

电力系统电气二次人员系列丛书



电力系统保护与控制基础

周建新 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

电力系统电气二次人员系列丛书

电力系统保护与控制基础

周建新 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书是专门为在电力系统中从事电气二次工作的人员进行电力系统保护与控制基础理论的培训与学习而编写的培训教材。全书共分五章,内容包括电力系统保护与控制概述、电力系统继电保护、变电站综合自动化系统、智能变电站条件下的综合自动化系统和继电保护、电力系统运行与控制技术。

本书所述内容是电力系统电气二次工作人员需要掌握和了解的基础理论知识,编写时立足基础理论,围绕电力系统运行与控制这条主线从总体到局部依次展开,内容翔实、概念清晰,非常适合读者自学。本书可以作为从事电力系统电气二次工作的人员进行电力系统保护与控制基础理论培训的教材和参考书,也可供高等院校电气工程专业师生阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

电力系统保护与控制基础 / 周建新编著. —北京: 中国电力出版社, 2014.7

ISBN 978-7-5123-5381-7

I. ①电… II. ①周… III. ①电力系统-继电保护-技术培训-教材②电力系统-自动控制装置-技术培训-教材 IV. ①TM77

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 306501 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2014 年 7 月第一版 2014 年 7 月北京第一次印刷

710 毫米×980 毫米 16 开本 13.25 印张 208 千字

印数 0001—3000 册 定价 50.00 元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

前言

随着电子技术、计算机技术、网络通信技术和智能电网技术的快速发展，电力系统的保护与运行控制技术正在突破传统的技术框架和分工模式向着相互融合与一体化的方向发展，作为新时期的电力系统电气二次技术人员，为了能够适应这种技术进步所带来的新的变革，迫切需要以全新的视角重新审视并更加全面地认识和理解当今电力系统的保护和运行控制技术。本书基于这样的背景，试图从电力系统安全稳定运行与控制的角度出发，对当今电力系统的各种保护和控制技术重新进行一次系统的演绎和梳理，使读者能够迅速而全面地认识和理解当今电力系统的各种保护和控制技术，更好地为电力系统的生产与运行服务。

电力系统是依据按电压等级分层、按负荷分布分区的原则构建出来的复杂同步交流系统，在网络构架上包含超高压输电网、高压配电网、中压配电网、低压配电网等多个层次的电网。超高压输电网主要承担电能输送的任务，高中低压配电网则主要承担电能的变换与配送任务。在控制方面，超高压电网关注的重点是全系统有功的平衡和系统频率、电压的稳定；而配电网则对无功补偿和配电电压的稳定性更关注一些，本书对系统运行所涉及的控制理论和装备都进行了比较全面的介绍。在保护方面，超高压电网保护对动作的快速性、可靠性要求很高，任何保护的误动和拒动都可能危及系统的安全稳定运行，因此保护系统的复杂性比较高；而配电网保护对动作的快速性、可靠性要求则要低一些，保护系统也相对简单一些，但大致思路是一样的。因此，只要理解和掌握了超高压电网的继电保护原理，配电网保护的原理就很容易理解了，故本书只对超高压电网的继电保护原理进行了介绍。微电网也是当今电力系统比较热门的一个话题，其主要特点是网内存在一个或多个逆变器型的微型电源，造成其运行方式和保护构成也跟普通配电网有所不同，但鉴于相关技术尚在研究和发展之中，因此，本书没有纳入这部分

内容。

电力系统保护与控制所涉及的技术非常广泛，要全面地理解和掌握非常不易，作者结合多年从事电力系统保护与控制基础理论培训所积累的经验，紧紧围绕电力系统运行与控制这条主线，采取先总体后局部的编写思路，力求在讲清楚基本原理的基础上，揭示所涉及的相关技术之间的内在联系，指明它们在电力系统的保护与控制过程中所承担的作用和相互间的配合关系。

本书的形成首先得益于作者多年从事电力系统保护与控制技术的研究和培训工作经历，正是这些经历使作者得以理清电力系统保护与控制技术所涉及的许多复杂问题。同时，在多年的工作中，单位领导和同事的关心与帮助，尤其是高中德和景敏慧两位老前辈的指点使作者受益匪浅，本书责任编辑对本书编写思路的肯定及所提的建议对本书的最终形成也起了很大的作用。另外，在本书的编写过程中，还得到了东南大学陆广香教授的鼓励和支持，他的学生周昊程为本书做了文字校对并提供了部分插图，在此一并表示感谢。

本书在编写过程中还参考了部分教材、书籍及相关文章，在此向有关作者表示谢意。

由于水平有限，书中有错误和不当之处恳请业内同行专家指正。

作 者

2013 年 12 月

目 录

前言

第一章 电力系统保护与控制概述	1
第一节 电力系统的基本构成	1
一、电力系统主网架	1
二、负荷中心的电网构架	2
三、变电站主要电气设备	4
四、常见的变电站母线接线方式	4
第二节 电力系统运行过程所涉及的保护与控制问题	6
一、电力系统的有功平衡及频率控制问题	6
二、电力系统的无功平衡及电压控制问题	7
三、电网的输电能力与系统的稳定性控制问题	8
第三节 电力系统保护与控制技术简介	9
一、调度自动化系统	10
二、变电站综合自动化系统	11
三、继电保护系统	11
四、稳定控制系统	13
五、柔性输电技术	15
第四节 本书的内容安排	16
第二章 电力系统继电保护	17
第一节 输电线路保护原理	17
一、输电线路保护概述	17
二、距离保护原理	22
三、纵联方向（距离）保护原理	48
四、纵联电流差动保护原理	58
五、输电线路的自动重合闸	63

第二节 母线保护原理	67
一、母线保护的功能配置要求	67
二、母差保护的基本原理	68
三、母差保护必须解决的两个共性问题	73
四、3/2 断路器接线方式的母线保护	77
五、双母线接线方式的母线保护	78
第三节 变压器保护原理	88
一、变压器保护的功能配置要求	88
二、变压器主保护	92
三、变压器后备保护	114
第三章 变电站综合自动化系统	119
第一节 变电站综合自动化系统的典型结构	119
一、以总控单元为核心的分散式综合自动化系统	119
二、以高速以太网通信平台为核心的分层分布式综合自动化系统	120
三、间隔层设备的配置原则	122
四、规约转换器	122
五、远动工作站	123
六、后台系统	123
第二节 变电站综合自动化系统的工作原理	124
一、系统组网及信息交换	124
二、通信规约	126
三、后台监控功能	127
四、间隔层设备间的时钟同步	129
五、“五防”功能	131
六、间隔层联锁和顺序控制功能	133
七、电压无功控制功能	134
八、小电流接地选线功能	135
第四章 智能变电站条件下的综合自动化系统和继电保护	136
第一节 智能化和网络化推动变电站二次系统不断变革	136
第二节 智能变电站条件下综合自动化系统和继电保护的特点	137
一、智能变电站条件下的综合自动化系统	137

二、智能变电站条件下的继电保护	138
三、智能变电站必须解决的几个关键问题	139
第三节 IEC61850 标准	142
第四节 智能变电站的构建流程	146
一、为 IED 设备建模得到 ICD 文件和虚端子图	146
二、为变电站一次系统建模得到 SSD 模型文件	147
三、生成 SCD 文件	147
四、从 SCD 文件中导出设备的 CID 文件得到实例化的 IED 设备	148
第五节 智能变电站条件下的继电保护实施方案	148
一、线路保护实施方案	150
二、变压器保护实施方案	151
三、母线保护实施方案	156
四、3/2 接线方式的断路器保护实施方案	156
第六节 智能变电站的可靠性措施	158
一、高效、可靠的 GOOSE 信息发送机制	158
二、开关状态变位时接收端的安全确认机制	159
三、继电保护系统在应对设备检修时所采取的安全性措施	159
四、对 SV 网和 GOOSE 网采取的数据过滤措施	159
第五章 电力系统运行与控制技术	161
第一节 电力系统运行与控制	161
一、电力系统的同步运行稳定性	161
二、电力系统的频率稳定性	166
三、电力系统的电压稳定性	168
第二节 调度自动化系统	172
一、调度主站的构成	173
二、SCADA 功能	174
三、EMS 高级应用功能	174
四、广域测量系统 (WAMS) 的原理及应用展望	176
第三节 电力系统稳定控制系统	178
一、区域稳定控制系统	179
二、就地稳控装置	182

第四节 柔性交流输电技术 (FACTS)	185
一、以 TCR 为基本控制部件的阻抗型 FACTS 控制器	186
二、以 VSC 为基本部件的有源型 FACTS 控制器	190
第五节 直流输电技术 (HVDC)	193
一、常规直流输电系统	194
二、柔性直流输电系统	197
三、直流输电系统在电力系统稳定控制中可以发挥的作用	200
参考文献	201

电力系统保护与控制概述

第一节 电力系统的基本构成

电力系统是由分布在广域范围内的电源、负荷和输变电网络共同构成的三相交流系统。电源是分布于各地的各类发电厂内的发电机，这些发电机的容量大小各异，它们源源不断地向系统送出电能；负荷就是工矿企业、政府机关、家庭用户内的各类用电设备，它们不断地从系统吸收电能；输变电网络是联系电源与负荷的纽带，它们将电源发出的电能送往系统的各个角落供负荷消费。

典型的现代电力系统构架如图 1.1.1 所示，主要由大型发电厂、主网架和负荷中心组成。大型发电厂和主网架构成了面向全系统的电能功率平衡与调剂平台。负荷中心从本地电源和主网架双向受电，满足本地负荷的需要，当本地电源输出功率正常时就按计划规定的数量从主网架受电，当本地电源输出功率不足时就从主网架多受电，当本地电源输出功率过剩时就向主网架送电。

一、电力系统主网架

我国电力系统的主网架主要由 500kV、750kV 和 1000kV 电压等级的输电线路及其同电压等级的枢纽变电站、开关站等构成，目前我国西北电网主要以 750kV 为主，其他区域电网主要以 500kV 为主，1000kV 的特高压网架正在建设之中。枢纽变电站主要负责联系多路大电源和多路线，以及向负荷中心送电。开关站主要建在 500km 以上的长距离多回输电线路的中间位置，该变电站不设变压器，只设母线、开关和无功补偿设备，其作用主要是将长距离输电线路分段以提高输电可靠性，以及对输电线路进行无功补偿以

提高其输电能力和系统稳定性。

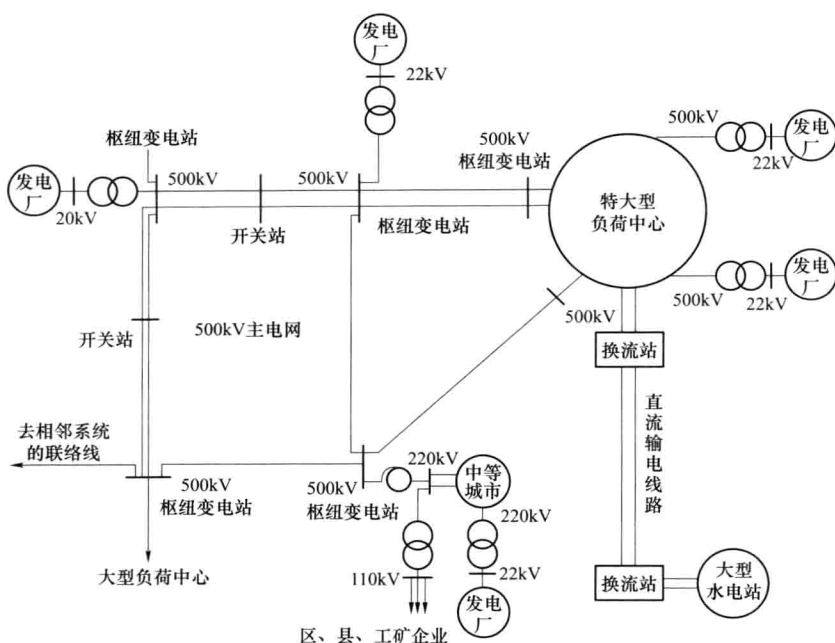


图 1.1.1 现代电力系统构架图

二、负荷中心的电网构架

根据城市用电量的大小，负荷中心有特大型负荷中心、大型负荷中心和中等负荷中心之分，例如：上海、北京等就属于特大型负荷中心，南京、杭州等就属于大型负荷中心，扬州、镇江等就属于中小型负荷中心。每个负荷中心都要从本地电源受得大部分电能功率，主网架则负责电能功率的补充和调剂。对于特大型负荷中心，由于本地电源缺口太大，往往还需要通过远距离直流输电线路或交流输电专线将远方大型水电站、核电站或坑口火电站的大容量功率直接引入负荷中心，以满足本地负荷的需要，像连接上海与葛洲坝水电站的葛上线±500kV 直流输电工程就是将葛洲坝水电站的大容量功率直接引入上海电网，连接上海与向家坝水电站的向上线±800kV 直流输电工程就是将向家坝水电站的大容量功率直接引入上海电网。

负荷中心的电网由城市送电网、高压配电网、中压配电网、低压配电网和各种电压等级的变电站构成。负荷中心的电网构架如图 1.1.2 所示。

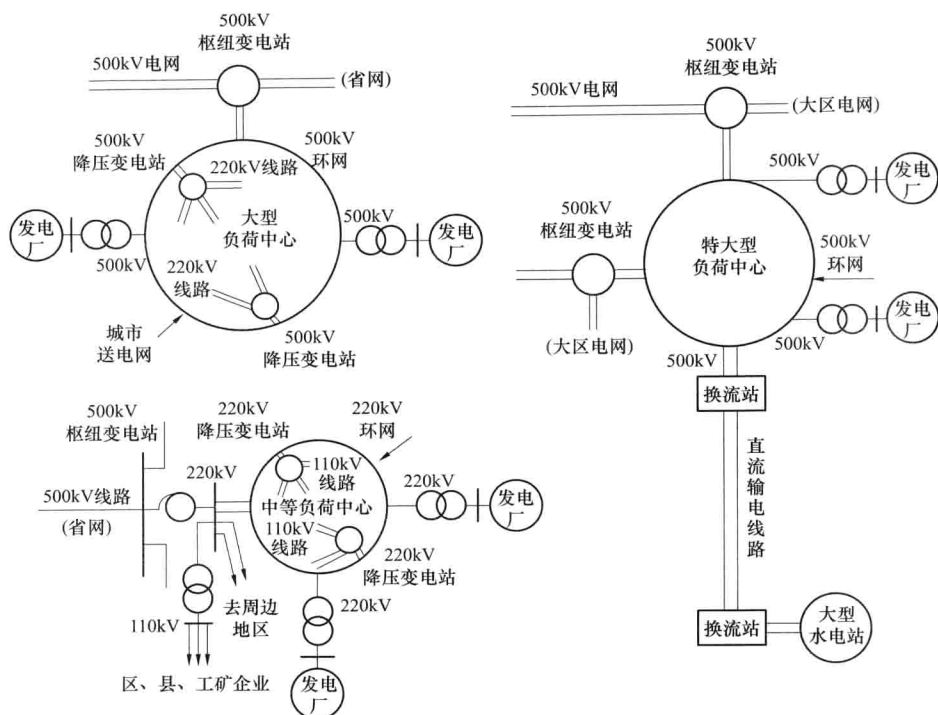


图 1.1.2 负荷中心电网构架图

城市送电网布置在城市的外围，负责将电能送到城市的周围。大型、特大型负荷中心的城市送电网一般采用 500kV 电压等级的电网，直接与主网架联为一体。中等负荷中心的城市送电网一般采用 220kV 电压等级的电网，通过枢纽变电站的降压变压器与主网架联通。

高压配电网作为城市送电网的下一级电网，负责向城市的某一块区域送电，它深入城市中心，将来自城市送电网的电能降压后送往市区的各个区域。

中压配电网则来自高压配电网的电能再次降压后送往上级配电网所覆盖区域内的更小的区域，中压配电网往往还会分成若干个层次，每个层次对应一个电压等级。

低压配电网则来自中压配电网的电能降压至 380V 以后送往居民家里。

各种电压等级的变电站分布在负荷中心各级送、配电网的交汇连接处，它们承担着汇集电源、变换电压、分配电能的职责。变电站与电网的连接线

路有进线和出线之分，进线用于引入电源，出线用于向同级电网转送电能或向下一级电网供电。变电站电压等级的命名通常与最高的进线电压等级一致，如进线电压为 500kV 的变电站就称作 500kV 变电站，进线电压为 10kV 的变电站就称作 10kV 变电站。

负荷中心电网的变电站通常分为枢纽变电站、中间变电站和终端变电站。枢纽变电站一般连接在 500kV 城市送电网上，通过两条以上的 500kV 线路与送电网或邻近的发电厂相连，承担着受电、转送电能和供电的任务，通过降压变压器降压后送出若干条 220kV 的出线向所在区域的若干高压配电网供电。中间变电站广泛连接在 220kV 及以下电压等级的高、中、低压配电网上，它从电源受得电能以后除向下级电网供电外，还向同级电网转送电能。终端变电站通常位于配电网的末端，它从电源受得电能以后只向下级电网或用户供电，不承担向同级电网转送电能的任务。

三、变电站主要电气设备

变电站的主要电气设备有一次设备、测量设备和二次设备。一次设备主要有母线、变压器、断路器、隔离开关、高压电抗器、电容器组等；测量设备主要有电流互感器、电压互感器等；二次设备主要有继电保护装置、安全自动装置、控制装置、综合自动化系统等。一次设备是电力系统交流电路系统的连接部件（如母线、断路器、隔离开关等）、电压变换部件（如变压器）和系统参数调整部件（如高压电抗器、电容器组等），二次设备是对一次设备和电网进行监控、故障测量、保护和控制的设备，测量设备则是连接一、二次设备的桥梁，它将一次设备的大电流、高电压按一定的比例转换成小电流、低电压信号供二次设备测量。

四、常见的变电站母线接线方式

母线是变电站主要的一次设备，变电站汇集和分配电能的任务都是由母线来承担的，它的接线方式与整个电网的结构息息相关，常见的母线接线方式主要有单母接线、单母分段接线、双母接线、双母分段接线、双母带旁母接线和 3/2 断路器接线等，接线方式如图 1.1.3 所示。

单母接线方式如图 1.1.3 (a) 所示，一般用在低压变电站里，它投资小、结构简单、运行维护方便但运行可靠性不高，母线故障时所有进出线都要被断开，母线检修时所有进出线也都要停运。对规模比较大的低压变电站通常采用单母分段的接线方式，如图 1.1.3 (b) 所示，将进线和出线平均分配在

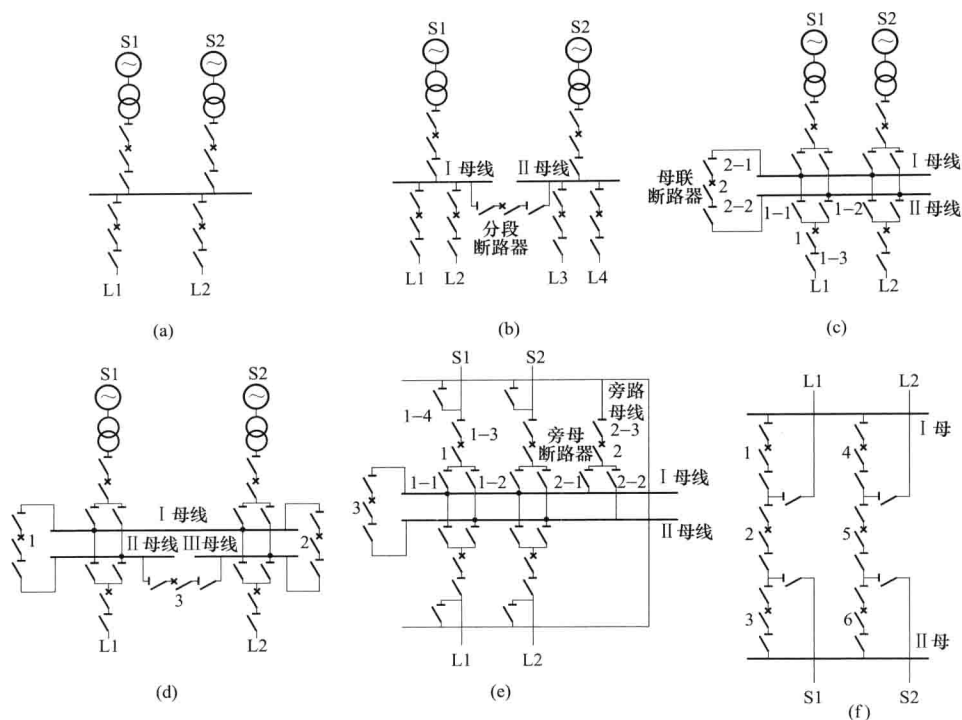


图 1.1.3 常见的变电站母线接线图

(a) 单母接线; (b) 单母分段接线; (c) 双母接线; (d) 双母分段接线;
(e) 双母带旁母接线; (f) 3/2 断路器接线

两段母线上, 分段断路器可以分位运行也可以合位运行, 无论是母线故障还是检修, 都只要停运一半的进出线。

双母接线方式如图 1.1.3 (c) 所示, 通常用在高压变电站和出线规模较大的中压变电站里, 每条进出线的连接方式都可以在两条母线间进行切换, 正常运行时所有进出线一般被平均分接在两条母线上, 两条母线可以分裂运行 (母联断路器处分位) 也可以并列运行 (母联断路器处合位), 当一条母线故障时只有一半进出线被断开, 另一半还可以正常运行, 当一条母线停电检修时, 所有进出线都可以转接到另一条母线上运行, 因此可靠性高于单母和单母分段接线。但由于检修期间所有进出线都连于一条母线上, 运行可靠性明显降低, 因此, 电压等级比较高的 220kV 变电站或规模较大的 110kV 变电站通常采用双母单分段接线方式, 如图 1.1.3 (d) 所示, 正常运行时有一条母线备用, 当某一条工作母线需要检修时, 可将它上面所连接的进出线

转接到备用母线上运行。在进出线回路数较多的 220kV 及以上电压等级的变电站，还经常采用双母双分段接线方式，相当于在图（d）的 I 母上再加一个分段断路器。

无论是单母还是双母接线，当某条进出线支路的开关需要检修时，该支路就要停运，为了在开关检修期间该支路还能正常运行，就必须设置一条旁路母线，接线方式如图 1.1.3（e）所示，当某条支路的开关需要检修时，可先将该支路线倒接到旁母上继续工作。

3/2 断路器接线方式的母线主要用在 330、500、750kV 变电站里，它由两条母线构成，在两条母线之间由 3 个断路器构成一串，每一串可以引出两条支路，由于两条支路需要配置 3 个断路器的缘故，所以该接线方式被称作 3/2 断路器接线方式。正常运行时，两条母线都处于运行状态，任何一条母线故障被切除时，所有支路可以继续正常运行，任何一条母线停电检修时，所有支路都不需要通过隔离开关改变其接线方式，因此，该母线的可靠性非常高。

第二节 电力系统运行过程所涉及的保护与控制问题

一、电力系统的有功平衡及频率控制问题

电力系统是由发电机、用电设备和输变电网络构成的一个分布在广域范围内的复杂的三相交流系统，在该系统中，发电机不断地发出电能，用电设备不断地消费电能，输变电网络则不断地将电能输送到系统的各个角落。由于电能具有即时生产即时消费、不能大量存储的特点，因此，系统内所有发电机发出的电能总和与系统内所有用电设备消耗的电能总和必须时刻保持平衡，否则，整个系统就不能稳定地工作。

交流电网将系统内的所有发电机联系在一起运行，为了使电网频率维持在 50Hz 的额定频率上，要求各发电机必须以同步转速运行。而发电机在正常运行时同时受到两个转矩的作用，一个是来自于汽轮机或水轮机的机械转矩，一个是由发电机输出的有功电流产生的电磁转矩，当机械转矩大于电磁转矩时发电机加速，当机械转矩小于电磁转矩时发电机减速，当两者相等时发电机以恒定速度运行。机械转矩对应发电机输入的机械功率，电磁转矩对应发电机输出的有功功率。发电机输出的有功功率的大小由系统侧的负荷大

小决定，发电机输入的机械功率的大小由电厂侧供给的一次能源的多少决定，为了维持两者的平衡，必须根据负荷的大小自动调整一次能源的供给。

对于整个电力系统来说，它所消耗的有功电能是由系统内所有联网的发电机共同来承担的，为了保证各发电机组能够有序地运转，必须根据系统有功电能的消耗情况实时地给系统内各联网发电机组合理地分配有功功率出力的大小，各发电厂再根据所属各发电机组分得的有功功率出力的大小调整其一次能源的供给，从而保证各发电机输入的机械功率与输出的有功功率保持平衡，使得系统内所有联网发电机输出的有功功率总和与系统消耗的有功功率总和相平衡。

衡量系统内有功功率是否平衡的指标是电网频率，当系统内所有联网发电机的有功功率出力总和大于系统消耗的有功功率总和时，电网频率升高，反之则下降。因此，可以用电网频率作为控制量，实时调整各联网发电机组的有功功率出力。电力系统根据电网频率的波动情况，通过一次调频和二次调频过程，合理调整各发电机组的有功功率出力大小，保持整个系统有功功率的平衡，维持电网频率在 50Hz 额定值。

二、电力系统的无功平衡及电压控制问题

在交流电网中存在着许多含电感的设备，如输电线路本身存在电感、变压器存在电感、电动机等用电设备也存在电感，当这些含电感的设备通以 50Hz 的交流电流时，因为要建立交变磁场就必须周期性地吸收和释放功率，这部分额外的专门用于建立交变磁场的功率就是无功功率。含电感的设备为建立交变磁场所消耗的无功功率的大小与该设备传送的有功功率大小的平方成正比。这部分无功功率既可以由远方的发电机提供，也可以在含电感的设备附近就近补偿。当通过远方的发电机提供无功功率时，这些无功功率所对应的无功电流在沿途的输电线路和变压器上将会产生压降，从而造成负荷端的电压下降，引起电网输电能力的下降。因此，在电力系统中，通常根据电网的分层分区情况，在每个地区就地安装一定容量的无功电源设备，专门为本地区电网中的含电感电气设备提供无功功率，实现本地区无功功率生产和消耗的就地平衡。这就是就地无功补偿的概念，这些提供无功功率的电源设备也称无功补偿设备，常见的无功补偿设备主要有并联电容器组、静止无功补偿器（SVC 或 SVG）、同步调相机等，有时本地区电网上的同步发电机也可用来向本地电网提供一定容量的无功功率。

如果某个地区电网中的含电感电气设备在运行过程中所消耗的无功功率完全由本地区的无功补偿设备提供,就称作本地区无功平衡。衡量一个地区无功功率是否平衡的指标是本地区的电网电压,如果本地区消耗的无功功率总量高于就地无功补偿设备提供的无功功率总量,则本地区电网电压就会降低,反之则升高。因此,可以用本地区电网的电压作为控制量,自动调整无功补偿设备的无功功率出力,以保持无功功率的平衡,使电网电压维持在额定值。

三、电网的输电能力与系统的稳定性控制问题

在电力系统中,有功功率的平衡情况是通过电网频率来反映的,有功功率平衡的变化是全局性的,系统中任何一个角落生产或消耗有功功率的变化,都会引起电网频率的波动。无功功率的平衡情况是通过区域电网电压来反映的,无功功率平衡的变化是局部性的,某个区域无功功率平衡情况的变化只会影响本区域电网电压的变化。

在电力系统的运行过程中,电网承担着电能输送和分配的任务,当电网工作正常时,所有发电机发出的电能都可以畅通无阻地流向电网的各个角落,实现整个系统有功功率的平衡。当电网发生故障时,电能的流动就会遇到瓶颈,此时虽然对整个系统来说,所有联网发电机组输入的一次能源与整个系统所消耗的电能依然保持着平衡,但由于电能的传输受阻,就会引起局部电网电能过剩、局部电网电能不足,于是,电能过剩的区域因发电机输入的机械功率大于输出的电磁功率而引起发电机加速,电能不足的区域因发电机输入的机械功率小于输出的电磁功率而引起发电机减速,这时系统内部的两个区域之间就会发生振荡,于是整个系统就失去了同步稳定性。

为了保证电力系统的稳定运行,必须始终保持电网有功功率输送通道的畅通,当电网发生短路故障时,必须在第一时间将发生故障的电气元件从系统中切除,确保系统中正常的电气元件能够继续工作。如果故障元件切除以后,系统中所有联网发电机的输出功率总和仍能与系统中所有负荷消耗的功率总和保持平衡,电网仍然能够保持有功功率输送通道的畅通,则系统仍能保持安全稳定地运行,否则,系统就要失去同步稳定性,严重时甚至会造成系统频率崩溃或电压崩溃,引起长时间、大面积停电。

为了实现系统中的任何电气元件发生故障时都能在第一时间将其从系统中切除,对系统中的每一个电气元件都必须设计和安装完善的继电保护系统,这些电气元件包括各类输电线路、变压器、母线、电抗器、电容器组等。