

电网继电保护应用

王梅义 编著

中国电力出版社

内 容 提 要

这是一本讨论电网继电保护应用有关问题的书。其内容包括：继电保护对电力系统安全稳定的作用与相互协调；涉及继电保护可靠工作的变电所电磁干扰与相关二次回路问题；用阻抗图法和电压相量图法分析距离元件动作性能；影响继电保护工作的仪用互感器暂态特性；用于系统事故和继电保护动作分析的故障暂态记录。对这些问题进行了系统性的阐述，作了一些原理性的解说，介绍了国内外的一些研究成果与实践经验，并就一些实践性问题提出了具体的建议，可供从事相关工作的设计、制造、运行及科研人员和学校师生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

电网继电保护应用/王梅义编著. -北京: 中国电力出版社, 1998

ISBN 7-80125-851-7

I. 电… II. 王… III. 电力系统-继电保护 IV. TM77

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (98) 第 35264 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

实验小学印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

1999 年 3 月第一版 1999 年 3 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 21.25 印张 481 千字

印数 0001—3450 册 定价 41.00 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换)

前言

这是一本讨论电网继电保护应用周边问题的书。大约近十年来,电网继电保护装置的构成发生了划时代的变化。到现在,基于微处理器的电网继电保护装置,在我国 220kV 及以上电压电网中,以横扫千军之势迅速地占领了这个领域,并向 110kV 以下电压电网和大中型电力设备领域急剧扩展。

基于微处理器的电网继电保护装置,继承了长期累积起来的模拟式保护成熟的原理与技术,以及成功的运行经验,充分利用自身智能化的优点,在保证安全可靠的前提下,对装置的安装、试验和运行维护带来了很大便利,同时为继电保护的现代管理提供了重要的物质基础,得到了人们的普遍欢迎。但除保护装置本体而外,电力系统对电网继电保护的要求未变,所处的变电所运行环境基本未变,严酷的强电磁环境对装设在变电所中的微机保护设备的安全可靠运行还带来了很大的威胁,而涉及保护装置具体应用的相关周边问题依然如故,因此,要保证电网继电保护的可靠运行,都有赖于这些周边问题的妥善处理和实际解决。

本书除介绍这些相关周边问题的情况和实践经验外,还提供了有助于了解有关电网继电保护运行环境的电力系统与变电所方面的基础知识。依据作者的理解和认识,还对一些具体应用提出了看法和意见,作为一家之言,供议论与参考。

吴竞昌同志审阅了全稿,提出了许多有价值的意见和建议,谨此志谢。

对于书中的错误与不足,以及立论不当之处,请读者阅后不吝赐教。

作者识

1997 年 10 月

前言

绪 论

第一章 继电保护与电力系统安全稳定

一、引言	7
二、电力系统稳定性概念	9
三、电网继电保护总论	24
四、继电保护系统的可靠性	27
五、继电保护系统的快速性	69
六、继电保护系统的选择性	73
七、继电保护系统的灵敏性	86
八、重合闸的应用	88
九、继电保护系统的振荡闭锁	108
十、按频率降低自动减负荷	118

第二章 继电保护装置的抗干扰问题

一、各种干扰源	122
二、电磁干扰的传布途径	135
三、控制与继电保护设备的抗干扰标准	143
四、变电所的抗干扰措施	145
五、导引电缆引入高压变电所问题	162
参考文献	169

第三章 距离元件的运行性能分析

一、距离元件的构成	171
二、求距离元件所见阻抗的分析方法	180
三、分析距离元件运行性能的电压相量图法	199

四、相间方向距离继电器的运行性能·····	225
五、相间距离元件在振荡时的运行性能·····	235
六、接地方向距离继电器的运行性能·····	238
七、保护相间短路的多相补偿距离继电器的运行性能·····	257
八、保护相间短路的工频变化量距离继电器的动作性能·····	266

第四章 继电保护用互感器

一、保护用电流互感器·····	269
二、电压互感器·····	284
三、研究与开发中的互感器·····	293

第五章 电网故障动态过程记录

一、总论·····	298
二 对高压电网故障动态记录的基本要求·····	303

附录一 线路电流的暂态过程·····	320
--------------------	-----

附录二 单回线情况下 A 相断线且接地时的电压相量图·····	329
---------------------------------	-----

绪 论

电网继电保护用于保护电网及其设备，有鉴于其重要性与技术特点，历来为科研、设计与电网调度运行部门所重视。电网结构、电网运行方式、系统故障形态与异常方式变化多端，为了快速、可靠而又有选择性地切除故障和终止电网异常状态，长期来，研究生产了各种线路保护、母线保护以及自动重合闸和低频减载、自动解列等装置，满足了电网运行的需要，为支持大电网的发展，发挥着重要的作用。

继电保护技术的发展，微电子技术的推广应用，配合现代通信技术的快速进展，可以认为，目前的电网继电保护技术已经完全成熟，已足以适应各种电网运行接线、不同的线路补偿方式（串联电容与并联电抗补偿）以及不同电网运行方式的要求。

在电网继电保护技术原理方面，在我国发展起来的工频突变量元件用于单相重合闸选相和实现快速距离保护，富有新意，在应用上取得完全成功，得到普遍采用。多年来，期望在继电保护原理上取得突破的“行波保护”，目前仍然处于纯理论性的探索阶段。

基于微处理器的继电保护装置，具有一系列的特点：①可以集主保护、后备保护的完整功能于一身，最适于在 220kV 及以上电压电网线路、大中型发电机组以及重要电力设备上实现完全独立的双重化保护；②远方通信功能，管理人员可以随时监测保护装置的运行状态、调用数据、改变定值，为现代化管理提供了必要的物质基础；③自检功能，自动故障定位，即时发出警报，用备用插件置换故障部件，可以在试验室集中进行专业检修。这一切都为提高保护装置的安全运行水平，显著地延长运行检测周期和减少运行检测项目提供了前提，同时也必将直接影响到专业人员的配置，从而大幅度地提高继电保护的管理水平和专业人员的劳动生产率。

随着微机的性能价格比的不断提高，现代化通信技术的迅速进展，以及标准化规约的陆续推出，自 90 年代以来，变电所的综合自动化成了热门话题，引得各地供电部门频频为之动心。所谓综合自动化，是将变电所中一切可以由微机实现的，如继电保护、远方控制、远方监视、故障记录及测量等功能，合理地实现分工协调，通过变电所就地通信网络把实现这些功能的微机设备联接在一起组成一个完整的变电所综合二次系统，同时通过接到就地通信网上的通信接口设备与上级调度和生产管理部门实时地直接进行联系。

变电所综合自动化系统应当是电网调度自动化系统与生产管理现代化系统的一个有机组成部分，它必须在总体规划的要求下，进行具体的安排，使之服从整个调度运行管理与生产管理的全面需要。以此为根本前提，要求所设计的变电所综合自动化系统的结构先进合理，需要采用新技术的环节和只有采用新技术才能解决的问题，应当尽可能地采用最先进的技术和设备，以期取得最大的技术经济效果，并能为今后的系统扩展及技术发展留有余地。

总体而言，设计的变电所综合自动化系统应当满足如下几个方面的基本要求：

1. 实用性

整个系统必须面向实际生产运行，具有现代化变电所应具有的保护、控制、监测及自动化功能；适合现场运行人员就地监控及操作的要求，也可以转为无人值班及远方控制变电所运行；适应调度系统自动化和现场运行管理现代化的需要，实现那些过去不可能而为生产实际所需要的实时测控及数据收集与处理功能，提高变电所本身和整个电网的安全和经济运行水平；除了执行电网正常运行情况下的某些功能外，还应当着重解决协助调度及时准确处理电网事故的问题，并作为电网事故处理自动化系统的一个基本组成单元；有鉴于其对电网实时运行的极端重要性，这个系统应能确保不间断地可靠地连续运行。

2. 安全性

所有采用的微机系统均应适应高压变电所的电磁场环境，满足对微机型继电保护现有的一切要求，即工频耐压、雷电波、脉冲干扰、静电放电、辐射电磁场及快速瞬变干扰试验标准等。同时要求变电所的二次回路设计应当符合现行有关规程及部颁《电力系统继电保护及安全自动装置反事故措施要点》的有关要求。

要求不因综合自动化的投入而带来原有运行高压变电所中不存在的新的不安全因素；同时应当利用现代技术，努力消除原有变电所及电网中的不安全因素，充分发挥运行电力设备潜力。

3. 可靠性

所有足以影响变电所和电网正常运行与安全运行的关键功能，都应实现无公用环节的双重化，保证系统中任一硬件设备故障和软件功能失效时，系统仍能不间断地全功能地保持安全运行。

4. 灵活性

可以适用于新建变电所，亦可移植用于改进原有变电所使之符合调度自动化系统的要求；适应于大型枢纽变电所，当然也应适应于中小型变电所。

适应变电所扩展的需要。

适应变电所自动化功能和管理功能扩展及修改既有功能的要求。

在服从变电所内部通信规约的前提下，该系统应满足开放式系统要求，可以接入任一厂家的各种微机保护和智能设备，保证电力用户对设备的选用有最大的自由度。

5. 先进性

90年代前期国外电网监控中心共性的重大缺陷之一是，当电网发生事故时，大量报警信号涌入控制中心，使调度人员无所适从，严重地影响了重大事故的处理和系统恢复时间。不应重蹈覆辙。要在建立现代化调度实时电网事故处理系统的总体思想前提下，在变电所建立一套先进的事故实时报告系统，作为该系统的一个基本信息源，从而显著地提高电网的事故处理能力。

现代化变电所监控系统的重要标志是变电所内部通信网络的现代化。应当采用适应上述“灵活性”要求的最新技术装备。

以变电所内通信网为纽带，建立面向间隔（电力设备单元）、面向任务的分布式综合二

次系统。联接到通信网上的各智能电子设备任务专一，分工明确，各自独立，互不依赖，各行其职，而无主从之分。任一智能电子设备失效，将不影响整个综合二次系统其他所有任务的执行。

选用标准化网络通信接口和网络通信规约，实现开放式系统联接。

采用新一代的微机软硬件技术，充分发挥智能元件的功能。

6. 适应性

对联接主输电网的 220kV 及以上电压变电所和作为地区供电的 110kV 及以下电压供电变电所的综合自动化功能要求应当有所区别。

220kV 及以上电压输电变电所的综合自动化，应当以服务于电力系统的安全经济运行为中心；而 110kV 及以下电压供电变电所的综合自动化，则应以提高供电安全与供电质量，有利于改进与提高直接为供电用户服务水平为重点。

就电力系统的全局而论，220kV 及以上电压输电变电所的问题，其影响将可能及于电力系统全局；而 110kV 以下电压供电变电所所涉及的只是地区性的局部问题。这是客观上的重大差别。

继电保护和动态故障记录在变电所综合自动化的组成结构中，扮演着重要角色。

有鉴于继电保护装置在保证变电所与电网安全运行的特殊重要性，至少在目前的技术水平条件下，实现完全独立的继电保护功能是必要的，即直接由被保护电力单元独立地取得电流、电压等故障判别信息，经处理分析后，直接向被保护电力单元的断路器发出控制命令。

通过就地通信网络，微机继电保护装置接受来自变电所中央控制计算机或通过接到就地通信网络的远方通信接口接受来自调度中心的命令，调出数据、实行监测和事先整定好的定值切换。

微机继电保护装置具有故障录波功能是绝对必要的，但着重点是检测装置本身在故障过程中各相关部件的动作行为，用以证实装置是否确实处于设计要求的正确工作状态。

动态故障记录在 220kV 及以上电压变电所是一个重要问题。由于历史条件的局限，过去的故障录波只为继电保护专业所专用并由变电所运行人员维护。智能化的故障动态记录装置应当成为超高压变电所非正常运行情况的现代化档案性质的记录设备，其信息资源应当为电力系统各相关部门如系统调度、系统分析、电网生产运行管理，当然也包括电网继电保护部门所共享。现代化的故障动态记录装置，再也不是分散地安装在各地变电所互不相干的孤立设备。通过联网，电网调度中心、系统分析中心和继电保护部门可以及时掌握全电网同时的相关故障动态信息，用于即时处理系统事故或用于事故后的分析。快速的、经过相应集中处理的故障动态信息，可以快速准确显示系统事故的发展过程，配合先进遥控系统的实现，必将极大地有助于调度对系统事故的正确处理，缩短恢复系统正常运行情况所经历的时间，避免事故处理过程中因失误而造成新的重大设备事故。这些都可以从国外历次系统大事故中取得教训。

全网集中的实时的第一手系统故障动态信息数据，将极大地有助于重大系统事故的事

后分析，确证理论分析是否正确，以显著地提高系统分析水平，从而为进一步发挥系统潜力提供切实依据。

对于继电保护专业，事实也说明，没有现代化的故障动态记录数据和相应的信息处理手段，单纯的故障录波解决不了复杂的某些继电保护动作行为的分析问题。

全网故障动态信息集中，还可以开展一些新的服务于电网的工作，在继电保护方面已经做了的，例如用双端故障数据比较准确地求得故障点的距离即是一例。

微型智能设备在变电所的推广应用，突出了高压变电所的强电磁干扰影响问题。造成高压变电所强电磁干扰环境有多种因素，诸如雷击、系统故障、变电所内高压开关操作，以及来自二次回路的操作和电网谐波等等。问题必须从两方面入手解决，一是微型设备本身必须采取相应的硬件和软件措施，使之具有相应的抗电磁干扰能力；另一方面，在变电所的设计和施工中采取相适应的措施，其中最主要的是尽可能减弱对一次干扰源的耦合，以降低对微机设备的干扰水平。双方面的协调配合，相辅相成，才能够保证微机设备在高压变电所的安全可靠运行。

微型继电保护的应用，也为开展新型高压互感器提供了条件，有可能将互感器与高压开关设备在部分结构上合而为一，降低成本，减少高压设备占地面积。

微型继电保护的应用，并没有改变电力系统对继电保护的要求。随着我国电网的不断发展壮大，保证继电保护的可靠跳闸与快速跳闸成了主要矛盾的关键问题。故障快速跳闸对保证电力系统的暂态稳定有决定性意义，在一些情况下，真可谓差之毫秒，失之全网。但必须妥善处理保护装置的快速跳闸问题。仍然用得着一切事物终当有度这句话，无条件的泛泛要求尽可能的快动作，不但于系统稳定运行无补，反而有可能带来事故的扩大，因为快速动作永远是和安全动作处于对立面。总之，在电网继电保护的应用中，一切应当以有利于和服务于电力系统安全稳定运行为根本前提，一切应当服从于实际的系统需要。

大电网中，继电保护的拒绝动作，对电力系统来说，其后果往往可能是灾难性的，特别是当电网运行结构不合理的情况下更是如此。防止主电网中继电保护的拒绝动作应当是另外一个极为重要的关键问题。

防止继电保护的误动作，当然是电网继电保护工作人员孜孜以求的事情，但平心而论，只要不是在系统振荡过程中因躲不开振荡或因躲不开负荷而可能引起继电保护装置连锁反应的一系列误动作，在大电网中，个别继电保护装置的误动作当不致对电力系统的安全运行带来严重恶果。这当然不是说可以容许继电保护误动作。

要求快动作，又要求不拒绝动作，继电保护的误动作恐属难免。安排电网运行方式时务须注意及此。一回线路故障跳闸的同时，最有可能引起相邻另一回线路继电保护的不正确动作。为了应付这种实际可能的事故，而又不致对电力系统带来严重恶果，合理安排电网运行结构将有决定性意义。这就是经常得到强调的，加强受端电网，适当分散外接电源两条原则。在实际运行中，适当分散外接电源，避免在送电侧并联的主要送电回路电源过于集中，以致传送电力占系统总容量的比重过大，具有第一位的重要意义。送电侧并联的电源过于集中，联接到受端系统的主要并联送电线路所传送的容量过大，这样一种也许在正常运行和正常故障跳闸情况下看来令人满意的电网运行方式，经受不起一回线故障同时

另一回线路继电保护误动作或母线故障的严重冲击，这正是某些国外系统大事故的严重教训，不可不引以为戒。应当说，对于这样一些对电力系统全局安全运行生死攸关的重大问题，不能把宝完全押在安全自动装置的身上。正常运行时，适当地分散外接大电源，让每一组送电回路传送的容量只占全系统的不过大比重，是应当采取的正确对策。这也是早已在《电力系统技术导则》第 5.4 条和《电力系统设计技术规程》第 3.2.6 条中反复明确过的。

二次回路问题，在电网继电保护的应用中，占有突出重要的位置。如果说，保护装置本身的缺陷可能带来该装置的不正确动作的话，二次回路的缺陷，其影响将及于整个变电所继电保护的安全可靠运行。频发事故，教训了人们开始重视二次回路问题。它的解决，更富于实践性，而又涉及面广，需要有明确的规程约束才能奏效。

微机继电保护的应用，让人们不得不再次捡起阻抗轨迹分析的方法，它有局限性，但又不得不用；利用电压相量图分析重负荷线路发生经电阻故障情况下的距离继电器动作行为具有独特的优点。归根结底，这些方法之所以能为人们所普遍接受，只是因为这些分析方法是在基于对电力系统运行情况有基本了解的前提下，运用了人所共知的电工原理和初等几何，只要对距离继电器的动作边界条件有所了解，也非常易于为非继电保护专业人员所掌握。相应的原理，也可以用来分析电力系统运行的其他相关问题。

电网继电保护应用，涉及方方面面的问题，但对于各种保护装置说来，又具有共性。既搞好保护装置，也搞好保护装置的应用，才能保证电网继电保护为大电网的安全稳定运行作出应有的贡献。

最后，议论有关主设备保护的问题。主设备继电保护与电网继电保护虽同属继电保护，但要求却有相当的差别。主设备继电保护的基本功能，是保证主设备运行安全，而主设备的运行安全，是比电网安全尤为重要的一件事。如果真的发生了主设备安全与电网安全之间不可调和的矛盾，首先应当保证主设备的安全，而不是相反。因为没有主设备，电网也就不存在。以变压器的保护为例，变压器的保护各种各样，但最基础的应是瓦斯保护与过电流保护，前者的重要性已为人们所公认，对于后者，特别是大型变压器，过电流保护的绝对必要，并没有完全为人们所重视。在实际中有一种做法，对大型变压器的基本保护，改过电流保护为距离保护，就是一例。

应当明确地说，对于线路保护，在超高压电网中，改过电流保护为距离保护，是理所当然，合情合理。但把这种做法，套用到变压器保护，就既不合情又不合理。影响变压器安全的一个重要因素，是绕组的过电流，这种过电流，可能因过负荷产生，也可能因外部短路故障长期未被切除（例如低压母线故障）而产生。按设计，变压器绕组允许过电流的份额是一个时间函数，从理论上说，应当有一种能反应这种过电流与允许时间关系的继电保护作为对变压器的基本保护。虽然简单的定时限过电流保护不能精确地担此重任，但在变压器的每一侧安装按额定电流整定的过电流保护，整定其时间大于所有出线的保护时间，也基本可以满足这一要求。装在变压器电源侧的距离保护，其保护性能，不可能取过电流保护的绩效而代之，应是明确的。

躲过出线保护最长时间的变压器过电流保护，在整定上不应作为整定配合之一级（当

然如果能兼顾更好，但不应有此确定要求)，因为它只是变压器的最基础保护。

主设备继电保护的動作，也必须计及对电网安全及设备安全的影响。例如，对于主变压器的差动保护，一个重要的要求是，绝不允许在电网过电压（从而引起相应过励磁）的情况下误动作，原因是电网过电压愈严重，差动保护误动作产生的可能后果愈严重，因为断路器在超过规定的过电压水平下无论跳开空载线路或跳开空载变压器都会产生不允许的操作过电压，以致损坏断路器或变压器。更可怕的则将是引起断路器爆炸。

第一章

继电保护与电力系统安全稳定

一、引言

充足性、安全性、经济性和质量是电力工业生产必须满足的几项基本要求。随着国民经济的发展与电力需求的不断增长,区域电网的规模愈来愈大,通过区域电网间的互联形成更大规模的联合电网,已是多年来和以后还将不断延续的发展趋势。从早期局限于城市范围的发供电,发展到通过高压线路联接远方电源和大供电负荷中心而形成电力系统,电力工业生产模式发生了质的飞跃。虽然从表面上看,电力生产和消费依然经发、送、变、配、用诸环节,但主体却发生了根本性的变化。在城市供电时代,电力生产的中心是发电厂,城市发、供、用电系统的规划、设计和运行都围绕着这个中心进行,这个时期形成的根深蒂固的传统习惯和观点,也有形无形地传了下来,并继续产生影响。

现代电力生产的中心是用发达的 220kV 及以上电压的超高压电网把众多发电厂和众多用电区域联接成为一个整体的电力系统。联接在电网上的任何发电厂乃至任何局部的供电区域,都是也只能是电力系统的一个组成部分,是局部。构成电力系统的骨干是超高压电网。超高压电网的运行情况如何,对电力系统的全局有决定性影响。

电力系统的安全性,包括安全和稳定两个基本概念。所谓安全,是指运行中的电力设备必须在不超过它们允许的电流、电压和频率的幅值和时间限额内运行。不安全的后果,可能招致重大电力设备,诸如发电机组、变压器等的损坏。所谓稳定,是指电力系统可以连续不断地向负荷供电的状态。

在电力系统中,有三种必须同时满足的稳定性要求,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、发电设备和输电线路的电流和电压大幅度地周期性波动,电力系统因不能继续向负荷正常供电而不能继续运行。电力系统振荡,是最为常见的一类系统事故。它可能是发展成为电力系统大停电的起因,也可能是在发展为大停电事故过程中的一个附加因素。系统振荡事故必须努力避免,这也是长时期以来在设计和运行电力系统中受到高度关注的一个极重要的安全运行问题。虽然由振荡演化为电力系统大停电的只是极少数,但由于各种原因,系统振荡事故仍在国内外系统中不断发生。

能否确实避免由系统振荡发展为电网大停电,关键在于有无预计与能否善于处理。有预计而又处理得当,可以使振荡的影响局限于小范围和短时间内,系统供电能迅速恢复正

常。否则，后果未可预料。中国电力系统有长期正确处理振荡事故的宝贵经验，其中，继电保护功不可没，应当进一步总结与推广应用。

为了避免发生系统振荡事故，国内外都制订了明确的安全稳定准则。在我国，有1981年由水利电力部颁布执行，现在继续有效的《电力系统安全稳定导则》。特别需要指出的是，任何准则的要求都是有前提条件的。普遍采用的前提是，除发生规定的简单故障外，电力系统中的其他一切运行条件都处于设想的正常状态下。例如，在《电力系统安全稳定导则》中，在电力系统发生大扰动时的安全稳定标准部分，关于必须保持稳定运行的有关条款规定中，都首先写明：“如遇下列情况，当保护、重合闸和开关正确动作时，必须保持电力系统稳定运行……”。当然，导则规定的要求，也是与占绝大多数的实际发生的事故情况相符，以之作为对系统稳定的基本要求，当然无可厚非。同时，实际发生过的和可能发生各种连锁反应情况也是千奇百怪，如果以连锁反应为准则，提出保证电力系统不发生振荡的要求，既不合理也不可能。

虽然继电保护工作者一直努力于防止继电保护系统的误动作和拒绝动作，但不正确动作的情况终属难免。计及继电保护的可能不正确动作，尽可能避免事故扩大，是安排事故预想和电力网运行接线必须认真注意的一个问题。长期的运行经验证明，国内外电力系统大事故的发展过程，都是从简单事故开始，经过一系列可能预计和不可能预计的各种偶然因素所产生的连锁效应叠加，才发展成为大停电的。

失去频率稳定性的后果，是发生系统频率崩溃而招致系统全停电，这是绝对需要避免的一种恶性事故。交流联网的系统容量愈大，发生全局性的频率崩溃的概率愈低，但后果也愈严重。系统频率的突然深度下降，标志着严重的系统事故即将来临，按频率降低自动减负荷是对付频率崩溃的最有效手段。在我国，有电力行业标准DL428—91《电力系统自动低频减负荷技术规定》对此作出了明确的要求。为了计及实际切负荷量和应切负荷量的不可控因素，例如无法安排和掌握实时切负荷量等，安排超额的自动减负荷量是绝对必要的。

失去电压稳定性的后果，是发生电压崩溃，使受影响的地区停电，过去只是一个极个别的局部问题。近些年来，国外系统多次因电压崩溃引起大面积停电事故，在国际上被炒得沸沸扬扬的电压稳定性问题，指的是影响及于全电网的情况。虽然一切电压崩溃的根源都是因为无功补偿功率不足，但只是在供电变压器自动调压得到普遍采用之后，才发展成为全网性大停电。在电网缺少无功补偿功率的条件下，由于供电变压器自动调压的不正确运用，各负荷中心仍然力图维持本地区电压于正常水平，使主网电压严重下降而产生连锁反应，造成了大停电，这是一种电力系统现代化的病症。1978年以来，法国、瑞典、日本东京等的几次大停电，无一不说明了这种情况。我国在文化大革命期间，有的电力系统长期在低频低压情况下运行，也发生过局部的城区因电压崩溃而停电，但从未发生过全网性的电压崩溃事故，这从另一方面说明了供电变压器自动调压在全电网电压崩溃过程中的消极作用。同时也明确地说明，正确地安排各级电压电网每一台供电变压器的自动调压，依照主网电压允许条件维持地区电压于相适应的水平，应是避免发生全网性电压崩溃的第一位重要举措。在某些地区，辅之以按电压降低自动减负荷，将可能进一步制止这种严重

事故的发生。

总之，就全局而论，在电力系统的安全问题上，有两种必须避免的灾害性事故：一种是重大电力设备损坏，另一种是电网的长期大面积停电。正是在这些方面，电力系统继电保护已经发挥和将进一步发挥其特殊重要作用。

为了避免运行系统发生稳定破坏事故，应当综合性地采取措施，例如在设计和运行系统时需要有预先的对策，在安排电网运行结构，考虑调度事故处理和继电保护与安全自动装置配置与整定等方面都需要分别作出精心安排，以防患未然。线路及母线保护的快速跳闸，重合闸方式选择和重合闸时间整定，对保证系统的暂态稳定有重要的影响；而继电保护在系统振荡过程中的动作行为，对调度正确处理振荡事故，从而尽可能缩短恢复系统正常运行的时间，尽可能减少对负荷的停电损失，将产生重大影响。反过来说，系统运行接线及运行方式的安排，也将影响继电保护的正确动作。因之，继电保护部门与调度运行部门之间需要密切地协调配合，在保证系统稳定运行的总前提下，充分发挥继电保护的积极作用。

发电机组是电力系统中最重要和最昂贵的电力设备，它的轴上串联着原动机，可能的运行方式很多，对系统运行的影响也最大；同时，不同的系统运行条件也给发电机组的安全运行带来严重影响。就电网继电保护而论，重合闸方式与重合闸的整定时间将可能对大机组的安全运行有重要影响；另一方面，大机组的失步保护、频率保护等的配置和整定，也将严重影响电力系统的安全运行。

以上一般性地讨论了继电保护配置与重合闸方式以及具体整定对电力设备安全运行和电力系统稳定运行的几个重要关系问题。为了适应大电力系统的需要，更好地与电力系统各有关方面搞好配合，作为继电保护工作者，需要主动对电力系统与电力设备的运行问题有更多的了解。应当说，对于继电保护这门技术，在一些部门的工作人员看来，不免带有某些神秘色彩，而又责任重大，往往是敬而远之。为了搞好相互配合，继电保护工作者对相关专业的知识了解得愈多愈深入，和相关部门讨论或处理电网相关问题的时候，就会多一些共同语言，在保证电力系统安全稳定的前提下，就可以比较容易与相关部门搞好配合，从而充分发挥继电保护的积极作用。在处理继电保护与相关专业的关系方面，相互支持与相互理解是绝对必要的。

然而，更为经常遇到和极为重要的问题是，如何确保继电保护与重合闸的正确动作。否则继电保护与重合闸不但不能成为电力系统的安全稳定运行卫士，反而成了电力系统安全稳定运行的大患，这正是继电保护工作者长期不懈努力以求避免发生的事情。在继电保护工作者的身上，总是承担着电力系统安全保卫者的光荣责任。

二、电力系统稳定性概念

前已述及，电力系统稳定性包括同步运行稳定性、频率稳定性和电压稳定性三类。在同步运行稳定性中，又可分为静态稳定性、暂态稳定性与动态稳定性三种。下面是对这些稳定性机理的简要说明。

(一) 同步运行稳定性

1. 静态稳定性

静态稳定性是指电力系统受到小干扰后, 不发生非周期性的失步, 自动恢复到起始运行状态的能力。为了保持静态稳定, 由电源经线路向受电系统传输的有功功率不得超过某一定值。如果达到这个定值, 无论电源侧或受电侧的任何负荷波动, 都将使通过这一送电回路的电流、母线电压和线路传输功率发生发展性的连续巨大波动, 正常的送电状态受到破坏, 而使供电不能继续。

为了说清静态稳定性, 首先研究单电源经线路向受电系统送电的各种电参量关系, 见图 1-1。

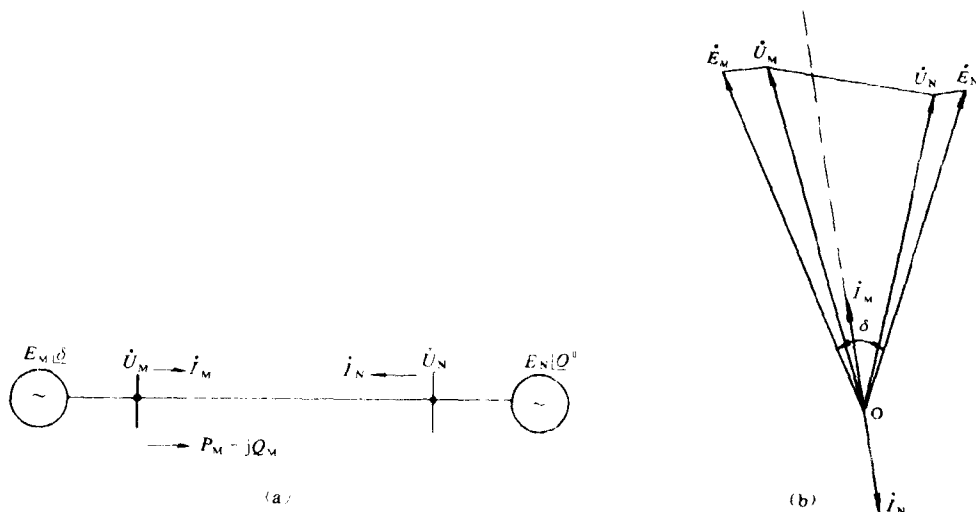


图 1-1 单电源经线路向受电系统送电

(a) 单线接线图及计算回路; (b) 电压相量图, $\angle Z_M$ 及 $\angle Z_N > \angle Z_L$ 情况

为了解任何回路的电气量, 必须首先确定电流及电压的正方向, 并明确电压指的是电压升或是电压降。所有电路中表示式中电气量的正或负的符号, 以及绘制的各种向量图中的相位关系, 只有对应于确定的电流及电压正方向时才是正确的。记住这一点, 对于从事实际工作的继电保护工作者说来极为重要。不建立这样一个最基本的概念, 在进行现场试验和在分析事故的过程中, 往往会愈弄愈糊涂, 在判定负序或零序方向元件的极性和接线正确性时, 情况更是如此。此一点早已为长期的实践经验所证实。传统的习惯是: 取由母线流向线路的方向为规定的电流正方向; 同时取母线电压为电压升, 即视为电源电压。如果没有特殊注明, 许多表示式和相量图往往采用这样的假定前提。

对于电网中的任一元件, 都有送出与受人功率的问题。一般以电源向感应电动机送电作为送出有功功率 P 与无功功率 Q 的标准。 Q 的数学表示式还有一个正负符号的问题。在一般的调度运行分析中, 往往将向感应电动机送电的情况表示为 $P - jQ$ (而在一些计算程序中, 则定为 $P + jQ$) 与这一约定相对应, 视在功率 S 的数学表达式则是以电流向量为基准, 取它与电压向量的共轭值相乘而求得。

以受端系统等价内电势 $\dot{E}_N$ 为基准, 即取为 $E_N \angle 0^\circ$; 令发电电源内电势为 $E_M \angle \delta$, δ 为正, 表示 $\dot{E}_M$ 相位领先 $\dot{E}_N$ 相位。按上述 S 表达式的约定, 可得下列诸式

$$I_M = -I_N = \frac{E_M \angle \delta - E_N \angle 0^\circ}{Z \angle \alpha} = \frac{1}{Z} (E_M \angle \delta - \alpha - E_N \angle -\alpha)$$

式中 $Z \angle \alpha$ ——电源侧阻抗 Z_M , 线路阻抗 Z_l 与受端系统等价电源阻抗 Z_N 之和, $\alpha \leq 90^\circ$

由
$$S = P - jQ = \hat{E} I$$

得
$$P_M - jQ_M = \frac{E_M}{Z} [E_M \cos \alpha - E_N \cos (\delta + \alpha)] - j \frac{E_M}{Z} [E_M \sin \alpha - E_N \sin (\delta + \alpha)]$$

为了简化分析, 取 $\alpha = 90^\circ$, 则

$$P_M = \frac{E_M E_N}{Z} \sin \delta \quad (1-1)$$

及
$$Q_M = \frac{E_M}{Z} [E_M - E_N \cos \delta] \quad (1-2)$$

式 (1-1) 是最重要的送电公式, 它说明, 图 1-1 送电回路可能传送的最大有功功率 $P_{\max} = \frac{E_M E_N}{Z}$, 发生于 $\delta = 90^\circ$ 之时。如果送电功率低于 $P_{\max}$, 此一送电回路可以经受正常运行时不大的负荷波动; 如果送电功率适等于 $P_{\max}$, 则任何微小的负荷增长, 都将使送电成为不可能, 即发生了稳定破坏, 这种稳定破坏的方式叫失去静 (态) 稳定。为了保证正常情况下电网的稳定运行, 电网中任何回路的送电有功功率, 都必须小于它的静 (态) 稳定极限值, 并留有一定裕度, 这个裕度在《电力系统安全稳定导则》中有明确的规定。在单机对无穷大系统和双机系统的特定情况下, 送电功率的极值表现为送电功率角 δ 不得大于 90° , 这是一个早已明确的概念。但是需要特别提醒的是, 以 90° 作为静稳定极限角的论断, 决不能无条件地套用于多机复杂系统的情况, 否则有可能引起某些误解。例如, 对于一个多电源串联运行的系统, 在系统稳定运行的情况下, 首末端任意两电源内电势角之差完全可能远大于 90° 。利用等价系统的原理, 不难对这种现象作出合理的解释。

式 (1-1) 说明, 有功功率总是从内电势角相对领先的电源侧送向系统; 而式 (1-2) 则说明, 无功功率总是从电压较高的母线向相邻的电压较低的母线方向送出。线路本身电容会影响线路两侧的无功功率分配, 但只要不是特别长的线路, 后一点结论一般还是正确的。掌握有功功率与无功功率的传输方向和线路两侧母线的电压水平, 对于通过试验方法正确判定被试继电保护装置的接线极性正确性具有决定性意义。

2. 暂态稳定性

暂态稳定是指电力系统受到大干扰后, 各同步电机保持同步运行并过渡到新的或恢复到原来稳定运行方式的能力。电网中经常发生的大干扰是短路故障。因此, 继电保护的动作情况如何, 将直接关系到电力系统的暂态稳定性。

在图 1-1 (a) 的单线接线图中, 令 M 侧为发电电源侧, N 侧为等价受端系统或相对无穷大系统。后者所接入系统的电源总容量远大于 M 侧的电源容量, 它接入系统的端电压在所有运行情况下都能保持恒定不变; 同时也不受 M 侧机组运行状态和其他影响而能保持本身运行频率恒定不变。这种假定, 是为了分析方便。

对送电侧的发电机组来说，它受到的力矩有两个，一是原动机施加的机械转矩 T_m ，另一是与之平衡的电磁转矩 T_e ，如果略去损耗，发电机组转子的运动方程是

$$J \frac{d\omega}{dt} = T_m - T_e \quad (1-3)$$

$$T_m = \frac{P_m}{\omega} \quad (1-4)$$

$$T_e = \frac{P_e}{\omega} \quad (1-5)$$

上三式中 J ——发电机组的转动惯量；

P_m ——对应于发电机组转子轴上机械力矩的电功率；

P_e ——发电机定子输出的电功率；

ω ——发电机组的转子角速度。

在我国，习惯采用的机组参数是惯性常数 M ， M 是机组在额定角速度 ω_n 下的动能 $\frac{1}{2}J\omega_n^2$ 除以发电机的额定兆伏安出力 S_n ，再乘以 2，即

$$M = \left[\frac{\frac{1}{2}J\omega_n^2}{S_n} \right] \times 2$$

在一些西方国家，定义的机组惯性常数为 H ， $H = \frac{\frac{1}{2}J\omega_n^2}{S_n}$ ， $M=2H$ ，以 M 值代入式 (1-3) ~ 式 (1-5) 得

$$\left(\frac{1}{\omega_n} \right) \left(\frac{d\omega}{dt} \right) = \left(\frac{1}{M} \right) \left(\frac{\omega_n}{\omega} \right) \left(\frac{P_m - P_e}{S_n} \right) \quad (1-6)$$

如果式 (1-6) 中各参数的单位选定为： ω 为弧度/秒 (rad/s)， P_m 及 P_e 为兆瓦 (MW)， J 为兆焦耳 (秒²/弧度²，s²/rad²)，则 M 的单位为秒 (s)。

速率 ω 除以额定速度 ω_n 为标么速度 Ω ， $\Omega = \frac{\omega}{\omega_n}$ ，在保持稳定运行的前提下，转速非常接近于额定转速，式 (1-6) 中的右侧 $\frac{\omega_n}{\omega}$ 可取为 1。同时取 P_m 及 P_e 为以 S_n 为基准的标么值，则发电机组转子的运动方程可写为

$$\frac{d\Omega}{dt} = \frac{P_m - P_e}{M} \quad (1-7)$$

为了简化分析，认为发电机组的原动机力矩在整个分析过程中保持恒定，即略去调速器的作用，同时认为发电机的内电势为恒定值。

由于发电机的感应电压为与发电机转子位置相对固定的磁通所产生，而受端系统运行于额定频率，因此，当转子转速高于同步转速时，感应电压的相对相位将走向超前，低于同步转速时则走向滞后。用数学式表示为

$$\frac{d\delta}{dt} = N(\omega - \omega_n) = \omega_n(\Omega - 1) \quad (1-8)$$

式中 N ——发电机转子的极对数；