



应用型本科规划教材

Automation
of Electrical Power System

电力系统自动化

◆ 杨剑锋 李 红 闵永智 编著



ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS
浙江大学出版社

电力系统自动化

杨剑锋 李 红 闵永智 编著



ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS
浙江大学出版社

内容提要

本书较全面地介绍了电力系统自动化的特点、理论、相关技术及其应用领域。全书从介绍电力系统自动化的特点、内容体系和发展趋势开始,依次介绍了发电机自动并列方法及数字式并列装置,发电机自动励磁控制系统的作用、分类及动态特性,电力系统频率及有功功率的自动调节,电力系统电压调整和无功功率控制技术,最后介绍了电力系统调度自动化的相关内容、变电站和配电网自动化的相关技术,并对电力系统自动化的未来趋势——智能电网加以简介。

本书可作为普通高等学校电气工程、自动化以及能源工程等专业的本科教材,也可作为有关工程技术人员的参考用书及培训教材。

图书在版编目(CIP)数据

电力系统自动化 / 杨剑锋等编著. —杭州:浙江大学出版社, 2018. 4

ISBN 978-7-308-17595-1

I. ①电… II. ①杨… III. ①电力系统自动化—高等学校—教材 IV. ①TM76

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 271417 号

电力系统自动化

杨剑锋 李 红 闵永智 编著

责任编辑 王 波

责任校对 刘 郡

封面设计 刘依群

出版发行 浙江大学出版社

(杭州市天目山路 148 号 邮政编码 310007)

(网址: <http://www.zjupress.com>)

排 版 杭州中大图文设计有限公司

印 刷 杭州杭新印务有限公司

开 本 787mm×1092mm 1/16

印 张 13.5

字 数 328 千

版 印 次 2018 年 4 月第 1 版 2018 年 4 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-308-17595-1

定 价 32.00 元

版权所有 翻印必究 印装差错 负责调换

浙江大学出版社发行中心联系方式:0571-88925591; <http://zjdxcbbs.tmall.com>

前 言

现代社会对电能供应的“安全、可靠、经济、优质”等各项指标的要求越来越高,相应地,电力系统也不断地向自动化提出更高的要求。电力系统自动化是自动化的一种具体形式,指应用各种具有自动检测、决策和控制功能的装置,对电力系统各元件、局部系统或全系统进行就地或远方的自动监视、协调、调节和控制,保证电力系统安全经济运行和具有合格的电能质量。

作为电气工程及其自动化专业的专业课教材,本书内容安排力求使学生对电力系统自动化及其相关问题有一个比较全面的了解。电力系统自动化作为一门综合性技术,内容涉及电力系统运行理论、自动控制理论、电力系统运动技术等诸多方面的知识。希望读者在使用过程中,本着“缺什么补什么”的原则,及时补充其他课程的相关知识。

本书为配合“电力系统自动化”课程(32~48学时)而写,从八个方面对电力系统自动化进行了论述与探讨。第1章概述了电力系统自动化的重要性、任务及其组成,并指出电力系统自动化技术的未来发展趋势;第2章论述了发电机的自动并列方法、原理及数字式并列装置;第3章论述了同步发电机的励磁自动控制系统的作用、分类和动态特性;第4章论述了电力系统调频的几种方法,以及低频减载等有功功率的自动调节等相关内容;第5章论述了电力系统电压调整的几种方法和无功功率控制技术;第6章探讨了电力系统调度自动化的基本理论、远动通信技术及电力系统状态估计;第7章探讨了变电站自动化和配电网自动化的相关内容;第8章概述了智能电网涉及的主要领域及接入电力系统的基本要求。部分章节附有习题,便于学生复习、巩固所学理论知识。

本书由杨剑锋主编,负责编写本书第1、2、4、5章,并校核了全书;李红负责第3、6、7章的编写;闵永智编写第8章,审阅了全书并提出了不少宝贵意见。研究生陈佳兴、江辉、姚华实、石戈戈、周天奇、张建鹏做了部分绘图工作。

由于电力系统自动化技术发展迅速,编者虽曾查阅了大量同类教材和相关文献,并尝试增添部分新的发电厂自动化控制技术,然而,限于手头资料和作者水平,仍未对该课程的内容体系做大的改动,略有遗憾。在此向参考过的以及未能列出的文献资料的作者们表示由衷的感谢,并希望专家和读者对书中的缺点、错误批评指正。

编 者

2017年8月

目 录

第 1 章 绪 论	1
1.1 电力系统自动化的重要性及其发展历程	1
1.2 电力系统自动化的内容	3
1.3 电力系统自动化的发展趋势与展望	5
第 2 章 同步发电机的自动并列	8
2.1 概 述	8
2.2 准同期并列条件分析及整定.....	11
2.3 准同期并列的基本原理.....	18
2.4 自动并列装置的工作原理.....	24
2.5 数字式并列装置.....	32
习 题	38
第 3 章 同步发电机的励磁自动控制系统	40
3.1 励磁控制系统的任务和要求.....	40
3.2 励磁系统的分类与原理.....	47
3.3 励磁系统中转子磁场的建立和灭磁.....	52
3.4 励磁控制系统调节特性和并联机组间的无功分配.....	56
3.5 励磁系统稳定器.....	72
3.6 励磁自动控制系统对电力系统稳定的影响.....	78
习 题	85
第 4 章 电力系统频率及有功功率的自动调节	87
4.1 电力系统的频率特性.....	87
4.2 调频与调频方程式.....	96
4.3 电力系统的经济调度与自动调频	104
4.4 电力系统低频减载	111
习 题.....	119

第 5 章 电力系统电压和无功功率控制技术	121
5.1 电压控制的意义	121
5.2 无功功率平衡与系统电压的关系	122
5.3 电压管理及电压控制措施	130
5.4 电力系统电压和无功的综合控制	141
5.5 无功功率电源的最优控制	144
习 题.....	146
第 6 章 电力系统调度自动化	147
6.1 调度的主要任务及结构体系	147
6.2 调度自动化系统的功能组成	151
6.3 调度自动化信息的传输	154
6.4 电力系统状态估计	160
6.5 电力系统安全分析与安全控制	168
6.6 调度自动化系统的性能指标	173
习 题.....	175
第 7 章 变电站和配电网自动化	177
7.1 变电站综合自动化	177
7.2 配电网及其馈线自动化	185
7.3 远程自动抄表计费系统	193
7.4 负荷控制技术	196
7.5 配电网综合自动化	199
习 题.....	203
第 8 章 智能电网简介	204
8.1 智能电网与电力系统自动化	204
8.2 新能源接入智能电网的要求	207
参考文献	209

第1章 绪论

电力系统是指由进行电能生产、变换、输送、分配和消费的各种设备,按照一定的技术和经济要求组成的有机统一整体。如图 1-1 所示的典型电力系统由发电、输电、变电、配电及用电五大部分构成。为了确保电力系统安全、优质、稳定、经济地运行,必须提高其自动化水平。电力自动化系统除包括继电保护与自动装置外,电力通信、调度自动化及自动调控设备等二次系统的种种装备都是必备的。

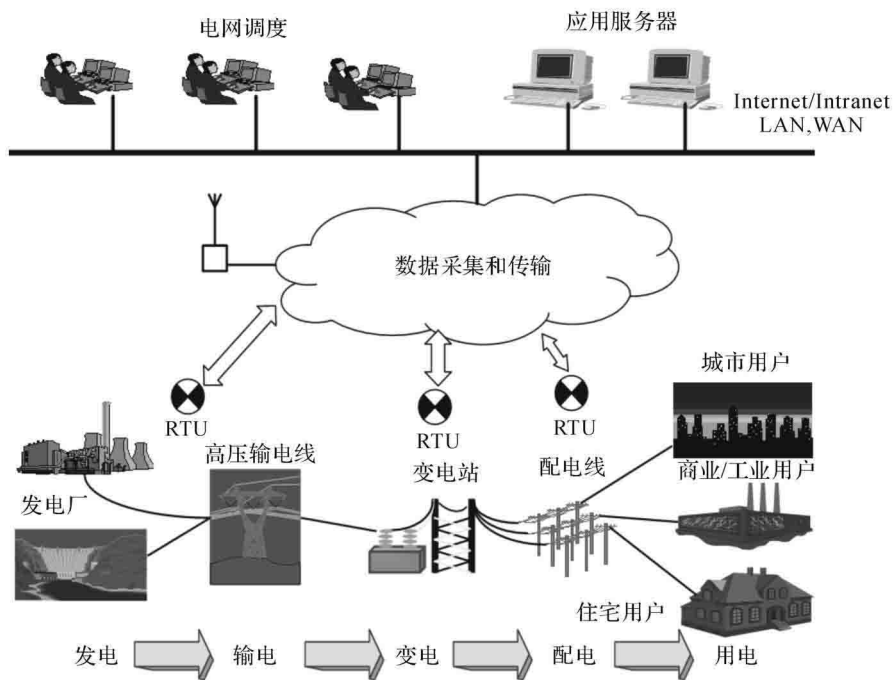


图 1-1 典型电力系统示意图

1.1 电力系统自动化的重要性及其发展历程

1.1.1 电力系统自动化的重要性

电力系统自动化是自动化的一种具体形式,它是指应用各种具有自动检测、决策和控制

功能的装置并通过信号系统和数据传输系统,对电力系统各元件、局部系统或全系统进行就地或远程的自动监视、协调、调节和控制,以保证电力系统安全、优质、稳定、经济地运行。

电力系统是个庞大和复杂的系统,控制与管理一个现代大型电力系统,使之安全、优质、稳定和经济地运行,将是十分困难的。

首先,被控对象复杂而庞大。电力系统各类设备众多,有成千上万台发电、输电、配电设备;被控制的设备分散,分布在辽阔的地理区域之内,纵横跨越一个或几个省;被控制的设备间联系紧密,通过不同电压等级的电力线路连接成网状系统。由于整个电力系统在电磁上是互相耦合和连接的,所以在电力系统中任何一点发生的故障,都有可能在瞬间影响和波及全系统,甚至引起连锁反应,导致事故扩大,严重时甚至会使系统发生大面积停电事故。因此,在电力系统中要求进行快速控制,而对这种结构如此复杂而又十分庞大的被控对象进行快速控制,是十分困难的。

其次,控制参数很多。这些参数包括电力系统频率、节点电压和为保证电力系统经济运行的各种参数。为了保证电能质量,要求在任何时刻都应保证电力系统中电源发出的总功率等于该时刻用电设备在其额定电压和额定频率下所消耗的总功率。而在电力系统中,很多用户的用电需求却是随机的,需要用电时就合闸用电,而且用电量往往是变化的;不需要用电时就拉闸断电。这就需要控制电力系统内成百上千台发电机组和无功补偿设备发出的有功和无功功率等于随时都在变化着的用电设备所消耗的有功和无功功率。显然,监视和控制成千上万个运行参数也是一项十分困难的任务。

最后,干扰严重。从自动控制角度而言,电力系统故障是电力系统自动控制系统的一类扰动信号。电力系统故障的发生是随机的,而且故障的发生和切除是同时存在的,也就是说,扰动的同时伴随着被控制对象结构的变化。这就增加了控制的复杂性。电力系统故障有时会使电力系统失去稳定,造成灾难性后果。因此,如何控制才能提高电力系统的抗干扰能力,使系统发生故障时不致失去稳定,在失去稳定后又如何控制才能使系统恢复稳定,已成为当前电力系统控制研究的重大课题之一。

上述分析说明,为保证电力系统安全、优质、稳定、经济地运行,单靠发电厂、变电站和调度中心运行值班人员进行人工监视和操作是根本无法实现的,必须依靠自动装置和设备才能实现。实际上,电力系统规模的不断扩大与电力系统采用自动监控技术、远动技术是密不可分的。可以毫不夸张地说,电力系统自动化是电力系统安全、优质、稳定、经济地运行的保证之一。没有电力系统自动化,现代电力系统是无法正常运行的。

1.1.2 电力系统自动化的发展历程

1. 单一功能自动化阶段

在电力工业发展初期,发电厂都建在用户附近,电厂规模很小,电力系统也是简单而孤立的。运行人员在发电机、开关设备等电力元件的附近直接监视设备状态并进行手工操作,例如人工操作开关、调节发电机的出力和电压等。这种工作方式的效果与运行人员的素质和精神状态有关,往往不能及时而正确地进行调节和控制。特别是在发生事故时,往往来不及对事故的发生和发展做出反应而使事故扩大。

随着工农业生产和人民生活用电的增长,电力系统内的发电设备及其出力不断增加,供电范围也不断扩大。在这种情况下,在设备现场人工就地监视和操作就不能满足电力系统

运行的需要了。为了保证电力系统安全运行和向用户供应合格电能,出现了单一功能的自动装置。这些装置有故障自动切除装置(即继电保护装置,自动切除出现故障的发电机、变压器和输电线路等设备)、自动操作和调节装置(如断路器自动操作、发电机自动调压和自动调速装置等)和远距离信息自动传输装置(即远动装置)。

电力系统单一功能自动化阶段的特点是:①电力系统继电保护、电力系统远动和电力系统自动化三者各自自成体系,分别完成各自的功能;②对单个电力设备和单一过程用分立的自动装置来完成自动化的某项单一功能;③电力系统中各发电厂和变电站之间的自动装置没有什么联系;④电力系统的统一运行主要靠电力系统调度中心的调度员根据遥信、遥测传来的信息,加上自己的知识和经验通过电话或遥控和遥调来指挥。

2. 综合自动化阶段

随着电力系统装机容量和供电地域的不断扩大,电力系统的结构和运行方式越来越复杂而多变,同时对电能质量、供电可靠性和运行经济性的要求也越来越高。在这种情况下,原有的技术装备已经不能使调度人员在很短的时间里掌握复杂多变的电力系统运行状态,并做出及时而正确的决策。远动和通信技术的发展使得电力系统的实时信息可以直接进入调度中心供调度人员直接掌握系统的运行状态,帮助他们及时地对电力系统运行实时调度指挥,并及时发现和处理事故。但是,在复杂的情况下,当大量信息出现在调度人员面前时,常使得调度人员不知所措,以致延误事故处理,甚至做出错误的决定,导致事故扩大。无人值班发电厂和变电站的增加也加重了调度中心的任务。电力系统的发展向电力系统调度提出了更高的要求。20世纪60年代人们开始研究电力系统自动监视和控制问题。

大容量、高速度的大型计算机和微型计算机及其网络系统在电力系统中的应用,充分显示了计算机存储信息量大、综合能力强、决策迅速等优点。日益提高的计算机性能价格比为计算机在电力系统自动化方面的普及应用创造了条件,也为电力系统综合自动化提供了物质保证。现在,世界上已出现了把电力系统实时运行的能量管理系统(energy management system, EMS)和配电网调度控制中使用的调度自动化系统(dispatch automation system, DAS),以及在电力工业各有关部门中用于管理和规划的管理信息系统结合起来的综合自动化系统,把不同层次的电力系统调度自动化功能和日常生产的计划管理功能在信息共享和功能互补上很好地结合了起来,使电力系统运行的安全性、经济性提高到了一个新的水平。

综合自动化的特点是用一套自动化系统或装置来完成以往用两套或多套分立的自动化系统或装置所完成的工作。由于综合自动化不仅可以充分利用计算机监控系统的软、硬件设备资源,而且可以实现分立装置所不能实现的功能,达到分立装置所不能达到的技术性能,所以随着科学技术的进步,尤其是现代控制理论和计算机数字监控技术在电力系统自动化中的广泛应用,电力系统中出现了不少称为“综合自动化”的系统,如发电机组综合自动控制、变电站综合自动化系统等。

1.2 电力系统自动化的内容

电力系统自动化一般有两方面的内容:一是电力系统运营自动化系统;二是电力系统自动装置。

1.2.1 发电厂自动化

发电厂自动化系统主要包括动力机械自动控制系统、自动发电控制(automatic generation control, AGC)系统和自动电压控制(automatic voltage control, AVC)系统。火电厂需要控制锅炉、汽轮机等热力设备,大容量火力发电机组自动控制系统主要有计算机监视和数据系统、机炉协调主控系统和锅炉自动控制系统。水电厂需要控制的则是水轮机、调速器以及水轮发电机励磁控制系统等。一般而言,水电厂的自动化程度比火电厂要高。

1.2.2 变电站综合自动化

变电站的自动控制系统是在原来常规变电二次系统的基础上发展起来的。随着微机监控技术在电力系统和发电厂自动化系统中的不断发展,微机监控监测技术也开始引入变电站,目前已实现了变电站的远方监视控制,远动和继电保护已实现了微机化。目前,各地正大力开展无人值班变电站设计改造工作。无人值班变电站将会把变电站综合自动化程度推向一个更高的阶段,其功能包括变电站的远动、继电保护、远方开关操作、测量及故障、事故顺序记录和运行参数自动打印等功能。

1.2.3 配电自动化

配电是电力系统直接面向用户的功能,是电力系统的重要组成部分。配电网是电力生产和供应中的最后一个环节,与千家万户直接密切联系。它是由配电变电所、柱上变压器、配电线路、各种断路器、开关以及各种保护装置和无功补偿装置所组成。配电系统最大的特点是供电设备分散,与用户直接相关。接线方式虽然大多数为干线式,但可以分段串联,运行方式变换灵活。它的主要任务如下:

- (1) 保证配电网重要用户的供电,控制负荷,使供电、用电平衡,提高负荷的利用率。
- (2) 随时掌握配电网的运行状态,及时调整配电网设备的运行,使有功功率分布合理。
- (3) 及时调整无功功率补偿设备的运行,保证负荷供电电压的质量。
- (4) 降低配电线路的功率损耗,提高配电网运行的经济性。
- (5) 发生事故时,迅速获取信息,及时处理事故,保证用户的供电并尽量缩短对用户的停电时间。

我国配电自动化采用三种基本功能模式:就地控制的馈线自动化,集中监控模式的配电自动化,以及集中监控模式的配电自动化与配电管理相结合的模式。

1.2.4 电力系统调度自动化

电力系统调度的任务可概括为:控制整个电力系统的运行方式,使电力系统在正常状态下能满足安全、优质和经济地向用户供电的要求;在缺电状态下做好负荷管理;在事故状态下迅速消除故障的影响和恢复正常供电。电力系统调度自动化的任务是综合利用电子计算机、远动和远程通信技术,实现电力系统调度管理自动化,有效地帮助电力系统调度人员完成调度任务。

20世纪60年代以来国际上出现了多起大面积停电事故。北美1965年以来电力系统主要的重大停电事故有:①1965年11月9日美国东北部大停电事故;②1977年7月13日

的美国纽约大停电事故；③1982年12月22日西部沿海大停电事故；④1996年7月2—3日西部沿海大停电事故；⑤1996年8月10日西部沿海大停电事故；⑥1998年6月25日安大略湖地区和美国中北部地区大停电事故；⑦1999年夏天美国东北部停电及电网扰动事件；⑧2003年8月14日北美大停电事故。

上述事故相同或相似因素主要有：①线路对树枝闪络；②错估了发电机的动态无功出力；③运行人员无法了解全网信息；④无法确定系统是否安全运行；⑤缺乏系统保护装置的协调；⑥低效率的通信和沟通；⑦缺乏“安全网络”；⑧运行人员的培训不充分。

因此，电力系统调度自动化系统的功能逐渐从以经济调度为主转向以安全控制为主。同时，随着计算机软、硬件能力的增强，开发了功能更强的应用软件包，如状态估计、在线潮流计算、安全分析、事故模拟等，使调度自动化系统由初期的安全监视功能上升到了能实现安全分析和辅助决策功能。

1.2.5 电力系统自动装置

发电厂、变电所电气主接线设备运行的控制与操作的自动装置，是直接为电力系统安全、经济运行和保证电能质量服务的基础自动化设备。

电气设备的操作分为正常操作和反事故操作两种类型。例如按运行计划将发电机并网运行的操作称为正常操作。电网突然发生事故，为防止事故扩大的紧急操作称为反事故操作。防止电力系统的系统性事故采取相应对策的自动操作装置称为电力系统安全自动控制装置。电气设备操作的自动化是电力系统自动化的基础。

电力系统自动装置一般指的是常规自动装置，主要包括：备用电源和备用设备自动投入装置，自动重合闸装置，同步发电机强行励磁和自动调节励磁装置，自动按频率减负荷装置，同步发电机自动并列装置，水轮发电机低频自启动、自动解列、自动调频装置。

以上这些自动装置，对保证电力系统的安全运行、防止事故扩大、提高供电可靠性具有重要作用。

1.2.6 电力系统安全装置

发电厂、变电所等电力系统运行操作的安全装置，是为了保障电力系统运行人员的人身安全的监护装置。由于电力操作是一项具有一定危险性的工作，每年都有许多惨痛的教训，因此安全装置成为人们长期力图攻克的目标，其功能是保障操作人员的人身和生命安全。这类自动装置还在发展中，本教材不再展开讨论。

1.3 电力系统自动化的发展趋势与展望

1.3.1 电力系统自动化的发展趋势

现代社会对电能供应的“安全、可靠、经济、优质”等各项指标的要求越来越高，相应地，电力系统也不断地向自动化提出更高的要求。电力系统自动化技术不断地由低到高、由局部到整体发展。当今电力系统的自动控制技术正趋向于：

- (1)在控制策略上日益向最优化、智能化、协调化、区域化发展。
- (2)在设计分析上日益要求面对多机系统模型来处理问题。
- (3)在理论工具上越来越多地借助于现代控制理论。
- (4)在控制手段上日益增多了微机、电力电子器件和远程通信的应用。
- (5)在研究人员的构成上日益需要多学科联合攻关、交叉研究。

整个电力系统自动化的发展则趋向于：

- (1)由开环监测向闭环控制发展,例如从系统功率总加到 AGC(自动发电控制)。
- (2)由高压等级向低电压扩展,例如从能量管理系统到配电管理系统(distribution management system, DMS)。
- (3)由单个元件向部分区域及全系统发展,例如监控与数据采集系统(supervisory control and data acquisition, SCADA)的发展和区域稳定控制的发展。
- (4)由单一功能向多功能、一体化发展,例如变电站综合自动化的发展。
- (5)装置性能向数字化、快速化、灵活化发展,例如继电保护技术的演变。
- (6)追求的目标向最优化、协调化、智能化发展,例如励磁控制、潮流控制。

近 30 年来,随着计算机技术、通信技术、控制技术的发展,现代电力系统已成为一个计算机(computer)、控制(control)、通信(communication)和电力装备及电力电子(power system equipment and power electronics)的统一体,简称为“CCCP”。其内涵不断深入,外延不断扩展。电力系统自动化处理的信息量越来越大,考虑的因素越来越多,直接可观可测的范围越来越广,能够闭环控制的对象越来越丰富。

1.3.2 具有变革性重要影响的技术

在电力系统的工程实际中,如果能靠二次设备解决问题,则往往比靠增加或改善一次设备更快、更省。专家预言,21 世纪初电力系统主要元件如发电机、变压器等将无大的改观,而电力系统控制技术将有突飞猛进的发展。

下面对未来电力系统自动化领域中具有变革性重要影响的两项新技术进行介绍。

1. 电力系统的智能控制

电力系统的控制研究与应用在过去的 50 多年中大体上可分为三个阶段:基于传递函数模型的单输入、单输出控制阶段;基于状态空间模型的线性最优控制、非线性控制及多机系统协调控制阶段;基于专家系统、神经网络、模糊模型等的智能控制阶段。电力系统控制面临的主要技术困难有:

- (1)电力系统是一个具有强非线性的、变参数(包含多种随机和不确定因素的、多种运行方式和故障方式并存)的动态大系统。
- (2)具有多目标寻优和在多种运行方式及故障方式下的鲁棒性要求。
- (3)不仅需要本地不同控制器间协调,也需要异地不同控制器间协调控制。

智能控制是当今控制理论发展的新的阶段,主要用来解决那些用传统方法难以解决的复杂系统的控制问题,特别适于那些具有模型不确定性、强非线性,要求高度适应性和鲁棒性的复杂系统。

智能控制的主要设计手段包括专家系统、人工神经网络、模糊集、自学习控制等,其在电力系统工程应用方面具有非常广阔的前景。

2. 柔性交流输电系统

所谓“柔性交流输电系统”技术,又称“灵活交流输电系统”(flexible alternating current transmission system, FACTS)技术,就是在输电系统的重要部位,采用具有单独或综合功能的电力电子装置,对输电系统的主要参数(如电压、相位差、电抗等)进行调整控制,使输电更加可靠,具有更大的可控性和更高的效率。这是一种将电力电子技术、微机处理技术、控制技术等综合应用于输电系统,以提高系统可靠性、可控性、运行性能和电能质量,并可获取大量节电效益的新型综合技术,世界各国电力部门对这项具有革命性变革作用的新技术都十分重视。它可以概括为输电系统建设(充分利用现有线路、减少输电走廊占地、节省输电网建设投资)和运行(安全性、经济性、灵活性)的需要,克服直流输电存在网络结构方面(不便于中间落点等问题)严重缺陷的需要,电力电子技术和元器件的发展支持,已有 FACTS 技术产品的研制和运行经验的积累四个方面。其中前两个是发展 FACTS 的需求动力,后两个是支撑条件。

随着高科技产业和信息化的发展,电力用户对供电质量和可靠性越来越敏感,甚至电器设备的正常运行使用寿命也与之越来越息息相关。可以说,信息时代对电能质量提出了越来越高的要求。

DFACTS 是指应用于配电系统中的灵活交流输电技术,是 Hingorani 于 1988 年针对配电网中供电质量提出的。其主要内容是:对供电质量的各种问题采用综合的解决办法,在配电网和大量商业用户的供电端使用新型电力电子控制器。

DFACTS 在电力系统中的一个应用范例是清华大学与澳门大学的学者合作于 1997 年提出的综合电能质量控制器(DS-Unicon)的概念,即快速补偿供电电压中的突降或突升、波动和闪变、谐波电流和电压、各相电压的不平衡以及故障时的短期电压中断。在这种装置中,主要有两个重要部分:并联交流单元和蓄电池单元。其具有一定的调峰能力,利用蓄电池的储能和释能,对用电负荷进行短期的电能调节。

1.3.3 电力系统自动化的展望

电力系统自动化的深度和广度都会在 21 世纪有更加飞速的发展。电力系统智能控制将迅速由研究走向实用,利用计算机技术实时地进行自学习,以帮助运行人员快速正确地做出决策。近年来,专家系统和神经网络算法已在一些电力公司得到应用,多种不同方法的混合使用也是正在进行的研究课题之一。由于我国电网的特点,FACTS 和 DFACTS 技术将在我国有异乎寻常的需求和发展。

随着计算机技术、控制技术及信息技术的发展,电力系统自动化面临着空前的变革。多媒体技术、智能控制将迅速进入电力系统自动化领域,而智能电网概念的提出,不仅对电力系统监测和自动化提出了更高的要求,也将推动电力系统自动化向更高水平发展。

第 2 章 同步发电机的自动并列

电力系统中的负荷是随机变化的,为了保证电能质量,满足安全、经济运行的要求,需经常将发电机投入和退出运行。把一台待投入系统的空载发电机经过必要的调节,在满足并列运行的条件下经断路器操作与系统并列运行,这样的操作过程称为并列操作。

由于电网运行的需要,同步发电机经常进行并列操作。在电力系统运行中,并列操作是较为频繁的。随着电力系统容量的不断增大,同步发电机的单机容量也越来越大,不恰当的并列操作将导致严重后果。因此研究和分析同步发电机并列操作的规律,提高其自动化水平,对于系统的可靠运行具有很大的现实意义。

2.1 概 述

2.1.1 电力系统并列操作的作用

并列运行的同步发电机,其转子以相同的电角速度旋转,每个发电机转子的相对电角速度都在允许的极限值以内,称之为同步运行。一般来说,发电机在没有并入电力系统前,与系统中的其他发电机是不同步的。

随着负荷的变动,电力系统中发电机运行的台数也经常改变。因此,同步发电机的并列操作是电厂的一项重要操作。另外,当系统发生某些事故时,也常要求将备用发电机组迅速投入电网运行。在某些情况下,还要求将已解列为两部分运行的系统进行联合运行,同样也必须满足并列运行条件才能进行断路器操作。这种操作也是并列操作,其并列操作的基本原理与发电机并列相同,但调节比较复杂,且实现的具体方式有一定的差别。图 2-1(a)表示发电机 G 通过断路器 QF 与系统进行并列操作,图 2-1(b)表示系统的两个部分 S1 和 S2 通过断路器 QF3 实现并列操作。

在发电机并列瞬间,往往伴随有冲击电流和冲击功率,这些冲击将使系统电压瞬间下降。如果并列操作不当,冲击电流过大,还可能引起机组大轴发生机械损伤,或者引起机组绕组电气损伤。

为了避免因并列操作不当而影响电力系统的安全运行,同步发电机组并列时应遵循如下原则:①并列断路器合闸时,冲击电流应尽可能小,其瞬时最大值一般不超过 1~2 倍的额定电流。②发电机组并入电网后,应能迅速进入同步运行状态,其暂态过程要短,以减小对电力系统的扰动。

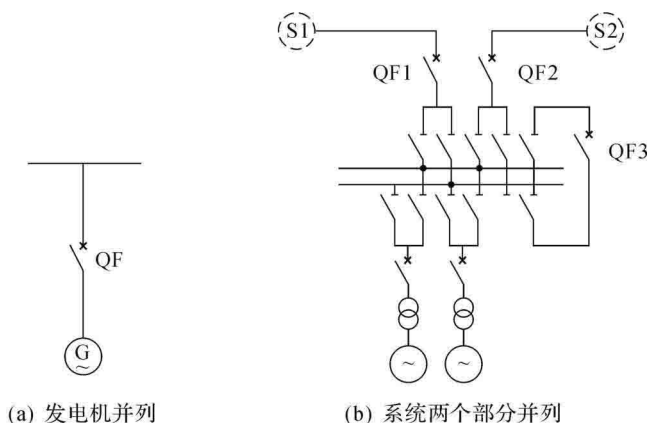


图 2-1 电力系统并列操作的基本方式

2.1.2 电厂的同步点

在发电厂内,凡可以进行并列操作的断路器,都称之为电厂的同步点。通常发电机的出口断路器都是同步点,发电机-变压器组用高压侧断路器作为同步点,双绕组变压器用低压侧断路器作为同步点。母线联络断路器也是同步点,它对于同一母线上的所有发电单元都是后备同步点。三绕组变压器的三侧都有同步点,这是为了减少并列运行时可能出现的母线倒闸操作,保证迅速可靠地恢复供电。110kV 以上线路,当设有旁路母线时,在线路主断路器因故退出工作的情况下,也可以利用旁路母线断路器进行并列操作,而母线分段断路器一般不作为同步点,因为低压侧母线解列时,高压侧是连接的,没有设同步点的必要。图2-2所示的发电厂主接线图中,凡带“*”的断路器均为同步点。

同步点的设置要考虑系统、发电厂、变电站在各种运行方式下操作的灵活方便,也应具体考虑并列操作过程中调节的可行性。

2.1.3 同步发电机并列操作的方法

在电力系统中,并列操作的方法主要有准同期并列和自同期并列两种。

1. 准同期并列

先给待并发电机加励磁,使发电机建立起电压,调整发电机的电压和频率,在接近同步条件时,合上并列断路器,将发电机并入电力系统。若整个过程是人工完成的,称手动准同期并列;若是自动进行的,称自动准同期并列。

准同期并列的优点:并列时产生的冲击电流较小,不会使系统电压降低,并列后容易拉入同步,因而在系统中被广泛使用。

准同期并列的缺点:

(1)并列操作时间较长。这是因为电压和频率的调整,相位相同瞬间的捕捉较麻烦。在系统事故情况下,系统频率和电压急剧变化,同期困难更大。

(2)操作要求高,可能产生非同期并列情况。如果操作人员技术不够熟练,掌握的合闸时间不够准确,则有可能造成非同期并列情况。

(3)操作系统复杂,要求严格。要求同期的二次接线必须准确无误,同期装置或仪表必

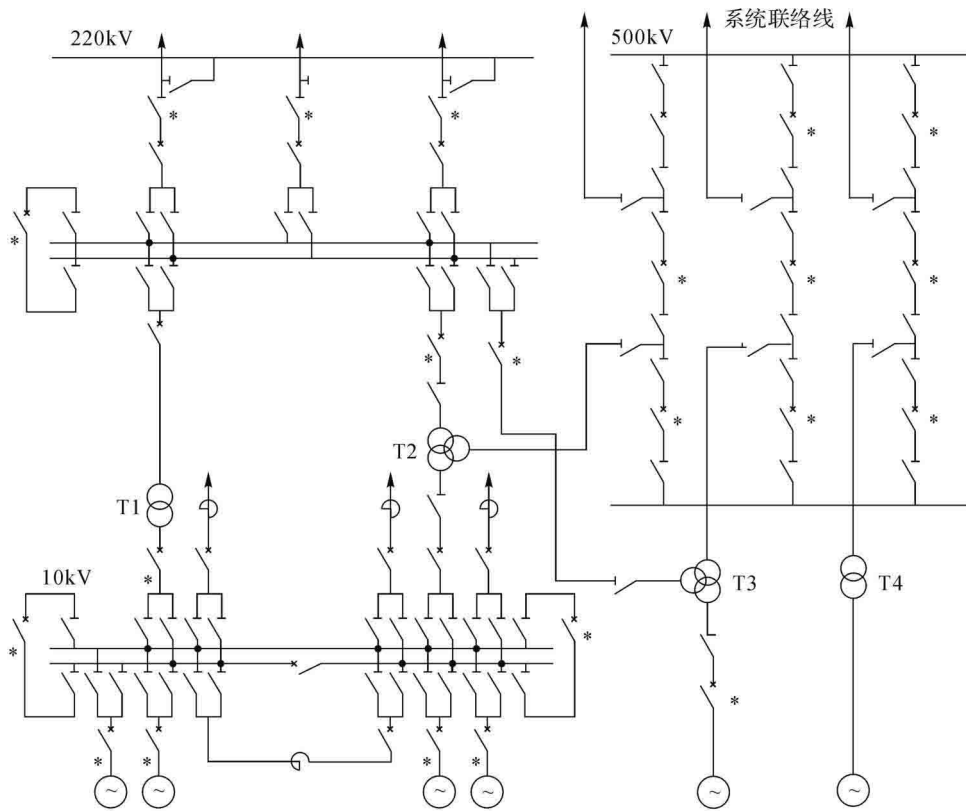


图 2-2 发电厂主接线图

须满足运行的要求。

2. 自同期并列

自同期并列操作是待并发电机并列时,转子先不加励磁,调整待并发电机的转速,当转速接近同步转速时,首先合上发电机断路器,并立即(或经一定的时间)合上励磁开关,给转子加励磁电流,在发电机电势逐渐增长的过程中由系统将发电机拉入同步运行。

自同期并列的优点:

由于待并发电机在投入系统时未励磁,故这种方式从根本上消除非同期并列的可能性。同时,并列操作简单,不存在调节和校正电压、相角的问题,只需调节发电机的转速。此外,自同期并列方式还可大大缩短并列所需的时间。自同期并列方式的这些优点,为电力系统发生事故而出现低频率、低电压时启动备用机组创造了条件,对于防止系统瓦解和事故扩大,以及较快地恢复系统正常工作,发挥着重要的作用。

自同期并列的缺点:

采用自同期并列方式投入发电机时,由于未加励磁,发电机相当于异步发电机,因此将伴随着短时间的电流冲击,发电机将从电网中吸收大量的无功功率,并使系统电压下降。冲击电流会引起电动力,可能对定子绕组绝缘和定子绕组端部产生不良影响;冲击电磁力矩也将使发电机组大轴产生扭矩,并引起振动。

由于同期并列操作是经常进行的,为了避免由于多次使用自同期产生的累积效应而造

成发电机绝缘缺陷,应对自同期使用做一定的限制。因此,GB/T14285—2006《继电保护和自动装置技术规程》规定:“在正常运行情况下,同步发电机的并列应采用准同期方式;在故障情况下,水轮发电机可以采用自同期方式。”

另外必须指出,发电机母线电压瞬时下降对其他用电设备的正常工作将产生影响,为此也需受到限制,所以自同期并列方式现已很少采用。本章只对准同期并列方式加以介绍,不再讨论自同期并列方式。

2.1.4 机组型同期和线路型同期

图 2-1(a)中发电机通过断路器 QF 与系统实现准同期并列,同期对象是发电机,属机组型同期。在机组型同期中,作为自动准同期装置,当频差超出设置的频差时,装置应发出增速或减速脉冲,使发电机频率尽快跟踪系统频率,使频率差尽快进入设置频率范围内;当频率过小时,自动准同期装置自动发出增速脉冲,打破这种近似同频不同相的局面,缩短同期并列的时间。当压差超出设置压差范围时,装置应发出升压或降压脉冲,使发电机电压尽快跟踪系统电压,使压差尽快进入设置压差范围内。若压差、频差均在设置范围内,则装置自动发出合闸脉冲命令,在相角差为零时刻并列断路器主触头正好闭合,完成自动准同期并列。

图 2-1(b)表示系统的两个部分,发电厂与系统或两个系统间一般通过线路联系,所以这种情况下的同期称线路型同期。在线路型同期中,自动准同期装置不发出增速或减速、升压或降压脉冲,只能等待频差、压差满足要求,在满足要求情况下实现自动准同期并列。因此,线路型同期实质上是等待同期,处于被动状态,满足同期条件就在相角差为零时刻实现两系统间并列,不满足频差、压差条件则只能处于等待状态。等待同期也称“捕捉同期”。机组型同期时是不会出现等待同期状态的。

2.2 准同期并列条件分析及整定

2.2.1 准同期并列的条件

电力系统运行中,任一母线电压瞬时值可表示为

$$u(t) = U_m \sin(\omega t + \varphi) \quad (2-1)$$

式中: U_m 为电压幅值, ω 为电压角频率, φ 为电压初相角。

式(2-1)反映了电网运行中该母线电压的幅值、频率和相角。这三个重要参数常被指定为运行母线电压的状态量。电网电压也常用相量 \dot{U} 来表示。

如图 2-3(a)所示,设待并发电机组 G 已经加上了励磁电流,其端电压为 \dot{U}_G ,QF 为并列断路器,QF 的另一侧为电网电压 \dot{U}_x 。并列断路器合闸前,QF 两侧电压状态量 u_G 与 u_x 一般不相等,需要对待并发电机组进行适当的调整,使它符合并列条件,然后才能发出 QF 的合闸信号。

由于 QF 两侧电压的状态量不等,QF 主触头间具有电压差 \dot{U}_s ,其值可由图 2-3(b)所示