

现代电力系统自动化丛书

韩 祯 祥

现代电力系统 安全监视和控制

水利电力出版社

现代电力系统自动化丛书

现代电力系统 安全监视和控制

韩祯祥

水利电力出版社

内 容 提 要

本书是根据国内的实际情况编写而成的，旨在能够把电子计算机对现代电力系统的影响，以及由此而在与电力系统安全运行有关方面发生的变化呈现给读者。为了实现这一宗旨，作者在书中深入浅出地介绍了现代电力系统的安全运行问题和电子计算机在电力系统安全运行中的应用。

本书可供有关的管理、技术人员和工人阅读。

现代电力系统自动化丛书 现代电力系统安全监视和控制

韩祯祥

*

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

水利电力出版社印刷厂印刷

*

787×1092毫米 32开本 2.75印张 60千字

1985年12月第一版 1985年12月北京第一次印刷

印数0001—7970册 定价0.60元

书号 15143·5739

前 言

随着我国电力工业的发展，发电厂容量越来越大，原来的零星小网逐渐联接形成几个跨省范围的大电力系统，一些省网也发展到相当可观的规模。对这样庞大而复杂的电力系统，用常规的控制和管理方法显然是应付不了的，必须采用新的手段和工具——电子计算机。

在六十年代，我国电力工业开始应用电子计算机。近十多年来，已取得不少成就，积累了一些经验。但是，这远远适应不了现代电力系统迅速发展的实际需要。与国外的先进水平相比更是相差甚远。近二十年来，国外在这方面的发展是惊人的：发电厂的自动化程度相当高，电网调度控制中心已普遍采用以电子计算机为核心的自动化监控系统，可以进行数据收集与安全监控、自动发电控制与经济调度及安全分析。当今世界正处于以信息处理为主要内容的新技术革命时代，人们原来的知识有些已经陈旧，需要大量补充和更新，否则，无法跟上新技术迅速发展的潮流。

为此，在中国电机工程学会的大力支持下，我们编写了这套现代电力系统自动化丛书，由王平洋任主编，吴凤书任副主编。全书包括十一分册：《现代电力系统自动化与电子计算机的应用与发展》、《电力系统计算》、《现代电力系统计算机监控系统》、《电力系统数据传输》、《现代电力系统安全监视和控制》、《现代电力系统自动经济调度》、《现代电力系统的保护和自动装置》、《现代火电厂自

自动化》、《现代水电厂自动化》、《供电网调度自动化》、《电力工业信息管理自动化》。各册之间，彼此有联系，互相衔接，但各册又自成系统，独立成册。这是一套提高性的普及读物。主要读者对象是电力工业中的技术领导干部，工程技术人员及本专业的工人和高校的师生。我们希望通过这套丛书，能将现代电力系统自动化的形象和状况及发展前景，向读者作一广泛的宣传，普及这方面的知识，以有利于我国电力工业迅速向现代化方向发展。

本书在编写过程中，得到许多专家和读者提出的宝贵意见，我们根据这些意见作了若干修改。在此，向他们表示衷心的感谢。限于水平和条件，一定有不少缺点和问题，敬希读者指正。

序 言

本书是现代电力系统自动化丛书的第五分册。

现代化电力系统运行中，首要问题是保证对用户的连续安全供电。由于电力系统的日益扩大，结构的越来越复杂，运行方式的变化多端，使得用传统的运行方法和手段来保证电力系统安全运行，变得越来越困难，而电子计算机和各种新的提高安全运行的措施及设备在电力系统中的应用，使现代化电力系统的安全运行提高到一个新的水平。

本书共分五章：第一章介绍电力系统事故发生和发展的原因，电力系统各运行状态间的相互转移，并结合国内外的现状说明对电力系统安全运行的要求。第二章介绍有关电力系统安全运行的重要手段，即电力系统的信息收集和安全监视系统，它是现代化电力系统运行中的耳、目、手、足，是保证安全运行的必要条件（在本书中仅从安全运行的角度作简要说明，这个问题在别的分册中另有较详细的介绍）。第三章介绍电力系统的安全控制，包括正常状态、紧急状态及恢复状态的安全控制，并对一些重要的控制措施及其功效作了说明。第四章介绍如何应用现代计算技术进行电力系统的安全分析，这与传统事故预想的最大不同点，是能快速、详尽而正确地预测到电力系统未来状态的安全性，并及时提出相应的控制措施（安全分析的内容涉及很多计算分析的方法，但是根据本书的目的，在这一章中不可能作系统、详尽的阐述；读者如对其中若干数学表达形式不太熟悉，可以参

阅有关的参考书，或者略去不看，这不会影响对全书内容的了解）。最后一章介绍对运行人员的培训，这是电力系统安全运行的重要保证。以电子计算机为基础的培训模拟器的应用，为运行人员建立了一个具有实际感的培训环境，为大大提高安全运行水平提供了技术条件。

目 录

前 言

序 言

第一章 电力系统安全运行的意义和要求	1
第一节 电力系统安全运行的意义	1
第二节 电力系统的运行状态	9
第三节 电力系统安全运行的要求	13
第二章 电力系统的信息收集和安全监视系统	17
第一节 电力系统实时信息的收集和传输	17
第二节 电力系统的状态估计	26
第三章 电力系统的安全控制	32
第一节 电力系统正常状态的安全控制	32
第二节 电力系统紧急状态的安全控制	35
第三节 电力系统恢复状态的安全控制	48
第四章 电力系统的安全分析	51
第一节 电力系统的静态安全分析	53
第二节 电力系统的动态安全分析	64
第五章 电力系统安全运行的重要保证——电力系统 运行人员的培训	69
附录 电力系统重大事故实例	76
主要参考文献	80

第一章 电力系统安全运行的意义和要求

第一节 电力系统安全运行的意义

电力系统是在单个机组（或发电厂）对用户供电所形成的简单孤立电网的基础上发展起来的。最初，是由人工就地监视和调节发电设备（如调节出力和电压等）和人工就地操作开关设备等进行这种电力系统运行的。随着技术的进步，出现了单个设备的就地自动控制，如自动励磁调节、自动切除故障线路和自动重合闸等。

生产的发展，对电能需求的日益增长，促使发电设备的容量不断增大，同时也扩大了供电的范围。为了充分利用发电设备的容量，提高供电的可靠性和经济性，逐渐形成了由几个相邻发电厂并列运行的电力系统（通过各种电压等级输电线路和变压器的联系）。而且电力系统的容量及其延伸区域越来越大。目前，世界上已出现了装机容量达几十万兆瓦，供电范围纵横几千公里的巨大电力系统。我国目前装机容量超过10000兆瓦的跨省电网也已形成；在不久的将来将出现华北、东北、华东、华中、西北、西南和两广七个跨省电力系统，为进一步形成全国统一的电力系统打下基础。

但是，随着电力系统的不断扩大，系统的结构和运行方式越来越复杂多变；在电力系统中任一地点发生故障，均将在不同程度上影响整个电力系统的正常运行。特别是在主要干线或发电厂发生故障时，如不能及时而正确地处理，将使事故扩大，波及电力系统其它正常运行部分，以致造成大面

积停电，其在政治、经济上所造成的影响是十分巨大的。

60年代以来，国际上出现了多次大面积停电事故（表1-1）。1977年7月13日，美国纽约市的电力系统，由于雷击、保护装置不正确动作、调度中心掌握系统实时信息不足，以及通讯困难等，造成事故连锁发展和扩大，致使全系统瓦解。在事故发生59min后，纽约全市停电，事故前后延续25h，影响九百万居民的供电（见附录）。在美国能源部1978年7月的一份报告中指出，根据最保守的估计，这次停电所带来的直接和间接经济损失约三亿五千万美元（每少供1kW·h电损失约四美元），相当于纽约市电力系统发电和输电设备价值的20%。直接损失包括工业停产、商品因缺少冷冻而变质、电力公司为恢复供电增加开支等；间接损失则包括抢劫、纵火等带来的不可估计的损失（在这段时间里共发生1037起火警、1809起抢劫和破坏行为，有几百人受伤，逮捕了3000人）。又例如法国1978年12月19日的3h事故停电，其经济上的损失至少与50年经济调度工作所得的经济效益相当。近几年来，随着电力系统的扩大，在我国大面积停电事故也时有发生。例如1972年7月27日，在湖北省电力系统中，由于继电保护装置误动作，使丹江到汉口的220kV输电线路断开，造成武汉和黄石地区电压崩溃，使受端系统全部瓦解，仅经济上的损失就约达2700万元。

在电力系统中，经常可能出现各种干扰和事故，发生事故的原因也是多方面的，如自然灾害、设备缺陷、人为错误等，其中很多因素是不能预测和控制的，所以要在电力系统的实际运行中绝对不发生事故是不可能的。重要的问题是应尽量减少出现事故的概率；在出现事故后，则应依靠电力系统本身的能力、继电保护和自动装置的作用以及运行人员的

表 1-1 大停电事故一览表

事故系统	英国南部	纽约市	美国密苏里系统	日本中部	加拿大和美国东北部系统	美国PJM系统
发生时间	1961.5.15 21h28min	1961.6.13 17h58min	1965.1.28 13h20min	1965.6.22 8h16min	1965.11.9 17h16min	1967.6.5
停电范围	约1500MW	约4000MW	美国中部5个州 (约350000km ²) 约2000MW	关西大部分、北 陆、中国、中部、九 州、四国的一部分 约3400MW	美国东北部8个 州及加拿大一部分 (约700000km ²) 约25000MW	美国东部几个州 (约1200000km ²) 约10000MW
停电时间	2h55min (最大)	4h30min (最大)	2h30min (最大)	2h7min (最大)	13h32min (最大)	12h (最大)
波及原因	输电线过负 荷, 频率降低	输电线过负 荷, 频率降低	输电线过负 荷, 频率降低	失步, 频率降低	输电线过负荷, 失步, 频率降低	输电线过负 荷, 失步

控制和操作,使事故得到及时处理,尽量减小事故的范围及其所带来的影响和损失。根据国内外电力系统重大事故的分析,除了自然因素外,可列举下列一些影响电力系统事故发生和发展的重要因素^[7]:

(1) 电力系统规划设计方面因素 电力系统运行的安全性,原则上首先应在电力系统规划设计中加以充分考虑。一方面各个规划设计部门都应根据规定的可靠性准则校核电力系统各发展阶段的规模(包括发电容量及其配置、电网结构及其输送容量等),使其均能与电力系统中各地区负荷的增长相适应,并有足够的备用;这种电力系统发展规模和负荷增长的适应,不仅要求有功功率达到平衡,同时要保证无功功率的平衡,以避免由于缺乏无功所引起的电压下降而使电力系统瓦解。另一方面特别要注意电力系统中各薄弱环节的结构,因为很多事故的发生和发展往往就出现在电力系统的薄弱环节。根据我国近几年来事故统计,在稳定破坏的事故中,约有2/3发生在电网结构较弱的电力系统中,如表1-2所示^[2]。

表 1-2 在较弱电网结构中发生的稳定破坏事故统计

结 构 型 式	占事故总数的百分数 (%)
距离过长或联系阻抗过大的单回线路	38.6
高低压环网结构	19.0
弱联系大环网	5.7
过弱的受端系统	2.9
主要电源T接	0.5
合 计	66.7

还应提到的是，在实际运行中，电力系统的结构往往与设计条件是不一致的，例如大机组或主干线路退出运行，系统处于检修状态等。所以在设计时就应考虑在各种典型运行方式下可能出现的故障，并分别按各地区的特点进行校核。为了保证电力系统的安全可靠，还应考虑罕见的最坏事故情况，并作出全面的研究分析，在技术、经济合理的条件下，采取相应措施，力争使事故后的影响为最小。

(2) 电力系统设备元件方面因素 在实际工作中，往往由于制造厂交货的不及时或经费、自然环境、劳力安排等原因，使计划内的设备不能及时投入运行，不得已而采用一些临时性的措施。这些措施往往只能应付正常的运行方式，却不能适应不正常的运行方式。此外，在设备的设计和制造中，往往由于没有全面和合理地考虑多种因素，如严重的气候条件（飓风、冰雪等）、地区的电气特性（接地电阻等）等特殊的技术和环境条件，因而影响设备的正常运行和电力系统的安全性。因此在实际运行中，为了保持设备的完好和安全可靠，必须定期根据现场实际条件，对相应环境下的设备进行试验、检查和校核，及时发现和消除设备的隐患及其初期的缺陷。特别在系统结构薄弱和电源紧张的情况下，设备的完善更有重要意义。不言而喻，加强设备的预防性维护是花费最少而收效最大的安全措施，它可以减少出现故障的概率，即使出现故障也可减少其严重程度。

(3) 继电保护方面因素 继电保护装置的功能一般用三个性能指标来衡量：①可靠性——就是要能正确地动作，通过断路器，隔离保护区内的故障设备和元件，避免事故的扩大；②安全性——避免保护区外故障所引起的错误动作；③快速性——要有足够快的反应和动作时间，使设备不致由

于过电流或过电压而受到损坏，或者由于故障时间的延续而使系统失去稳定或扩大事故。一般来讲，希望继电保护装置越简单越好。但是，由于电力系统的结构日益复杂，使相应的继电保护系统也越来越复杂，给各种继电保护装置整定的配合上带来困难。特别是在运行方式和系统结线变更时，往往由于未能及时对继电保护整定作合理的修正而导致事故情况下的拒动或误动，成为事故扩大的重要原因。近年来，我国对电力系统事故统计的结果表明，由于继电保护直接引起的事故或使事故扩大而造成稳定破坏的事故占所统计事故总数的41%（直接是7.6%，扩大是33.3%^[2]）。

（4）电力系统运行的通讯和信息收集系统方面因素
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基本信息（如线路潮流、主设备运行状态、母线电压等），或者传送信息的误差（如断路器状态的不对应），而使运行人员对系统的现状缺乏正确的概念，未能及时发现问题和处理问题，或者根据错误信息作出的错误判断，而造成事故的扩大。特别是在发生事故后，信息收集系统更应能及时反映系统迅速变化着的状态，使运行人员易于抓住事故特点，及时作出正确判断（有关电力系统信息收集系统见本书第二章内容）。

事故情况下，通讯失灵，使各级运行人员间无法进行联系和正确的指挥，也往往是使事故扩大或处理延缓的重要原因。

（5）运行人员方面因素 虽然电力系统自动化的水平越来越高，特别是电子计算机在电力系统运行中的应用、取代了原来很多需要人工进行的工作。但是，自动化水平的提高并没有丝毫减弱运行人员在整个电力系统运行和控制过程

中的主导作用。技术水平高的自动监视和控制系统需要有相应文化和科学技术水平的运行人员去正确而熟练地掌握和使用，才能充分发挥它们的作用。特别是在事故情况下，要求运行人员能应付突然来临和未能预测到的严重运行状态，及时作出反应，采取正确的操作步骤和控制措施。对很多重大事故的分析表明，由于运行人员对系统及设备的情况不熟悉或者情况不明，做出错误判断和处理不当，往往是使事故扩大或延续较长时间的重要原因之一。所以，在选择调度人员时，应考虑他们的文化技术水平和运行经验，同时还应注意他们的精神素质。平时要拟定综合性的训练和提高计划，对他们进行定期而有计划的培训（见本书第五章）；要编制和经常修订各种运行规程（包括各种事故处理导则），并督促运行人员严格贯彻执行。对于电力系统中各级运行人员的职责要有明确规定，要相互密切配合。上一级运行人员缺乏指挥下一级运行人员的权威，各级运行人员间工作的不协调，也往往是拖延事故处理时间和扩大事故的重要原因之一。

（6）运行管理方面因素 在电力系统的实际运行中，事故的发生和发展往往与系统的运行方式（包括实际结线方式）有很大关系。根据我国近年来稳定破坏的事故统计来看，其中与运行管理有关的约占总事故数的72%，如表1-3所示^[2]。所以，为了保证系统安全运行，应该对实际运行的电力系统结构和运行方式（要考虑若干设备在计划检修和停役、水电厂洪水和枯水季节等可能的运行方式）进行几天以至几周的运行预想分析，并结合可靠性导则的规定和运行经验及具体环境条件，对各种预想事故进行分析并规定出一系列的处理办法。在运行方式的安排上，应考虑足够的旋转备用和冷备用，以及它们的合理分布。除了正确的继电保护

表 1-3

与运行管理有关的稳定破坏事故统计

分 类	运行管理方面的问题	占事故总数的百分数 (%)
静态稳定破坏	对正常或检修的运行方式未进行应有的稳定计算分析, 在负荷增长或受电侧发电厂减少出力时, 未能控制潮流	16.6
	由于无功不足, 线路长, 负荷重, 或将发电机自动调整励磁装置退出运行, 或误减励磁造成运行电压大大下降、电压崩溃	10.5
暂态稳定破坏	对发电机失磁是否会引引起稳定破坏未作分析计算, 未采取预防措施	15.7
	高低压环网运行方式考虑不当, 或环网运行时未采取相应的解列措施	14.8
	未考虑严重的故障(主要是三相短路, 又未能采取有效措施)	5.7
	未考虑低压电网故障对稳定的影响	8.6
合 计		71.9

配置和整定外, 对用于事故后防止大面积停电的安全自动装置(如切机、切负荷)的协调和配置也应作仔细的考虑和安排。

到目前为止, 世界各国对事故停电所带来的直接和间接损失, 没有统一严格的分析和计算准则。例如, 根据美国电机和电子工程师协会(IEEE)的估计, 每少供 $1\text{kW}\cdot\text{h}$ 电造成的损失为 $0.33\sim 15$ 美元; 英国1978年的资料表明, 每少供 $1\text{kW}\cdot\text{h}$ 电的损失为 $0.3\sim 1$ 英镑(此单位属英制)。这些近似的统计数字均表明: 由于停电所带来的直接和间接经济损失是实际电价的几十倍, 甚至成百倍; 是与用户类型、供电

时间(白天还是晚上)以及停电时间等因素有关。总而言之,大面积停电事故及由此而带来的巨大损失,使电力系统安全性已成为运行中受到突出注意的问题。

第二节 电力系统的运行状态

在讨论电力系统的安全控制功能以前,先来分析一下电力系统运行的各种状态及其条件。在图 1-1 中示出各种运行状态及其相互间的转变^[8]。

电力系统的运行条件一般可用三组方程式组来描述。一组微分方程式组用来描述系统元件及其控制的动态规律;另两组代数方程式组则分别构成电力系统运行的相等和不等约束条件。

所谓相等约束条件,就是系统发出的总的有功和无功功率应随时随刻与系统中随机变化着的总的有功和无功负荷(包括线损)相等。这是电力系统正常运行的必要条件,可用下列数学公式表示:

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

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

式中 P_G 、 Q_G ——发电机或其他电源设备发出的有功和无功功率;

P_L 、 Q_L ——各种负荷的有功和无功功率;

ΔP_i 、 ΔQ_i ——电力系统中各种有功和无功功率的损耗。

另一种所谓不等约束条件,表示在系统正常运行条件下涉及系统安全运行的某些参数(母线电压、线路潮流等),