

电力生产现代技术

(电网部分)

蒙定中 等编

河海大学出版社

编写说明

为了适应水利电力系统大中型企业领导干部岗位职务培训工作的开展，部教育司、生产司、基建司组织了部分有专长的教授、讲师和专业科技干部，编写了一套体现水利电力行业特点的领导干部岗位培训教材，共有十四本，书名是《电力企业管理》、《电力生产企业现代管理》、《电力生产企业现代管理案例》、《电力生产现代技术（电网部分）》、《电力生产现代技术（供电部分）》、《电力生产现代技术（火电厂部分）》、《电力生产现代技术（水电厂部分）》、《电力建设现代管理》、《电力施工企业管理》、《火电施工现代技术》、《送变电施工现代技术》、《水电施工企业现代管理》、《水电施工企业经营管理》、《水电施工现代技术》。

这套教材主要是供给水利电力系统大中型企业局厂长（经理）、党委书记、总工程师、总经济师，总会计师岗位培训时使用，也可供其它经济管理干部和科技干部的岗位培训和高等院校有关专业选用。

由于经验不足，编写时间又很仓促，再加上当前水利电力企业正处在改革之中，一些问题正在研究探索，而且新的技术又在不断发展，因此，书中一定会存在着不完善或者欠妥之处，望读者批评指正。

水利电力部教育司

1987年8月

序 言

前事不忘，后事之师！

电力系统（Power System），俗称电网，是电力工业的基本形态，它包括发电、送电、变电、配电、用电与一系列信息、保护和控制装置，构成一个整体。当交流发电成为电力工业主体时，它就开始出现。百年来，它已日益发展壮大，形体健全，地跨全国，甚至越过国界、洲界，最大容量达2亿千瓦。

面对这样一个庞大的系统，人们的认识是比较迟缓的，甚至有所不同。美国人说，很长时期，他们重视发电，而不注意送变电。电网已在不断发展，而并未及时地、有意识地将之作为一个整体来进行研究。在我国，建国以来，也是长期“重发轻供不管用”，实际是目无全网。电网是客观存在，它并不以人们的意志为转移，它不断发展着，人们不认识它就会碰钉子。1965年11月9日，美国东北部系统（包括纽约）发生大停电事故，引起社会秩序混乱。此后，电网稳定运行问题引起了美国朝野的注意，成立了美国全国电力可靠性协会（NERC），制订了各区的可靠性准则，也引起了国际电力界的注意，二十多年来有了很大的进步。

但是，当别人在进步时，我们却开始了大批判。1970年全国电力会议上，批判了大机组、大电网，批判了两个“条条专政”，要求“向洋设备开刀”，搞“一厂变一厂半”，要求“按省分网，按省建网”。似乎电力系统发展的规律在中国可以听从大批判的指挥。然而，事与愿违，正是在批判大电网的同时，架设了第一条330kV的送电线——刘关线，从甘肃省的刘家峡水电站送电到陕西省的西安。此后几年，很多省由原有的110kV大城市电网，也自流地发展成220kV的全省统一电网。所不幸的是这些电网由于缺乏正常的规划，形成了先天不足、后天失调、结构紊乱、弱不禁风的畸生儿。电网的发、送、变电以及全网性事故频发，一年中电网稳定破坏事故近二十次。最严重的是1972年7月27日湖北全省电网瓦解事故，全省停电37小时，损失估计在3500万元以上，幸亏武钢高炉抢救及时，未曾报废，矿井水深已可及胸，但未死人。

1973年，为了有系统地开展的工作，对各地电网进行了全面的书面调查，概括起来，当时的电网存在10个方面的问题：

- 1、发电容量不足，普遍缺电，频率下降到48~48.5Hz。
- 2、送变电容量更不足，普遍过负荷，各地变电站均有20%左右的变压器过负荷，一般过负荷20~30%，个别达到70%。有些发电厂由于送电线容量不足，严重窝电。
- 3、调相、调压设备缺乏，无功容量不足，电网电压普遍低下。华东220kV电网，在常州地区低至154kV，京津唐电网在沧县地区110kV低至77kV。
- 4、开关设备：110kV开关普遍出现短路容量接近极限，个别地方超过。国产220kV开关的操作机构不过关，经常出现慢分慢合及拒分拒合。
- 5、保护系统紊乱，全国各地电网主系统上有180个T接，无法保护，其中以四川最为突出。作为新生事物普遍推行的晶体管保护，因元件不合格普遍出现误动。

6、电网通讯普遍只有电力线载波通讯(东北、京津唐各有一条24路的微波通讯),每逢电力线路事故,则电话不通。

7、电网结构薄弱——如华东、四川主电网均系220kV单线且长达1000多公里以上,东北水丰~大连~鞍山~水丰220kV环网,单线长800公里,每次事故,都引起系统振荡。广州220kV主网上T接长湖水电站到广州的220kV送电网,该线无防雷的架空地线,而地处重雷区,一年14次雷击,均引起广州主网波动。

8、电网事故频发,稳定破坏事故大量出现。

9、调度机构不健全,设施简陋,大部分省网中央调度系统才开始成立。跨省电网因管理分散,难以执行统一调度。

10、电网管理机构不统一,跨省的电网管理局管不了省水利电力厅,省水利电力厅对电力的管理不重视。省内各地区电力机构也因下放给地、县,难以统一管理。

在当时比较困难的条件下,我们针对不同的问题,采取了不同的解决方法:整修设备,完善电网,搞好前方(生产调度、运行、检修),充实后方(修配、试验、教育培训)。发电厂大打设备翻身仗,彻底检修设备。变电站更换过负荷变压器。组织大容量电容器的制造,推动30MVAR、60MVAR调相机的试制,组织和推动变压器有载调压开关的制造。大规模地开展110、35kV的各种型式的开关的增容改造,帮助制造厂解决220kV开关的切空载长线问题和操作机构问题。推动高频保护、距离保护和综合重合闸设备的改进和试制。推动国产微波通讯设备的制造和散射波的应用,要求打开电力通讯的第二通道。促进国务院〈1975〉114, 159号文件的颁发,力求解决电网的统一管理与统一调度问题。由于当时的政治条件,工作的推进是受到很大的阻碍的。

“四人帮”垮台之后,政治形势好转。在国务院领导同志指示下,在国家计委、国家经委支持下,以五、六年的时间进行了发供电设备完善化。在两年内解决了因各种原因形成的发电设备出力不足问题,增加了4000MW出力。陆续增建了近2000公里线路,增添了20000MVA变压器,增装了大量的无功设备,推动了国产电容器设备质量的提高和制造大、中型电容器。计划修建2万公里的微波通信,在通讯调度局的努力下完成了1万公里。1979年3月电力工业部成立,国务院颁发了(1979)189号通知,加强电网统一管理。此时,电力供应不足问题虽未解决,但由于坚持计划用电,自1978年起,全国统一调度工作加强,各地电网运行已基本摆脱低周波状态。自1970年至1980年,全国各地电网共发生稳定破坏事故210次,平均每年近20次左右。问题是很严重的。1977年开始,部生产司、电力规划设计院、电力科学研究院联合起来,共同组织调查组,对事故进行了系统分析,并组织调度运行及系统设计人员进行了研究、总结。明确了电网结构薄弱或不合理是造成系统不稳定的主要条件,并揭露出种种极易形成事故的不合理的结构型式。1979、1980、1981年先后组织了三期网局、省局总工程师参加的电网研究班,研究电网稳定问题。同时,在明确电力系统结构应该注意的事项之后,又组织了反复的调查分析,针对我国电网现状,提出了设置三道防线的原则,要求按三相短路考虑事故,和采取加快故障切除时间(0.1秒)等措施。1981年7月,在大连召开了全国电网稳定会议,要求迅速减少电网稳定破坏事故。会后,各地认真执行会议决定的措施,一年内,使稳定破坏事故减少了四分之三,取得了重大的胜利。

220kV电网存在的种种问题逐步解决(或基本解决),500kV电网又出现在面前。一般来说,电网每升高一级电压,便进入一个新的阶段,必然会出现新的问题。建国之初,很多

地方35kV电网大规模扩展，曾经在接地事故发生时，引起弧光短路。以后，装设消弧电抗器解决了。1953年架设第一条110kV线路（宁常线）时，通讯干扰问题曾经变得严重起来。文化大革命中220kV系统增多，系统稳定问题突出了。现在，500kV系统正在兴起，我们将遇见哪些我们所不认识的问题呢？为此，生产司、电规院、电科院和东北试研所的同志又进行了常年累月的调查研究，经过四、五年的时间，逐渐有所体会。于是，又于1986、1987两年，组织了新的网局、省局总工程师电网研究班，重点研究500kV电网。现在，根据这两个班的研究结果，修改了讲稿，汇编成本书，以便于广泛进行学习。本书实际是讲稿汇编，还未能形成体系明确、文字简练的教著。但是，它归纳了目前国内各个方面对500kV电力系统的认识，有经验、有教训，也尽量概括了国际大电网会议和各国电力界对500kV电力系统的认识，其中有我们体会到了的，也有尚未体会到的。能印刷出版，供更多的同志们参阅，还是十分必要的。如果能促进更多的同志来共同研究500kV电力系统，更全面、更深入地修改和充实本书中所讲的种种知识，让我们更快地掌握正在兴建的500kV电网，使我们向电力现代化迈进一大步，则更是本书编写者们的衷心愿望。

电力系统是个整体，500kV电力系统是其中一个主要部分，研究500kV电力系统也要看到电源布局，看到电网有无备用容量，也要考虑调相、调压、保护、自动、通讯等条件。不可能设想不认识电网的一般发展规律，可以真正研究和处理好500kV电力系统。为此，我们还以较多的篇幅介绍了1970年大批判以后我国电网发展的曲折过程。唐人杜牧诗云：“十年一觉扬州梦，”从1970年至1982年，我们像做梦一样地忙于补救和完善电网，也是“十年一觉”。希望今后我国电网的发展，能够明眼一点，不再做梦！

本书各章的作者为：序言与第一章，沈根才；第二、五、七章，王梅义；第三、四、十一章，蒙定中；第六、十章，吴竞昌；第八章，孙光辉；第九、十二章，郑美特；第十三章，蔡洋。

编者

1988年8月

目 录

序 言

第一章 我国电力工业的长远发展战略

第一节 形势	(1)
第二节 能源	(2)
第三节 方针	(3)
第四节 发展电网	(6)
第五节 节能节电	(7)

第二章 电网的稳定问题

第一节 总论	(8)
第二节 同步运行稳定性	(9)
第三节 暂态稳定	(12)
第四节 动态稳定	(21)
第五节 失去稳定后的对策	(25)
第六节 频率稳定性与电压稳定性	(27)

第三章 电网结构建设的方针

第一节 前言	(32)
第二节 电网结构的一些基本思想	(33)
第三节 对国外一些电网结构的分析	(34)
第四节 对我国电网结构的分析	(38)
第五节 关于加强受端系统	(39)
第六节 关于电源接入网络的原则	(40)
第七节 系统间联络线与直流输电	(42)
第八节 各级电压网络的简化与改造	(46)
第九节 电网结构的有关标准	(47)
第十节 2000年电网结构的展望	(54)
第十一节 目标与措施	(59)

第四章 大电网与大机组的协调

第一节 前言	(61)
第二节 对大机组的四级冲击	(61)
第三节 不对称运行对大机组的影响	(72)
第四节 频率对大机组的影响	(73)
第五节 切机与快关	(76)

第六节 大机组的失磁	(77)
第七节 大机组的无功功率	(79)

第五章 电网的无功补偿与电压调节

第一节 经阻抗传输功率的理论基础	(81)
第二节 无功电源与无功补偿设备	(85)
第三节 稳态电压标准与无功功率事故备用	(94)
第四节 电力系统的无功功率安排	(96)

第六章 电网的可靠性

第一节 概述	(99)
第二节 对设计和运行的原则要求	(101)
第三节 可靠性研究的目标及水平层次	(102)
第四节 大电网的可靠性指标	(103)
第五节 停运的分类及计算举例	(105)
第六节 可靠性评价的步骤	(109)
第七节 可靠性评价的方法	(109)
第八节 运行可靠性的衡量	(114)

第七章 电网的继电保护

第一节 对继电保护的基本要求	(118)
第二节 220kV及以上电网继电保护装置	(121)
第三节 500kV电网的继电保护问题	(124)
第四节 电流互感器的暂态特性要求	(125)
第五节 电容式电压互感器的暂态特性	(127)
第六节 变电所的二次回路干扰问题	(128)

第八章 电网稳定控制技术与安全自动装置

第一节 电网稳定控制的若干原则	(132)
第二节 提高电网安全稳定的主要措施	(133)
第三节 安全自动装置及其在电网中的配置	(137)
第四节 电网特性的观测方法	(146)
第五节 小结	(152)

第九章 电网频率的调整与控制

第一节 前言	(154)
第二节 频率的调整与控制问题	(155)
第三节 正常运行的频率控制	(159)
第四节 事故方式的频率控制	(164)
第五节 恢复方式的频率控制	(172)

第六节 结束语	(174)
---------	-------

第十章 电网短路电流的配合

第一节 概论	(175)
第二节 一些国家电力系统的短路电流	(176)
第三节 限制短路电流的措施和问题	(183)
第四节 短路电流水平的预测方法	(187)
第五节 新变电所的设计和原有变电所的增容改造问题	(193)

第十一章 大电网与高电压的协调

第一节 前言	(197)
第二节 高压电网的工频过电压	(197)
第三节 高压电网的谐振过电压	(203)
第四节 直流输电的过电压	(216)
第五节 重合闸	(220)
第六节 电网与有关设备的一些关系	(229)

第十二章 电网的安全稳定分析

第一节 概论	(234)
第二节 静态稳定的分析	(235)
第三节 暂态稳定的分析	(238)
第四节 动态稳定的分析	(242)
第五节 再同步的分析	(244)
第六节 电力系统崩溃分析	(247)

第十三章 电网调度管理、通信和自动化

第一节 电网调度管理	(250)
第二节 电网通信	(261)
第三节 电网调度自动化	(263)

附录一： 关于认真贯彻全国电网稳定会议文件的通知〔电力工业部(81)电生字第109号〕	(267)
---	-------

附录二： 李鹏同志在全国电网稳定会议上的讲话(摘要)	(272)
----------------------------	-------

附录三： 电力系统安全稳定导则	(276)
-----------------	-------

附录四： 电力系统技术导则(试行)	(283)
-------------------	-------

附录五： 电力系统暂态稳定计算暂行规定	(292)
---------------------	-------

第一章 我国电力工业的长远发展战略

电力工业是能源工业。其发展取决于三个战略条件：一是国民经济发展的用电需要；二是动力资源的开发条件；三是发、供电设备和技术的供应条件。而电源的开发布局又更直接地与作为动力资源的国家一次能源情况有关。为此，在近三年间，我们编制1986~2015年电力发展规划时，对上述三个条件，特别是国家一次能源平衡情况作了一系列的调查研究。

我国的能源与电力供应紧张，已经出现十多年了。1975年人民日报的元旦社论中已经指出煤、电、运是国民经济的薄弱环节。十多年来，这个局面并未改变。展望未来，一次能源的供应，随着国民经济的不断发展，将越来越紧。前十五年（到2000年），努力增产和节约，可能勉强满足需要；后十五年（2001~2015年），如不及早采取措施，将会限制国民经济，使之不能保持必要的发展速度。

第一节 形 势

建国以来，直到1985年末，三十六年间，我国的发电量平均年增长13.5%，发电设备平均年增长11.3%。电力工业是国民经济的一项基础工业，它应该是先行工业，其发展速度应高于工农业总产值的发展速度，但近十几年却低于工农业总产值的增长。这就造成缺电局面日益严重。1980年，全国拥有发电设备6000多万千瓦，缺电为1000万千瓦；1985年全国拥有发电设备8000多万千瓦，缺电1200万千瓦；1986年缺电达700亿度，约1500万千瓦。长期电力不足给国民经济和人民生活带来严重的影响。

党的十二大决定，到2000年，全国工农业总产值比1980年要翻两番，即为1980年的四倍。电力发展如保持同样的速度，到2000年，至少应达2.4亿千瓦（ 4×6000 万千瓦），年均增长7.1%。但事实上，“六五”计划的工农业总产值指标和发电量指标均已提前一年完成。1986年发电量又增长9.47%，1987年发电量增长10.3%，今年一季度发电量增长12%，都高于二十年翻两番的年均增长7.1%的计划速度，“七五”计划也必将提前完成。从钢铁和煤炭近年调整后的规划看，原拟在2000年完成的指标均将提前五年在1995年完成。看来，二十年翻两番的计划也必将提前完成。1988年3月25日，李鹏总理向七届人大一次会议所作的报告中提出：“中国国民生产总值今后五年平均每年增长7.5%左右”。工农业总产值增长率一般高于国民生产总值增长率，如国民生产总值年增长7.5%，则工农业总产值的增长率将在9%左右。所以，今后发电设备仅仅年增7.1%，势必不能解决缺电问题。据各电业管理局、省电力局按用户的实际计划进行具体测算，到2000年，如果能解决缺电问题，全国发电设备至少需达2.9亿千瓦。

2000年以后，按工农业总产值三十年再翻两番，即十五年翻一番，年平均增长4.73%考

虑，电力至少也应十五年翻一番。到2015年，全国发电设备拥有量应由2.9亿千瓦增到5.8亿千瓦。这也是一个必需达到的较低的速度。美国1967年达到2.88亿千瓦，1977年达到5.76亿千瓦，1978年达到5.99亿千瓦，用了十年多的时间完成了这个阶段的增长，我们考虑用十五年，比他们还慢些。苏联1983年达到2.93亿千瓦，以后每年只增加1000万千瓦左右，发展速度较慢，他们自1970年以来，长期缺电，电力系统降低周波运行，据苏联国家计委副主任拉拉扬茨的文章介绍，1985年以前，每年74%的时间处于低周波状态，就现场所见，低至48.5赫磁。1985年三月，戈尔巴乔夫执政之后，在报上公开宣布能源拖住了国民经济的后腿，撤换了主管石油和电力的部长，并指出过去国民经济发展速度过低是错误的。苏共二十七次通过新的发展国民经济的远景计划，要求1986~2000年的十五年间，国民经济要翻一番，年均增长4.73%。如果我们考虑的速度比这个速度还低，到时，现在在苏联出现的问题我们也可能要出现。

国民经济的发展是有它内在的规律的，过快不行，过慢也不行。党的十二届三中全会指出：“我们是个发展中国家。经济的增长和稳定，都是必需的。经济不稳定，无法保持经济持续增长和整个社会的安定，没有一定的增长速度，许多矛盾会更尖锐。总之，经济要稳定，又要增长；要有较好的效益，又要有较好的速度。”1986~2000年的十五年间，我国将有33724万人达到十八岁，除少量仍在大学读书外，绝大部分均将就业；有13059万人达到60岁，如果全部退出劳动，就业人口将净增20665万人。我国自1952年至1982年的三十年间，城乡劳动者的劳动生产率平均每年增长5.21%，1983~1985年平均年增长11.4%，如仍以5.21%计算，仅仅因为增加20665万人劳动，工农业总产值每年必须增长7.44%以上，这个速度就超过了二十年翻两番的速度。如果低于这个速度，就必然有些人不能就业，这就会造成很大的社会问题。到2000年，另外还有4000万人达到十六岁，其中至少有一半不能升高中，也需要就业。实际上，我国国民经济的发展，是不能满足于仅仅安排大量人口就业的，还必需进行四个现代化。因此，在2000年前，年增长速度必然要高于7.44%的速度。

总之，从1986年到2015年的三十年间，全国发电设备拥有量必然将由8000多万千瓦增长到5.8亿千瓦，也就是说，要净增5亿千瓦，这是我们必须考虑的一个艰巨任务。

第二节 能源

我国的一次能源平衡预测与对节能的估计，经过很多部门的研究，近年已趋于一致。1980年的基数是产原油1亿吨（相当2亿吨原煤），原煤6亿吨，共合原煤8亿吨，折合标准煤5.7亿吨。过去曾想以一番能源保两番工农业总产值，即到2000年达到产原油2亿吨，原煤12亿吨，现在看来，这种设想是难以保证的。1987年原油产量已达到1.34亿吨，原煤产量已达9.2亿吨。石油虽经连年在近海勘探，但探明储量并不丰富，石油部门计划仍按2000年达到2亿吨考虑。煤炭有足够的资源，但又集中在山西~陕西~蒙西~宁夏这块基地，其他各省（除新疆外）大量增产煤炭困难极大，今后将陆续出现仅足本省自给或自给仍不足，而基地的煤炭大量外运，存在困难。煤炭部门考虑努力增产，2000年想达到14亿吨原煤，其

中基地产7亿吨以上,外运4.5亿吨以上。现在基地外运煤约1.76亿吨,大秦铁路、侯月铁路建成后可达到3.5~3.6亿吨,仍然不足,需要在2000年前完成神木~朔县~石家庄铁路以及一系列相应的铁路。

据多方测算,2000年全国所需一次能源约在15亿吨(标煤)左右,2015年约在22亿吨(标煤)左右。2000年如能产油2亿吨,煤14亿吨,合18亿吨原煤,折合标准煤12.6亿吨,缺口2.4亿吨标准煤。其他一次能源(包括天然气,核电、水电)即使按最大可能性考虑,2000年只能达到天然气200亿立方米(相当2700万吨标准煤),核电装机500~600万千瓦,发电250亿千瓦时(相当800万吨标准煤),水电装机8000万千瓦,发电2500亿千瓦时(相当8800万吨标准煤)。三项共达1.23亿吨标准煤,尚有1亿多吨标准煤的缺口,只能依靠节约来解决。

2000年以后更加困难,假定到2015年,石油增长到年产3亿吨,探明储量需比现在已探明的增加3~4倍,至少需成倍地增加石油勘探费用。煤炭的增长,即使尽力而为,2001~2005年间,每年增加5000万吨产煤能力,到2015年全国达到年产21.5亿吨原煤。这样,油煤合计27.5亿吨原煤,相当19.6亿吨标准煤,尚缺2.4亿吨标准煤。但全国如产原煤21.5亿吨,其中山西~陕西~蒙西~宁夏这块基地必须生产12亿吨以上,需要调出8亿吨以上。而铁路由于山口有限,运量如超过5亿多吨,就有很大困难。在基地内尽量多建大电厂向外送电,但又限于水资源不足,外送电力难以超过2400万千瓦(相当外供7200万吨原煤)。也就是说,至少有2亿吨以上的原煤运不出来。现在可以考虑的办法只有在北面通过草原向东北建设大容量的铁路,并向东、向南采取管道输送。管道输煤也需用水,比例为1:1,并需研究解决输到电厂后的脱水问题,管道输送水煤浆,可用1份水送3份煤,目前国外只有苏联在建设一条年送300万吨煤的230公里长的管道,但推迟了好几年尚未投产。

总之,石油资源探明储量不多,煤炭大量生产后运输有很大的困难,这两个因素,随着时日的增长,随着国民经济发展规模的增长,随着能源需要量的增加,将越来越难以解决。

第三节 方 针

从上述一次能源平衡越来越紧的情况出发,我国电源开发与布局,理应着眼于减轻一次能源的压力,这就需要采取下列几条方针:

第一、充分开发水电,将之成为一次能源开发。

过去,开发水电,往往感到水电厂单位千瓦投资比火电厂高,因而在电力投资不足时,往往多安排火电。事实上,水电厂的建设,不仅相当于建设了相应的火电厂,而且相当于建设了相应的煤矿。一般火电厂造价每千瓦在1200~1500元,水电厂在1500~2000元,贵300~500元。但每千瓦火电厂需相应建设生产3吨原煤的煤矿,每吨原煤的煤矿建设投资至少需200元,亦即每千瓦火电厂还需国家投资煤矿600元,这就使火电厂的总投资高于水电厂。今后,很多火电厂需要脱硫,以防止环境污染。一般建设脱硫设备,火电厂的建设投资就需增加30%,运行费用增加15%。鉴于全国一次能源将越来越紧张,因此,在具有水力资源的地区应该充分开发水电,特别是在煤炭资源缺乏而水力资源又很丰富的西南地区抓紧水电开

发，国家安排计划时应将用电多的有色金属冶炼企业和化学电解工业安排在西南，就近利用大量水电。

一般来说，电网规模大了，火电厂单机容量增大，采用了中间再热方式，效率大大提高，但机组则不宜经常开停。因而，一个电网上的各个电厂、出现分工、有的带基本负荷，有的带中间负荷，有的带尖峰负荷。水电开停简便，调整负荷迅速，最宜于承担峰荷，从电源布局来说，应尽可能让水电承担峰荷（径流水电站则只能承担基荷）。我国各地电网负荷日负荷率在正常状态时为0.85左右，一般尖峰负荷约占最高负荷的 $1/6$ ，低谷负荷也占最高负荷的 $1/6$ ，亦即峰谷差为最高负荷的 $1/3$ 。考虑到一些火电老机组仍可开停，可以承担调整负荷任务，电网内的水电容量最好保持在总容量的 $1/4$ 以上，力争由水电调整尖峰负荷。特别是有核电站的电网，为了保证核电站的负荷稳定，一般应建相当核电站总容量的30%左右的抽水蓄能电站与之配合。从这些技术要求出发，并尽可能考虑开发的可能性，在未来三十年所需增加的5亿千瓦发电设备容量中，拟安排1.38亿千瓦水电。到2015年，水电总容量将达1.6~1.7亿千瓦，年发电量相当2.0~2.7亿吨原煤，或1.4~1.8亿吨标准煤。

三十年内开发1.38亿千瓦水电虽然只占开发总容量的27.6%，但这是一个巨大的任务。东北、西北、华东、华中、华南各省，包括黄河自龙羊峡以下，乌江、红水河流域的5万千瓦以上的水电站，均将全部开发，三峡在2005年前也将开工建设。在2005年前需要着手开发金沙江，要求建设两座水电站（虎跳峡与白鹤滩或向家坝与溪落渡），总规模在1600万千瓦左右，2015年各建成一半。大渡河的铜街子、瀑布沟、独松、大岗山、龙头石、冶勒、南桷河四级、雅砻江的二滩、桐子林、锦屏高坝及引水均得全部建成。澜沧江的漫湾、小湾、大朝山全部建成，糯扎渡建成一半。岷江的鱼子溪二级、太平驿、紫坪铺，白龙江的宝珠寺、紫兰坝也将建成。为了配合沿海的核电建设，还将建设17个抽水蓄能电站，共1257万千瓦。现有水电站中有较大调节库容年利用小时在4000小时以上的，有15~20个应予扩建改造，使其年利用小时降到2500~3000小时左右，充分承担调峰任务，总容量可增550万千瓦左右。由于这批水电站的水库及大坝不动，扩建投资每千瓦只需600元。

第二、在坑口、港口、路口，大量建设烧煤的火电厂。

三十年内，烧煤发电还是占主要部分，在新增5亿千瓦发电设备容量中，将新建3.4亿千瓦烧煤的火电厂。要下大力量解决煤炭运输和环境污染问题。

到2015年，全国火电厂年用原煤量将达12亿吨，其中需山西~陕西~蒙西~宁夏能源基地外运的6.26亿吨。东北需要0.82亿吨，应建设集宁至通辽的1亿吨运量的重载直达铁路。华东需要1.66亿吨，山东0.68亿吨，福建0.21亿吨，广东需0.22亿吨，共需2.77亿吨，其中需要海运的2.28亿吨，现在秦皇岛港运量为4500万吨，扩建后达7500万吨，最终可达9500万吨，显然不足，还需要在秦皇岛附近利用现有铁路新建上亿吨运量的新港口，华中需要1.05亿吨，京广、焦枝两条铁路目前已经超载，两线进行改造和焦枝复线电气化后，可望增加0.84亿吨运量，仍然不足，还需要建成京九铁路。

在神木、府谷、准格尔、大同、丰镇、神头建立电站群，以50万伏交流和直流线路向京津唐和东北送电，在王曲建电站向山东送电，在阳城建电站向河南送电，并将晋东南的煤运至焦作，在焦作建立1000万千瓦火电站基地。

在建铁道、港口和送电线同时，应开发管道输送。拟建四条管道自晋中和陕西黄陵至武汉东部两个电厂，自晋东南至江苏仪征和南通两个电站，每条管道输送1000万吨原煤，输煤

或水煤浆。

为了减少长途运费，减少大型锅炉的磨损，今后煤炭应先洗后运，火电厂烧煤应烧发热量在5000~6000大卡/公斤以上的好煤。洗后煤渣可在洗煤厂附近建设中小型沸腾炉，燃用发电。现在鸡西煤矿已采用的国产130吨/时沸腾炉，配以2.5万千瓦发电机，早经鉴定，可以推广使用。

经计算，在新增3.4亿千瓦容量的烧煤火电厂中，将有30%的电厂需要装设烟气脱硫装置，并采用电气除尘。在人口密集地区，火电厂不能烧高硫煤，特别是上海~南京~杭州间，将建设5000万千瓦烧煤电厂，应供给低硫，低灰的煤炭，以减轻当地环境污染的威胁。

第三，积极开发核电，并形成我国自己的核电制造能力。

除水、煤之外，必须积极发展核电。三十年内，瞻前顾后，拟新建核电3000万千瓦，相当1亿多吨原煤，折合7000~8000万吨标准煤。这些核电站拟建在运煤困难地区，华东100万千瓦，广东540万千瓦，东北810万千瓦，此外，在福建、湖南、江西也分建一批。

建设3000万千瓦核电是个艰巨的任务，一般核电站建设从开工到投产需时十年。2000年前，从目前条件看，最多能完成500~600万千瓦，2001~2015年的十五年间，将完成2400~2500万千瓦，平均每年要完成160~170万千瓦，这些核电站自1991年起便需陆续开工，逐年增加在建容量，到2000年时，在建容量需保持 $10 \times (160 \sim 170) = 1600 \sim 1700$ 万千瓦，这看来是需要费很大气力的。

我国有一定的核资源，也有一定的技术力量，应该建立自己的核电设备与制造能力。但核电设备制造工艺要求甚高，初期需要引进一些国外成熟的设备和工艺。我国已确定采用压水堆，自己制造30、60万千瓦核电机组，从需要看，还可制造更大容量（如120万千瓦）的机组。考虑到2015年以后石油和煤炭开发更加困难，水力开发殆尽，必须大量建设核电。估计届时每年共将增加3000万千瓦左右的发电能力，如核电提供三分之一，则我国的核电设备制造能力，到2015年，需要达到年产1000万千瓦左右。

目前，我国已探明的核资源并不丰富，除应进一步加强勘探外，尚应着手研究快中子增殖反应堆。压水堆只能利用铀资源的1%左右，而快堆能利用60%左右，因此，世界各发达国家均已着手快堆的试验研究和建设，法国已建成125万千瓦的快堆（名为超级凤凰堆），印度也已建成4万千瓦试验快堆。我国三十年内必须下力量研究快堆，并着手建成一座快堆核电站，以便三十年后大量兴建。一个快堆需要十倍容量的压水堆用过的燃料作原料，因此，一般计划大量建设快堆的国家，如法国、苏联、日本等国，都具有3000万千瓦以上的压水堆和沸水堆核电站，我国要在三十年后迅速转向大量兴建快堆，没有几千万千瓦压水堆，也是难以起步的，为此，三十年内兴建3000万千瓦压水堆是必不可少的。

按照上述布局，水电和核电共可提供一次能源2.1~2.5亿吨标准煤，勉强使国家一次能源达到22~22.4亿吨，大致平衡。

第四、要为三十年后留余地，及时做好准备。

三十年后，国民经济仍将继续发展、一次能源需要量还将增加。或者，三十年内国民经济的发展也可能比我们预想的要快（我们预想的是前十五年年均增长8.8~8.9%，后十五年年均增长4.73%），一次能源需要量也可能要超过上述预测。届时，如果一次能源无可增加，必将形成巨大的恶果，为此，必须考虑在一次能源的开发方面留有一定的战略后备。分析全国一次能源的总形势，可以作为一次能源战略后备的只有西南的三江一河，即金沙江、

雅鲁江、澜沧江和大渡河。到2015年，按上述开发方案大约还有5000~6000万千瓦的水电可供开发，其中主要在金沙江上。金沙江自虎跳峡至宜宾附近的向家坝，共有九级可以开发，共5000~6000万千瓦。按上述开发方案，2015年拟开发两个点，1600万千瓦，尚有4000万千瓦可供开发。应该在2015年以前为迅速全面开发金沙江作好准备，如果一旦需要，可以集中国力，在二十年内全部开发出来，这就需要能从上游、下游两面作战，为此，2015年前应使上游的虎跳峡和下游的溪落渡或白鹤滩基本建成，投产一半，并完成金沙江梯级其余各电站的设计工作。国家应建设昆明至大理的铁路，以便将用电多的企业安排在大理~昆明~六盘水~毕节~宜宾一带附近金沙江的地区。

怒江地临边陲，距离较远，2015年前未考虑开发，2015年以后可以开发。

三十年后，不仅沿海缺煤地区需建核电，就是内地，如西南地区运煤困难，也应建核电，使水、火、核配合，才能充分发挥水电效益。金沙江九级电站，年发电量可达2747亿度，如年利用小时采用5000小时，可装机5500万千瓦，如采用4000小时，可装机6800万千瓦，如采用3500小时，可装机7800万千瓦，相差1300~2300万千瓦。如采用核电承担基本负荷，水电承担中间负荷及尖峰负荷，容量效益是很大的。所以，三十年内创造核电大规模发展的条件，也是为三十年后的发展作准备所必须进行的工作。

第四节 发展电网

发展电源还必须发展电网。

从动力资源条件来说，我国的电源开发必须水电、火电、核电一起上，才能满足需要。但要使水电、火电、核电相互配合得好，开发得又快、又省，还必须有计划地优先发展电网。一般来说，发展国民经济，电力必须先行；发展电力工业，电网的网络建设必须先行，这是一条不以人们的意志为转移的规律。日本的东京电力公司和关西电力公司，在大规模建设之初，都先建成大容量的外轮线，在各电厂纷纷建成后，都陆续接入外轮线，再转给各变电站，这样形成坚强的网架。网络先行了，就为采用大机组创造了条件，为大电厂采用标准电厂、水电站实行梯级开发，连续作业创造了条件；在网络结构上，可以做到既节约，又坚强。

具体规划的结果，我国电网的发展在三十年内主要仍是现有的七个50万伏的大电网，东北、华北、华东、华中均将达9000~10000万千瓦容量，西北达5000万千瓦，西南达7000万千瓦，华南达3600万千瓦，山东达3000万千瓦，与华北联接，福建达1800万千瓦，与华东联接。

七个大电网之间，互有联接，但只是联合电网，实行合同调度。神木、府谷、准噶尔的火电送东北600~900万千瓦，龙羊峡、大柳树水电站向京津唐送360~400万千瓦尖峰负荷，福建向华东送200万千瓦尖峰负荷，华北向山东送200万千瓦基荷，贵州狗皮滩向湖南送200万千瓦尖峰，广西龙滩向湖南有时送100万千瓦尖峰，而湖南东江向广州有时送100万千瓦尖峰。这些送电关系，为了防止电网在稳定破坏时造成特大面积停电，均采取直达列车送电，两网分列运行方式或一点联接方式，一旦出现稳定破坏事故，两网即行解列。某些电厂远距

离向邻网送电，运行时与本地电网不联接，但停机后可以倒向本地电网。

七大电网达到1亿千瓦容量时，短路电流估计仍在50千安之内，仍可用50万伏开关。但为进一步增大容量，当短路电流超过50千安，就需要出现更高一级电压，如120万伏的电网，以便将50万伏电网打开，减小短路电流。估计2015年以后不久，必将出现120万伏电网。为此，三十年内必须抓紧120万伏电压送变电设备的研制工作。

第五节 节能节电

在努力开发能源和电源的同时，必须认真进行节能节电。

现有设备在运用上应该抓紧注意节能节电。但一般其节约程度不超过5~10%，幅度不大。要想大量节能节电，必须采用新技术，新设备，或对老设备进行技术改造。例如发电厂的煤耗率、厂用电率，小机组的消耗高，大机组的消耗低，如果要降低1克煤耗率，1%的厂用电率，在机组不变的条件下，是要费很大的气力的，并且，我们还不可能使中低压参数的小机组的效率赶上高温高压的大机组。其他行业的设备大致也是这样。

要想使能源和电力大量节约，必须改造国民经济各部门的装备，这是需要花很多时间和费用的，并且还需要一定的条件。日本由10万千瓦火力发电机组，过渡到20~30万千瓦机组，然后再过渡到50~60万千瓦机组只花了三、四年的时间，我们也曾经希望很快渡过20~30万千瓦机组，但60万千瓦机组造不出来。从1972年第一台20万千瓦机组投产之后，至今已十六年之久，看来还需要几年才能大量装设60万千瓦机组。三十年内，由于钢材限制，我们还只能制造出临界参数的机组，还不能制造超临界机组。瞻望未来，我国的节能节电水平，只能逐步提高，很难迎头赶上，一步达到日美那样的高效率水平。苏联现在准备以十五年时间，全面改造国民经济的装备，以求大量节能，我国目前应加紧对节能节电设备的制造，以求迅速完成这一过渡。为此，应加强节能组织，使各行业在行政上、在技术开发上都有专职机构，在各企业、工厂均应设专职或兼职节能人员，以便持续有效地开展节能节电工作。

提高电气化程度是节能最有效的一项措施。日本、美国电能消费占一次能源消费总量的35%，都计划在2000年提高到44%，并想进一步提高到50%。我国现在只达24%，我们设想2015年达到33~35%，需要费很大气力，特别是要纠正一些不恰当的认识和做法。近几年，国民经济发展较快，用电量大量增加，而电业投资需要较大，国家投资不足，缺电因而严重，结果，各地各自为政，纷纷装设小柴油机、小汽油机、燃气轮机发电，数达300万千瓦以上，每度电费高达0.4~0.8元，能源消耗大量增加。前五、六年已有计划淘汰1200万千瓦中低压机组，国家计委并已指定装设一批20~30万千瓦机组顶替，现在顶替机组均已投产，而这1200万千瓦机组由于各地缺电，一个也没有停用，全国发电煤耗，因此增加一克。像这样一些各自为政的局面不改变，要想大量节能节电是办不到的。要求大量节能，必须下决心解决全国缺电问题。

第二章 电网的稳定问题

第一节 总 论

电力系统的根本任务，是在国家经济发展计划的统筹规划下，合理开发能源，用综合最低成本，向国民经济各部门和各电力用户提供充足、可靠而又质量合格的电能。

可靠性准则，是规划设计电力系统的技术标准，它包括两方面的主要内容，即供电的充足性和供电的安全性。

就供电的充足性水平而论，国外已普遍采用概率性准则，而评价供电安全性的标准，目前无论在国内或国外，都是按规定的故障形态来进行考核，这方面，我国已有“电力系统安全稳定导则”可兹遵循。

对电力系统来说，安全和稳定都是电力系统正常运行所不可缺少的最基本条件。

安全和稳定是两个不同的基本概念。

所谓安全，是指运行中所有电力设备必须在不超过它们允许的电流、电压和频率的幅值及时间限额内进行。不安全的后果，可能招致电力设备损坏。

所谓稳定，是指电力系统可以连续地向负荷正常供电的状态。

在电力系统中，有三种必须同时满足的稳定要求，即：同步运行稳定性、频率稳定性和电压稳定性。

失去同步运行稳定性的后果，是系统发生振荡，引起系统中枢点电压、发输电设备中的电流和电力大幅度地周期振动，电力系统因不能继续向负荷正常供电而不能继续运行，如果处理不好，其后果是系统的大停电。失去频率稳定性的后果，是发生系统频率崩溃，引起整个系统的全停电。失去电压稳定性的后果，则是系统电压崩溃，使受影响的地区全停电。

保持电力系统的安全运行，是赋予系统规划设计直到电网调度运行的一项重要任务。就总的方面来说，保证电网安全稳定运行的基本条件有三个：

(1) 有一个合理的电网结构。

(2) 全面分析电力系统可能发生的各种事故。采取一切可行的调度措施和自动措施，保证在这些事故实际发生后，电力系统仍然能够安全稳定地继续运行。

(3) 万一系统失去稳定，能有预定措施防止发生恶性连锁反应，尽可能缩小事故损失，并尽可能快地使系统恢复正常运行。

上述三条基本措施，是在总结分析了我国电力系统的建设和运行经验，分析研究了国外几次重大系统事故的教训而后提出的。它的基本精神，已纳入“电力系统安全稳定导则”和“电力系统技术导则（试行）”的有关条文中，作为规划设计和生产运行部门共同遵守，处理有关问题时的指导性原则。

合理的电网结构，是电力系统安全稳定运行的客观物质基础。一个合理的电网结构，应当能够适应系统发展过程中可能出现的电源建设和负荷增长的不确定因素，应该能够在技术经

济上适应我国电力系统发展，建设大容量、大机组和超高压大电网的需要，应该能够为运行的电力系统提供安全稳定的客观基础，也应该能够使调度运行人员容易掌握和方便处理系统安全和稳定问题，避免全网性事故的发生和发展。

合理电网结构的基本内容是执行电网分层分区的原则。一定容量的电厂应当直接接入相应一级的电压网，以充分发挥各级电压网的传输能力，简化电网结构，并加强对高压电网枢纽点的电压支持；对受端系统、远方电源及其输电回路和系统间联络线分别提出不同的要求，不断地加强和扩大受端电网，适当地分散外远方电源。有了一个坚强的受端系统，就有能力把各个适当地分散了的远方外接电源同步地联系在一起稳定运行。对于任一外接输电网络的事故，不论因故障断开，乃至因失稳而使某一外远方电源对主系统振荡，都不致破坏受端系统与其他外接电源的同步运行和对系统主要供电负荷的继续供电，从而防止出现大面积的停电事故发生。

总而言之，一个加强了受端系统，适当分散了外接电源和相应容量的电厂直接接入相应输电电压网的电网结构，是一个合理的稳定结构，它能为电网的安全稳定运行提供良好的物质基础。

第二节 同步运行稳定性

电力系统的同步运行稳定性，是最受关注也得到认真校核的一种稳定性。

根据“电力系统安全稳定导则”的规定，电力系统的同步运行稳定性分为三种，即：静态稳定、动态稳定和暂态稳定。

静态稳定要求，为了系统的正常运行，系统中任一输电网路在正常情况和事故后传输的功率，必须低于稳定运行所允许传输的极限，并随时保留合理裕度，不因传输功率或系统电压等的正常波动而使所连系的两侧电源系统间的电势角差非周期性地无限增大，导致同步运行稳定性破坏。提高静态稳定的措施，是增大机组的同步力矩，主要是减少到系统的连系阻抗和提高送受端运行电压。发电机的励磁自动调节，对静态稳定有良好的重要作用。

动态稳定要求，不因系统运行情况的正常波动和在系统故障切除后引起系统电源间电势角差的周期性振荡发散，导致稳定破坏。一般地说，电力系统的动态稳定，是包括了系统调节设备（发电机组的调压器和调速器）与电力系统本身（电源及负荷）在内的整个电力系统的综合调节稳定性。保证动态稳定的基本条件是系统具有正的阻尼力矩。在电力系统的调节设备中，发电机的快速初始励磁（简称快速励磁）最有害于系统的动态稳定。由于发电机励磁回路具有很大的时滞，快速励磁将使机组对系统产生负的阻尼力矩。它是国内外发生过的机组对系统、系统对系统间“低频振荡”的主要根源。降低快速励磁产生的负阻尼的简单办法是降低励磁调节器的放大倍数乃至将电压调节器退出运行；为了恢复因快速励磁造成的动态失稳，还可以用降低线路传输功率，提高机端电压等手段。而补偿使之转入产生正阻尼的完善补救办法，是在励磁调节器的控制量中引入附加的经过正确相位补偿的速度增量，即所谓的电力系统稳定器（英文简称PSS）

暂态稳定性要求，在系统发生故障或断开线路等引起大干扰的操作时，保持事件后的系