

高等学校教材

电力系统安全分析与控制

山东工业大学 邹森 主编



高等学校教材



电力系统安全分析与控制

山东工业大学 邹森 主编

水利电力出版社

内 容 提 要

本书着重介绍电力系统安全分析与控制的基本概念和方法,并且讨论了N和N-1安全性。全书共分六章,主要内容为:现代电力系统安全监控系统概述;电力系统潮流计算;电力系统安全分析;电力系统等值;电力系统正常运行安全控制;电力系统事故运行安全控制。

本书是作为高等学校电力系统及其自动化、电力系统继电保护和自动化专业的选修教材,也可供电力系统从事这一领域工作的工程技术人员参考。

高等学校教材

电力系统安全分析与控制

山东工业大学 邹森 主编

*

水利电力出版社出版

(北京三里河路6号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

北京市地矿局印刷厂印刷

*

787×1092毫米 16开本 9.5印张 213千字

1995年11月第一版 1995年11月北京第一次印刷

印数 0001—1980册

ISBN 7-120-02404-3/TM·643

定价 7.50元

前 言

60年代以来,工业化国家一些大电力系统多次发生大面积停电事故,在经济上造成了巨大损失,为此,国内外对电力系统安全分析和控制问题极为重视,使其成为异常活跃的研究领域,并取得了很大成果。近年来在这一领域内,已经发表了大量的文献。本书着重介绍电力系统安全分析和控制的基本概念和方法,并且只讨论 N 和 $N-1$ 安全性。编者认为,这样有助于初学者对该领域有基本的和较完整的了解,也符合 $N-1$ 事故发生概率最大的特点。至于 $N-2$ 及以上的安全性,读者如需要作进一步了解,可在此基础上阅读有关文献进行研究。

本书是作为“电力系统及其自动化”和“电力系统继电保护和自动化”专业的选修课教材,其目的在于为学生扩展对电力系统分析的眼界,并加深对其的认识,以适应现代大电力系统对工程技术人员的要求。因此,本书也可供电力系统从事这一领域工作的工程技术人员参考。

全书共六章,其中,第一、六章由潘久平编写,其余各章均由邹森编写。邹森任本书主编。张波参与了本书例题的程序调试和计算工作。

本书由成都科技大学王贵德教授主审,提出了很多宝贵的建设性意见,在此表示衷心的感谢。

限于本人的水平和条件,虽然作了努力,书中难免存在错误和欠妥之处,敬请读者指正。

编 者

1994年3月

目 录

前 言

第一章 现代电力系统安全监控系统概述	1
第一节 现代电力系统的运行特点	1
第二节 电力系统的运行状态	4
第三节 现代电力系统计算机监控系统的基本构成	8
第四节 电力系统安全监控应用软件的基本功能	13
第五节 电力系统的分层控制	16
第二章 电力系统潮流计算	20
第一节 概述	20
第二节 直流法潮流计算	25
第三节 保留非线性的潮流计算	27
第四节 有约束条件的潮流计算	36
第五节 灵敏度分析	42
第三章 电力系统安全分析	45
第一节 概述	45
第二节 电力系统静态安全分析	46
第三节 电力系统动态安全分析	73
第四章 电力系统等值	85
第一节 电力系统静态等值	85
第二节 电力系统动态等值	93
第五章 电力系统正常运行安全控制	104
第一节 概述	104
第二节 电力系统最优潮流	105
第三节 电力系统的预防性控制	116
第四节 电力系统的校正控制	117
第六章 电力系统事故运行安全控制	119
第一节 电力系统紧急状态的安全控制	119
第二节 电力系统恢复状态的安全控制	135
附录一 雅可比矩阵	141
附录二 灵敏度矩阵	144
参考文献	146

第一章 现代电力系统安全监控系统概述

第一节 现代电力系统的运行特点

电力工业的发展是整个国民经济发展水平的重要标志。随着用电需求量的不断增长,电力系统的规模也日益扩大。大规模电力系统的运行具有明显的优越性:

- 1) 可以更合理地开发和利用水力、火力和原子能等能源,以解决资源与负荷分布地域间的不平衡。
- 2) 有利于采用大容量机组,以降低基建和运行费用,加快建设速度。
- 3) 在正常情况和事故情况下可以互相调剂、互相支援,减少了检修备用和事故备用容量,提高系统运行的安全水平。
- 4) 可以利用时差和季节差错开负荷高峰,取得错峰效益;可以在更大地区范围内进行能源调度和协调配合,获得各种能源的最有效利用。

由此可见,形成大规模电力系统是电力工业发展的客观规律,是世界各国电力工业所走的共同道路。如俄罗斯已基本形成了全国统一电力系统并且与相邻国家互联,形成了更大规模的联合电力系统。美国电力工业管理虽然比较分散,但各电力系统在发展过程中也互相联网,目前已形成三大联合系统。至1992年我国华东、东北、华中和华北四个跨省的大区电网,其装机容量均已达到20000MW以上。主力火电机组的单机容量达300MW和600MW。大型水电厂和核电站的建设投运,500kV交、直流输电网络的形成,已使我国电力系统步入大电网、高电压、大机组时代。预计在不久的将来,各大区电网也将相互联网,最终形成全国统一的电力系统。

大规模电力系统的形成,大机组、超高压远距离输电线的出现,以及系统内电压层次的增加、电厂类型多样化、环网重叠等,使系统的结构和运行方式越来越复杂,对安全、经济和电能质量(电压和频率)的要求更加严格。现代大电网的设计和运行所涉及的技术内容极为广泛,下面仅对与现代大电网安全、经济运行有关的问题作简单概述。

一、大电网的经济运行及其安全约束

大规模电力系统利用计算机实现在线经济调度可以合理地使用燃料、降低电力系统煤耗和网损,经济效益显著。国内外长期的运行及计算实践表明,电源经济分配可以节省0.5%~2%的燃料或运行费用;机组最优投入的节省量为1%~3%;水火电经济协调的效益依系统内水电厂的情况不同而有较大差异,据文献记载,最高的节省量可达5%。

然而,大规模电力系统的经济运行是一个错综复杂的问题。如果从控制理论的角度来讨论,其控制目标是实现全系统最小燃料费用或最低发电成本,具体执行方法是控制系统中被指定的各种类型发电机的出力。为实现这个目标,不仅要考虑各种发电厂间的经济特性问题,还要考虑在广阔的地域范围内水、火电厂间的经济协调问题,以及在大规模电力

系统经济运行中占相当比例的网损问题。还应指出的是,在大规模电力系统的运行中,运行的安全性越来越受到重视。因为,一次大面积停电事故给国民经济带来的损失,远远超过了多年来经济调度所带来的效益。因此,电力系统经济运行和电能质量控制中的各种调节和控制措施,都必须考虑到调节后电力系统运行的安全性,也就是说,经济出力分配和控制都应受到系统运行安全条件的约束。即在正常运行和预想事故情况下,必须使设备的运行参数在允许的范围内(如发电机有功和无功出力的上、下限,系统电压控制点电压模的上、下限),必须使通过线路的潮流在安全限值以下,或者是线路两端的功率角保持在电力系统稳定运行的范围内等等。只有在满足安全约束的条件下,才有经济运行的意义。如果存在电力系统的安全性受到威胁的情况,那就必须在电力系统运行的安全性、经济性和电能质量之间协调,以便取得在满足安全运行条件下的最大经济效益和最好电能质量。

由于大规模电力系统安全经济运行的复杂性,还没有解决上述问题的统一模型,至今只能从不同角度来解决问题的某些方面。随着计算机技术和有关安全经济运行理论研究的发展,利用计算机监控系统来实现全面的安全经济调度是人们所期望的目标。

二、国内外电网大停电事故的经验教训

前面已述,建立大规模联合电力系统不仅可以获得巨大的经济效益,而且又可在系统发生事故时提高其抗扰动性能。但系统的复杂性对系统的安全运行产生潜在的威胁,即某些扰动可能导致大面积停电和稳定性问题尖锐化。小电力系统发生事故造成的停电是局部的、有限的,而大电力系统发生事故,特别是发生稳定破坏和不可控的恶性连锁反应时,停电时间长,后果严重。当电网结构薄弱、管理不善而又缺乏必要的技术措施时,则某些单一设备的故障,可能发展成为全网的大面积停电事故。因此,必须把保证大电力系统安全运行问题放在极为重要的位置,这是国内外一些大电力系统发生的多次大停电事故中得出的经验和教训。对于我国电力系统,由于电网结构一般比较薄弱,重视和防止全网性大停电事故尤为重要。

在国外超高压大电网中,自60年代开始,大面积停电事故时有发生。开始受到广泛注意的是1965年11月9日美国东北部停电事故,即引起震惊的第一次纽约停电事故,这次事故造成21000MW用电负荷停电,最长时间达13个小时,影响范围包括美国纽约市和美国东北部6个州及加拿大安大略省,停电区域20万km²,影响居民3000万人,经济损失达1亿美元。事故起因是一条230kV输电线路因过负荷继电保护误跳闸,潮流转移到其它并行的四回线路上,造成四条线路过负荷,保护动作相继跳闸,致使系统发生振荡,电压和功率大幅度波动,形成暂态稳定性破坏,联络线先后跳闸,系统被迫解列,造成大面积停电。再者,在事故发生过程中,由于调度人员不了解事故起因,对事故处理不当,影响了供电恢复时间。时隔十年,美国纽约电力系统于1977年7月13日又发生一起轰动国际的大面积停电事故。故障的起因是连续两次发生雷击线路跳闸,由于运行人员缺乏事故预想的准备,加上操作失误,造成事故的扩大,恢复时间长达25个小时。根据最保守的统计,这次停电造成直接和间接经济损失达3.5亿美元。自70年代末以来,法国、加拿大、瑞典、日本等工业发达国家先后也发生了规模在10000MW至20000MW以上的大停电事故。在我国,各大电网也先后发生过大面积停电事故。

对世界各国典型重大事故的分析表明：系统事故扩大的主要原因常是一次事故处理不当，导致系统稳定破坏而大面积停电，或者由于线路和大容量机组跳闸后造成的过负荷、低电压和低频率连锁反应跳闸而导致大面积停电。总结国内外大电网的典型事故，可以得到如下几方面的经验和教训。

1. 电网结构要合理

要保证大电力系统的安全稳定运行，首要的条件是要有一个合理的电网结构。电网的结构是电力系统安全稳定运行的基础，而且继电保护和安全自动装置的效果也有赖于电网结构是否合理。电网结构的问题，既是规划设计的问题，也是制定近期运行方式的重要问题。

所谓结构合理的电网应包括两方面的内容：其一，为了适应负荷的需要，配置足够的、布置合理的电源容量；其二，与电源容量和负荷水平相适应的、有足够传输能力的电网结构，在正常运行时具有必要的灵活性并足以应付运行中各种偶然情况，特别是事故情况。在实际运行中，电力系统的结构往往与设计的条件不一致，如大机组或主干输电线路因故障退出运行，系统处于检修方式等。所以不仅在设计时就应考虑各种典型运行方式下各种预见到的故障，在运行中也应对电网的实时运行方式进行在线安全分析，并在技术经济合理的条件下，采取相应的预防性控制措施。

2. 具有合适的可靠的继电保护和安全自动装置

电网结构是保证系统安全稳定运行的基础，而继电保护和安全自动装置则是抗大干扰的具体技术措施。继电保护和安全自动装置的动作是否正确，是否能满足系统要求，是能否防止系统崩溃瓦解的一个重要因素，国内外的重大系统事故绝大多数是由于继电保护和安全自动装置的不符合要求的动作而扩大的。

从系统安全稳定运行的观点出发，对继电保护和安全自动装置的基本要求是：

1) 在正常的电网结构和运行条件下，当系统发生单一故障时（包括三相短路），应能迅速切除故障并保持系统的稳定运行。

2) 当系统发生多重故障或其它原因不能保持系统的稳定运行时，尽可能缩小事故范围，缩短故障影响的持续时间，防止其发展扩大为失去控制的恶性连锁反应而最后导致电网的崩溃和大面积停电。

3) 事故后能迅速恢复对用户的供电和电力系统的正常运行。

由于电力系统的规模日益增大，结构日趋复杂，且运行方式多变，相应的继电保护和安全自动装置系统也越来越复杂，整定配合困难。随着计算机监控技术在电力系统中应用的不断发展，可借助微机来构成整体保护，对复杂故障可作出综合识别以保证保护装置正确动作。而由微机构成的具有预测和实时处理功能的安全控制装置，可以对复杂事故的动态过程进行快速、综合有效的识别和处理。微机化和智能化将是今后继电保护和安全自动装置的发展方向。

3. 具有可靠的数据采集系统和通讯系统

很多事故后的分析表明，在一些正常或事故情况下，由于缺少某些电力系统实时运行方式的重要而基本的信息（如线路潮流、主设备运行状态、母线电压等）或者由于传送信

息有误差（如断路器状态的不对应），使运行人员未能及时地发现问题和处理问题，或者由于根据错误信息作出错误的判断，而造成事故的扩大。事故情况下，由于通信失灵，各级运行人员无法进行联系和正确地指挥，往往是使事故扩大或处理延缓的重要原因。因此，为保证电力系统的安全稳定运行，必须具有准确、实时的数据采集系统和可靠的通信系统。尤其是事故后，数据采集系统应能及时地反映系统迅速变化着的动态过程，使运行人员能及时做出正确的判断和处理。

4. 调度员培训模拟

根据对几次大面积停电事故的分析，往往由于调度人员的错误处理或缺乏经验而扩大了事故。这是因为大停电事故通常很少发生，调度人员很难得到处理大事故的实际经验；另外一方面，事故发生时的紧张气氛也增加了错误判断和错误处理的可能性。因此，自从第二次纽约大停电事故以来，调度人员的培训模拟工作受到了重视。在一些工业发达国家中，开始研制和创建电力系统调度人员的专用培训模拟系统，使其成为整个电力系统监控中心的一个有机组成部分。利用培训模拟系统，可以创造一个具有实际感的训练环境，使运行人员对事故发展过程及其后果有实际的感觉，而且对设想的安全控制措施的正确性进行符合实际的校验，从而提高了运行人员的操作经验和事故处理能力。

三、现代电网的计算机实时安全监控

要保证大规模电力系统的安全经济运行，必须对系统的运行进行全面监视和正确控制，调度运行人员只有在掌握可靠的实时信息基础上，才能正确地识别电力系统的实时运行状态。随着电网的不断扩大，电网结构和运行方式的复杂多变，电网监控所需的信息量迅速增加，要直接从数以千计的信息中，及时判断系统运行状态的变化，并采取相应的安全控制和经济调度，已是人体的功能所不能及。

电网计算机监控技术是在 60 年代初期发展起来的，首先在电力系统经济调度方面取得了成功。自 60 年代后期，许多发达国家的大电力系统相继发生了大面积停电事故后，人们开始认识到，一次大面积停电事故造成的损失，远远超过了几十年节能带来的效益。自此以后，电力系统计算机监控系统的设计思想有了根本性的转变，从考虑经济性为主转移到安全运行为主。在实际运行中，以保证电力系统安全稳定运行为前提，同时进行电能质量控制和经济调度。因此电网的实时安全监控功能在整个电网计算机监控系统中占据了相当重要的位置。

随着计算机、数据通信和显示技术以及电网安全经济运行理论研究的迅速发展，电网计算机监控系统的水平不断提高，功能日臻完善，从而为电力系统的安全经济运行提供了技术上和管理上的保障。

第二节 电力系统的运行状态

在稳态运行中，电力系统应能持续不间断地完成发电、输配电和供电的生产过程，既在数量上又在质量上满足用户用电要求。为此，必须保证满足两种条件方程，也称为两种约束方程。

(1) 等式约束条件。系统发出的总的有功功率和无功功率应在任一时间与总的有功和无功负荷（包括网损）相等，即应该满足

$$\sum_i P_{Gi} - \sum_j P_{Lj} - P_{Ls} = 0 \quad (1-1)$$

$$\sum_i Q_{Gi} - \sum_j Q_{Lj} - Q_{Ls} = 0 \quad (1-2)$$

式中： P_{Gi} 、 Q_{Gi} 为发电机 i 的有功和无功功率； P_{Lj} 、 Q_{Lj} 为负荷 j 的有功和无功功率； P_{Ls} 、 Q_{Ls} 为有功和无功功率的总网损。

(2) 不等式约束条件。为了保证系统安全运行，有关电气设备的运行参数都应处于运行允许值范围内，可用如下不等式表示：

$$\left. \begin{aligned} U_i^m &\leq U_i \leq U_i^M \\ P_{Gi}^m &\leq P_{Gi} \leq P_{Gi}^M \\ Q_{Gi}^m &\leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi}^M \\ S_{ij}^m &\leq S_{ij} \leq S_{ij}^M \end{aligned} \right\} \quad (1-3)$$

式中： U_i 、 U_i^M 、 U_i^m 为节点 i 的运行电压及上、下限值； P_{Gi} 、 P_{Gi}^M 、 P_{Gi}^m 为发电机 i 的有功出力及其上、下限值； Q_{Gi} 、 Q_{Gi}^M 、 Q_{Gi}^m 为发电机 i 的无功出力及其上、下限值； S_{ij} 、 S_{ij}^M 、 S_{ij}^m 为线路 $i-j$ 的潮流及其上、下限值。

从上述两种约束条件看，

式 (1-1) 和式 (1-2) 可简写成

$$g(x) = 0 \quad (1-4)$$

并称之为功率平衡约束条件，式中 x 为系统运行状态变量列向量。

式 (1-3) 可简写成

$$h(x) \leq 0 \quad (1-5)$$

并称之为运行约束条件。

通常我们根据式 (1-4) 和式 (1-5) 的组合

$$\left. \begin{aligned} g(x) &= 0 \\ h(x) &\leq 0 \end{aligned} \right\} \quad (1-6)$$

是否得到满足，将电力系统的运行状态分为四种：电力系统的四种运行状态及其相互间的转移关系如图 1-1 所示。

一、安全正常状态 (Secure Normal State)

在正常运行状态下，等式约束条件和不等式约束条件都得到满足，即电力系统能连续地以质量合格的电能满足负荷要求。在这种状态下，还要求发电设备和输变电设备有足够的备用容量，使系统保持适当的安全裕度。在承受正常的扰动（如无故障断开一条线路或一台发电机）后，仍能满足式 (1-6) 的条件。即在正常的扰动下，系统能达到正常运行状态。

在正常运行状态下，电力系统运行中的每一扰动或控制，可认为是从一个正常状态变化到另一个正常状态。电力系统正常状态下安全控制的任务是监视不断变化着的运行状态，

并根据日负荷曲线调节运行方式和进行正常的操作控制（如启停发电机，调节发电机出力，调整变压器分接头位置等），使发电出力与负荷需求相适应，系统运行参数维持在规定的允许范围内。同时，还应在保证安全的前提下，实现电力系统的经济运行。

二、不安全正常状态 (Insecure Normal State)

当运行在正常状态下的电力系统，承受规定的预想事故集的

扰动时，只要有一个预想事故使系统不满足不等式约束条件，就称该系统处于不安全正常状态。

电力系统的运行安全水平可以理解为该系统免遭事故破坏的能力。系统运行的安全水平不仅与事故发生的概率密切相关，而且与系统当时抵抗事故冲击的能力有关，因此，系统的安全水平是一项实时性的指标。目前，在线安全分析的功能是确定系统在当前的正常运行状态下出现一组预想事故时是否安全，故又称之为“预想事故评定 (Contingency Evaluation)。”在这里，我们只考虑合理的预想事故集。因为毫无限制地考虑所有可能事故的事故集，就有可能找不到一个所谓安全的电力系统，或者要求很大的经济代价。事实上，系统的安全性是相对于全部可能事故集中的某一部分事故（发生概率较大和较严重的）来确定的。在大多数电力系统中，预想事故一般是单一的，例如：开断一台发电机或开断任一条支路（输电线路或变压器）。但在某些情况下，有必要考虑双重故障。

在线安全分析的另一个功能是对处于不安全正常状态的系统进行预防性调度，通常称为预防性控制，以使系统提高承受合理预想事故的能力。

三、紧急状态 (Emergency State)

处于不安全正常状态的系统，如果在进行预防性控制之前就发生了一个足够严重的扰动（如切除大容量机组或主要的输电线路等），系统进入紧急状态。在紧急状态下，若等式约束条件仍然满足，但某些不等式约束条件受到破坏，如一些线路潮流超过限值，一些节点电压超过或低于允许值等，这种情况称为“静态紧急状态 (Static Emergency State)”。这种状态通常允许运行一段时间，在这段时间里可以采取校正控制——通过可控变量（如发电机组的有功和无功出力）的再安排，消除约束条件越限的现象，使系统恢复到正常状态。还有一种情况是当发生扰动后，电力系统将失去稳定。此时，无论是等式约束条件还是不等式约束条件都不能得到满足。这种状态称为“动态紧急状态 (Dynamic Emergency State)”。这时为了防止事故的进一步扩大以及缩小事故对系统的冲击影响，应采取紧急控制——运行人员的操作或安全自动装置的动作（如切机、卸负荷、解列运行等）。在尽量减小停电范围的条件下，使系统进入待恢复状态。

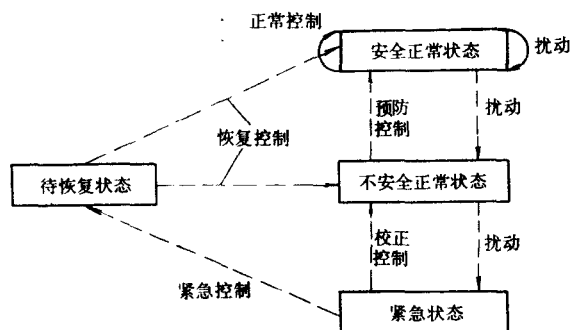


图 1-1 电力系统的四种运行状态

处于紧急状态的电力系统，如果不及时采取校正控制措施（对静态紧急状态而言），或来不及采取紧急控制措施（对动态紧急状态而言），或这些措施不够有效，就有可能使系统运行条件继续恶化，出现广泛波及性的跳闸，导致整个系统的瓦解或崩溃，造成长时间的大面积停电事故。在这种情况下，功率平衡条件和运行约束条件均遭到破坏，而且给系统的恢复造成极大的困难。安全控制的功能是应尽可能避免这种连锁性的事故发展，将事故的影响范围和损失程度降低至最小。图 1-2 是系统发生故障后可能导致失去负荷（用户供电中断）甚至系统崩溃的发展过程。

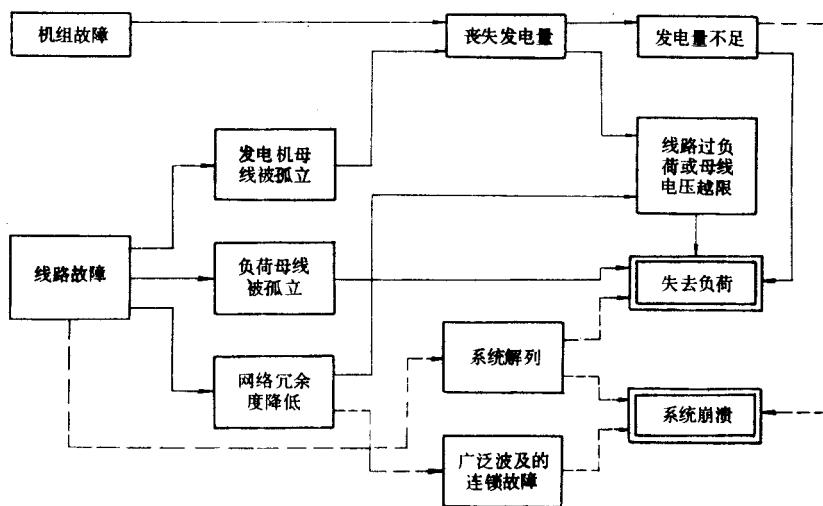


图 1-2 电力系统故障后失去负荷或系统崩溃的发展过程
(其中虚线表示整个系统将不再同步；双框表示最严重的后果)

四、待恢复状态（Restoration State）

在紧急状态下，借助继电保护和安全自动装置迅速切除故障元件，防止事故的进一步扩大，维持系统内非故障部分的正常运行，此时系统处于待恢复状态。

处于待恢复状态下的电力系统，虽然已经脱离了故障，但尚未恢复到正常状态。此时运行条件虽可以得到满足，但由于部分用户停电，部分发电和输变电设备处于断开状态，或者电力系统已经分解成几个部分。这时，应采取各种恢复控制，如启动备用机组、调整发电机出力，切换负荷，停运状态下的机组和输变电设备重新进入紧急状态，逐步恢复对用户的供电，解列的系统重新并列运行等，使系统尽快恢复到正常运行状态。

目前，对电力系统运行状态的划分尚没有严格和统一的定义，上面介绍的四种运行状态只是其中的一种分类方法。通过对电力系统各种运行状态的特点和它们相互之间转移的原因以及安全控制措施的简介，可以比较清楚地了解电力系统安全运行的有关基本概念，有利于以后各章节内容的学习。

第三节 现代电力系统计算机监控系统 的基本构成

从功能发展上看,电力系统计算机监控系统(又称电网调度自动化系统)大体分为三个阶段:

1) 监视控制与数据采集(Supervisory Control And Data Acquisition)系统,简称SCADA系统,它主要完成电力系统实时运行状态的监视(包括数据采集、处理和显示),事件顺序记录、事故追忆、越限报警、远距离开关操作,以及制表、打印和统计等功能。SCADA是电网调度必须具备的基本功能。

2) 能量控制系统(Energy Control System),简称ECS,国外统称为SCADA+AGC系统。该系统是在SCADA功能的基础上,增加了自动发电控制(AGC)功能。这种监控系统可以满足我国大部分省级电网的调度功能要求。

3) 能量管理系统(Energy Management System),简称EMS。这种系统除了具有SCADA+AGC功能外,还具备完善的安全调度和对系统运行的预测、计划和全面的管理功能。这种系统主要用于大规模电力系统(如我国的跨省大区电网)的调度中心。EMS在技术上最复杂、功能最全面,是目前国内外电力系统最先进的计算机监控系统。

本节将对电力系统计算机监控系统的基本结构(包括硬件配置和软件构成)作一概括性介绍。

一、微机远动系统的基本构成

电力系统规模的扩大,自动控制水平的提高,要求电网中足够的状态数据连续地送入调度中心的计算机。准确、实时的电网数据采集是实现电力系统安全监控和经济调度的重要依据。同时,在调度运行人员或计算机系统作出决策后,应将调节和控制信息及时、可靠地传送到各厂、站的被控对象。

电网的实时数据大致可分为两大类:一类是遥测量(数值信息,通常称为模拟量),如节点电压、发电机出力、线路潮流(包括有功功率、无功功率、电流)等。另一类是遥信量(状态信息,通常称为数字量,开关量),如断路器和隔离开关的分、合位置,也就是反映电网拓扑结构的数据,以及继电保护的動作信号等。

电网运行中主要的调节和控制信息大致也可分为两大类:一类是遥控信息,也就是改变设备运行状态的控制命令,如断路器和隔离开关的合闸及断开命令、机组的启停命令。另一类是遥调信息,也就是连续或断续地改变设备运行参数的调节命令,如改变发电机出力的调节命令。

目前,我国电力系统为实现上述数据采集和调度控制功能,即遥测、遥信、遥控、遥调四遥功能,主要是依靠以微型机为核心的远动装置,称之为微机远动系统。微机远动系统由设在厂、站端的远方终端装置(RTU)和设在调度中心的远动通信接口装置(MTU),以及远动通道构成。图1-3给出了微机远动系统原理性结构框图。

远方终端(Remote Terminal Unit),简称RTU,其基本功能是在厂、站端收集信息

接口部分、人机联系系统构成。

1. 计算机监控系统的可靠性指标

电网调度计算机监控系统运行的可靠性对电网的监控是一个极为重要的因素。为了保证电网运行的安全性,电网调度计算机监控系统要求绝对可靠,必须从各部件、单机、系统等多层次来保证其较高的可靠性,提高硬件和软件的抗干扰能力。计算机系统中单台设备的可靠性一般用平均故障间隔小时数来表示,也就是指设备在运行中发生两次偶然性故障的平均间隔时间,如主机的 MTBF 指标目前在 8000~20000h 的范围内。对整个系统的可靠性通常用“可用率”表示。系统的可用率指标由下式计算

$$\text{系统可用率} = \frac{\text{系统运行时间}}{\text{系统运行时间} + \text{系统停用时间}} \times 100\%$$

系统运行时间是指整个系统保证基本功能正常的持续时间,停用时间是指整个系统丧失基本功能后不能运行的时间,包括故障和维修时间在内。由于技术水平和运行维护水平的不断提高,目前双机系统的可用率可达 99.9% 以上,也就是说一年中可能停机几个小时。

2. 双机系统

在电网调度自动化计算机在线应用的初期,一般采用一台计算机,这种简单的单机系统通常只具有基本的 SCADA 功能。随着计算机在调度自动化中地位的提高和功能的增强,单机系统的可靠性已不能满足要求。目前,较为普遍地采用双机系统。这种双重化配置,包括主机、前置机和主要人机联系设备(如 CRT)的双重化。

双机系统的工作模式根据其可用性可分为:主机-备用机工作方式,主机-副机工作方式,双机平行工作方式三种。当采用第一种和第二种方式工作时,备用机(或副机)还可以同时承担其它调度管理、应用软件开发和模拟培训等工作。当主机发生故障时,备用机(或副机)立即自动投入,承担主机的全部功能。

3. 主机和前置机的连接方案

如上面所述,由于前置机可承担处理周期快而计算简单的实时任务,如远动信息的采集和处理、计算机通讯的控制等。因此前置机的设置可以减少主机的负载而使主机能做更多的复杂任务,目前大多数电力系统计算机监控系统都采用主机-前置机系统的配置方案。为了保证其可靠性,主机和前置机都用两套,形成广义的双机系统。主机和前置机有几种不同的连接方案,如图 1-4 所示。

第一种方案如图 1-4 (a),前置机可看成是主机的延伸,和主机同成一体,优点是连接简单,但可靠性较差。第二种方案如图 1-4 (b),增加了前置机和另一台主机的联系通道,提高了可靠性,但整个系统的硬件和软件设置也要复杂一些。第三种方案如图 1-4 (c),前置机通过专门的总线和主机相连,计算机间通信比较灵活,功能较强,但总线又成了关键部件,为提高整个系统的可靠性,应增设一条备用总线。

4. 分布式多微机系统

近年来微型计算机发展迅速,性能不断提高。高性能微机在内存容量和计算速度上已不比过去的小型机逊色,因此已可能用多微机组成分布式系统来完成电网的实时监控任务。所谓分布式系统就是整个监控功能分散到各台微型机上去,如数据采集、显示管理、自动

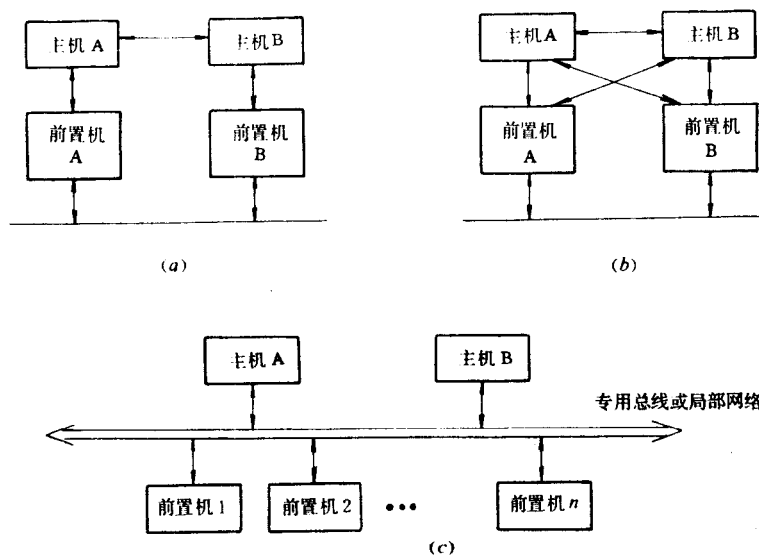


图 1-4 主机和前置机的连接方案

发电控制、监控处理等都用单独的微机处理，其中一台微机管理调度所有的任务，各微机间可以互相通信，也可以通过公用内存共享数据。分布式监控系统代表了新的发展方向。

5. 人机联系系统

在电网调度计算机监控系统中，人机联系子系统是一个重要的和关键的组成部分，也是检验整个计算机系统可用性的尺度。电力系统计算机监控系统中主要的人机联系（又称人机接口）设备包括：动态系统模拟盘、CRT 彩色显示器、制表打印和图形硬拷贝设备、控制键盘、光标定位装置等。其中 CRT 是电力系统计算机监控系统最重要的人机联系手段，正是由于 CRT 的出现，可以用网络接线图的形式向调度员提供动态的电力系统运行状态和计算机的处理结果，还可以通过画面进行遥控和远方操作，非常直观及形象化，成为现代化监控中心不可缺少的设备。

三、电力系统计算机监控（SCADA）系统

电力系统计算机监控系统的应用软件大致可分为两类：一类称为 SCADA 软件，它是任何电力系统计算机监控系统不可缺少的部分；另一类为有关安全经济运行的应用软件（Power Application Software），简称 PAS，该类软件的配置随各级调度中心的监控任务和调度权限以及计算机系统的配置不同而有所不同。

下面将对 SCADA 系统应用软件的主要功能模块作一概括性介绍。有关电力系统安全监控应用软件的功能在下一节再予介绍。

1. 数据采集

数据采集模块是调度端远动装置或前置机系统以及主机系统处理远动通信的软件功能的集合。其功能有以下几个方面：

- 1) 周期性地对 RTU 进行查询，根据需要收集各 RTU 采集的实时数据；

- 2) 发送对 RTU 的遥控、遥调命令;
- 3) 对来自 RTU 或来自主机的信息进行规范化处理。

2. 数据预处理

为了排除测量误差和传送中干扰的影响,在遥测、遥信数据存入数据库之前,需要对它们进行合理性、可信性校验和处理。这些预处理和下节介绍的状态估计功能不同,它们具有更强的实时性要求。预处理的内容包括遥测量及其变化率合理性校验,遥测值快速滤波,开关变位可信性校验等。经过预处理环节,丢弃了不合理或不可信的遥测、遥信数据,提高了数据的可靠性和精度,也提高了状态估计的成功率。

3. 电网运行监视

对电网运行参数和设备状态进行实时监视,当运行参数超过某一限值或设备状态发生非预定变化时,给出报警信号。

电网运行监视的内容包括电能质量(频率和电压)监视、发电出力和负荷情况以及联络线交换功率的监视、安全限值监视(频率、电压和线路潮流)、电网结构监视、保护和全自动装置的动作状态监视等。当发生异常事件时,报警信号应指明事件发生的时间、地点、设备和事件的性质等信息。

4. 屏幕显示

目前电网运行监视的主要人机联系手段是彩色 CRT 显示设备。信息显示是选择地检索数据库中的固定数据和实时数据,并将其组合,提供给运行人员的过程。固定数据包括发电厂、变电站或电网的接线图及其它不随时间变化的可显示信息,实时数据或可变数据包括设备状态的标志和运行参数等。调度人员的操作命令经键盘输入后,有关的操作提示信息 and 操作过程也将由 CRT 显示出来。

CRT 显示器具有以下几方面的作用:

- 1) 以单线图形式显示电网或厂站的接线图;
- 2) 以表格形式成组显示电力系统的运行参数;
- 3) 各种曲线、棒图、目录的显示功能;
- 4) 计算机监控系统配置图和运行状态的监视画面;
- 5) 可以在指定画面上进行某些操作(调度员遥控、遥调操作);
- 6) 利用屏幕修改或生成监视画面和数据库。

实时监视画面可由键盘或光笔跟踪球选择调用。在 90% 的情况下,监视画面的响应时间应不超过 2s,最长不得超过 5s(不包括计算时间);画面上实时数据的刷新时间一般为 5~10s,紧急状态下不应超过 3s。

5. 统计和保存

统计是对实时数据进行一些简单的计算、分类统计和整理。例如,求取变量的平均值,在给定时间间隔内的最大值和最小值;统计各变电站各电压等级的电压合格率,地区负荷总和等。

数据保存主要是指超过 24h 以上保存期的数,其中有月、年累计数据,典型日实时和统计数据,负荷预测用的负荷样本等资料的保存都配有相应的检索手段并有对保存数据进