

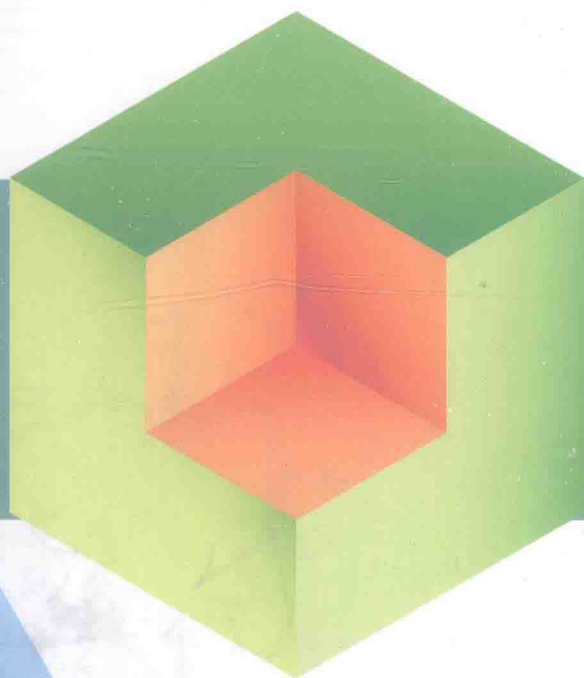


国家电网公司
电力科技著作出版项目

国家自然科学基金项目 (51177152)

智能配电网 建模理论与方法

盛万兴 宋晓辉 孟晓丽 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

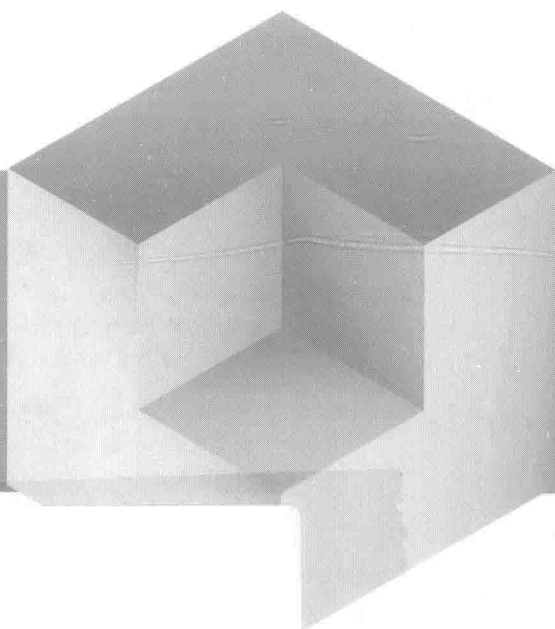


国家电网公司
电力科技著作出版项目

中国电力科学研究院科技专著出版基金资助

智能配电网 建模理论与方法

盛万兴 宋晓辉 孟晓丽 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书阐述了智能配电网建模理论与方法,主要内容包含智能配电网建模概述,智能配电系统模型体系,智能配电网建模基本理论与技术,负荷建模,设备建模,分布式电源建模,智能配电网通信模型,配电网控制模型,智能配电网信息模型,配电网系统模型和模型验证理论与方法。

本书建模理论先进、科学,讲解深入浅出,适合电力系统及自动化、配电网等科研人员使用。

图书在版编目(CIP)数据

智能配电网建模理论与方法 / 盛万兴, 宋晓辉, 孟晓丽
编著. —北京: 中国电力出版社, 2016.6

ISBN 978-7-5123-9028-7

I. ①智… II. ①盛… ②宋… ③孟… III. ①智能
控制-配电系统-系统建模 IV. ①TM727

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 045019 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>)

三河市万龙印装有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2016 年 6 月第一版 2016 年 6 月北京第一次印刷

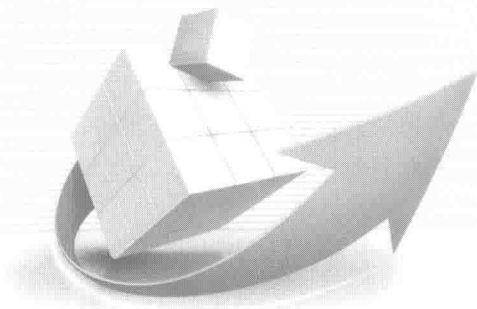
710 毫米×980 毫米 16 开本 17.5 印张 294 千字

印数 0001—2000 册 定价 78.00 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

以模型为基础的计算和仿真是配电网规划设计、运行分析、保护控制及新技术研究的重要手段。随着分布式电源、智能装备等智能化要素的发展以及规模的不断扩大,配电网逐渐成为一个复杂的智能系统,其科学、合理的建模显得日益重要、紧迫。模型是研究对象、问题本质属性的抽象和简化,决定了计算和仿真的科学性、有效性。建模的过程,一般是根据应用的需要,从一个或多个方面抽取事物的主要相关特性,采用数学方法进行描述的过程。由于对象的复杂性,模型通常不能全面、精确地反映对象的各种特性。建模理论和方法对于科学、有效地展示物理原型的某类特性,提高具体问题分析的适用性具有重要作用。

电力系统建模方面的成果较多,但大多数侧重于输电系统具体模型(如负荷模型)的建立、具体建模方法(如系统辨识法)的应用,针对配电网建模理论方法的专著较少。本书作者多年来一直从事配电网规划,运行保护控制、管理等方面的科研和实践工作,深感理论方法对配电网建模工作的重要性。为了帮助电力系统和非电力系统的广大科研工作者和技术人员系统地了解配电网建模理论与方法、配电网主要模型,在国家自然科学基金项目(51177152)、国家电网公司电力科技著作出版项目和中国电力科学研究院科技专著出版基金支持下,编写了本书,以期对智能配电网建设和运行贡献绵薄之力。

全书共 11 章。第 1、2 章主要介绍了智能配电网建模的基本概念、特点及模型体系;第 3 章介绍了智能配电网主要建模理论和方法;第 4~10 章分别介绍了智能配电网负荷建模、设备建模、分布式电源建模、通信模型、控制模型、信息模型、系统模型等理论、方法以及主要模型;第 11 章介绍了模型验证理论与方法。

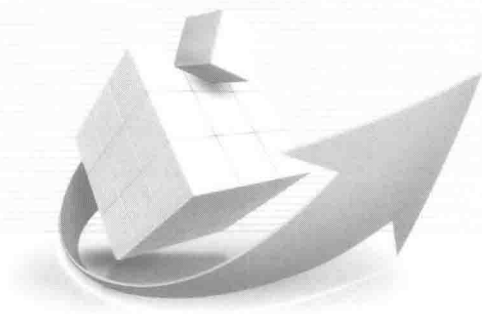
本书在编写过程中,宋晓辉高级工程师编写了第 3、8、10、11 章,孟晓丽高级工程师编写了第 4、5、7 章;盛万兴博士主持编写了本书,编写了第 1、2、

6、9 章并统稿。另外，研究团队成员李建芳、高菲、贾东梨、张瑜、李雅洁、赵珊珊、胡丽鹃、何开元、冯雪平、常松等参与了本书部分章节的编写、文字和图形整理工作，在此表示感谢。

限于作者水平，兼时间仓促，书中难免存在疏漏之处，敬请广大读者批评指正。

作 者

2016 年 6 月于中国电力科学研究院



目 录

前言

1	智能配电网建模概述	1
1.1	现状	1
1.2	智能配电网建模特点及需求	3
1.3	智能配电网建模的方法和途径	3
2	智能配电系统模型体系	5
2.1	智能配电网特点	5
2.1.1	传统配电网特点	5
2.1.2	智能配电网特点	7
2.1.3	智能配电网业务流	9
2.2	智能配电网模型体系	12
2.3	对象模型	13
3	智能配电网建模基本理论与技术	17
3.1	建模的基本理论	17
3.1.1	模型论	17
3.1.2	相似理论	20
3.1.3	系统辨识理论	21
3.1.4	图论及网络理论	27
3.2	建模的基本方法	30
3.2.1	机理/推理建模法	30
3.2.2	统计分析建模法	31
3.2.3	综合建模法	32
3.3	建模的常用方法	32

3.3.1	回归分析建模法	32
3.3.2	演绎-归纳建模法	34
3.3.3	概率统计建模法	34
3.3.4	灰色系统建模法	36
3.4	智能建模方法	39
3.4.1	人工神经网络建模法	39
3.4.2	模糊建模法	40
3.4.3	遗传算法建模法	41
3.5	复杂系统建模方法	42
3.5.1	多智能体建模法	42
3.5.2	多分辨率建模法	44
3.5.3	马尔可夫建模法	47
4	负荷建模	53
4.1	概述	53
4.2	配电网负荷建模方法	54
4.2.1	统计综合法	54
4.2.2	总体测辨法	55
4.3	配电网的负荷特性	57
4.3.1	负荷特性指标	57
4.3.2	负荷特性分析方法	60
4.3.3	典型负荷特性案例	62
4.4	配电网负荷模型辨识方法和参数确定	67
4.5	配电网负荷模型	69
5	设备建模	79
5.1	智能配电设备特点与建模需求	79
5.2	设备建模方法	80
5.2.1	配电变压器等效建模	80
5.2.2	配电线路等效建模	90
5.2.3	开关等效建模	96
5.2.4	无功补偿装置建模	99
5.2.5	电动机建模	107

5.2.6	充放电桩建模	111
6	分布式电源建模	119
6.1	概述	119
6.2	系统级建模方法	121
6.3	元件级建模方法	125
6.3.1	暂态分析	125
6.3.2	稳定性分析	126
6.3.3	潮流计算	127
6.4	分布式电源建模方法	130
6.4.1	一次能源转换装置模型体系	131
6.4.2	发电装置模型体系	143
6.4.3	电力电子装置模型体系	144
6.4.4	控制系统模型体系	147
6.5	分布式电源模型实例验证	150
6.5.1	微型燃气轮机模型验证算例	150
6.5.2	算例仿真验证结果	153
7	智能配电网通信模型	157
7.1	概述	157
7.1.1	通信概述	157
7.1.2	智能配电系统通信	158
7.2	通信建模的基本方法	159
7.2.1	形式化描述建模法	159
7.2.2	图示化描述建模法	159
7.2.3	计算机辅助建模法	159
7.3	通信模型体系	160
7.3.1	结构模型	160
7.3.2	通信规约	162
8	配电网控制模型	168
8.1	配电网控制技术需求	168
8.2	配电系统控制模型体系	169
8.2.1	传统控制理论模型	169

8.2.2	配电系统控制层次	171
8.2.3	配电系统控制模型	173
8.3	配电系统控制模型建模方法	176
8.4	配电系统控制类型建模方法	176
8.4.1	机械控制建模方法	176
8.4.2	自动控制及人工控制建模方法	177
8.5	组织结构建模方法	178
8.5.1	集中控制	178
8.5.2	分散控制结构	179
8.5.3	递阶控制结构	180
8.5.4	基于 MAS 的智能配电控制结构建模方法	181
8.6	基于运行状态辨识的智能配电系统控制建模方法	182
8.6.1	配电网的运行状态	182
8.6.2	优化控制数学模型建模方法	184
8.6.3	风险控制数学模型建模方法	186
8.6.4	紧急控制数学模型建模方法	188
8.7	配电网继电保护建模	191
8.7.1	继电保护建模的意义与手段	191
8.7.2	继电保护建模	191
8.8	配电网风险建模	195
8.8.1	配电网风险评估的定义	195
8.8.2	配电网运行风险评估的思路	196
8.8.3	配电网运行风险评估建模理论方法	197
8.8.4	配电网运行风险评估参数模型	197
8.8.5	负荷曲线模型	200
8.8.6	配电网运行风险评估指标计算模型	201
9	智能配电网信息模型	204
9.1	概述	204
9.1.1	信息模型的定义	204
9.1.2	信息建模的目标	204
9.1.3	信息模型表示法	205
9.2	信息模型的建模方法	210
9.2.1	信息模型的主要建模方法	210

9.2.2	UML 建模方法及特点	211
9.2.3	智能配电网信息模型建模方法	213
9.2.4	智能配电网信息模型建模原则	217
9.3	智能配电网信息模型	218
9.3.1	智能配电网信息模型的通用框架	218
9.3.2	智能配电网信息模型的特点	220
9.3.3	信息模型库	221
9.4	信息模型的应用	239
9.5	信息模型验证	240
9.5.1	模型符合度验证	240
9.5.2	数据质量验证	241
10	配电网系统模型	244
10.1	配电网网络接线	244
10.1.1	高压配电网接线	244
10.1.2	中压配电网接线	246
10.2	配电网网络计算机建模	253
10.2.1	基本思路	254
10.2.2	配电网络层次模型	254
10.2.3	网络模型分层存储结构	255
10.2.4	静态全局网络建模	256
10.2.5	动态局部网络建模	257
11	模型验证理论与方法	259
11.1	概念模型验证	259
11.1.1	概述	259
11.1.2	层次与内容	260
11.1.3	过程	260
11.1.4	方法	260
11.2	输出验证	261
11.2.1	静态性能检验方法	262
11.2.2	动态性能检验方法	263
索引		265

智能配电网建模概述

1.1 现 状

在电网技术研究中,实际电网系统比较复杂并且对安全性要求较高,不宜或者不能在实际电网上进行实验,往往需要建立相应的模型以预测、反映出实际电网系统的特性、功能等;在电网的分析、控制、仿真中,也同样需要建立相关的各类模型。模型是电网技术研究、分析与控制的重要基础和关键。

长期以来,配电网积累了大量的模型,这些模型是一代又一代的科研人员经实践、研究探索而形成的,经受住了实践的检验。在新形势下,配电技术得到迅猛发展,产生了大量模型需求。一方面,新提出的模型需要经过实践及理论检验,另一方面,也需要制定大量新模型。重温现有模型及其建模过程和建模方法,借助其他学科发展起来的通用建模和分析理论与方法,对于做好配电网建模与分析,提高建模与分析的效果和效率,保证模型及选用分析方法的科学合理性和适用性,促进配电技术创新发展具有积极意义。

从字面意义理解,建模就是建立模型的活动,由于事物的复杂性,模型通常不能全面、精确地反映事物的各种特性。因而建模的过程,一般是根据应用的需要,从一个或多个方面抽取事物的主要相关特性,采取一定的方法构建出相应的模型。

模型从形态上可以分为物理模型、数学模型和仿真模型三大类。

物理模型是根据相似原理,按照电力设备/元件的工作机理、外形特征等,构造出的与电力设施/设备具有相同、近似工作特性、输入/输出特性的物理模拟。简而言之,物理模型就是用物理学的概念和理论来描述电力设施/设备。物理模型的特点是舍弃次要因素,抓住主要因素,从而突出电力设备/元件的本质特征,具有物理概念明确、能自然包含各种复杂物理因素的优点,但模型实验成本高且费时费力,很难模拟大规模复杂配电系统。

数学模型是将配电网中的现实问题归结为相应的数学问题，并在此基础上利用数学公式、逻辑准则和具体算法进行深入地分析和研究，从定性或定量的角度来描述配电网的客观现象，并为解决现实问题提供精确的数据或可靠的数学推导。数学模型虽然有时难以包含所有的物理因素，但随着计算机技术的迅速发展，用数字仿真计算进行分析研究已越来越显示出其简便、灵活、成本低等方面的优越性。

仿真模型主要是在物理模型或数学模型的基础上所形成的用于仿真试验的物理的或数字的模型，其中数字模型可以理解为数学模型的计算机实现。

配电网涉及的设备/元件复杂多样，很多设备/元件的模型不能单纯地说是物理模型还是数学模型，或者仿真模型。各种模型之间既相互区别，又相互联系，各模型间的关系如图 1-1 所示。

模型是对现实系统有关结构信息和行为的某种形式的描述，是真实对象和真实关系中那些令人感兴趣的特性的抽象和简化^[1]。一方面，模型必须能够正确描述系统的本质；另一方面，模型往往不是真实对象某特性的全面反映，而是经过一定的等效、取舍，忽略对结果无影响或影响较少的次要因素，应该在能反映相关特性的前提下尽量简化。

模型的简化程度影响模型的精确性。模型的精确性和简单性往往存在着矛盾，需要根据实际问题对模型的要求找出两者合适的解决方案^[2]。根据对真实系统规律的认识，可以建立模型系统，可以说模型系统是对真实系统一小部分或者某几方面的“抽象”的“映像”。而对建立的模型进行实验的过程又可发现一些新的规律，由此预测未来或丰富对真实系统的认识。模型与原型系统的关系如图 1-2 所示。

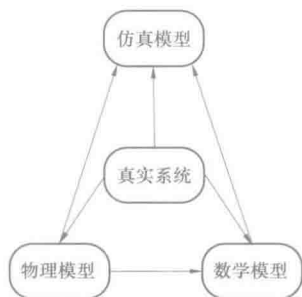


图 1-1 智能配电系统模型间的关系

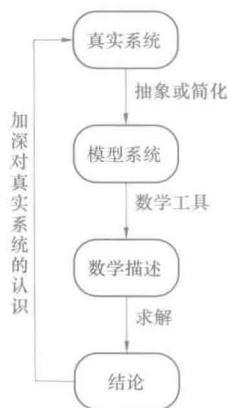


图 1-2 模型与原型系统的关系

本书所称的智能配电网建模,主要是指智能配电网数学模型的建立活动。

1.2 智能配电网建模特点及需求

河海大学的鞠平教授在《电力系统建模理论与方法》^[3]一书中提出,输电系统具有四项主要特性:① 输电系统在本质上是非线性的;② 输电系统是高阶复杂系统;③ 输电系统是随机系统;④ 输电系统的动态过程时间分布广。

相对输电系统,配电网具有自身特性,从而也使其建模具有不同的特点。

(1) 配电网是一个负荷随机性较强的系统,规律性相对不足。

(2) 配电网量测不足,信息不完全、不精确。

(3) 配电网结构复杂、点多面广,是一个分布参数系统。

(4) 配电网是一个连续过程与离散过程混合的复杂系统。

(5) 智能配电网包含了分布式电源、多样性负荷、智能化设备及自动化、信息系统、互动化系统,是一个典型的信息物理系统(Cyber Physical Systems, CPS)。

与传统配电网相比,智能配电网成为包括分布式电源接入的有源网络,是一个复杂的智能系统,对安全可靠、技术经济性提出了更高要求,在建模中需要根据所建模型要解决的问题并考虑配电网的上述特点,存在以下建模需求:

(1) 适用的建模理论与方法。

(2) 反映分布式电源/微电网、多样性负荷等智能配电网特色的设施建模。

(3) 不完全信息条件下的配电网建模。

(4) 反映智能配电网风险、故障、可靠性、安全等的配电网分析、控制建模等。

(5) 智能配电系统建模。

1.3 智能配电网建模的方法和途径

智能配电网建模可分为两种方式:① 从微观到宏观,微观是从局部、设备的角度出发建模,宏观是从系统层面出发建模;② 从构造到模拟方式,对于科学研究、产品研发,通常依据目标构造需要的模型;而对于已存在的系统,当不知道其模型、参数时,需要采用系统辨识的方法进行建模,即为模拟建模,如图 1-3 所示。



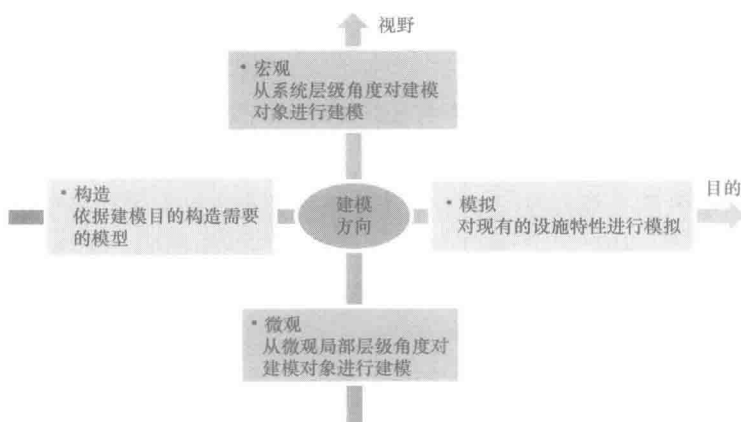


图 1-3 智能电网建模的主要方式

智能电网适用的建模理论和方法比较多，基本理论主要有模型论、相似理论、系统辨识理论和图论；建模方法可分为 4 类，包括基本建模方法、经典建模方法、智能建模方法以及复杂系统建模方法。

这些理论方法中，相对传统配电网，智能电网更需要系统辨识以及多智能体建模方法。系统辨识建模理论与方法通过测量方式，按照一定的准则，在假设模型中选择一个与数据拟合最好的模型，可有效进行对象模型中的负荷、分布式电源、设备建模以及控制模型、分析模型建模。多智能体建模理论与方法适用复杂配电网的分析、控制与仿真建模。

智能电网建模的基本途径主要有 4 种，分别为机理推理、在线量测量/辨识、仿真拟合以及混合建模。

本章参考文献

- [1] 方美琪, 张树人. 复杂系统建模与仿真[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 2011.
- [2] 鞠平. 电力系统建模理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2010.

智能配电系统模型体系

2.1 智能配电网特点

2.1.1 传统配电网特点

配电网通常指 110kV 及以下电网。

相对智能配电网，传统配电网是一个电源来源相对单一的辐射网络，具有规模大、结构复杂、点多面广等特点。图 2-1 为一个典型的传统配电网结构模式，以 220kV 为主要供电电源，以 35~110kV 高压配电网为主干网向各区域供电，以 10~20kV 中压配电网和低压配电网直接向用户供电。

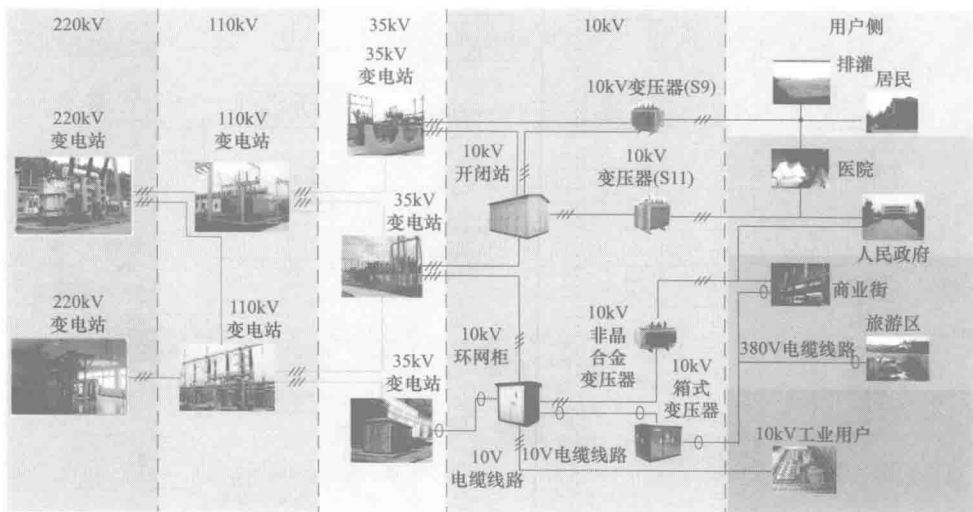


图 2-1 典型的传统配电网结构模式

近年来，随着城乡电网统筹发展步伐的加快和新农村电气化建设的有序推

进,我国配电网建设与改造取得了长足的进步,配电网的网架结构得到很大改善,随着配电网规模不断扩大、结构日益复杂,其规模大、节点多、设备杂、运行方式多的特点日益突出:大量的分布式电源、微电网、大容量充电器、储能系统等接入配电网,运行方式日益复杂;网络接线从原有的单电源单辐射、手拉手方式已经发展为双电源环网、多电源网格状供电,多种供电模式共存;网络中的设备种类涵盖了负荷开关、交流高压自动重合器(简称重合器)、环网柜等多种设备类型,呈现出空前的多样性;网络中调度自动化系统、配网自动化系统、负荷控制系统、无功优化控制系统、经济运行系统、用电信息采集系统等实时或非实时应用系统和地理信息系统、生产管理系统等管理系统众多,许多系统间还需要实现数据共享。

图 2-2 给出了一个具有配电网自动化的典型中压配电网模式。电网为单环网接线,采用断路器或负荷开关分段,配电变压器处配备 TTU,开关处配置 FTU,用户侧加装自动抄表系统,与通信系统一起实现对供电信息的采集及“三遥”(遥测、遥信、遥控)等功能,已经初步具有了智能电网的一些特性。

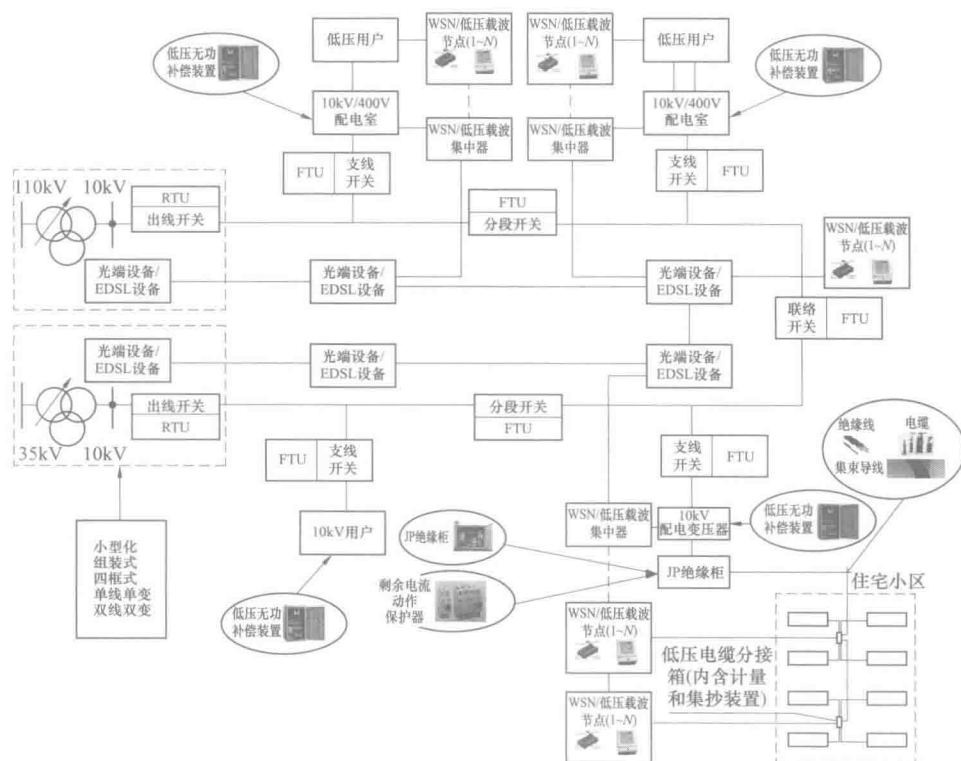


图 2-2 具有配电网自动化的典型中压配电网模式

2.1.2 智能配电网特点

与传统配电网相比,智能配电网成为包含分布式电源接入的有源网络,在具有规模大、结构复杂、点多面广特点的同时,能够满足分布式电源和以电动汽车为代表的多样性负荷接入需要,具备自动化、信息化和互动化技术特性,是一种多目标、多约束、多运行特性的离散状态与连续过程混合的复杂智能系统,扩展了传统配电网的构成、技术特性、运行特性,是一个典型的信息物理系统。

图 2-3 给出典型智能配电网的示意图。智能配电网集成了传统和前沿配电技术、高级传感和量测技术、先进控制技术、现代计算机与通信技术的配电系统,构成上,增加了分布式电源及多样性负荷,完善了自动化系统、信息化系统及通信系统,具有以下功能特征:① 自愈能力;② 具有更高的安全性;③ 提供更高的电能质量;④ 支持 DER 的大量接入;⑤ 支持与用户互动;⑥ 对配电网及其设备进行可视化管理;⑦ 更高的资产利用率;⑧ 配电管理与用电管理的信息化,如图 2-4 所示。

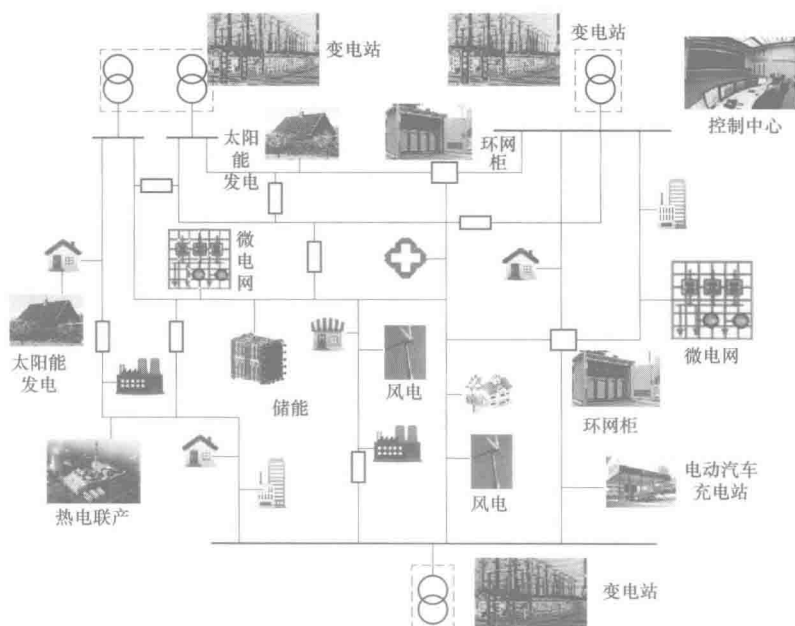


图 2-3 典型智能配电网示意图