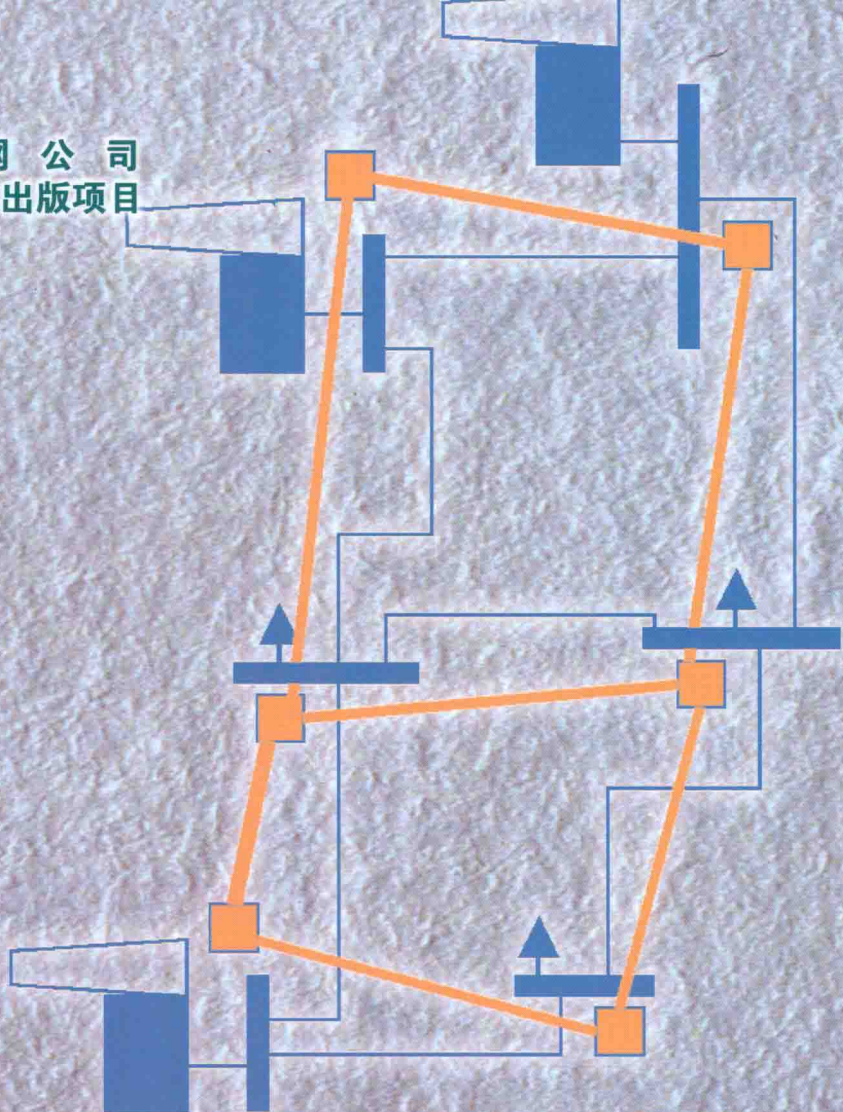




国家电网公司
电力科技著作出版项目



顾欣欣 姜宁 季侃 李惠宇 等 编著

配电网自愈 控制技术



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



国家电网公司
电力科技著作出版项目

配电网自愈控制技术

顾欣欣 姜 宁 季 侃 李惠宇
仇新宏 李卫良 季学军 陈兴松 编著
杜红卫 沈兵兵 许和平



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

“智能电网”具有可靠、优质、高效、兼容、互动等特点，是现代电网的发展方向，因此受到电力行业的高度关注。自愈能力是保证电网可靠、优质供电的关键，是智能电网技术研究的重点。

本书从自愈控制理论，配电网自愈控制系统，保护、控制、监测终端与自愈控制系统一体化，系统高级应用软件，智能调度等方面研究了配电网自愈技术，并结合示范工程给出了实例。

本书可供电力系统相关专业的研究人员、规划设计人员和试验人员作为参考。

图书在版编目（CIP）数据

配电网自愈控制技术/顾欣欣等编著. —北京：中国电力出版社，2012.7

ISBN 978-7-5123-3304-8

I. ①配… II. ①顾… III. ①配 电 系 统 — 控 制
IV. ①TM727

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2012）第 162705 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>）

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2012 年 12 月第一版 2012 年 12 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 10 印张 174 千字

印数 0001—3000 册 定价 35.00 元

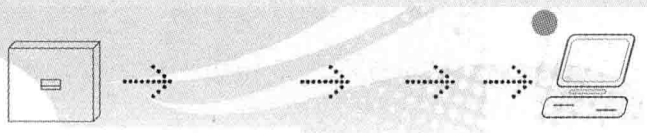
敬 告 读 者

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

序



我国目前拥有世界上最大的能源网络和用能终端，未来 20 年内城镇化、工业化仍将处于高速发展时期。需求推动了我国智能电网发展，也推动了我国构建能源调峰、新型储能体系、推进资源循环利用、发展用能终端智能管理和实现智能网服务等新型能效发展模式。

能源和环境问题是本世纪最具挑战性的问题之一，为了应对这一挑战，开发和利用可再生资源成为世界各国的共同选择。在这种大背景下，电力行业也意识到仅靠传统、常规的电力技术和手段，难以解决越来越多的新能源接入的问题。我国电力发展面临新的挑战，电力发展与资源、生态环境的矛盾日益突出。为落实我国政府 2020 年非化石能源在一次能源消费中比重达到 15% 左右和单位二氧化碳排放量比 2005 年减少 40%~45% 的承诺，需要大力发展水电、风电、太阳能等绿色能源。只有通过建设坚强智能电网，才能有效解决风能、太阳能等可再生能源的大规模开发问题，保证可再生能源发电的大规模接入、远距离输送和消纳，实现能源资源在全国范围的统一高效配置。

国家科技部近期公布的智能电网重大科技产业化工程

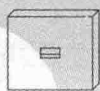
“十二五”专项规划，明确提出了“十二五”期间智能电网发展的总体目标为，突破大规模间歇式新能源电源并网与储能、智能配用电、大电网智能调度与控制、智能装备等智能电网核心关键技术，形成具有自主知识产权的智能电网技术体系和标准体系，建立较为完善的智能电网产业链，基本建成以信息化、自动化、互动化为特征的智能电网，推动我国电网从传统电网向高效、经济、清洁、互动的现代电网的升级和跨越。“十二五”期间，国家电网公司将建设覆盖主要能源基地和负荷中心的“三纵三横”特高压骨干网架。同时，推进电力系统各个环节的智能化进程，构建覆盖我国大部分地区的综合智能服务网络。

配电网自愈技术是智能电网的核心技术之一，近年来已经成为国内外电力系统界的热点课题。本书作者在完成国家电网公司城市配电网自愈控制系统项目的基础上，结合智能电网研究与建设工作经验和工程实践，写出此书。相信本书的出版将促进我国智能电网的研究与建设工作，也为从事这方面工作的研究开发人员和工程技术人员提供了重要的参考。

鞠平

2012年5月于河海大学

前言



本书源于国家电网公司科技部下达的科研项目——城市电网自愈控制系统研究，书中凝聚了项目研究过程中的经验和收获。

城市电网自愈控制系统项目的构思开始于 2005 年末，当时国内配电网自动化处于第一次工作试点之后的总结与反思阶段。我国的配电网自动化在上个世纪末到本世纪初经历过一轮较大规模的尝试，由于当时技术不成熟等原因，致使成功的案例很少。因此当时国内电力企业对开展配电网自动化的积极性普遍不高，都在进行反思和观望，整个配电网自动化处在低潮期，配电网自动化技术和产品的研发基本上处于停滞状态。

然而，在“十一五”期间，我国经济高速度发展，我国城市出现供电负荷密度大，供电方式复杂，可靠性要求高的现象。社会对电力的需求与当时配电网发展存在不同步现象。

国家电网科技部结合公司总部开展重点城市电网规划和改造工作，为促进电网与城市的协调发展，支持我们开始了本项目的研究，旨在探索我国配电网及自动化系统存在的主要问题，探索新形势下配电网自动化发展方向，特别注重

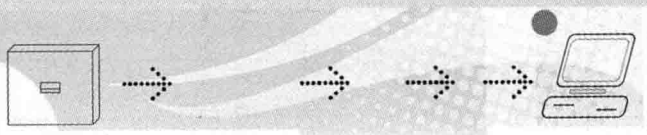
城市电网对自动化的要求。

在项目的研究过程中，2008 年我国发生了一系列十分罕见的自然灾害，涉及范围广，持续时间长，造成了巨大损失。在受灾最严重的地区，一些骨干输电线路发生倒塔、断线，致使相关城市发生全城停电停水。灾害造成的电网困境凸显出当时城市电网的缺陷：一旦极端条件下大电网崩溃，则区域内供电全部中断，无一幸免。城市电网集中了我国最重要的负荷，涉及国家政治、经济命脉，涉及千家万户，城市电网发生停电事故影响面大，造成的损失也大，配电网的网架、电源结构和与之相适应的配电网自动化缺一不可，研究自愈式配电网也显得更加必要。

城市电网自愈控制系统研究项目结题时，适逢 2009 年国家电网公司启动智能电网建设工作，课题组大部分同事亲身参与了智能电网的研究工作，编者结合体会与收获写成本书，希望与国内外广大智能电网建设者一起设立一个研究与谈论的平台，并在实践中继续探索适合我国电网的自愈控制理论和方法。

感谢国家电网公司、国网电力科学研究院相关部门和领导给予的关心与支持。

目 录

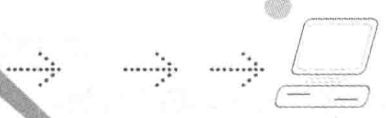


序

前言

第一章 概述	1
第一节 智能电网的提出	1
第二节 我国配电网自动化的发展状况	2
第三节 自愈控制理论的发展	4
第二章 配电网自愈控制系统架构	6
第一节 配电网自愈控制系统的特征	6
第二节 配电网自愈控制系统的构成	7
第三章 配电网智能调度与自愈控制高级应用软件	9
第一节 智能调度平台应用软件的设计原则	9
第二节 配电网自动化系统总体结构	11
第三节 智能调度平台功能	13
第四章 新一代配电网继电保护	23
第一节 配电网网络化保护原理及应用	23
第二节 自适应保护	24
第三节 配电网网络化保护	32
第五章 配电网设备监测管理系统	51
第一节 开展配电网设备状态监测和状态检修的意义	51

第二节 配电网设备状态监测与配电网监测管理系统.....	93
第六章 自愈控制技术的实现	113
第一节 自愈控制的实现原则.....	113
第二节 自愈控制方法	114
第三节 配电网自愈的实现方法.....	123
第七章 示范工程	134
第一节 仿真分析	134
第二节 示范应用	139
参考文献	150
后记	152



第一章

概 述

第一节 智能电网的提出

从 20 世纪 80 年代开始, 计算机技术、信息技术、通信技术发生了翻天覆地的变化, 随着新技术、新材料的不断渗透, 电力系统这一传统的技术领域面临着巨变。一触即发的巨变由用户、国家安全、环境保护的需求而引发。2003 年 7 月 8~9 日, 美国电力工业设备制造公司、学术界、行业团体、国家实验室, 以及联邦、州政府等各个机构和部门的约 200 多位专家在华盛顿参加了国家电力传输技术展望专题会议。

会议期间讨论了以下内容:

- (1) 为了实现远景设想需要在 2010、2020、2030 年达到的目标;
- (2) 为了达到目标和实现远景目标需要克服的主要挑战;
- (3) 克服挑战所需要的研究、开发和示范;
- (4) 研究、开发和示范需要的时间表。

当时美国电力供应面临主要问题是: 老化的电网和电力设施不能够满足经济发展的需要, 影响了经济增长。这是需要密切关注的严重问题。

对电力市场的供应环节来说, 输配电是其关键, 10.4 万亿美元产值的美国经济依靠安全、可靠的电力供应。面对用户对电力供应越来越高的要求, 出于国家安全、环境保护、能源政策的考虑, 必须研究电网改造实施战略; 市场、政策和技术整合的方法; 电力系统研究、开发与工程示范; 政策分析与建模; 联邦、地区及州各部门的协调; 通过“Grid 2030”计划形成一个具有竞争性的北美电力市场, 它在任何时间、任何地点都可以为每个用户提供充足的清洁、高效、可靠和价格合理的电力供应, 提供世界上最安全的用电服务。

这种服务的基础是：

- (1) 电力主干网——实现东西海岸之间的功率交换；
- (2) 区域互联电网——是电力主干网的有力补充；
- (3) 地区配电网——实施电力的配送；
- (4) 最终的美国电网——包括通信与控制系统。

这次会议提出电网技术与最新的通信、控制、电子技术结合，建立更加智能化的电力系统，2030 年最终达到电网实时自愈。

第二节 我国配电网自动化的发展状况

始于 2000 年初城乡电网改造中的配电网自动化试点工作持续了约两年时间。由于配电网自动化设备和通信技术还不成熟，大部分配电网自动化系统未能实现预期的效果，配电网自动化发展方向不明。

然而面对我国经济高速发展，我国重点城市出现了供电负荷密度大，供电方式复杂，对可靠性要求越来越高的情况。城市配电网集中了我国最重要的负荷，涉及国家政治、经济命脉，涉及千家万户，对安全、可靠供电要求高，特别是重点城市，一旦发生意外停电事故，造成的影响大、损失也大。

国家电网公司为解决配电网严重滞后问题，组织开展 31 个重点配电网规划和南京、青岛配电网规划国际咨询工作。目的在于结合城市发展，加快电网建设，优化电网结构，建成坚强的配电网，提高供电能力和可靠性。

从 2003 年起，作者一直关注“Grid 2030”项目、电力传统产业在新技术应用方面的进展，以及对我国电力技术发展的借鉴作用。特别是美国电科院（USA Eprl）以 Frank Goodman 为首的研发团队所研究的 ADA（Advanced Distribution Automation）项目。

ADA 是未来配电网自动化发展的目标。

ADA 主要研究和解决以下问题：

- (1) 提高可靠性和电能质量；
- (2) 降低运行费用；
- (3) 研究配电网与分布电源的一体化；
- (4) 研究配电网与需求侧系统的协调；

- (5) 缩短停电恢复时间;
- (6) 为用户提供更多的用电选择。

项目涉及的技术领域有:

- (1) 设计新的智能电子设备 (IED);
- (2) 研究低成本多功能的静态开关设备、传感器和监视系统、故障预测等。

ADA 描述的未来智能配电网如图 1-1 所示, 具有同步卫星、通信系统 (Communication)、传感器 (Sensors)、智能电子设备 (IEDs)、控制子站 (就地代理 Local Agent)、配电网控制中心 (Distribution Control Center) 构成自动化系统, 配电站 (Distribution Substation)、电力电子设备 (FACTS)、智能变压器 (IUT)、分布式电源 (DER) 构成配电系统。这是一个体系完整、完全可控可调的理想配电网, 工业 (Industrial Consumer)、居民 (Residential Consumer)、商业 (Commercial Consumer) 用户可以得到安全、可靠、高质量的电力供应。

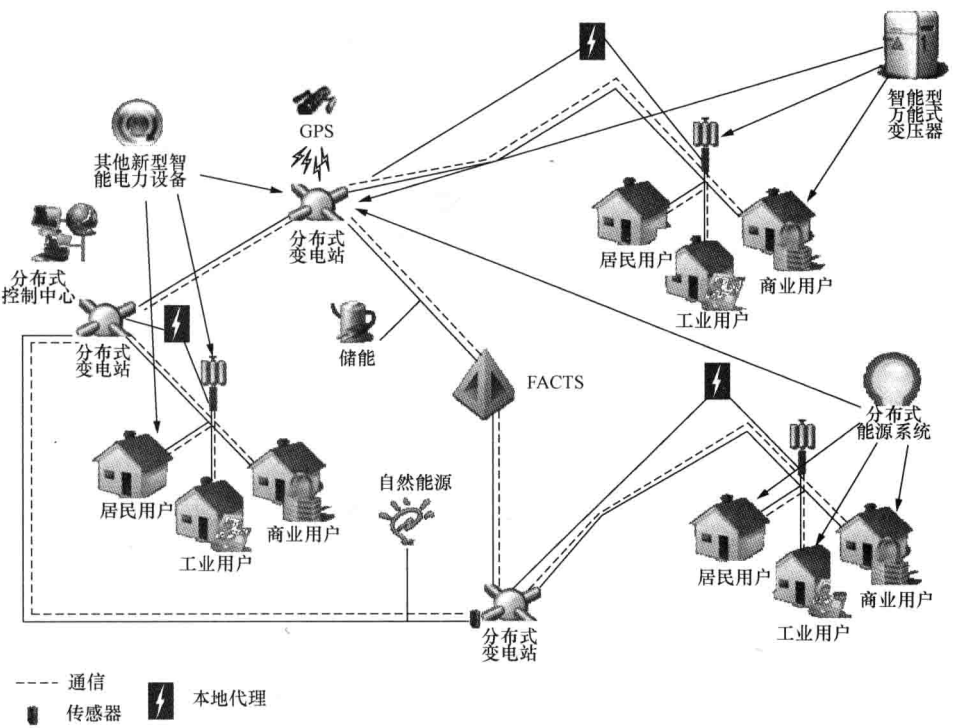


图 1-1 ADA 描述的未来智能配电网

第三节 自愈控制理论的发展

装备系统的故障可否在其运行中得到控制或自行消除？

故障能否像人和动物的疾病一样“自愈”？

在系统科学的指导下，移植现代医学“自主调理”治疗原理，包括免疫、防御、代偿、自修复和自适应等，可以用来指导研究装备自愈原理及工程应用。

而电力系统借助以故障预防和消除为目标的装备系统自愈调控原理，正在不断实践中总结、完善、提高，创造出电力系统的自愈控制理论。

现代装备日趋大型化、高速化、自动化和智能化，特别是广泛应用于石化、冶金、电力、有色冶金等流程工业的高速透平机械、工业泵、风机、压缩机、离心机等重大装备与生产过程紧密相连，形成大系统。这类系统一旦发生故障可能导致重大事故，并造成巨大经济损失。从 20 世纪 60 年代开始，国际工程科技界开发了设备监测诊断技术，在工业企业逐步推行预知维修和智能维修，并广泛采用紧急停车连锁系统，为确保安全生产发挥了重要作用，取得了实效。

研究自愈控制，旨在改变仅靠紧急停车保护机器和完全靠人来检修消除故障的传统方法。这种理论与方法又有别于设备诊断与预知维修技术，是研究使装备系统具备故障自愈功能，在运行中自行消除故障，而不完全是停机由人来排除故障。工程实践表明，除了少数突发故障以外，大多数故障发生是有一个渐进过程的，如果早期发现，及时采取恰当的措施是完全可以防止的。

装备的故障发生是一个渐进过程，如果装备没有设计重要环节的监控、智能化程度不够，而错过了调控的大好时机，将由设备隐患发展为设备故障。

电力系统故障处理方式与装备系统类似，故障时由继电保护动作跳闸，然后由人工处理故障。电力系统是一个复杂的多装置系统，跳闸往往引起多点扰动，伴随的后果可能包含解列、切机等较大区域的扰动或失稳等。

电力系统自愈的概念最早出自美国电科院（EPRI）与美国能源部于 1999 年启动的复杂互动系统联合研究计划。后来美国电科院的智能电网（Intelligrid）、美国能源试验室的现代电网（Modern Grid Initiative）研究项目都把自愈作为主要研究内容，作为保证电网供电质量的核心技术手段。自愈功能是当前智能电网研究的热点内容。

电网的自愈功能（Self-healing）是指在无需或仅需少量的人为干预的情况下，

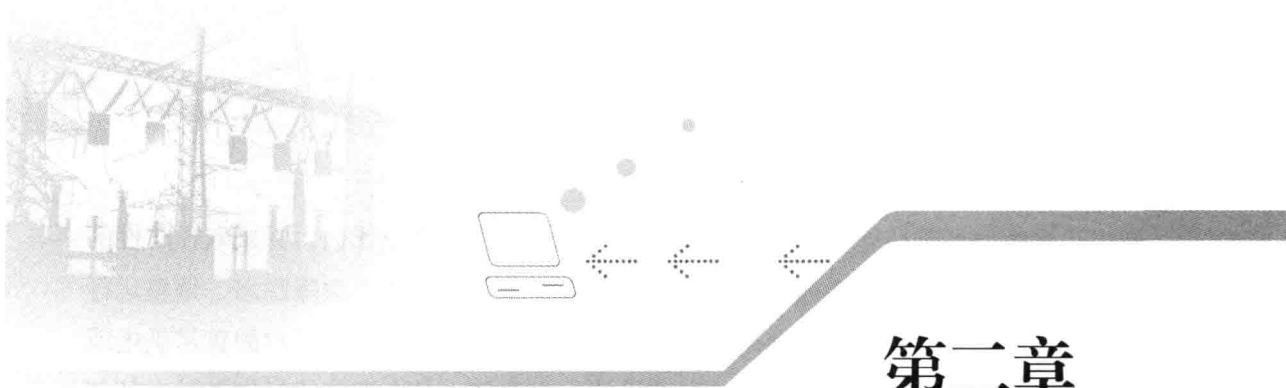
利用先进的监控手段对电网的运行状态进行连续的在线自我评估，并采取预防性的控制手段，及时发现、快速诊断、快速调整或快速隔离。消除故障隐患、调整运行方式，在故障发生时能够快速隔离故障、自动快速重构，不影响用户的正常供电或将影响降至最小。就像人体的免疫功能一样，自愈能力使电网能够抵御各种内外部危害（故障），保证电网的安全稳定运行和用户的供电质量。

输电网主要采用环网多电源供电结构，其中一个甚至多个元件退出运行，不会影响系统的正常供电。因此，自愈功能一方面是实现电力设备状态在线监测，发现并排除故障隐患，及时通过继电保护切除故障元件；另一方面是对系统进行在线安全评估和预警控制，防止出现电网稳定破坏事故导致的大面积停电。

配电网直接面向用户，一般采用辐射性供电方式，配电网中的任何故障、电能质量扰动都直接影响对用户的供电质量，因此配电网中的自愈功能有着不同于输电网的特点。智能配电网自愈功能的作用：首先是减少停电时间与停电次数，特别是避免目前电网大量存在短时非计划停电问题，提高供电质量；其次是优化电能质量，尤其是抑制电压骤降，提供优质电力；最后是有效提高电网防灾、防破坏能力。

需要指出，从含义与技术内容来讲，自愈功能并不是一个全新的概念，继电保护与安全自动装置都属于自愈功能的范畴。自愈功能是在传统的继电保护与安全自动装置的基础上发展而来的，并且更为完善，它的终极目标是在无需人为干预的情况下，为用户提供永不间断的理想电力。

自愈控制技术的研发与推广应用，对于建设智能电网，提高供电质量具有十分重要的意义。



第二章

配电网自愈控制系统架构

第一节 配电网自愈控制系统的特征

配电网自愈控制（Self-healing control）涵盖了电网保护、控制领域的很多新进展，目的是构建配电网自我预防、自我调整、自我恢复的能力，其具有两个显著特征：

（1）以预防控制为主要控制手段，及时发现、诊断和消除故障隐患。电气设备在线监测是预防控制的重要支撑技术。

（2）故障发生的情况下具有维持系统不间断运行的能力。

配电网自愈控制技术建立在丰富、全面的实时测量和实时监视数据的基础上，通过系统仿真技术、短路电流计算、保护定值配合、类型辨识、负荷预测等形成正常运行的优化运行控制，实现配电网运行的积极性；应用异常运行时的预防控制技术，达到防患于未然，减小系统由异常状态向故障状态下滑的几率，保证配电网运行的可靠性；故障时的全局控制技术，力争不停电、少停电、减小停电范围、缩短恢复时间；紧急情况下的应急控制技术，如进入保护加速程序、启动备用电源、将冷备用状态电源转入热备用状态等。紧急控制预案一般是一系列方案，设定若干防线，首先执行扰动最小的方案，使故障影响最小，尽可能的减小系统由异常状态向故障状态下滑。

紧急控制的最后一道防线是通过自愈控制技术和配电网继电保护，对配电网进行快速恢复控制，通过提高电源出力、切除部分负荷，甚至将配电网分成若干临时的供电孤岛等措施，杜绝大面积停电的出现。主要技术内容包括：

（1）正常运行时的运行优化方案配置技术和算法。异常运行时，通过设备的在线测量系统和配电网的测量系统发现配电网或设备的异常状态或设备缺陷，判

断出可能发生的故障，形成预防策略，实施预防控制，使配电网从异常状态过渡到一个健康状态，需要在线变更配电网继电保护的定值，以及定制改变后的校验仿真。

(2) 预防控制算法和技术，配电网网络预重构算法和技术。故障时，进入紧急控制状态，实施紧急控制。隔离故障点或区域，缩小停电面积，减少停电时间，实施网络重构，加速故障恢复。

(3) 一次、二次、自动化系统协调配合，应用自愈控制技术，提高配电网可靠性。

(4) 通过全网数字控制、设备在线监测、配电网继电保护和开关设备的相互协调，以及在调度系统嵌入自愈控制高级应用软件，全方位实现自愈控制，缩小故障范围、缩短停电时间，提高配电网供电可靠性。

第二节 配电网自愈控制系统的构成

配电网自愈控制系统主要由自愈控制功能、数据接口、SCADA 平台、系统平台四部分构成，如图 2-1 所示。将配电网自愈控制系统嵌入配电网调度自动化系统的方式是增加自愈控制数据服务器、系统服务器和工作站，如图 2-2 所示。

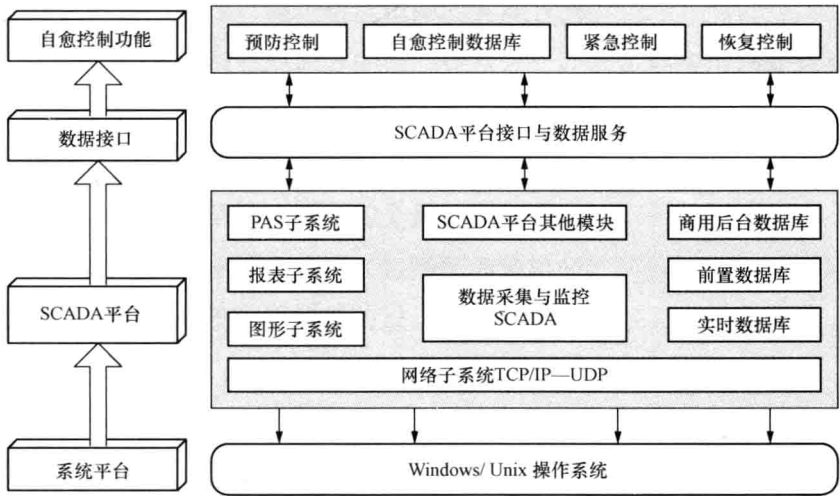


图 2-1 配电网自愈控制系统的构成

根据电力系统安全防护的要求，电力系统的安全性按重要性分为四个区。本系统位于 I 区和 II 区，通过物理隔离设备、网络防火墙与其他系统互联。

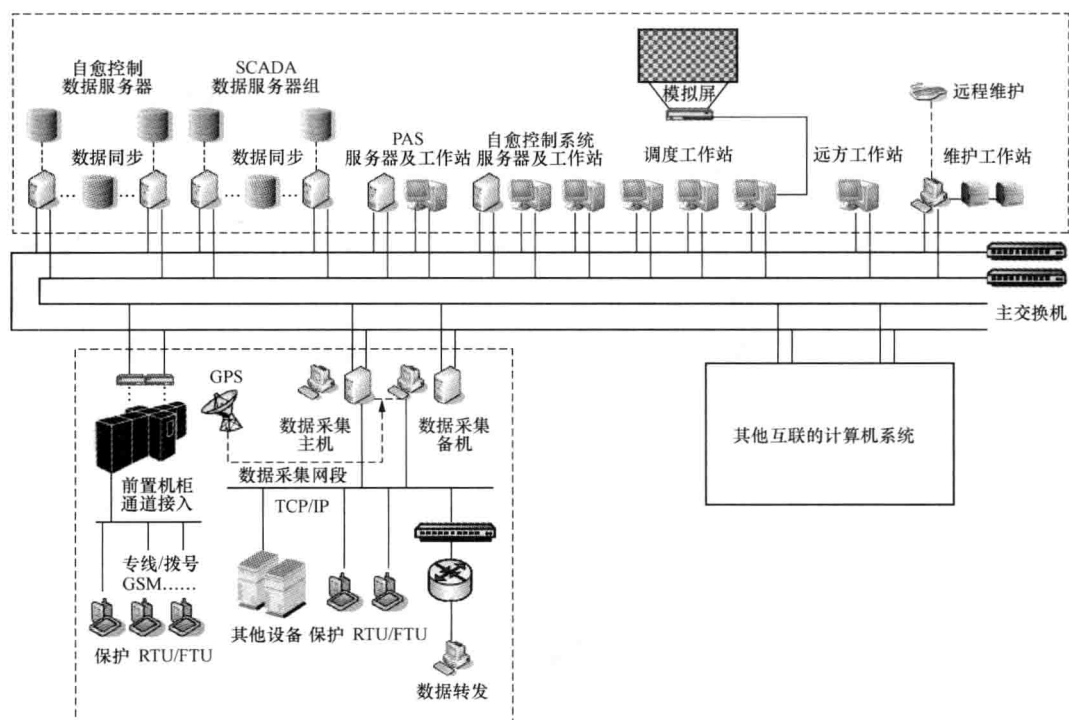


图 2-2 配电网自愈控制系统嵌入配电网调度自动化系统方式