



电力系统 过渡状态控制

〔苏〕B. A. 维尼柯夫 主编



科学出版社

内 容 简 介

本书研究了电力系统过渡状态控制的理论和方法,对具有最新技术体制和控制手段的大型联合动力系统中复杂过渡过程的状况和最优控制,尤其对用数字计算机构成控制系统的原理和方法进行了详细的论述,很有实用价值。书末附有大型电力系统的控制系统实例,并对一些国家的电力系统所发生的典型事故进行了分析。

本书可供电力专业大学生和从事电力系统运行、设计和研究的工程技术人员阅读,也可供上述专业的研究生及其他科技工作者参考。

В. А. Веников

УПРАВЛЕНИЕ ПЕРЕХОДНЫМИ РЕЖИМАМИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Москва «ВЫСШАЯ ШКОЛА» 1982

电力系统过渡状态控制

[苏] В. А. 维尼柯夫 主编

杨笑石 张金镔 译

贺家李 校

责任编辑 范铁夫

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

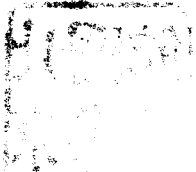
1989 年 11 月第 一 版 开本: 787×1092 1/32

1989 年 11 月第一次印刷 印张: 9 1/4

印数: 0001—4 340 字数: 207,000

ISBN 7-03-001163-5/TM·14

定价: 7.80 元



译者前言

目前,电力系统的控制,尤其是对过渡状态的控制,已受到世界各国电力工作者的极大重视。许多国家在制定动力系统发展规划时,都把解决系统过渡状态控制问题置于举足轻重的地位。如果对复杂而巨大的动力系统不进行有效控制,不防患于未然,就不能保证安全可靠供电,就会给社会带来严重影响和巨大经济损失。

我国电力事业正在飞速发展。各大区域的联合动力系统已经或者正在形成。全国的统一动力系统可望可及。因而系统控制问题日益引起人们的关注,不少单位也做了一些有益的尝试。苏联著名学者 B. A. 维尼柯夫主编的这本书,在过渡过程控制理论和控制实践上都很有见地。这对我国电力工作者研究解决系统过渡状态控制问题,无疑会有很大帮助。

本书前言及第一、二、三章由杨笑石翻译,第四、五、六章及附录由张金锬翻译。张金锬对全稿进行了统一和整理。在翻译本书的过程中,得到了贺家李教授的指导和帮助,并在百忙中校阅了译稿,在此谨向他表示感谢。

前 言

本书研究了联合电力系统暂态过程的控制问题,是以前出版的由七本书¹⁾组成的《Электрические системы》(《电力系统》)丛书的补充。由于近年来复杂动力系统状态控制及其暂态控制问题特别突出,因而出版这本书就十分必要了。

到目前为止,组成电力系统过渡状态的任何过渡过程(按照《电力系统》丛书的定义,过程是状态的组成部分)都只用分析方法进行研究。分析方法可以揭示状态参数随时间的变化,揭示给定状态下工程师们感兴趣的影响过渡过程的因素。在这类研究中,要给定初始条件和引起过渡过程的各种扰动。

现在,专门用于控制的自动装置和反事故自动装置以及电力系统使用的计算技术已经达到了这样的水平,即在电力系统状态的研究中,已从过去的作为基础的分析研究向综合研究过渡,而这些方法间的差别是很悬殊的。这样,如果在分析研究中主要是寻找在给定初始条件下以 $y=\varphi(x)$ 或 $\dot{y}=\psi(x)$ 关系式描述的过程,那么在现在和未来的任务中,分析研究就带有另外一种性质。此时,寻找控制电力系统(包括设备构成)的方法和手段是必要的。这些方法和手段的构成,应使得被研究的过程(或一组过程)从某一要求出发具有理想的特性。解综合课题,就是寻找和实现这样的控制作用。这对控制系统的过渡状态是必要的。

1) 除这本第八分册以外,所提及的由七本书组成的丛书还包括一个补充的第九分册,专门论述远距离输电问题。

动力系统是控制论型的大系统,在设计和控制时,需要新的方法。当然,电力系统专业特别是电力系统控制专业的大学生,应当非常清楚地了解动力系统的控制任务和控制个别过渡过程(最终还是“状态”)的特殊任务。

对动力系统和电工方面其他专业的学生,本书可作为教学参考书。于此,应注意到,本书只是从“状态”——电力系统状态特性——的观点研究过渡过程控制,不涉及和重复其他动力专业工作者研究的那些问题。例如,本书只有很少篇幅论述设备结构及其在电力系统中的运行。因为本书不是专门论述过渡过程的教科书,有关过渡过程的一些问题,也像数学问题一样,对它们研究的程度不超出电力系统控制问题的范围。也就是说,要看为解决过渡过程控制这一专门任务,需要它们到什么程度。

当然,在编写本书时,作者不仅依靠自己的研究成果和实践、教学经验,而且也依靠国内外一些知名学者的著作。这里不能一一列举。因此,在叙述过程中没有给出文献出处,而文献索引也并非全部,仅列出需要深入研究的文献题目。尽管本书主要是为已学过电力系统、自动化、继电保护、暂态过程等课程的高年级学生用的,但作者也希望本书能对从事电力系统问题研究的工程师、研究生、科学工作者有所裨益。本书虽然包括在“电力系统”丛书之内,但基础好的读者也可单独进行学习。

这本书是高等学校教师和动力工作者集体编写的。B. A. 维尼柯夫审阅了手稿。在编写的各阶段中,全体作者都参加了讨论。

• iv •

目 录

绪论 概念解释和问题的提出·····	1
第一章 动力系统过渡状态和过渡过程控制方法与措施 的一般特性·····	13
§ 1-1 控制的任务·····	13
§ 1-2 供电可靠性·····	16
§ 1-3 反事故控制系统·····	18
§ 1-4 通过作用于系统元件控制系统·····	21
§ 1-5 过渡过程控制论型控制概要·····	24
思考题·····	40
第二章 过渡状态下动力系统的控制·····	42
§ 2-1 反事故控制系统的一般特性·····	42
§ 2-2 为防止稳定破坏控制有功功率·····	54
§ 2-3 异步状态的消除·····	60
§ 2-4 恢复动力系统被解列部分的有功平衡·····	68
§ 2-5 不同结构联合动力系统过渡过程控制的特点·····	77
思考题·····	97
第三章 发电厂机组的自动调整和控制·····	99
§ 3-1 发电厂汽轮机功率的应急控制·····	99
§ 3-2 同步发电机的励磁系统和自动励磁调节器 (APB)·····	105
§ 3-3 按电压偏差作用的自动励磁调节器调节通道参数的 选择·····	115
§ 3-4 自动励磁调节器镇定通道参数的选择·····	125
§ 3-5 大扰动时动力系统自动励磁调节器的作用·····	141
思考题·····	147
第四章 动力系统过渡过程的最优控制·····	148

§ 4-1 最优控制的任务和判据	148
§ 4-2 研究动力系统稳定的数学方法	150
§ 4-3 最优控制的数学判据	158
§ 4-4 最优化任务的数学描述	168
思考题	187
第五章 过渡过程自动控制系统中的计算技术	189
§ 5-1 用于自动化系统中的电子计算机	189
§ 5-2 数字式频率和有功功率(自动调节系统)	195
§ 5-3 反事故自动装置系统控制用电子计算机	209
§ 5-4 实现继电保护和自动装置功能的电子计算机	224
§ 5-5 自动装置系统的信息传输	229
思考题	234
第六章 动力系统过渡过程控制的可靠性	236
§ 6-1 动力系统可靠性的概念	236
§ 6-2 一次网络设备的故障率	236
§ 6-3 自动控制设备的可靠性	240
§ 6-4 过渡过程控制系统的可靠性	242
§ 6-5 过渡过程控制系统运行经验分析	244
§ 6-6 运行人员在防止事故发展和消除事故中的作用	248
§ 6-7 大联合动力系统事故举例	251
思考题	258
附录 1 结构复杂的联合动力系统反事故自动装置举例	259
附录 2 动力系统可控机电过程的计算	272

绪论 概念解释和问题的提出

本书专门研究的所谓动力系统乃是它所联结的所有元件的总和。这些元件将电能和热能的生产、转换、输送、分配、消费以及整个系统的集中生产管理结合在一起。

组成动力系统 (ЭС) 的元件可以分成三类:

基本动力设备——锅炉、水力和蒸汽动力机组(涡轮机和发电机), 它们将水力和燃料的能量转换成电能和热能; 变压器和整流设备, 用于变换电流和电压的数值及类别; 输电线, 用于远距离传输电能; 开关设备(断路器、隔离开关等), 用于改变电网接线, 切除故障元件。

测量设备——电流互感器和电压互感器, 用于接入测量仪表、控制装置等。

控制设备——各种保护装置、调节器、自动装置、远动装置、通信系统, 它们以各种方式确保动力系统接线和运行方式手动及自动控制的顺利进行。

所谓动力系统状态是指由已投入或准备投入的主要动力和电工装备所确定的动力系统的某些状况。状态由电气接线及确定电能生产、传输和分配的过程参数(在每一给定瞬间所具有的功率、电压、电流、频率数值)来表征。

根据参数变化的快慢可将状态分成稳态和过渡状态。

在所研究的时间范围内, 稳定状态的参数保持不变或变得相当缓慢。

几个动力系统, 由其基本设备联结成一个统一的网络, 并具有共同的状态和集中的生产管理时, 则称其为联合动力系

统 (OЭC).

几个联合动力系统, 由其基本设备联结成一个统一的网络, 并具有共同的状态和集中的生产管理时, 则称其为统一动力系统 (EЭC).

术语“电力系统”常常与术语“动力系统”作为同义语使用. 但这是不准确的. 因为电力系统——动力系统的电气部分——是用统一的状态和集中的生产管理联系起来的电气设备 (发电机、变压器、输电线路、控制手段) 的集合. 动力系统的管理, 不论在运行操作方面, 还是在经营管理方面, 都具有分层结构.

过渡状态对发电厂能否联结为动力系统、动力系统能否联结为联合动力系统以及联合动力系统能否联结为统一动力系统有重大影响 (在许多情况下甚至起决定性作用).

建立接入苏联统一动力系统的联合动力系统是我国 (指苏联) 动力工业发展的基本方向. 这是在 60 多年以前苏联国家电气化计划 (ГOЭЛПO) 所规定的, 并且作为将来的发展方向亦由苏共第二十六次代表大会决议所肯定. 在技术发达的资本主义国家, 如在美国、英国、法国、联邦德国、意大利等国, 动力工业也同样是按照建立联合动力系统的方向发展的.

因此可以肯定, 世界动力工业将沿着建立巨大联合动力系统的方向发展. 在这些系统的管理上, 毫无疑问, 将因每个国家技术的、社会的、政治经济的特点而有所不同. 但在管理问题上将有某些共同点. 首先是它们都具有同样的对确定信息的感知、记忆、沿通信通道传递和为调节和控制目的而进行变换的能力.

电力系统 (在正常的能量品质指标下) 应该保证对用户正常供电. 从这个意义上说, 电力系统的基本状态是正常状态. 相对称为稳态的正常状态是由大量从一种稳态向另一种稳态

的过渡组成的。这些过渡——过渡状态——包括一系列不同的过渡过程：电磁的和波动的、机械的和机电的、热力的等等。显然，动力系统或其子系统——电力系统——中的过渡过程的发展对整个动力系统的工作条件有很大影响。首先是影响其工作的可靠性、稳定性和稳固性。因此，在寻找控制联合动力系统整体或其相互作用部分的过渡状态的最好方法时，应考虑组成过渡状态的过程多种多样，其表现形式也千差万别。由于许多过渡过程——它们的发生和发展——与事故的偶然性有关，因而，这一考虑变得复杂了。这些事故的信息显然是不完全的，也不是唯一的。所有这些都使确定不同结构动力系统过渡状态自动控制最好条件的课题复杂化。最好条件的确定仅仅能在具体情况下或那些情况的一定组合下实现。同时注意到，控制的最好条件并不是绝对的，而是相对某些指标（例如，过程的衰减速度、过程的局部化等等）而言。符合这些条件的过渡状态（或说得更窄一些——过程）控制，以下称为最优控制。

那些应当遵守的使过渡过程在上述意义上说是最优的指标或指标组合称为最优控制判据。

用专用的自动装置和控制用计算机实现的动力系统过渡过程的数学模拟方法，可以保证对过渡状态的不同过程施加影响，并且可以用来研究动力系统状态控制论型控制的技术实现问题。

60年代中期就出现了根本改善动力系统过渡状态及相应过程控制方法和措施的要求。目前这一问题已经特别尖锐，并要求有专门的解决方法和措施。其中过渡过程控制的自动化处于首位。它是电力系统进一步发展及向更高的形式——统一动力系统——过渡的必要条件。

动力系统过渡状态控制自动化作为一个新的技术分支正

在形成和发展。该分支的健全发展要求建立新的科学技术课程。本书正是建立新的科学技术课程的尝试。该课程研究对动力系统过渡状态及其中诸过程的控制。

新的科学技术课程不应是某些课程（如电力系统机电过渡过程或电力系统自动化）的重复。从获得理想（最优）的过渡过程特性出发研究过渡状态（过程）控制的可能性，是这个学科的任务。在这里，必须研究作为复杂控制对象的动力系统的特点。控制的复杂性首先在于电力生产具有如下特点：电能生产的连续性，在每一瞬间电能生产与消费的严格平衡，分布着动力设施的巨大空间以及特别重要的是控制基本任务的复杂性——考虑可靠性要求和电能质量，使整个系统达到经济上最优。

为保证对动力系统过渡过程进行可靠控制，必须用数学方法对其进行分析。用数学方法寻找系统个别元件（原动机、励磁机、电抗器、负荷等等）的最优控制及复杂结构联合动力系统的综合控制。综合控制应以所建立的数学模型为基础或按对实际事故情况的辨识结果来进行。为了实现这种控制，并由分析过渡至综合，即过渡至得到被认为是理想的、并根据专门的研究被确认是最优的特性，必须使用自动调节器、继电逻辑系统、各类控制计算机、发达的远距离信息传送通道系统，以及将控制作用引入控制对象的自动化设备系统。过渡过程最优控制的任务是用最简单最便宜的手段在可能范围内、在过渡过程期间获得最大的效果（状态参数最少恶化，在时间和空间上限制事故范围），并且获得可能最好的事故后的稳态特性。

书中对解决上述问题的许多措施提出了技术要求。这些措施要完成相应的功能，成功地预防或削弱事故扰动并使其局部化。单次事故扰动时，这些措施同样可以减少用户的损

失。但是，复杂电力系统的现代发展趋势要求扩大过渡过程控制设备的功能。例如，有必要预防事故的连锁发展；当发生严重事故时减少用户的损失；系统发生事故后能快速恢复对用户的供电。事故后以最快速度恢复系统运行的措施（如自动按频率减负荷系统的作用、按频率起动等）及对系统低频振荡进行阻尼的措施也具有重要意义。

解决这些课题有两种途径：

不论是系统本身的动力（一次）部分，还是继电保护设备和自动装置，都能提高其元件的可靠性，并改善其性能；

建立专门的反事故控制系统，确保故障局部化并最好能全部地自动消除事故后果，即使在最坏的情况下，也要为运行人员的后来操作创造最大的方便。

制定电力系统过渡过程的控制方法和措施时，应考虑联合动力系统所具有的那些特点。互联可以提高供电可靠性。发生事故时，可通过利用各电力系统的备用容量来保证系统之间互相支援。联合动力系统的稳固性高于个别动力系统的稳固性。个别的单一故障（线路、发电机损坏甚至发电厂几台发电机被切除）通常并不引起联合动力系统整体或其大面积工作破坏。但发生在一个动力系统的事故有可能扩大到相邻系统，甚至发展到整个联合动力系统或它的大部分地区。引入专门的措施限制事故，可以避免这一点，做到使故障不波及整个联合动力系统，即不转化为所谓雪崩型事故或连锁性事故。过渡过程的控制应保证限制事故扩大。

因而，解决过渡过程控制任务的目的应该是明确的。不仅要消除或限制该过渡过程引起的现象，也不仅仅是赋予一个过程以理想的特性，而应考虑对构成过渡状态总体的一组过渡过程进行控制。此外，当控制作用建立起事故后最好的稳态条件时，它才是最佳的。

目前,借助自动装置可方便地实现控制作用,而将来应用计算技术(电子计算机——ЭВМ)实现起来更为方便.利用电子计算机可以提高控制装置的可靠性,原则上有可能实现新的继电保护.例如由切除系统“病灶”的“外科手术式”的保护过渡到能监察系统元件的健康状况并预防其故障的“预防型”保护.在电子计算机存贮器中能够保存故障发生前系统工作状态的信息.这个信息可用来分析和综合.根据分析和综合的结果可以对过渡状态进行控制.用电子计算机构成继电保护和自动装置,可以很容易地改变动作定值,同时能自动改变调节器的定值.

在动力工程控制系统应用计算工具的经验表明,成功地利用统一系列的通用计算机是可能的.但是对其可能性以及对状态控制任务(这归结于对稳态,特别是对过渡过程进行多方案分析)艰巨性的分析指出,在许多情况下,可通过计算工具的组合,即通用的和专用的计算机系统的联合运用,来得到更完善的解决办法.因此专用计算机的主要任务是显著(在几个数量级)提高计算速度.这对解决多方案的状态控制课题是必要的.

为解决动力工程中控制系统的高效计算工具问题,混合计算系统和与模拟计算装置联接的多处理器数字计算结构具有很大意义.

对于电力工程的课题,混合计算系统可以作为自动化调度系统 АСДУ(发电厂、区域性联合系统)中计算综合体的高效子系统应用.

看来,含有混合计算机的计算系统对计算过渡过程是有益的,因为计算必须保证有很高的速度.控制数字计算机的应用办法之一,看来与中央处理机的使用有关.这时,主要计算工作量将由专门的并行处理器担负.它们带有模拟式信息

显示,形成了系统的模拟部分,并且总合起来成为动力系统的混合模型。这样结构的多处理器可以实时或超实时完成动力系统过渡过程的研究。

在混合计算系统位数少的并行处理器中,必要时可以进行混合计算,其最终结果可保证有数字机的准确度。

用并行工作微处理器控制系统的过渡过程是很有可能的。很明显,在这些微处理器中并行计算方式可以解决复杂的任务。这些任务要求达到 10^{12} — 10^{14} 次的控制作用。这些系统也提高了计算系统的可靠性。所有这些应允许按新的方式着手研究控制过渡过程的课题,实现上面提到的向研究这些过程的综合过渡。

当研究过渡过程控制的前景时,必须考虑它应以某种方式进行简化,并且应扩大其研究功能。这不仅依靠实现现代控制和调节手段,而且还依靠按新的结构构成动力设备。这里可以列举各子系统的软联接设备(直流连接线、电机式变流器)、按负荷调节的电抗器、快速调节的无功电源(ИРМ)、传输功率极限可达直流输电相应极限的新型交流输电。而这些线路的特殊调节方式可以在很大程度上消除静、动稳定问题所带来的矛盾。

目前,出现了根据某种型式储能器原理建成新装置的实际可能。这些新装置能大大改善动力系统的静稳定(为此,储能量达 10^6 焦就足够了)和动稳定(10^7 — 10^8 焦)性能。而当具有高储能容量(10^{10} — 10^{13} 焦)时,可用以补偿尖峰负荷,并作用于动力系统的频率。应用储能器(无功电源也同样),对直接控制过渡过程是非常重要的。这些设备不仅改变了反事故控制的特点,而且必将影响动力系统结构和运行方式。

因此可以断定,目前,动力工程正处在发展控制技术新时期的起点上。在这个时期内,评价电力系统及其动力设备特

性的方法也应有重大改变。

因此,现在以至将来,有可能使用现代技术手段和将于最近建立的方法得到理想的过渡状态。这时,应该认为联合动力系统是典型的大系统,它有分散的结构和发电、输电、变电、配电以及电能消费的连续生产过程。

这个过程由大量具有复杂相互联系的变量确定,过程进行的条件随时间而变化。用人工的状态控制调度系统,甚至基于系统分析方法而非综合方法的自动控制调度系统,均不是很有效的。在联合动力系统中,使用控制论型的控制方法和与快速远动、通信系统配合的成套控制机控制系统,是保证最优稳态和最优过渡状态的唯一手段。这种系统不仅使以前靠手动完成的功能自动化,而且还可完成新的功能,如最优化和预测控制状态。

所有这些,以及必须考虑的影响状态优化的附加因素,使运行控制过程中加工的信息量显著增加。这种信息的性质也在变化。如果以前它主要带有记录的特点,那么现在在收集、传输、记录和加工计算机输入信息的统一系统中,基本上是计算机信息在循环。这些信息对传输能力、快速性和可靠性提出了更高的要求。

当构成联合动力系统的控制系统时,其中包括对过渡状态的控制,必须解决下列几类课题:

选择控制系统的合理结构及其集中化的程度;

将信息分类,研究在系统中循环的或联系控制系统外部设施信息流的结构和特点;

按照确定其品质的准则,研究减少所利用的信息数量的可能性;

确定对信息采集、传输和加工系统及对各种不同结构和特点的信息流的基本要求;

制定信息流采集、传输和加工系统的构成原理。

构成统一控制系统的基本原则可以随信息采集、加工和传输的新设备的研制及动力系统控制水平的不同而局部进行改变。

对于内部和外部的及形成信息流的所有信息，根据使用方法，可以分成两类：

- 1) 用于动力系统操作控制(操作信息)；
- 2) 用于确定动力系统运行的技术经济指标(技术经济信息)。

操作信息本身又可按获得和使用这些信息的状态的特点分为三类：

- 1) 正常状态下，用于动力系统操作作的控制信息；
- 2) 事故后状态下，用于动力系统操作的控制信息；
- 3) 在动力系统控制过程中，用于过渡状态优化的信息。

不同状态下的控制系统功能决定处理上述各类信息的算法。

在正常状态下，利用这些信息维持数量指标(发电机发出的和输送到用户的功率)和质量指标(用户的电压值和系统频率)。

动力系统正常状态下的过程具有运行的(正常的)过渡过程特点，其参数(具有 10^{-1} — 10^{-4} 赫频率)缓慢变化。在这些参数上迭加了(10^{-1} —1 赫频率的)较快的波动。参数变化相当大、并且以月、季和年为周期者属于这一类过程。参数缓慢变化具有相对的稳定性。因此，考虑到所执行的计划，可以在很大程度上根据统计分析结果的外推对其进行预测。所以信息的先验概率增加了。这样就允许降低已经较低的信息产生速度。这种信息很有价值，因为它代表着系统参数的变化；而这些参数对电能的数量和质量，对动力系统状态优化，都有重

大影响。

各种偶然扰动引起参数的快速波动。描述参数快速波动的信息具有另外的性质。这时参数变化具有稳定随机过程的特点。波动幅度小于缓慢变化的幅度。信息产生的速度很快,但它的价值可疑。不管怎样,它的价值应按波动对动力系统状态的影响程度确定。

因此,在稳态控制时,有关参数缓慢变化的信息具有主要价值。并且对每一个参数都能确定给定瞬间的可能值。所以对信息传输和加工设备主要要求是保证准确度和可靠性。虽将信息分成三类,但应考虑到这些类别是互相联系的。这样,当控制过渡过程时,不能不利用有关稳定的初始状态和事故后状态的信息。

但是,对三类信息的质量要求各不相同。稳态下信息传输和加工所允许的延迟将由信息集的统计特性和给定的状态品质来确定。

过渡状态下,维持给定指标不变的要求将让位于保持系统元件完好(过电流时不损坏设备等等)和必须保持动力系统稳定的要求。

在动力系统过渡状态下所发生的过程具有强烈和快速改变状态参数的特点(具有频率 10^{-2} —50 赫)。对给定的参数来说,信息产生的速度最大。这样,信息的价值也最大,因为不能预言将发生怎样的变化。

应该区分过渡状态两种可能的结局:要求快速消除的稳定事故状态;不要求快速消除的稳定事故状态。

事故信息加工设备的首要任务是快速判明事故结局。因此,在传输和加工事故信息的过程中,所有控制系统的工作都应保证最大的可靠性和最小的延迟。这里,信息传输的准确性是重要的。但主要是针对完成逻辑功能,而不是针对完成