

◎ 本书获长沙理工大学学术著作出版项目资助

智能电网中多谐波源 相互影响与控制方法

Interaction and Control of Multi-harmonic Sources in Smart Grid

◎ 夏向阳 著



中国矿业大学出版社

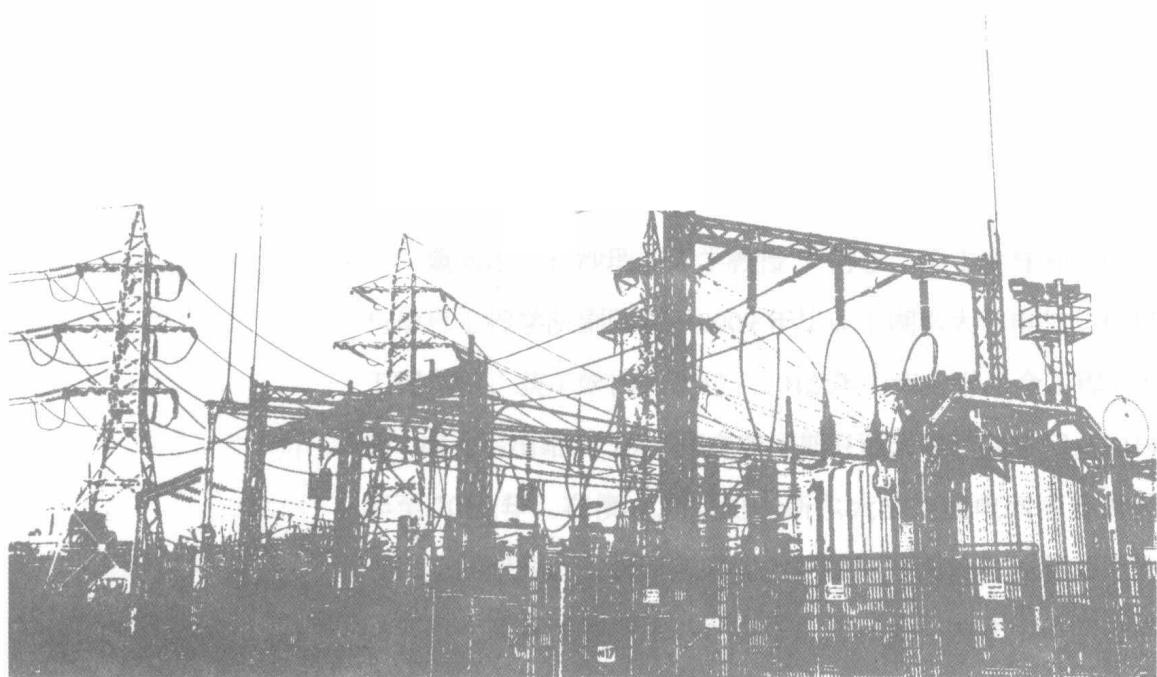
China University of Mining and Technology Press

本书获长沙理工大学学术著作出版项目资助

智能电网中多谐波源 相互影响与控制方法

Interaction and Control of Multi-harmonic Sources in Smart Grid

◎夏向阳 著



中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

图书在版编目 (CIP) 数据

智能电网中多谐波源相互影响与控制方法 / 夏向阳著 . — 徐州 :
中国矿业大学出版社, 2018.12

ISBN 978-7-5646-4325-6

I. ①智… II. ①夏… III. ①电网—谐波—研究 IV. ① TM714

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 299203 号

书 名 智能电网中多谐波源相互影响与控制方法
著 者 夏向阳
责任编辑 李 敬 章 毅
出版发行 中国矿业大学出版社有限责任公司
(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)
营销热线 (0516) 83884103 83885105
出版服务 (0516) 83995789 83884920
网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com
印 刷 湖南省众鑫印务有限公司
开 本 710×1000 1/16 印张 19 字数 315 千字
版次印次 2018 年 12 月第 1 版 2018 年 12 月第 1 次印刷
定 价 98.00 元

(图书出现印装质量问题, 本社负责调换)

夏向阳 长沙理工大学教授，博士，硕士生导师，电气与信息工程学院副院长。2009年毕业于湖南大学电气与信息工程学院，获工学博士学位，2012年中南大学冶金工程(控制)博士后出站，2013年在英国斯旺西大学访问学习，2014年至2015年，在澳大利亚纽卡斯尔大学智能电网中心做博士后访问研究。主要研究方向为新能源并网发电控制和柔性直流输电及其控制应用。近年来主持和参与国家和省部级项目多项，主编教材1本，授权第一发明人的发明专利15项，以第一作者在《中国电机工程学报》等相关SCI和Ei收录期刊上发表论文40余篇，获省部级科学技术成果奖多项。



前 言

电力行业是关系国计民生的基础能源产业。随着全球经济的稳步发展及人民生活水平的逐步提高,各国对电力的需求急速增加,要求各国持续加大电力基础设施投资力度,从而带动电网建设。在新能源技术、智能技术、信息技术、网络技术不断创新突破的条件下,智能电网成为全球电力能源输配电环节发展的必然选择,全球掀起一片智能电网建设热潮。根据最新报告,智能电网技术市场将从2012年的330亿美元增长到2020年的730亿美元,8年间,市场累积达到4 940亿美元。在这样的发展态势下,谐波对于智能电网的影响更是举足轻重的。其中,多谐波源接入后对配电网中节点谐波等的影响和优化控制是本书的重点研究对象。

智能电网中大量电力电子设备的应用、非线性负荷的大量增加以及不同类型新能源发电电源的并网运行,使得许多区域电网出现了各种谐波源,甚至同样一条线路就存在多种不同类型的谐波源,这些不同类型的谐波源存在于同一局域电网中使得电网变成多谐波源网络。近年来谐波问题已经成为危害电网和用电设备安全经济运行的主要问题之一,特别是当“电能”作为商品进入市场后,电力生产企业和用电部门对电能的质量有了更高的要求,抑制电网中的谐波,使谐波在国家标准规定的范围内,是对目前电网中“绿色电力”电力系统环境的迫切要求。

本书围绕着智能电网中多谐波的产生机理、谐波源间交互影响和配电网中谐波优化控制三个核心方向,在全面介绍智能电网中各种典型谐波源特性的基础上,定性分析了多谐波源接入后对配电网中节点谐波等的影响和相关检测方式,重点论述了多谐波源配电网中滤波器的优化配置,实现抑制谐波的方法,并结合部分工程示范案例进行阐述。

本书中，作者还根据多年实际工作经验，介绍了实现优化配置的方法案例，为读者深入了解多谐波源配电网中滤波器的优化配置提供了宝贵的参考资料。

全书共分为六章：第1章概述了智能电网的概念，介绍了近年来智能电网面临的挑战及解决方案；第2章描述了智能电网中谐波的危害、电力系统中典型谐波源波形、含谐波源的配电网谐波潮流分析；第3章从铁磁饱和型谐波源、电弧型谐波源、电力电子开关型谐波源三种类型分析了谐波源对配电网的影响；第4章介绍了智能电网多谐波源相互影响及其检测方法，重点介绍了多谐波源谐波电流检测方法；第5章阐述了电力滤波装置，包括滤波装置的谐波模型、无源滤波器、有源滤波器、混合型有源滤波器，并给出相应控制策略分析；第6章结合实际算例分析，介绍了多谐波源配电网中滤波器的优化配置及其模型、算法、参数分析。

本书为2018年度长沙理工大学学术著作出版资助项目。本书是基于作者多年来对智能电网多谐波相互影响与控制方法的研究，在相关研究基础和项目支撑下，结合理论推导、仿真分析和工程实践总结，同时参考国内外一些专家学者和组织机构的研究思路形成的研究成果。在此，向众多参考文献的作者表示衷心的感谢！希望本书的出版能够对智能电网多谐波相互影响与控制方向的研究有所帮助。

由于知识水平有限，书中难免有不妥之处，希望读者能够提出改进的宝贵意见，我们将不胜感激。

作者

2018年11月

目 录

第 1 章 智能电网概述	1
1.1 智能电网的定义	1
1.2 智能电网的主要特征	3
1.2.1 智能电网与传统电网的差异	3
1.2.2 智能电网的主要优势	6
1.3 智能电网面临的挑战及解决方案	10
参考文献	13
第 2 章 智能电网中谐波潮流分析	17
2.1 概 述	18
2.1.1 谐波的标准	18
2.1.2 谐波的危害	21
2.1.3 谐波源一般等效模型	30
2.1.4 减小谐波危害的常用措施	31
2.2 电力系统中典型谐波源波形	32
2.3 含谐波源的配电网谐波潮流分析	35
2.3.1 谐波潮流的计算方法	35
2.3.2 配电网谐波潮流计算	39
参考文献	42

第 3 章 智能电网中谐波源类型及特性分析	43
3.1 铁磁饱和型谐波源	43
3.1.1 变压器	44
3.1.2 交流电机	47
3.2 电弧型谐波源	50
3.3 电力电子开关型谐波源	51
3.3.1 常用变换电路	52
3.3.2 现代电力电子化装置	82
参考文献	99
第 4 章 智能电网多谐波源相互影响及其检测方法	103
4.1 谐波的交互影响与机理分析	103
4.1.1 多谐波源系统谐波叠加方法	104
4.1.2 多谐波叠加频谱特性分析	105
4.1.3 谐波交互影响机理	112
4.2 谐振的产生与分析	113
4.2.1 串并联谐振产生的条件	114
4.2.2 谐振的检测原理	115
4.2.3 模态检测谐振安装滤波器的步骤	117
4.2.4 公网谐波与逆变 / 整流装置之间的谐波谐振	118
4.2.5 公网谐波与滤波器发生谐振	118
4.2.6 逆变器之间谐波的交互影响	118
4.3 多谐波源谐波电流检测	140
4.3.1 基于特征值分解和快速独立分量分析的谐波电流检测	142
4.3.2 基于改进扩展普罗尼谱估计的跟踪电流检测	150
参考文献	161

第 5 章 电力滤波装置	167
5.1 电力滤波装置概述	167
5.1.1 无源滤波器	167
5.1.2 有源滤波器	168
5.1.3 混合型电力滤波器	176
5.2 滤波装置的谐波模型	181
5.2.1 滤波装置的基本原理	181
5.2.2 滤波装置的数学模型	183
5.2.3 谐波电流的实时检测算法	184
5.3 无源滤波器	187
5.3.1 无源滤波器的一般性设计原则	187
5.3.2 单调谐滤波器的设计方法	188
5.3.3 高通滤波器的设计方法	191
5.4 有源滤波器	193
5.4.1 基本控制方法	194
5.4.2 有源滤波器电流跟踪控制	200
5.4.3 仿真分析与实验验证	221
5.5 混合型有源滤波器	226
5.5.1 并联 APF 与并联 PPF 混合方案控制策略分析	226
5.5.2 串联 APF 与并联 PPF 混合方案控制策略分析	227
5.5.3 APF 与 PPF 串联后与负载并联混合方案控制策略分析	233
参考文献	240
第 6 章 多谐波源配电网中滤波器的优化配置	245
6.1 滤波装置优化配置数学模型	246
6.1.1 平均电压总畸变率	246
6.1.2 装设滤波装置初期投资成本最小数学模型	247

6.2 多目标优化算法 248

 6.2.1 多目标优化的基本概念 249

 6.2.2 基于偏好方法的多目标优化算法 250

 6.2.3 基于产生式方法的多目标优化算法 254

6.3 基于改进粒子群算法的优化配置 256

 6.3.1 基本粒子群算法 256

 6.3.2 改进粒子群算法 259

 6.3.3 实例分析 261

6.4 基于改进模拟退火-粒子群算法的优化配置 270

 6.4.1 改进的模拟退火-粒子群算法 270

 6.4.2 实例分析 272

6.5 基于自适应模糊粒子群算法的优化配置 279

 6.5.1 自适应模糊粒子群算法 279

 6.5.2 实例分析 280

参考文献 290

第 1 章 智能电网概述

1.1 智能电网的定义

虽然目前国际范围尚未形成统一的智能电网定义，但是国际组织和一些国家性组织从智能电网采用的主要技术和具有的主要特性的角度对其进行了描述。欧盟智能电网特别工作组描述的智能电网是：可以智能化地集成所有接于其中的用户——电力生产者 (producer)、消费者 (consumer) 和产消合一者 (prosumer) ——的行为和行动，保证电力供应的可持续性、经济性和安全性^[1]。美国能源部在其研究报告中将智能电网描述为：智能电网利用数字化技术增强电力系统的可靠性、安全性，提高电力系统的运行效率，此处的电力系统涵盖大规模发电到输配电网再到电力消费者，包括正在快速发展的分布式发电和分布式储能^[2]。中国国家电网公司将其提出的坚强智能电网描述为：以特高压电网为骨干网架，以各级电网协调发展的坚强网架为基础，以通信信息平台为支撑，具有信息化、自动化、互动化特征，包含电力系统的发电、输电、变电、配电、用电和调度六大环节，涵盖所有电压等级，实现“电力流、信息流、业务流”的高度一体化融合，具有坚强可靠、经济高效、清洁环保、透明开放和友好互动内涵的现代电网^[3]。从三方对智能电网的描述可以看出：欧洲主要强调了产消合一者的服务和管理，原因在于欧洲分布式能源和电动汽车发展迅速，配电网面临巨大的压力和挑战，这是欧洲发展智能电网的最主要驱动力之一。美国强调了数字化技术在智能电网中的重要作用，认为现代数字化技术和新能源技术的结合是智能电网发展的动力，也是带动新型产业发展、增加就业的机遇，而这正是美国发展智能电网的驱动力之一。由于中国的电力工业仍处

在快速发展时期，国家电网公司强调在增强电网智能化水平的同时，需要建设坚强的输电网络，并强调各级电网协调发展。关于智能电网性能的描述，三方基本观点相近，建设经济、环保、安全、高效的新型电网，是中、美、欧发展智能电网的共同追求。中、美、欧智能电网发展环境和基础对比如表 1.1 所列。

表 1.1 中、美、欧智能电网发展环境和基础对比

项目	美国	欧洲	中国
组织和激励	政治主导：通过立法（如 EISA2007 和 ARRA2009）使智能电网成为国家发展战略；政府给予专项资金，支持前期研究和工程示范，支持标准体系研究	欧盟和各国政府主导：欧盟发布法令（如 M44、M490、M468）；欧盟和各国政府给予专项资金，支持前期研究和工程示范；欧盟标准化组织编制标准体系，指导标准研制工作	智能电网列入国家发展战略和“十二五”科技规划；政府以科技项目形式对研究工作给予一定支持；智能电网的工程示范和建设由电网公司主导
监管和电价	有较完善的监管和市场机制，开放了终端电价，有实行尖峰电价、尖峰补偿电价和实时电价（小时或分钟级）的基础，有利于实时自动需求响应	有较完善的监管和市场机制，开放了终端电价，有实行尖峰电价、尖峰补偿电价和实时电价（小时或分钟级）的基础，为实施自动需求响应及分布式能源参与市场奠定了基础	未开放终端电价，部分地区试点分时电价
用户特点	居民用电占比较高，一般在 30% 左右	居民用电占比较高，一般在 30% 左右	工业用电占比高；居民用电占比较小
能源结构和分布特点	分布均匀，结构合理，新能源主要以分布式电源接入，拥有较高比例的燃油、燃气机组承担调峰机组	新能源主要以分布式电源接入；电源互补性好，如挪威水电与丹麦风电可实现互补，在德国，天然气管道发达，燃气机组与风电形成互补	能源和负荷分布不均衡，电力需长距离传输、大范围配置；风电主要采取几种接入方式，电力能源结构以火电为主，缺乏燃气、燃油等调节性较好的机组
电网发展	近期：电力需求增长相对缓慢，电网架构已基本形成；因走廊获取困难、电网投资回收期长，输电网建设困难；设备陈旧，需寻找未来发展方向，对电网进行升级改造。远期：考虑加强电网互联，建设超级电网	近期：电力需求增长相对缓慢，电网架构已基本形成；走廊获取困难、电网投资回收期长，输电网建设缓慢；分布式电源发展迅速，给配电网带来巨大的挑战。远期：考虑建设洲际超级电网	电力需求快速增长，预计 2010 年到 2020 年电力需求翻一番，既需要加强输电网和配电网建设，还须提高电网的智能化水平，应对对可再生能源并网带来的挑战。巨大的发展空间为实施智能电网提供了机遇

续表 1.1

项目	美国	欧洲	中国
管理模式	电网所有权、管理权分散，国内存在 3 200 家电力公司，电网的发展缺少统一规划和管理。标准制定和被认可需要时间，重视互操作标准的研究和制定	欧洲互联电网规划由欧盟输电运营 ENTSO-E 负责，众多利益相关方和供货商参与，标准制定并得到认可需要很长时间，重视互操作标准的研究和制定	中国电网所有权和管理权相对集中，有利于统一规划、统一调度，形成统一标准

智能电网作为当今社会中的新兴产物，其相较于传统的电网，可以将信息进行整理、搜集以及分析，使其可以统一融入一个大的数据库中，显著改善电力系统的输电、配电以及用电情况，并能及时发现和解决电力系统运行过程中出现的一系列问题，防止问题扩大，出现不可逆转的现象，为电力系统安全运行提供可靠保障，使其可以平稳安全地发展。

智能电网可以合理运用先进的测量技术、控制方法等对电网的运行效率和效果进行提升，将运行过程中的损失降至最低，并且最大限度地满足人们的需求。其具体优势如下^[3]：

(1) 可以对电力业务信息交流进行拓展，利用双向网络通道与信息交换平台对电网运行效果进行有效提升；

(2) 对以往管理人员工作量较大的情况进行了改善，可以根据电网运行过程中的问题提出合理的解决方法；

(3) 可以对各级电网等级进行优化处理，将实际情况和需求作为依据构建相应的框架与体系，能够根据生产要求对电网网络结构进行及时转换，使智能重组系统框架的目标得以实现，为电网精细化要求的实现提供更多的有利条件；

(4) 可以对电网运行过程中的数据进行实时收集，为后期管理和改进工作提供可靠的数据。

1.2 智能电网的主要特征

1.2.1 智能电网与传统电网的差异

传统电网是一个刚性系统，电源的接入与退出、电能量的传输等都缺乏弹性，致使电网没有动态柔性及可组性；垂直的多级控制机制反应迟缓，无法构建实时、可配置、

可重组的系统；系统自愈、自恢复能力完全依赖于实体冗余；对客户的服务简单、信息单向；系统内部存在多个信息孤岛，缺乏信息共享。虽然局部的自动化程度在不断提高，但信息的不完善和共享能力的薄弱使得系统中多个自动化系统是割裂的、局部的、孤立的，不能构成一个实时的有机统一整体，所以整个电网的智能化程度较低。

与传统电网系统相比，智能电网系统的功能和效率更加突出，但系统组成更加复杂。除电网技术系统和电网基础设施系统外，智能电网还包括电网规范系统和智能服务系统。智能电网系统不仅实现了电能的有效管理和传输，而且可以通过通信技术保证供电系统的实时控制。在智能电网系统建设中，除了加强技术和管理外，还应有智能服务系统，提高供电服务质量，让用户享受电力服务等基础服务，获取增值智能服务^[4-6]。

与传统电网相比，人们设想中的智能电网将进一步拓展对电网全景信息(指完整的、正确的、具有精确时间断面的、标准化的电力流信息和业务流信息等)的获取能力，以坚强、可靠、通畅的实体电网架构和信息交互平台为基础，以服务生产全过程为需求，整合系统各种实时生产和运营信息，通过加强对电网业务流程实时动态的分析、诊断和优化，为电网运行和管理人员提供更为全面、完整和精细的电网运营状态图，并给出相应的辅助决策支持，以及控制实施方案和应对预案，最大限度地实现更为精细、准确、及时、绩优的电网运行和管理。

与传统电网相比，智能电网将进一步优化各级电网，构建结构扁平化、功能模块化、系统组态化的柔性体系架构，通过集中与分散相结合，灵活变换网络结构、智能重组系统架构而使配置系统效能最佳，优化电网服务质量，实现与传统电网截然不同的电网构成理念和体系。由于智能电网可及时获取完整的电网信息，因此可极大地优化电网全生命周期管理的技术体系，确保电网实现最优技术经济比、最佳可持续发展、最大经济效益、最优环境保护，从而优化社会能源配置，提高能源综合投资及利用效益^[7]。

和传统电网发输配电单向为用电服务的供需关系不同，可再生能源发电和电动汽车充放电的入网管理和市场交易，形成了供需互动的双向服务关系，传统电网对此已无能为力，故必须求助于智能电网的研发。尽管智能电网尚有待于规范定义，但智能电网研发领域有别于传统电网的几个特点已逐步形成共识，如图1.1所示。

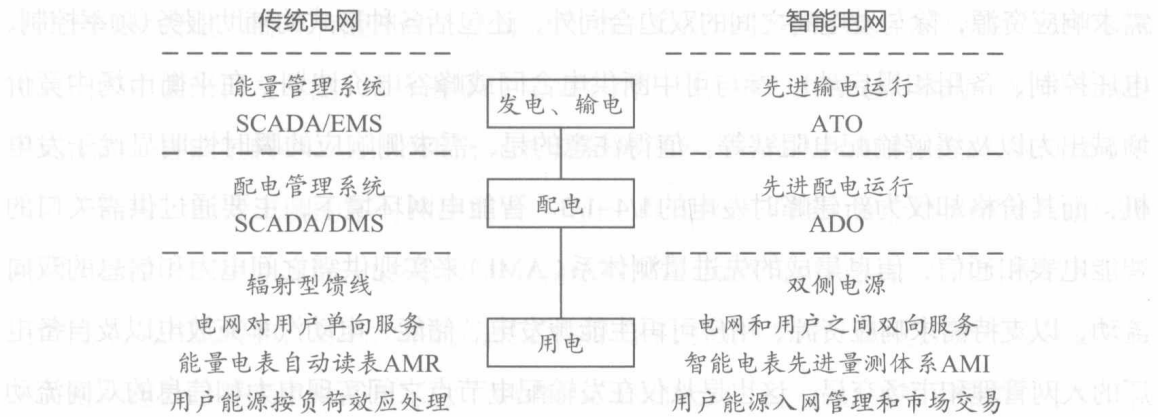


图 1.1 传统电网和智能电网

图 1.1 中，先进量测体系 AMI (advanced metering infrastructure) 继承与发展了传统自动读表 AMR 的各种应用，通过智能电表和通信、信息集成，实现供需之间电力和信息的双向流动，支持表前电网侧和表后用户侧的各种应用。先进配电运行 ADO (advanced distribution operations) 继承与发展了传统 SCADA/DMS 的各种应用，支持需求响应资源、大量用户可再生能源发电和电动汽车充放电的入网管理和市场交易，以及电网的安全自愈和优质高效运行。先进输电运行 ATO (advanced transmission operations) 继承与发展了传统 SCADA/EMS 的各种应用，支持接入灵活交流输电、高温超导输电等新系统元件。高压集中发电和低压分散发电的协调优化、快速仿真决策的启动以及故障隔离的灵活分区，可有效避免大面积停电。

此外，智能电网中的先进资产管理 AAM (advanced asset management) 与 AMI、ADO、ATO 相集成，使用有关信息和控制，实现对资产规划、建设、运行、维护等全生命周期的优化管理。可见，传统电网和智能电网的不同，主要反映在从供需的单向服务发展到供需互动的双向服务上。传统电网、特别是垄断经营时期的发输配用电，是从上而下的单向供需关系。那些由用户控制启停的自备电厂，都被视为是虚拟负荷，即使接入配电系统，也不参与自动发电控制，甚至在配网侧安装逆功率继电器，正常时不向电网注入功率，更不用说量大面广的可再生能源发电。随后，这些分散发电直接或间接纳入需求侧管理 DSM (demand side management)，在开源节流、改善负荷曲线方面发挥了积极作用，但单向的供需关系基本未变。对电网而言，分散发电的启停可以看成是虚拟负荷的减少和增加。同样，负荷的减少和增加也可等效于虚拟发电的增减。因此，

需求响应资源，除与发电商之间的双边合同外，还包括各种形式的辅助服务(频率控制、电压控制、备用和黑启动)、参与可中断供电合同或峰谷电价计划、在平衡市场中竞价增减出力以及缓解输配电阻塞等。值得注意的是，需求侧响应的瞬时性明显优于发电机，而其价格却仅为新建峰时发电的1/4~1/3。智能电网环境下，主要通过供需关口的智能电表和通信、信息集成的先进量测体系(AMI)来实现供需之间电力和信息的双向流动，以支持需求响应资源、用户可再生能源发电、储能、电动汽车充放电以及自备电厂的入网管理和市场交易，这也是从仅在发输配电节点之间实现电力和信息的双向流动的传统电网发展到双向服务的智能电网时需要填补的一大空白。

AMI除提供如上所述的电网侧表前服务外，还提供量大面广的用户侧表后服务。如与用户侧网络HAN(home area network)相连，实现用户分散发电、分布储能(包括电动汽车充放电)与需求响应组成的分布能DER(distributed energy resources)系统集成，优化用电设备的使用和管理，支持供需互动的双向服务等。总之，智能电网的研发和实施以及传统电网的改进和发展，同样都必须依靠监管法规的推动和市场机制的激励，而且两者在发输配用之间也没有必然的先后顺序联系。因此，由于各国资源配置、监管决策取向、电力市场进展以及用户认知程度不同，切入点、重点和先后顺序必然有所差异。此外，旨在应对能源和环境挑战，重视可再生能源发电、电动汽车运输和优化能源使用的智能电网，与相关的煤水气油能源以及气象、运输等行业，存在着密切的关联和互动关系。如何加强行业间的宏观调控，实行智能能源网统一管理，也是当前令人关注的一个问题。

1.2.2 智能电网的主要优势

综合国内外研究，智能电网的特征可归结为灵活性、可观测性和可控性、互操作性3个方面^[8-9]。

1.2.2.1 灵活性

灵活性是指系统功率/负荷发生较快的变化、造成较大功率不平衡时，通过调整发电或电力消费保持可靠供电的能力^[10]。功率的不平衡可能由负荷变化而引起，也可能由间歇式能源发电功率的改变而引起^[11]。为系统提供灵活性的系统/设备称为灵活源，

在生产或消费电力时具有随机性，而难以控制的系统/设备则称为不可控源。传统电网中灵活源主要来自发电侧，不可控源主要来自用户侧，电力由发电—输电—配电—用电单向流动。智能电网中，灵活源和不可控源种类更多，分布更加复杂，需求侧包含了更多的灵活源，而发电侧的不可控性增大。图1.2直观描述了接入智能输电网和智能配电网的灵活源、不可控源以及电网中的电力流的方向。间歇性可再生能源的大量接入，不可调度电源占比增加，对电力系统的灵活性提出了更高的要求。建设智能电网需要解决的关键问题就是提高电网的灵活性、调动灵活源的能力，并对这些灵活源的电力生产和消费进行实时管理控制，使其能有效跟踪不可控源的电力生产和消费，在保持系统安全稳定的前提下，实现全系统的实时平衡。灵活源包括可调节的发电厂、需求侧管理/响应、储能设备、可控负荷、互联电网可提供的交换功率。

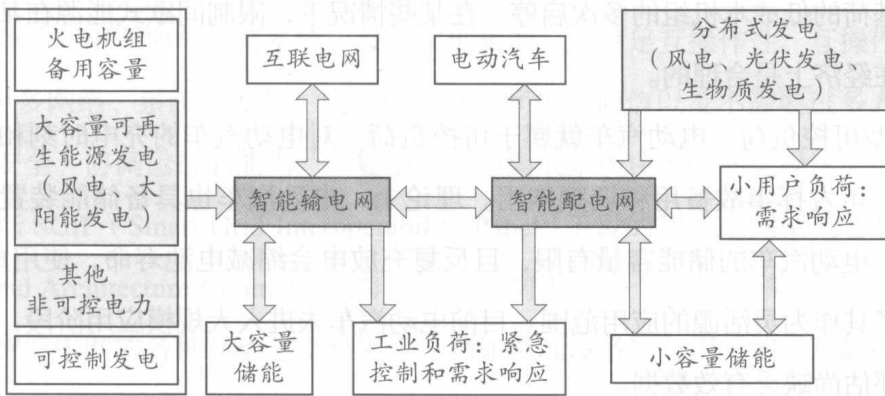


图1.2 智能输电网及配电网电力源及电力流向

根据美国能源部可再生能源实验室的研究，目前这些灵活源在电网中的投入顺序如图1.3所示^[12]。

(1) 机组备用及互联电网之间的互供备用，包括火电机组备用容量、可调水电机组及互联电网之间提供的备用。可通过降低火电机组的最小出力、提高机组对负荷的跟踪能力、爬坡速度等来提高电源侧的灵活性。

(2) 灵活性电源。可快速启动投运的机组，如燃气机组、燃油发电机等。

(3) 需求响应，指负荷对电价或其他激励做出响应。通过实施需求响应，既可减少短时间内的负荷需求，也能规划未来数小时内的削峰填谷作用。这种技术被纳入智能电网框架，除需要相应的技术支撑外，还需要制定相应的电价政策和市场机制。