网络的可靠性估计	137
5.1	系统网络可靠性计算方法的基本情况	137
5.2	电力系统设施故障后果的经济估计	147
5.3	配电装置对大型发电厂发电容量可靠性影响的 估计	151
5.4	基本电网运行工况可靠性的估计	157
5.5	用专门的自动切负荷装置 (CAOH) 来保证可靠 运行工况的经济合理性论证	169
第六章	配电网络可靠性估计	174
6.1	问题的提出	174
6.2	配电网络可靠性计算的现行方法	178
6.3	近似考虑配电装置的结构图法	184
6.4	考虑可靠性时供电接线图的技术经济比较算例	206
6.5	有简化变电所的供电接线图的可靠性	220
附录	主要名词中俄对照表	223
参考文献		233

绪论 电力系统可靠性问题的一般评述

B.1 近代电力系统的特点

苏联电力系统的发展是沿着增加汽轮发电机、水轮发电机单机容量，扩大电站容量，提高电压等级和增加输电距离，并将电力系统联合为一个全苏统一电力系统（EЭC）的道路前进的。

现在苏联统一电力系统（EЭC）共包括9个联合电力系统（OЭC）——西北、中部、南方、北高加索，外高加索，中伏尔加、乌拉尔、北哈萨克斯坦和西伯利亚联合电力系统。接入统一电力系统的还有经互会（CЭB）成员国的联合电力系统^①，此外，还有保加利亚人民共和国和蒙古人民共和国的电力系统。苏联统一电力系统（EЭC）的简化结构图如图B.1所示。其总容量约为210GW，而每个联合电力系统的容量在10~40GW之间。

联合电力系统之间的联系靠电压为220~750kV的交流输电来实现。具体是：北哈萨克斯坦联合系统和乌拉尔、西伯利亚联合电力系统的联系通过500kV单回线；连接西北和中部联合电力系统的是列宁格勒-康纳科夫加盟共和国国营电站的单回750kV线路，并有两回较低电压的330kV线路与

① 经互会成员国联合电力系统，又称“Мерп”电力系统，即“和平”电力系统，故在图B.1中用了“和平”电力系统。——译者

之并联；还有具有一种电压等级或多种电压等级的多回联络线，例如在南部和中部联合电力系统间的联络线的电压从110kV至500kV之间的线路约共有20条。

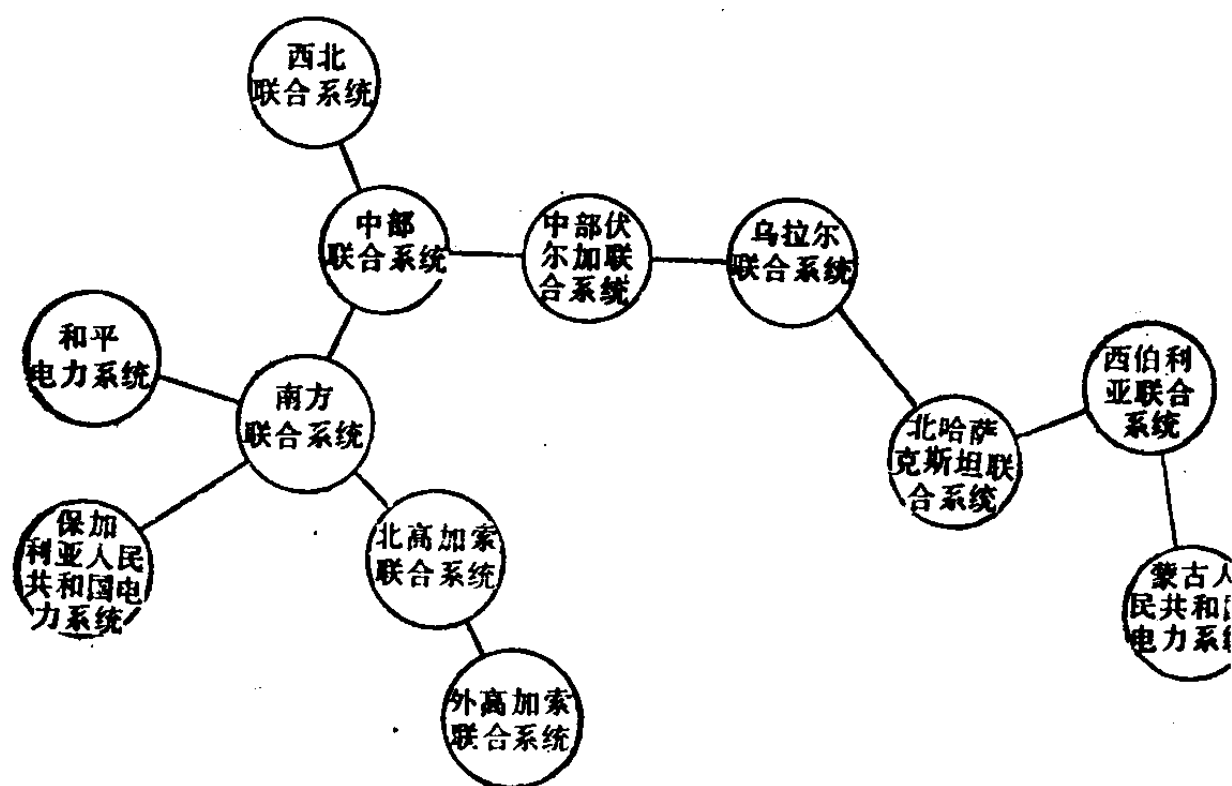


图 B.1

有些联合电力系统之间的传输能力在0.2~2.5GW之间，为与之相联的那部分统一电力系统容量的百分之一。这样的联系属于弱联系。

强大的电力联合和苏联统一电力系统的建立加速了电力发展的速度并使电力得到了最经济的发展，这是由于可以大量采用含有大容量单机机组的大容量的火电站。建设中的伏尔加-卡姆水电站和第聂伯梯级水电站以及西伯利亚强大水电站都不断地与联合电力系统连接；为了合理的利用这些水电站的电力和电能，只能将其接入在大容量的联合电力系统中工作。

从孤立运行的电站过渡到强大的联合系统，从根本上改变了对用户的供电条件。极大地提高了供电可靠性和经济性，出现了充分利用电力设备功率的可能性，并改进了电站的经济指标。在运行条件下，出现了电力系统并联运行的优越性，这里关键是可以最优地利用可用容量以及根据燃料情况的变化和水资源的形势来广泛的调用电力备用。国民经济供电可靠性的明显提高有赖于当电力系统运行时电力电量的平衡值与计划的平衡值发生未预料到的偏离时，或在故障情况下电力系统结构和运行方式被破坏时，电力系统的互相支援。

由于联合的规模巨大，增加了互联系统经济效益的绝对值，其中包括峰值负荷的降低，这是由于苏联统一电力系统不同时区的峰荷来临的时间不同。根据联合系统内部本身联络线的条件和传输能力，联合电力系统安装容量的总经济性由于错峰效益可节省 $1\% \sim 3\%$ 系统安装容量，由于互为备用可以节省 $5\% \sim 7\%$ 。

苏联联合电力系统的特点，在于其系统内部的连接具有各种不同的结构和特征。这是因为电力系统的联网是为了解决电力工业发展和国家电气化中所发生的各种不同问题——如从远方电站向负荷中心建设大容量输电线路，从相邻电网向共同的负荷点建立输电线路，连接供电网络（特别是为了供电给电气化铁路网络），为了连接孤立网络而建设电网联络线，以解决它们日益增长的负荷或者利用其剩余功率。

可以把联合电力系统的基本网络结构划分为以下几种：

辐射型——如围绕着莫斯科有500kV环网的中部联合电力系统。向此环网引入线路的有以列宁和二十二大命名的伏

尔加水电站、康纳科夫和科斯特罗姆加盟共和国国营电站等等。

单回链型线路——如南方联合电力系统。它具有单回750kV线路，并且并联有330kV分支网络。

双回链型线路——如西伯利亚联合电力系统。它以长度约2000km的双回500kV线路来连接几个大电站——纳扎罗夫斯克加盟共和国国营电站和克拉斯诺亚尔斯克、勃拉特斯克和伊尔库次克水电站。

环型网络——如乌拉尔的500kV网络。

联合电力系统的基本网络连接于电站和枢纽变电站之间，从这些变电站分布出220kV和更低电压等级的配电网，以向用户供电。

配电网可分为供电部分和配电部分本身，后者根据它所供应的用户可以分为工业用、农业用和城市用网络。供电网络在负荷密度很高的地区采用复杂的闭式连接，并常常与基本的系统网络的线路并联，而在负荷密度低的地区都是采用环形或辐射形连接。配电网本身的结构也是各种各样的，这主要决定于它的任务，用户的特性以及其容量大小等等。

电力的大规模增长要求以新的、更加现代化的优化方法来研究联合电力系统的发展规划、设计和运行，以满足国民经济增长的需求并使费用最小。

评估和选择电力系统可靠性的合理水平是现代电力系统发展的最重要问题之一。这也是近几年来苏联和其它国家对可靠性增加兴趣的原因。

一般可靠性理解为设备、装置或系统在标准文件规定的时间内，在保持自己的运行指标的条件下，完成规定功能的

性能。因此，电力系统的可靠性是在电气设备安装规程规定的频率和电压偏移范围内，保证用户电力供应的性能。

电力系统可靠性决定于它的每个元件的可靠性（发电机组，输电线路，操作设备，保护及自动装置等等），结构（备用程度）和运行工况（静态稳定和动态稳定储备）以及系统的抗干扰能力，也就是系统承受连锁性事故免遭恶性后果的能力，换句话说，就是对用户既不停电，也不投入按频率自动减载装置（AЧР）。

供电可靠性的评估，必须在元件的研制，联合电力系统的发展规划，个别系统和设施的设计，以及运行过程等各个环节中进行。甚至在设备质量优良，运行水平很高的条件下，由于一系列偶然的客观原因，设备故障也是不可避免的，首先是在运行条件下，设备可能遭受到未估计到的作用，如果考虑这些因素，将引入很大的不合理的备用。

电力系统的可靠性基本上可以用供电不间断性和可维修性来描述。这时对系统故障将理解为在停止或限制供电以及在频率降低时，所引起的对用户电量供应不足事件（全部或部分）。可维修性决定停止供电或降低频率运行的持续时间，并且和清除故障时间和元件恢复时间有关。

电力系统故障的基本形式和故障原因如下^①：

1. 统一电力系统或者其中某个联合电力系统功率短缺，原因是由于发电机组故障停运，或者是负荷增长超过了预测值而联合电力系统之间的联络线输送能力又有限。这些电力不足虽没有引起联合电力系统并列运行的稳定破坏，但是需要根据调度指令限电，否则引起频率降低，后者同样将使电

① 本书未考虑保证动力资源的可靠性问题（燃料和水力资源）。

能供应减少。

2. 为防止联合电力系统主网或统一电力系统的联络线之间的稳定破坏，也就是防止由于线路短路和大容量单元机组事故切除等所造成的事故扩大，而自动切除用户。

3. 当由于故障而解列的系统的电力供应不足且频率下降时自动切除用户。

在第2和第3条所述的某些情况下，当系统失去抗干扰能力时，可以引起大面积的全部停电，这主要是由于反事故控制装置数量不足和不完善所致。

4. 由于事故时切除配电网络线路以及在无备用的网络中进行计划检修，中断向用户供电或电压降低到不允许的程度。

5. 对用户短期停电（决定于保护和自动装置的动作时间），或者自动装置由于配电网络或主网故障引起的电压大幅度降低，如果由主网直接向用户供电时，则将导致用户工作的破坏。

根据上述对现代电力系统及其故障形式和原因的特性分析，在研究可靠性时可分为三级水平来进行：上层——指统一电力系统的基本结构（联合电力系统及其彼此间的系统互联），中层——指联合电力系统的主网，下层——指配电网络。在某些情况下，必须考虑一层对于另一层的影响。例如，某些联合电力系统的故障工况的有功功率不平衡是对全苏统一电力系统互联稳定性的极大威胁。这些功率不平衡将波及所有通过交流送电线路与之相连的联合电力系统，可能引起没有故障的联络线过负荷以及稳定破坏，也就是故障的连锁反应。

B.2 可靠性优化课题的提出

电力系统可靠性的提高和保证它的最优水平，决定于发电备用容量和电力网络间的传输能力以及反事故控制。后者的作用是保证能完全利用备用容量，即发电备用和网络传输备用，而当这些备用容量不足时又能使用户由于电量不足造成的损失最小。

提高可靠性一般与增加投资有关。因此，无论在比较设计方案或者在决定运行课题时，必须进行提高用户供电可靠性的效果和费用的比较。

根据停电后果，可将所有用户分为三类：

1. 若中断其用电，将产生与人们生命有关的极其严重的后果（如火灾，爆炸），或者造成社会生活的严重混乱的用户。
2. 若中断其用电，仅产生物质损失的用户。
3. 若中断其用电，在原则上是可以的，但是其后果不能用价值来表示（生活用电、运输、照明、取暖等等）的用户。

由于大部分用户可以归于第二类，而在系统中发生故障时，常常正是对它们供电不足，当计及可靠性来解决优化问题时，可以把折算费用的最小值作为基本判据，其中除了投资 K 和运行维护费 H 外，还包括用户的年国民经济损失 Y 。

$$Z = KE_H + H + Y = \min \quad (B.1)$$

式中 E_H ——投资有效性的标准系数。

在运行条件下，当计及可靠性而对运行工况优化时，判据则为使系统可变费用最小：

$$3_{\text{nep}} = 3_T + \bar{Y} = \min \quad (B.2)$$

式中 3_T ——燃料费用（或者是由于提高运行可靠性，而增加的燃料费用）。

电力系统元件故障是由许多具有随机性质的因素所决定的，所以可以视为随机事件。这就决定了电力系统可靠性分析必须根据数学中的概率论。

不仅是元件故障具有随机性质，就是故障后果也有随机性质。例如，由于电站设备故障，造成电站输出的功率降低，若系统中有备用容量时，则将不会造成用户供电不足。而系统中备用容量的大小，同样和随机因素有关，例如与系统中处于计划停运或强迫停运状态的机组数量，以及负荷值等等有关。因此，由于系统元件故障，造成对用户供电不足的损失也是随机变量。

为了定量的估计概率论中的随机变量，利用数学期望值概念，也就是随机变量的平均值。在比较具有不同供电可靠性的电力系统设施的接线方案或者运行方案时，必须将损失的数学期望值列入到折算费用公式（B.1）和（B.2）中。

事实上，对于某一具体年代的具体设施，供电不可靠的实际损失将与数学期望值不同，因为其元件的故障次数和停运持续时间，都与平均值不同，而损失的数学期望值都是根据平均值计算的。但是如果论及大量的设施和其长期的工作周期，则损失的平均值将接近数学期望值。因此，当多次应用根据电量不足所引起的损失期望来进行可靠性的经济评价时，则可以认为，从国民经济的观点，我们确实具有电力设施的最优接线图。换句话说，通过使包括期望损失在内的折算费用最小，可以找到电力系统设施的最优方案。这时得到的供电可靠性水平也将是最优的。

损失的近似估计可以根据电量不足值和对停电用户供电不足的千瓦小时数所造成的单位电量损失来进行。电量不足的单位电量损失由用户的生产过程的工艺来决定，一般与电量不足的性质（事先通知的或者突然的）以及其持续时间有关。

对于预先通知的停电或限电所造成的损失应只考虑与用户停电损失有关，或者说和生产减少有关。而突然停电时，除了生产减少外，还可能发生生产过程作废、原料损坏、基本设备破坏或寿命缩短、生产工艺过程延长或紊乱等造成的直接损失。两种损失都和用户性质密切相关，此外，发生直接损失的是属于电气设备安装规程中的第一类用户。预先通知的停电造成的损失可以通过在故障时刻每少供1kW电力造成的单位损失来估计，而故障则是根据停电持续时间来分类的。

很明显，在解决下层水平的可靠性课题时，必须利用具体用户的单位损失特性。对于中层和上层水平的课题，则可以使用按供电不足的形式来划分各种少供电量的单位损失的平均特性。对于负荷为1GW和以上的系统，可以利用下述少供电量的单位损失来作为不可靠后果的大致估计：

计划停电，即限额供电或者在系统峰荷时周期性的降低频率时造成的单位损失为

$$y_{0(\text{пн})} = 0.1 \text{ 卢布/kWh};$$

预告停电，即对预先通知的较短期的对用户限电，例如在检修时，或者故障后恢复并联运行时等等造成的单位损失为

$$y_{0(\text{кп})} = 0.3 \text{ 卢布/kWh}$$

短暂的故障后工况由于频率下降造成的单位损失为

$$y_0(\Delta f) = 0.3 \text{ 卢布/kWh}$$

突然停电，即在频率下降自动切除用户时造成的单位损失为

$$y_0(\Delta P) = 0.5(1 + 10\Delta P^*) \text{ 卢布/kWh}$$

突然停电即为了避免稳定破坏自动切除用户造成的单位损失为

$$y_0(\Delta P) = 1(1 + 10\Delta P^*) \text{ 卢布/kWh}$$

式中 $\Delta P^* = \Delta P / P_H$;

ΔP ——未向用户供应的电力;

P_H ——系统发生电力不足时的额定负荷容量。

根据取对用户停电和限电损失的折算费用最小为准则去求取电力系统可靠性的优化值，即使在具备所必须的原始数据的条件下，也是非常复杂的问题。因此，参考文献[1]提出了，在科研和技术工作的基本任务中，必须研究“确定用户供电可靠性指标值的准则和建立对系统的标准要求，以及形成其它相应准则的原则和方法”。

对用户的停电和限电可能由于供电网络某些负荷结点的直接故障，也可能由于系统电力或电量不足，特别是当缺电系统故障解列时，因此，可靠性准则应包括发电、输电、配电的所有生产环节。

如前所述，由于可靠性决定于系统的稳定性，所以，考虑到在保证稳定的措施中包括有引起电力不足的切除水轮发电机组和对汽轮发电机组的减载，则可靠性的准则应该与稳定准则一致，因而近期可能要进行某些修正。

为了对电力系统及其设施的规划发展和设计，同样为了供电者和电力用户彼此间的核算，将电力系统分为一系列结构水平，并对下列结构水平的可靠性作了规定，各结构水平如下：

1) 在保证电能质量处于现行标准范围的条件下的110(220)kV降压变电站的二次电压为10(20)kV的母线供电，以及向用户直接供电的电站中具有发电机电压的母线供电；

2) 220kV和具有更高电压等级的变电站的二次电压母线供电，以及向110(220)kV配电网络供电的发电站的供电；

3) 沿系统网络 and 系统间联络线的电能输送；

4) 发电站向系统的送电，其中包括远距离直流输电；

5) 电力对负荷曲线的满足；

6) 电量对负荷曲线的满足；

7) 系统抗干扰能力的保证。

第一类水平建立了三个不同的可靠性等级，对其中每个等级都规定了系统强迫停运的频率和系数。此外，对于最低（第三）等级的可靠性规定了计划停电系数。为了定出第一类水平的可靠性标准，作为初始材料，可以取如图B.2对应的三种供电接线图所保证的可靠性指标：I——两侧供电备用接线图；II——双回路备用接线图；III——无备用接线图，对第II级和第III级可靠性水平，当系统电力和电量不足时要停电和限电。

对第二类水平，同样规定强迫停运的频率和系数，其可靠性指标应该不低于第一类水平的第二级可靠性指