



电力系统中水电厂群 日优化运行



张英贵

DIANLIXITONGZHONG SHUIDIANCHANGQUN
RIYOUHUA YUNXING



华中理工大学出版社

147924

TV737
1245

电力系统中水电厂群 日优化运行

张英贵

华中理工大学出版社

(鄂)新登字第 10 号

图书在编目(CIP)数据

电力系统中水电厂群日优化运行/张英贵—武汉:

华中理工大学出版社, 1994 年 12 月

ISBN 7-5609-1033-5

I. 电…

II. 张…

III. ①水力发电—电力系统运行 ②水力发电站—电力系统运行

IV. ①TM612 ②TV737

电力系统中水电厂群日优化运行

张英贵

责任编辑:湛柏琼

*

华中理工大学出版社出版发行

(武昌喻家山 邮编:430074)

新华书店湖北发行所经销

武汉水利电力大学印刷厂印刷

*

开本:787×1092 1/16 印张:13 字数:310000

1994 年 12 月第 1 版 1994 年 12 月第 1 次印刷

印数:1—2500

ISBN 7-5609-1033-5/TK·32

定价:10.50 元

内 容 提 要

本书是关于电力系统中水电厂群日优化运行的基础理论运用、数学模型建立与求解、模型中各组成环节的计算方法和实际生产问题系列研究成果的汇集与总结。全书共十一章,内容包括:对以往常用解法的概述与简评,电力系统日优化运行问题的简略解法,运用微增率解系统中各电厂间及水电厂各机组间负荷优化分配问题,水电厂日运行的水力计算和水力发电机组的工况计算,水电厂梯级的日优化运行,水电厂群日优化运行算例及综合分析以及抽水蓄能电站的优化运行。对火电厂经济运行作了简述,附录中汇集了水电厂群日优化运行通用的和可引用借鉴的电算程序。本书特点是理论与实用并重。

本书可供电力系统、水电厂运行管理及水能规划专业科技工作者和教师参考,还可作有关专业大学本科、硕士研究生的选修教材或教学参考书。

序 言

以系统工程的观点、方法,运用优化技术、自动控制理论,使用电子计算机研究、组织电力系统的经济运行,是当今保证电力系统工作可靠、提高能源利用率和经济效益,促进国民经济发展的有力手段。在经济和科学技术发达的国家,电力系统优化运行及自动控制的理论和实践已经发展到很高的水平。我国受整个经济、科学技术发展水平的制约,虽然在这方面还比较落后,但也已具有一定的基础,并开始在生产实践中实施。自动控制的优化运行是我国电力系统运行管理努力逐步实现的目标。

近年来我国有关部门自行研制的和从国外引进的用于水电厂水文测报和运行监测控制的自动装置为数不少,但是实际功能的发挥程度却较低。而在与优化运行结合方面更有待切实研究实现。这种状况应当尽快改变。

党的十一届三中全会以后,随着全国所有领域的拨乱反正,扭转了电力系统过去长期存在的严重不合理的运行管理的局面,用先进的技术和方法组织电力系统运行的课题被迅速提上日程。多年来在学习运用国际上先进的优化理论,提高实际的运行管理水平以提高经济效益方面已经取得了一定成效。但是与当前世界的先进水平相比,以科学管理的要求、以能够和应当取得的经济效益来衡量,还存在较大的差距。因而降低电力生产的能耗率和提高经济效益的潜力甚大。

长期以来,国内外在电力系统日优化运行的理论与方法的研究方面取得了大量成果。我国近10多年中通过鉴定的用于水、火电混合电力系统日优化运行生产实际的研究成果也不少。这些成就对于电力系统日优化运行理论和实践的发展都作出了重要的贡献。但是总起来看,还存在着不少理论上、方法上带有实质性的不足之处。不少论著在理论联系实际、注重实用和切实为生产服务方面还存在着显著的缺陷。正确理解和运用有关的数学理论,尽可能反映实际地解决水电厂水力状态,水、火电厂及其发电机组特性的计算方法和实现的途径问题等是这个课题的基础。为做到符合科学严谨性要求和尽可能反映实际情况以切实可靠地达到提高经济效益的目的,还有不少问题需要解决。当前,我们面临的首要任务是在学习、研究先进理论的基础上,密切结合我国的实际情况,从当前设备条件、技术力量和组织管理水平等实际情况出发,突出为生产服务的方向,努力将理论和新的研究成果尽快运用到电力系统的运行管理中,以取得实际的经济效益。同时还应特别强调的是,我们的研究和实际工作必须将近期和远景很好地结合起来,以全面运用优化理论实现高水平的优化运行为目标,进行相应的研究和实际的准备。在研究工作中切要防止停步于尚不便在实际生产中应用的理论成果,而应以转化为现实生产力为目标,向前更跨进一步。对于我国长期来缺电已成为国民经济发展制约因素的状况来说,特别是发表邓小平同志1992年南巡谈话和党的十四大以后,改革、开放进入新的时期,对电力的需求将更加迅猛增长的情况下,就更具有特别突出的重要意义。

10余年来,我们正是根据上述指导思想,在学习前人做出的成果的基础上,针对在理论和方法方面还需要完善、充实和提高的一些环节进行研究,努力争取得出较为系统、全面、便于实

用的成果。本书就是此项系列研究成果的汇集与总结。

现代电力系统一般由火电厂、水电厂和核电厂组成。我国在较长的时期内,核电将只会占很小的比重,而水电比重可能会逐步有所增长。三种电厂各有自己的运行特点。水电厂,包括抽水蓄能电站,由于运行上具有极大的灵活性,在电力系统整体中可以发挥突出的积极作用。一般说,水电厂的优化运行条件比火电厂复杂,系统内水电厂群相互间的联系往往甚为密切。这种状况使水电厂群在系统的运行中与火电厂相比,提高自身和系统的经济效益的潜力较大,途径较多。对此必须给予极大重视。以往见诸文献的关于核电厂的运行特点是只适于在系统日负荷图的基部,即以均匀的负荷工作。但较近的有关资料介绍,法国核电站实际运行中出力是可以调节的,而且幅度甚大。大容量的抽水蓄能电站在我国已开始兴建,有的即将投产,其基本功能将是调峰。我们研究的成果说明抽水蓄能电站的优化运行蕴含着甚大的经济效益潜能。这些情况将使今后电力系统日优化运行问题的研究及实施具有更大的复杂性。有关部门和科技工作者对此应及早采取相应的对策。

考虑我国当前的实际情况和限于作者所做研究工作的范围,本书的内容是以水、火电混合电力系统的运行行为依据,并且重点突出水电厂群的日优化运行问题。我们对此重点部分的研究成果,形成了在理论认识和运用、模型求解、各具体环节的计算方法以及提高经济效益综合途径的分析等方面较为完整的体系。

本书不用大量篇幅去重复综述前人的各种成就,而以我们的研究成果为主导内容。为了使读者能够和便于将一些成果直接引用于生产实际工作,节省劳力和时间,我们将一些通用的和可借鉴引用的电算程序及供水电厂日优化运行计算使用的子程序集编为附录。将这些程序与正文有关部分相结合阅读,有助于理解相应的理论与方法,可以提高效率。这些程序中,有些是在编制具体的水电厂群日优化运行计算程序时可以参照的模式,有些是可以直接使用的。

电力系统和水电厂群日优化运行可以提高经济效益的幅度并没有什么客观绝对的基准,因此显然是不好作具体的一般估计的,虽然有些文献中提到了一些关于个别电厂的这类数字。文献[2]中对水电厂厂内优化运行的经济效益作了概括的衡量:用每台机组实际的特性曲线与使用厂家提供的特性曲线选择工作机组台数,两种情况相比水电厂效益之差可达2.2%,使工作机组台数最优化效益提高可达6%,选择机组最优组合的效益提高可达1.5%,机组间负荷优化分配的效益提高可达1%,用简化方法进行机组间负荷优化分配(如等负荷或等开度)与用等微增率法相比,效益差为0.5%。以上各项的综合效益提高可达7.5%。这些数字可以反映水电厂的一般情况。然而对于水电厂和水电厂群来说,还必须注意到其他非数学理论所能推演的运行控制方面影响经济效益的因素。根据这种考虑,我们对个别水电厂和水电厂群所作日优化运行经济效益提高的分析计算有以下结果:某大型低水头径流式水电厂、某水电厂梯级和某混合联系的水电厂群,以相对不利的运行方式和相对很有利的运行方式相比,发电量相差分别达到18%、3%和40%。各种水电厂的具体情况是千差万别的,提高效益的可能幅度也相应不同,当然更无法确定一个衡量效益提高程度的标准线,因而不能确定一般的效益可能提高的幅度。然而以上列出的个别水电厂和水电厂群进行日优化运行可能带来的发电量提高的情况,再计及水电厂为火电厂创造有利的运行条件所带来的燃耗率的降低,具体昭示了进行电力系统日优化运行确实具有十分重大的经济意义。在一些情况下,效益的绝对量和相对量可能达到以前还没有估计到的相当巨大的境地。这使我们更深刻地认识到积极实现电力系统的日优化

运行的重要性。

基于河流短期径流预报可有较高的精确度,电力系统中水电子系统及各水电厂的日负荷图可有较高的相对稳定性,水电厂群日优化运行的经济效益的提高比较容易落实。与水电厂群长期优化运行调度由于水文预测精确度极低而难以落实的情况相比,这是突出的特点。我们应当充分运用这一优势。

限于作者水平,错误和不当之处在所难免,竭诚欢迎批评指正。

作 者

1993年10月

目 录

序言	(I)
第一章 电力系统日优化运行概述	(1)
第一节 电力系统组成	(1)
第二节 各类发电厂的基本特性	(3)
第三节 电力系统日运行的最优化准则	(4)
第二章 电力系统日优化运行问题的传统常用解法概述及简评	(6)
第一节 纯火电系统,不计网损	(6)
第二节 纯火电系统,计及网损	(9)
第三节 混合电力系统,水电厂间无水力联系	(9)
第四节 动态规划法	(11)
第五节 数学模型实现问题概略述评	(12)
第六节 对传统常用解法的若干改进	(19)
第三章 电力系统日优化运行问题简略解法	(21)
第一节 概述	(21)
第二节 水电厂优化日负荷图	(21)
第三节 电力系统简略日优化运行数学模型	(22)
第四节 解算步骤	(24)
第五节 无水电厂机组动力试验资料时的近似处理	(25)
第四章 运用微增率解电力系统日运行厂间负荷优化分配问题	(27)
第一节 运用微增率逐次逼近最优的数学模型	(27)
第二节 水电子系统厂间负荷优化分配	(29)
第五章 水电厂有功负荷机组间优化分配	(32)
第一节 概述	(32)
第二节 水电厂有功负荷机组间优化分配数学模型	(33)
第三节 运用微增率逐次逼近解法	(34)
第四节 最优工作机组台数及最优机组组合	(36)
第五节 动态规划法	(38)
第六章 火电厂动力特性及经济运行概述	(46)
第一节 火电厂动力特性	(46)
第二节 火电厂经济运行	(49)
第七章 水轮发电机组工况参数计算	(50)
第一节 概述	(50)
第二节 水轮发电机效率特性	(52)

第三节	轴流转桨式水轮机特性	(53)
第四节	混流式及轴流定桨式水轮机特性	(58)
第五节	水轮发电机组流量对出力的导数	(65)
第六节	水轮发电机组动力特性的几种数值逼近方法	(69)
第七节	水轮机引水道水头损失	(71)
第八章	水电厂上、下游水位计算	(73)
第一节	水库特性	(73)
第二节	明渠非恒定流的基本特性	(73)
第三节	明渠非恒定流计算的理论方法	(75)
第四节	解圣-维南方程组的差分法	(77)
第五节	理论方法计算中的一些问题	(80)
第六节	明渠非恒定流水位计算经验方法	(82)
第七节	以水电厂日负荷图为上边界条件的计算	(87)
第九章	水电厂梯级的日优化运行	(89)
第一节	梯级水电厂间的水力联系	(89)
第二节	梯级水电厂间日负荷优化分配	(92)
第十章	水电厂及水电系统日优化运行算例及综合分析	(96)
第一节	概述	(96)
第二节	低水头径流式水电厂	(97)
第三节	水电厂梯级	(102)
第四节	混联水电厂群	(104)
第五节	径流式水电厂调蓄容积的利用	(111)
第十一章	抽水蓄能电站的优化运行	(114)
第一节	概述	(114)
第二节	优化运行数学模型及其解算	(115)
第三节	抽水工况各环节的计算	(117)
第四节	提高经济效益的综合途径	(118)
第五节	实例计算及简要评述	(120)
附录		(125)
一、确定轴流转桨式水轮机效率计算式参数的程序		(125)
(一) 以工作特性曲线组为原始资料		(125)
(二) 以综合特性曲线为原始资料		(128)
二、确定混流式及轴流定桨式水轮机效率计算式参数的程序		(132)
(一) 以工作特性曲线组为原始资料		(132)
(二) 以综合特性曲线为原始资料		(137)
三、确定水库水位容积关系式参数的程序		(143)
四、确定引水道水头损失计算式参数的程序		(144)
五、确定河道断面恒定流水位流量关系式参数的程序		(146)

六、确定水电厂下游断面非恒定流水位计算式参数的程序	(148)
(一) 以流量、水位过程实测记录为原始资料	(148)
(二) 以水电厂负荷过程、逐时段运行机组台数及上、下游水位过程记录为原始资料	(152)
七、确定水电厂下游河道若干断面非恒定流水位计算参数的程序	(157)
八、水电系统日优化运行计算子程序集	(159)
(一) 给若干变量赋初值	(160)
(二) 优化运行机组台数的确定	(160)
(三) 进行机组组合程序段	(160)
(四) 运行机组间初分负荷	(161)
(五) 水电厂负荷为零的上、下游水位计算	(161)
(六) 装设混流式机组水电厂机组工况及水力计算	(162)
(七) 装设轴流转桨式机组水电厂机组工况及水力计算	(164)
(八) 混流式水力发电机组间负荷分配优化调整	(165)
(九) 轴流转桨式水力发电机组间负荷分配优化调整	(167)
九、水电厂机组间负荷优化分配动态规划迅捷解法程序范例	(169)
十、径流式水电厂调蓄库容优化运行程序范例	(178)
十一、抽水蓄能电站优化运行程序范例	(182)
十二、水电厂耗水量计算程序	(191)
参考文献	(195)

第一章 电力系统日优化运行概述

第一节 电力系统组成

由发电厂、变电站、输电及配电网络和电力用户形成的生产和使用电能的具有复杂联系的整体,称为电力系统。电力系统中通常可有火力发电厂、水力发电厂、原子能发电厂和抽水蓄能电厂等。由两种以上发电厂,其中包括火力发电厂、水力发电厂组成的电力系统叫做混合电力系统。现代的电力系统多属于这种形式。纯火力发电系统或纯水力发电系统都是很少见的。

电力系统中的电力用户可能有各种类型,它们具有不同的性质和要求。从保证供电的重要性来分,一般可区别为三级:对一级用户的供电要求不能中断,否则将引起严重后果;二级电力用户属于重要用户,若中断用电将给生产带来很大影响;其他由于中断供电不会带来严重后果或很大影响的电力用户,均属于三级用户。对于以上三种不同的电力用户的供电,电力系统可以给予不同的保证程度。

按电力用户的性质一般可区分为工业用户、农业用户、交通运输用户和城镇公用事业及家庭用户等。这几类用户一般具有各自的用电过程的特点。工业用电的基本特点是用电量,年内用电过程比较均匀,而日内用电变化则视生产班制而不同,如一班制、二班制生产用电过程变化较大,三班制和连续性生产日内用电则较均匀。农业用户年内具有较大的季节性变化。交通运输用户主要是电气化铁路运输。电气化铁路用电在年内和日内是十分均衡的,但在一日内要多次出现短时的冲击负荷高峰,这发生在电气火车启动的时候。城镇公用事业及家庭用电的特点是年内、日内变化都比较大。

电力系统中任一时刻所有电力用户用电功率的总和等于电力系统在该时刻的负荷。此外为满足电力用户用电功率的要求,发电厂生产电能需要相应的厂用电功率,输配电系统要发生相应的功率损失。系统中全体电力用户用电功率与发电厂用电功率及输配电损失功率之总和形成该时刻电力系统的总负荷。电力系统总负荷一日内随时间变化的过程以曲线形式表示称为电力系统的日负荷图。电力系统实际的日负荷图形式一般如图 1-1(a) 所示,为便于对日负荷图进行分析,将图 1-1(a) 的锯齿状的过程线代以光滑的曲线如图 1-1(b) 所示。然而为适应对电力系统进行日运行计算的情况,在进行有关计算时一般都将日负荷图由 1-1(b) 的形式进一步转变为如图 1-1(c) 所示的阶梯状过程图,亦即将一日内连续变化的曲线,离散为若干等时段的由时段平均值组成的阶梯状图形。一日所分的时段数一般为 24 个。

图 1-1(b) 中分别标出了日最小负荷 $P_{\min}$, 日平均负荷 $\bar{P}$ 及日最大负荷 $P_{\max}$ 。此三种特征负荷将图划分为三个部分:日最小负荷以下为基荷;日最小负荷与日平均负荷之间为腰荷;日平均负荷与日最大负荷之间为峰荷。也有将日最小负荷以上的部分统称为峰荷的。对系统日负荷图这样划分区域,是为了在分配各个电厂负担负荷的位置时较为方便。日平均负荷与日最大负荷的比值称为日负荷率,它反映日负荷的均匀程度。

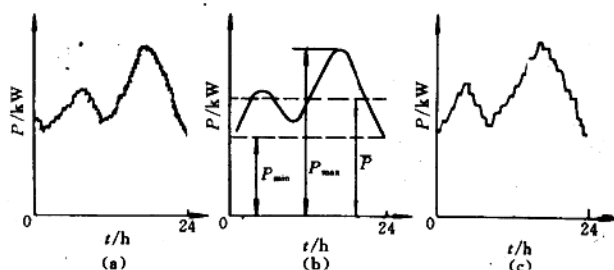


图 1-1 电力系统日负荷图

显然,电力系统日负荷图所包围的面积为次日负荷图相应的日发电量,根据图 1-1(c) 可用下式计算日发电量:

$$E_d = \sum_{i=1}^{24} P_i$$

式中 P_i 为时段 i 的平均负荷。

故日平均负荷

$$\bar{P} = E_d/24$$

为便于运用日负荷图进行各电厂间的负荷分配和有关计算,可绘制系统日负荷图分析曲线,如图 1-2 所示。此分析曲线就是给定的日负荷图任一出力水平与在负荷图上截取的部分所对应的日电量的关系曲线。其绘制方法及物理意义乃至对此曲线的使用由图 1-2 可一目了然。图中 P 是负荷, E 是电量, t 是时间。

电力系统运行中调度机构根据以往的资料,采用一定的方法作出负荷预报,拟定系统日负荷图,作为对各个电厂分配日负荷的依据。但是,系统实际运行的结果,所得日负荷过程与预报的系统日负荷图总是不一致的。当然,二者的差别愈小,反映系统计划调度的水平相应愈高,运行的质量相应愈好。这样,在运行过程中,各个电厂的出力过程,也相应地会与预先给定的负荷图有出入。

电力系统日负荷由系统中的发电厂共同负担。在基荷部分工作的电厂,可以以均匀出力运行;在峰荷部分工作的电厂,随负荷的变化而变化出力,即以变动的出力过程运行。后者的工作过程称为调峰。图 1-1(a) 所示的锯齿状的负荷跳跃,是负荷的突然改变。由于系统中电厂的出力不能在同一时刻发生与之完全相应的改变,因而引起系统出力与负荷暂时不平衡而发生电流频率变化偏离额定频率的情况。为保证

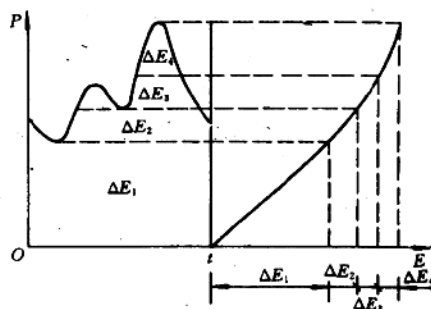


图 1-2 日负荷分析曲线

2

供电的质量,要求这种偏离在限定的幅度内且尽快予以消除而维持正常的频率。担负这种随时调整出力以维持系统正常供电频率任务的运行称为调频。

电力系统由于将各种类型的发电厂联结在一起,使之相互配合,取长补短,较之电厂单独供电可以大大提高供电的可靠性、电能质量及经济性。当代的发展趋势是大电力系统直至全国统一甚至跨国的大电网。我国已经分别以大区组成电网,并向现代化管理调度发展。

第二节 各类发电厂的基本特性

由于电力系统中所有各类电厂都是在系统统一调度指挥下共同工作,它们的运行情况密切联系,相互制约,相互影响,所以必须掌握各种类型发电厂的基本特性,才能使之配合协调,以达到保证供电质量、运行可靠和提高经济效益的要求。

一、水电厂的基本特性

从长期运行的角度来看,由于水电厂据以进行发电的河川径流随季节和年际的变化,决定了水电厂运行情况随季节和年际的多变性。这一点对具有各种不同径流调节性能的水电厂一般都是如此。但是这里研讨的是电力系统的日优化运行问题,所以将以水电厂长期运行计划已定为前提,即一般以水电厂日用水量一定的情况来分析其有关的特性。

水电厂最基本的特点是它的主要动力设备——水轮发电机组工作的灵活性。水力发电是借助水轮机在瞬间将水流的能量直接转变为旋转的机械能,并同时由发电机转变为电能,而水轮机的调节机构运转灵活迅速,能够随机组负荷的变化快速调节进入水轮机的流量,使出力与负荷相适应。特别是在实现自动控制的情况下尤其如此。大型的水力机组通常只需几分钟的时间,即可由开机达到满负荷运行。由于水电站具有能迅速适应负荷的变化而调整出力这一突出特点而使之宜于担负调峰、调频以及系统事故备用的任务。此外还必须提及,水轮发电机组在调整出力的过程中,除机组效率随之变化外,一般并不会带来水量即一次能源的损失。上述特点,使水电厂在电力系统中可以一般不付代价地发挥极为突出的良好作用。

水电厂的另一基本特点是,与火电厂相比有较为复杂的、变化的运行条件。这里主要指水电厂在担负变动负荷的运行过程中,相应引起上、下游水位、引水道水头损失的变化而使水力发电机组在变动的水头下工作。这首先使计算水轮发电机组效率变得复杂,因为水轮发电机组的效率是水头和出力的函数。而且以上几种变化本身的计算确定也比较麻烦。所有这些因素之间又是互相联系和互为函数关系的。不少文献对这些因素采取了一些甚为粗略的考虑方法,有的甚至忽略其变化。对于水电厂厂内经济运行的计算,应当说这是很不适宜的,也可以说在一定情况下是不可行的。因为它必然对计算结果带来有实质性影响的误差。这种情况对于不同条件的水电厂,如水头高低,上、下游水位变化的幅度大小和速率高低等,其影响程度会有所不同,但问题的基本性质总是如此。

二、火电厂的基本特性

火电厂,包括凝汽式和供热式,其基本特点是由矿物燃料燃烧产生热能,然后转变为电能,与水电厂的能量形式转换相比,需要长得多的过程。已经转变的热能和正在燃烧的燃料,在负

负荷突然降低时,即机组需求的一次能源减少时,是无法收回或减少的;在负荷突然增加时,火电厂也不能使燃料迅速实现转变为电能的过程,不像水电厂那样灵活,能够随时调整进入水轮发电机组的一次能源,使机组出力迅速与负荷变化相适应。这样,火电厂必须付出附加燃料消耗的代价,否则是不能或不宜担负急剧升降的负荷的。这种附加燃料消耗之量究竟有多大,不同的资料有不同的说法。例如,据统计我国华东电网火电平均煤耗约 $0.4\text{kg/kW}\cdot\text{h}$,而参与调峰煤耗将增至 $486\sim 511\text{g/kW}\cdot\text{h}$,平均提高 $22\sim 29\%$ 。有的资料说明,采用压低 50% 出力调峰,顶峰运行 8 小时,关出力运行 16 小时,将增大之煤耗量可达 40% 。压低出力运行使火电设备寿命缩短。而且火电担负调峰、调频或事故备用,相应的事故多,强迫停运率高,厂用电率高。据此,从经济性和供电可靠性考虑,火电厂应当尽可能担负较均匀的负荷。

火电厂与水电厂比较还有一个突出的缺点,就是大型发电机组由停机到开机并带满负荷需要几个到十余个乃至几十个小时并附加耗用大量燃料。一台 12 万千瓦的发电机组启停一次耗煤可达 84 吨之多。

三、核动力发电厂的基本特性

核动力发电厂技术复杂,造价高昂,在我国还只是开始创建和发展,第一座核电厂于不久前才投产。以往一些文献都指出,此种发电厂只宜承担固定负荷,以保持较高的效率。但据四川电力部门赴法考察组报告,法国核电站实际运行中是可以调节的,短时间、长时间可作不同的调节,从白天到晚上比火电调节幅度还大,最小出力可达满出力的 $25\sim 30\%$ 。但是从安全考虑实际运行没有这么低,其调节性能肯定是相当好的。核电同样可以作跟随负荷的频率调节,在 20 分钟内每分钟负荷可调 $\pm 3.5\%$,约束条件是燃料循环,初、末期燃料不同并和燃料种类有关。

第三节 电力系统日运行的最优化准则

电力系统运行最基本的要求一般是供电的可靠性,符合电能质量标准,以及经济性等,而可靠性与保证电能质量应是前提条件。我们通常所说的电力系统运行的最优,就是指在保证供电可靠和满足电能质量标准要求的前提下,使经济指标达到最优。混合电力系统运行最优的一般性的准则是运行支出或生产费用最小。

这一准则实际上也就是国民经济效益最大的准则,具有一般性和全面性。但是,由于确定各种有关损失值与工况间的函数关系是很困难的问题,从而使此准则难以付诸实用。因而常采用在保证对系统供电要求、保证可靠性与电能质量的前提下,使电力系统燃料费用 C_F 为最小的准则,即

$$C_F = \sum_{j=1}^K \sum_{t=1}^m B_{jt} P_j \rightarrow \min$$

式中 m 计算时段数;
 K 火电厂数目;
 B_{jt} j 电厂 t 时段消耗的燃料;
 P_j j 电厂的燃料价格。

然而准确地确定不同的火电厂燃用的不同燃料的价格和计算它们的燃料费用,有时也是一项难以解决的课题。因而常采取另一种方式,以标准燃料的消耗量最小为经济运行准则,即

$$B = \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^n B_{jt} \rightarrow \min$$

这里 B_{jt} 表示 j 电厂 t 时段标准燃料的消耗量。当各电厂使用非标准燃料时,运用此准则只需将各个火电厂使用的燃料统一折算为标准燃料。折算方法将在第二章中介绍。

上述混合电力系统优化运行的准则要在系统内各水电厂日用水量一定的条件下实现。

正确地运用系统优化运行准则以及各有关因素的合理计算,在系统运行的最优化分析中具有十分重要的作用。这些条件决定着计算结果是否反映实际。在具体进行系统运行优化计算分析时,必须认真细致地处理。

第二章 电力系统日优化运行问题的 传统常用解法概述及简评

电力系统,包括火电系统、水电系统和混合电力系统的日优化运行问题的数学处理属非线性规划的求解问题。如在序言中已经提及的,一些传统的解法存在带有实质性的缺陷。以下首先根据一般模式对这些解法作简要的介绍,然后再进行评述。

对于解析型的方法,这里将只对以某种判据条件确定目标函数极值而求得最优解的间接解法进行评述。

第一节 纯火电系统,不计网损

纯火电系统日优化运行的准则可采用火电厂的发电燃料总耗量或总费用最小,取前者则其目标函数如下:

$$B_T = \sum_{i \in R_i} B_i(P_{ii}) \rightarrow \min, \quad i = 1, 2, \dots \quad (2-1)$$

式中 B_T 燃料消耗总量;

P_{ii} 火电机组 i 的负荷;

B_i 火电机组 i 的燃料耗量(考虑时间因素,则为燃耗率),是火电机组 i 负荷 P_{ii} 的函数;

R_i 火电机组集。

约束条件:

系统有功功率平衡

$$P_D = \sum_{i \in R_i} P_{ii} \quad (2-2)$$

式中 P_D 系统总负荷。

机组负荷限制

$$\underline{P}_{ii} \leq P_{ii} \leq \bar{P}_{ii} \quad (2-3)$$

式(2-3)中字母下“—”表示最小,字母上“—”表示最大。

此系统运行最优化的课题就是在满足式(2-2)、(2-3)约束条件下,使目标函数式(2-1)达极小值。

暂时只考虑式(2-1)、(2-2),这是一个具有等式约束的求目标函数极值的问题。运用拉格朗日乘子法可得等价的无约束条件的目标函数为

$$B_i = B_T + \lambda [P_D - \sum_{i \in R_i} P_{ii}] \quad (2-4)$$

式中 λ 拉格朗日乘子。其物理含义是将 $[P_D - \sum_{i \in R_s} P_{si}]$ 之功率值折算为燃料值, 否则, 式(2-4)在量纲上不合理。

式(2-4)取极值的条件是

$$\frac{\partial B_i}{\partial P_{si}} = 0 \quad (2-5)$$

依据式(2-5)对式(2-4)进行偏微分运算, 得

$$\frac{\partial B_T}{\partial P_{si}} - \lambda = 0 \quad (2-6)$$

设此纯火电系统有 n 台机组, 则由式(2-6)有

$$\lambda = \frac{\partial B_1}{\partial P_{s1}} = \frac{\partial B_2}{\partial P_{s2}} = \dots = \frac{\partial B_n}{\partial P_{sn}} \quad (2-7)$$

式(2-7)是 B_i 取极小值的必要条件, 还必须满足充分条件

$$\frac{\partial^2 B_i}{\partial P_{si}^2} > 0 \quad (2-8)$$

这样, 同时满足式(2-7)及(2-8), 就是 B_i 取极小值的完全条件。

至此, 我们可以对纯火电系统以燃耗量最小为准则的最优化运行概括表述如下: 在满足系统负荷要求条件下, 按下述情况分配负荷, 使每台运行机组所承担负荷对应的燃耗率对各自负荷的二阶偏导数均大于零, 且此时各运行机组的燃耗微增率均相等, 则相应的各机组间有功负荷的分配为最优, 即系统燃料总消耗量最小。此方法被称作等微增率法。

还注意到, 以上的推导过程未计及不等式约束, 所以在使用式(2-7)、(2-8)确定机组间负荷优化分配的过程中, 必须时时使之满足式(2-3)。

根据式(2-7)可达到系统燃料总消耗量最小的目标。这里应当特别强调指出, 如果所有机组使用的燃料都一样或同是一种价格, 则此时经济上也达到了最优, 即燃料总费用最小。如果各机组使用之燃料价格不一, 则此时经济上一般并不是最优。当然, 我们实际的目标应当是经济上最优, 在此情况下应作如下处理:

设各台机组使用燃料之价格为 $p_i, i \in R_s$, 由式(2-7)、(2-8)中各燃料量乘以各自的价格, 可得等微增率式

$$\frac{\partial(B_i p_i)}{\partial P_{si}} = \frac{\partial(B_2 p_2)}{\partial P_{s2}} = \dots = \frac{\partial(B_n p_n)}{\partial P_{sn}} \quad (2-9)$$

及

$$\frac{\partial^2(B_i p_i)}{\partial P_{si}^2} > 0 \quad (2-10)$$

式(2-9)、(2-10)是使系统满足电力用户用电功率要求条件下, 使系统燃料总费用达到最小的确定各机组间有功负荷分配的条件。式(2-9)中的各项, 称为各个机组的燃料费用率微增率。

如果我们规定以各机组所用燃料中某一种燃料的单位含热量或其价格为基准, 例如 1 号机组的燃料价格 p_1 , 令 $\gamma_i = p_i/p_1$, 则式(2-9)、(2-10)可写为

$$\frac{\partial B_1}{\partial P_{s1}} = \gamma_2 \frac{\partial B_2}{\partial P_{s2}} = \dots = \gamma_n \frac{\partial B_n}{\partial P_{sn}} \quad (2-11)$$