

■ 国外电力名著译丛

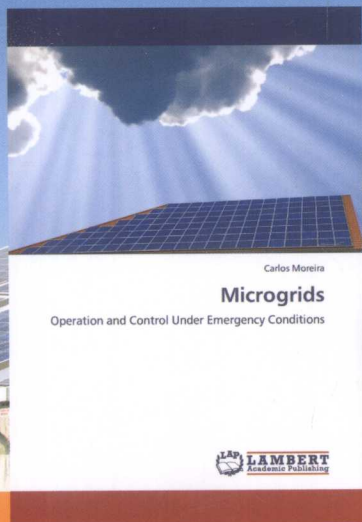
Microgrids

Operation and Control Under Emergency Conditions

# 微电网紧急工况下的 运行与控制

[西] Carlos Moreira 著

南京南瑞集团公司 蒋雷海 译



LAP LAMBERT  
Academic Publishing



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

■ 国外电力名著

**Microgrids**

Operation and Control Under Emergency Conditions

# 微电网紧急工况下的 运行与控制

[西] Carlos Moreira 著

南京南瑞集团公司 蒋雷海 译

 **LAMBERT**  
Academic Publishing



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

## 内 容 提 要

微电网是低压配电网的一部分,包含分布式能源(微型电源)、储能设备及可控负荷,在通信系统的支持下,与先进的管理和控制系统协调工作。微电网最突出的特点是既可以并网工作,也可以孤岛运行,可以将两种运行方式有效地结合在一起。为应对微电网孤岛运行状态,需事先设想一整套紧急处理方案。本书侧重于为微电网孤岛情况下稳定运行提供可行性方案。

本书共7章,包括简介、分布式发电模式、微型发电和微型电网的概念及模型、微电网紧急控制策略、孤岛和黑启动状态下的微电网紧急控制策略评估、孤岛微电网稳定性评估、结论。

本书可供电力生产运行部门、科研院所、电力设备供应商等工作人员参考,也可作为高校相关专业师生参考用书。

## 图书在版编目(CIP)数据

微电网紧急工况下的运行与控制/(西)莫雷拉(Moreira, C.)著;蒋雷海译. —北京:中国电力出版社,2016.5

书名原文:Microgrids: Operation and Control Under Emergency

ISBN 978-7-5123-8813-0

I. ①微… II. ①莫… ②蒋… III. ①电网-电力系统运行  
IV. ①TM727

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第012239号

北京市版权局著作权合同登记

图字:01-2014-5734号

ISBN: 978-3-659-21515-5

Publication of this translation in consultation with OmniScriptum GmbH & Co. KG. 此翻译书的出版已与OmniScriptum GmbH & Co. KG磋商约定。

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>)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

\*

2016年5月第一版 2016年5月北京第一次印刷

710毫米×1000毫米 16开本 12.25印张 228千字

印数0001—3000册 定价65.00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

## 译者序

微电网技术很好地解决了分布式中小型电源的应用问题，为风、太阳能等可再生能源发电的大规模应用找到了出路，适应了新能源的发展方向，是未来电网发展的重点之一。其概念自 1999 年问世以来，经过十多年的发展，在欧美日等地区获得了大量的应用验证，技术逐步成熟，已具备商业化应用的条件。2012 年以前，中国因缺乏市场发展的内在动力，技术沉淀较少，整体上处于技术跟随状态。为快速跟进和掌握该领域最新技术，提升国有技术和产品的市场竞争力，计划引进该领域最新科技著作。

Microgrids: Operation and Control Under Emergency 一书是 2011 年之前欧洲微电网运行和控制技术阶段性发展成果的总结。该书对微电网的概念及可靠运行的必要条件进行了归纳和总结，并在如何建模和分析微电网系统方面进行了探索。该书提出的分布式电源接入方法、微电网并网和离网运行控制、微电网在配电网黑启动中的潜在能力等，都获得了仿真验证支持，具有良好的运用前景。

希望该书的引进可以对国内相关领域的发展起到促进作用。

译者

2015 年于南京

## 摘 要

本书介绍了微电网的概念，以及各种新型电力系统运行所需的必要条件。微电网是低压配电网的一部分，包含分布式能源（微型电源）、储能设备及可控负荷，在通信系统的支持下，与先进的管理和控制系统协调工作。微电网最突出的特点是既可以并网工作，也可以孤岛运行，可以将两种运行方式有效地结合在一起。为应对微电网孤岛运行状态，需事先设想一整套紧急处理方案。本书侧重于为微电网孤岛情况下稳定运行提供可行性方案。推荐紧急控制措施包含了不同类型逆变器的控制模式，具备电压、频率紧急控制功能，可以确保孤岛运行时系统的稳定性，并不降低用户的供电质量。这些控制策略在制定过程中综合考虑了微电网的特点，尤其是不同种类微型电源的反馈特性。

为充分挖掘微电网的发电潜能，本书就如何在低压电网中进行快速黑启动进行了探讨和研究。本书提供的快速黑启动方法，有利于减少故障停电时间，提升供配电网可靠性水平，减少用户停电次数。微电网黑启动过程要求遵循一定的行动顺序，恢复过程中还需对每个执行步骤所需条件的具体情况进行监测。电压和频率的控制方法以及必要的储能设备，是低压电网故障恢复过程中确保系统稳定和维持恢复系统安全运行的必要因素。

## 插图清单

- 图 2-1 传统电力系统结构
- 图 2-2 分布式电源并网
- 图 2-3 分布式发电和自治微电网形态
- 图 2-4 燃料电池基本单元结构示意图
- 图 2-5 燃料电池发电厂内部基本流程
- 图 2-6 单轴微型燃气轮机系统
- 图 2-7 光伏电池组构建的光伏模块和阵列
- 图 2-8 联网光伏系统结构框图
- 图 2-9 包含储能设备和受保护负荷的联网系统电能供应框图
- 图 2-10 电池基本单元电化学反应过程——放电模式
- 图 2-11 电池基本单元电化学反应过程——充电模式
- 图 2-12 电化学超级电容器
- 图 2-13 飞轮储能系统
- 图 2-14 辐射状配电网馈线电压典型分布情况
- 图 2-15 第  $n$  台分布式电源控制器
- 图 2-16 第  $n$  台分布式电源无功控制方案
- 图 3-1 CERTS 微电网结构图
- 图 3-2 微电网结构, 包括微型电源、储能设备和管理控制结构
- 图 3-3 微型电源逆变器接口功能
- 图 3-4 SOFC 动态模型框图
- 图 3-5 SSMT 控制系统框图
- 图 3-6 SSMT 有功控制
- 图 3-7 SSMT 引擎动态模型
- 图 3-8 机组侧逆变器控制框图
- 图 3-9 光伏电池等效电路
- 图 3-10 光伏电池单元典型  $I-V$  和  $P-V$  特性图
- 图 3-11 电池温度对  $I-V$  特性曲线的影响
- 图 3-12 光照强度对  $I-V$  特性曲线的影响
- 图 3-13 光伏系统配置
- 图 3-14 直流并联电容器功率平衡
- 图 3-15 直流连接设备动态模型

- 图 3-16 PQ 逆变器控制
- 图 3-17 频率—有功功率下垂特性
- 图 3-18 VSI 控制系统的功能框图
- 图 3-19 VSI 控制模型
- 图 4-1 单主运行控制结构图
- 图 4-2 多主运行控制结构图
- 图 4-3 VSI 频率下降和有功功率输出增加量  $\Delta P = P_1 - P_0$  间关系
- 图 4-4 连接储能设备的 VSI 稳态有功特性
- 图 4-5 可控微型电源就地二次负荷—频率控制
- 图 4-6 VSI 通过低压电缆（阻性）连接到刚性交流电压源
- 图 4-7 两个 VSI 通过电压电缆（高阻性）给负荷供电
- 图 4-8 VSI1（虚线）和 VSI2（实线）间无功功率流动情况
- 图 4-9 部分负荷切除后，缩小 VSI1（虚线）和 VSI2（实线）间无功功率流动措施采取后情况
- 图 4-10 微电网黑启动程序触发条件流程图
- 图 5-1 低压微电网测试系统
- 图 5-2 微电网计划孤岛形成前从中压电网汲取的有功功率
- 图 5-3 微电网计划孤岛形成前从中压电网汲取的无功功率
- 图 5-4 微电网计划孤岛形成前节点电压
- 图 5-5 工况 1（实线）和工况 2（虚线）条件下孤岛微电网形成过程中系统频率和可控微型电源的动态表现，仅考虑下垂控制特性
- 图 5-6 工况 1（实线）和工况 2（虚线）条件下孤岛微电网形成过程中系统频率和可控微型电源的动态表现，考虑下垂控制特性和二次有功功率—频率控制
- 图 5-7 工况 1（实线）和工况 2（虚线）条件下的微型电源无功功率输出
- 图 5-8 工况 1（实线）和工况 2（虚线）条件下的微型电源端电压
- 图 5-9 工况 1（实线）和工况 2（虚线）条件下孤岛微电网形成过程中系统频率和可控微型电源的动态表现
- 图 5-10 工况 1（实线）和工况 2（虚线）条件下孤岛微电网中微型电源无功功率输出情况
- 图 5-11 工况 1（实线）和工况 2（虚线）条件下微型电源端电压
- 图 5-12 短路状态下的电压、电流波形
- 图 5-13 微型电源注入系统有功、无功波形
- 图 5-14 工况 3 条件下孤岛微电网形成过程中系统频率和可控微型电源的动态表现，仅考虑频率下垂控制

- 图 5-15 工况 3 条件下孤岛微电网形成过程中系统频率和可控微型电源的动态表现, 综合考虑频率下垂控制及二次有功功率—频率控制
- 图 5-16 工况 3 条件下微型电源无功功率输出状态
- 图 5-17 工况 3 条件下微型电源端电压情况
- 图 5-18 孤岛运行时微电网频率和可控微型电源有功功率状态 (负荷投切)
- 图 5-19 孤岛运行时 VSI 无功输出和微型电源端电压状态 (负荷投切)
- 图 5-20 工况 1 (实线) 和工况 2 (虚线) 条件下孤岛微电网形成过程中系统频率和可控微型电源的动态表现, 仅考虑下垂控制特性
- 图 5-21 工况 1 (实线) 和工况 2 (虚线) 条件下孤岛微电网形成过程中系统频率和可控微型电源的动态表现, 综合考虑下垂控制特性和二次有功功率—频率控制特性
- 图 5-22 工况 1 (实线) 和工况 2 (虚线) 条件下微型电源无功功率输出情况
- 图 5-23 工况 1 (实线) 和工况 2 (虚线) 条件下微型电源端电压情况
- 图 5-24 工况 1 (实线) 和工况 2 (虚线) 条件下孤岛微电网形成过程中系统频率和可控微型电源的动态表现, 考虑负荷减载措施
- 图 5-25 短路故障后微型电源端电压和端电流波形 (工况 1 条件下)
- 图 5-26 微型电源功率输出波形 (工况 1 条件下)
- 图 5-27 孤岛微电网形成过程中系统频率和可控微型电源的动态表现, 仅考虑下垂特性控制
- 图 5-28 孤岛微电网形成过程中系统频率和可控微型电源的动态表现, 考虑下垂特性和二次有功功率—频率控制
- 图 5-29 工况 3 条件下微型电源无功功率输出情况
- 图 5-30 微电网孤岛运行时系统频率和可控微型电源有功功率输出情况 (负荷投切)
- 图 5-31 微电网孤岛运行时 VSI 和 SSMT2 的无功功率输出及端电压情况 (负荷投切)
- 图 5-32 微电网黑启动试验系统
- 图 5-33 SSMT1 和微电网主要储能设备有功功率和频率状态<sup>[128]</sup>
- 图 5-34 黑启动初始阶段微型电源频率和有功功率输出情况
- 图 5-35 黑启动初始阶段微型电源电压和无功功率输出情况
- 图 5-36 微电网频率和微型电源有功功率输出情况
- 图 5-37 微型电源端电压和无功功率输出情况
- 图 5-38 配电变压器低压侧同步电流、有功和无功功率情况
- 图 6-1 微电网孤岛形成过程中不同工况下系统频率和储能设备向系统注入功率情况



- 图 6-2 ANN 基本处理单元框图
- 图 6-3 ANN 中通常采用的激励函数
- 图 6-4 前馈型 ANN 示意图
- 图 6-5 ANN 训练框图
- 图 6-6 微电网动态仿真算法示意图
- 图 6-7 测量值和预期值之间线性回归关系
- 图 6-8 工况 1 (实线) 和工况 2 (虚线) 条件下需减载负荷量
- 图 6-9 工况 1 条件下采取负荷减载措施前 (实线) 和智能负荷减载措施后 (虚线) 微电网动态表现
- 图 6-10 工况 2 条件下采取负荷减载措施前 (实线) 和智能负荷减载措施后 (虚线) 微电网动态表现
- 图 6-11 工况 1 条件下采取压缩发电量措施前 (实线) 和智能压缩发电量措施后 (虚线) 微电网动态表现
- 图 A-1 微电网测试系统
- 图 A-2 微型风力发电机功率曲线
- 图 A-3 微电网服务故障恢复程序低压测试系统图
- 图 B-1 MatLab<sup>®</sup>/Simulink<sup>®</sup> 仿真平台
- 图 B-2 SSMT 连接到三相系统图
- 图 B-3 SSMT 模块设置对话框
- 图 B-4 SSMT 框图封装细节
- 图 B-5 SSMT 模型, 包括 SSMT 机械部分、永磁同步发电机和电机侧逆变器
- 图 B-6 SOFC 模块设置对话框
- 图 B-7 SOFC 模块封装细节
- 图 B-8 MatLab<sup>®</sup>/Simulink<sup>®</sup> 环境中 SOFC 模型细节
- 图 B-9 负荷减载参数
- 图 B-10 负荷减载实施框图

# 表 格 清 单

- 表 2-1 主要燃料电池概述
- 表 3-1 同步发电机和逆变器特征对比
- 表 4-1 图 4-7 中 VSI 参数
- 表 5-1 微电网解列前发电和负荷情况
- 表 5-2 工况 1 特征描述
- 表 5-3 工况 2 特征描述
- 表 5-4 工况 3 特征描述
- 表 5-5 可控负荷减载方案定值
- 表 6-1 系统工况特征
- 表 6-2 蒙特卡洛参数
- 表 6-3 不同工况下的负荷减载定值
- 表 6-4 不同工况下压缩发电量情况
- 表 A-1 低压微电网测试系统电气参数
- 表 A-2 微电网测试系统最大联网负荷
- 表 A-3 电机类负荷参数
- 表 A-4 电压源逆变器 (VSI) 参数
- 表 A-5 固态氧化燃料电池 (SOFC)
- 表 A-6 单轴微型燃气轮机参数 (SSMT1、SSMT2、SSMT3)
- 表 A-7 SSMT “ $\omega-P$ ” 曲线
- 表 A-8 SSMT 和 SOFC 并网 PQ 控制逆变器参数
- 表 A-9 光伏系统参数
- 表 A-10 光伏系统并网 PQ 控制逆变器参数
- 表 A-11 微型风力发电机参数
- 表 A-12 SSMT2 电压源逆变器在多主控制模式下的参数
- 表 A-13 不同微型电源的电压源逆变器参数——第一部分
- 表 A-14 不同微型电源的电压源逆变器参数——第二部分

## 名 词 缩 写

AFC	Alkaline Fuel Cell	碱性燃料电池
AI	Artificial Intelligence	人工智能
BoP	Balance of Plant	电厂平衡/发电平衡
BS	Black Start	黑启动
BTU	British Thermal Unit	英热单位（一种热量单位）
CHP	Combined Heat and Power	热电联产
CERTS	Consortium for Electric Reliability and Technology Solutions	电力可靠性技术解决方案联合会
CPM	Critical Path Method	关键路径法
DSM	Demand Side Management	需求侧管理
DMFC	Direct Methanol Fuel Cell	直接式甲醇燃料电池
DER	Distributed Energy Resources	分布式能源
DG	Distributed Generation	分布式发电
DMS	Distributed Management System	配电管理系统
DNO	Distributed Network Operator	配电网调度员
Emf	Electromotive force	电动势
EMS	Energy Management System	能量管理系统
EU	European Union	欧盟
FP	Framework Program	框架计划
GAST	Gas Turbine	汽轮机
GHG	Greenhouse Gases	温室气体
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor	绝缘栅双极晶闸管
IGCT	Integrated Gate Commutated Thyristors	集成门极换流晶闸管
CIREED	International Conference on Electricity Distribution	国际配电会议
LC	Load Controller	负荷控制器
LV	Low Voltage	低压
MPP	Maximum Power Point	最大功率点
MPPT	Maximum Power Point Tracker	最大功率点追踪器
MSE	Mean Square Error	均方差
MV	Medium Voltage	中压
MG	Microgrid	微电网

MGCC	Microgrid Central Controller	微电网集中控制器
MCFC	Molten Carbonate Fuel Cell	熔融碳酸盐燃料电池
MMO	Multi Master Operation	多管理操作
OLTC	On Load Tap Changer	有载调压器
OECD	Organisation for Economic Cooperation and Development	经济合作发展组织
PMSG	Permanent Magnet Synchronous Generator	永磁同步发电机
PAFC	Phosphoric Acid Fuel Cell	磷酸燃料电池
PV	Photovoltaic	光电
PCC	Point of Common Coupling	公共耦合点
PEMFC	Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell	聚合物电解质膜燃料电池
PLC	Power Line Communication	电力线载波通信
PERT	Program Evaluation and Review Technique	规划评审技术
PI	Proportional Integral	比例积分
PWM	Pulse With Modulation	脉冲调制
RE	Relative Mean Squared Error	相对均方差
RES	Renewable Energy Sources	可再生能源
RMSE	Root Mean Squared Error	均方根误差
SCR	Silicon Controlled Rectifier	可控硅整流器
SMO	Single Master Operation	单主控操作
SOFC	Solid Oxide Fuel Cell	固体氧化物燃料电池
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition	监控与数据采集
VTG	Vehicle to Grid	电动汽车并网
VSI	Voltage Source Inverter	电压源逆变器

译者序

摘要

插图清单

表格清单

名词缩写

<b>1</b>	简介 .....	1
1.1	背景和目的 .....	1
1.2	主要内容 .....	3
1.3	本书的章节结构 .....	4
<b>2</b>	分布式发电模式 .....	6
2.1	简介 .....	6
2.2	分布式发电概念 .....	8
2.2.1	电力系统发电模式的变革 .....	10
2.2.2	分布式发电和自治及非自治微电网形态 .....	11
2.3	分布式发电增长的主要动力 .....	12
2.3.1	环境问题 .....	12
2.3.2	商业经济因素 .....	12
2.3.3	国家/调控政策因素 .....	14
2.4	不同类型的分布式发电技术 .....	15
2.4.1	燃料电池 .....	15
2.4.1.1	燃料电池系统 .....	16
2.4.1.2	燃料电池种类 .....	17
2.4.2	微型燃气轮机 .....	18
2.4.2.1	微型燃气轮机技术现状及应用 .....	19
2.4.3	光伏电池 .....	20
2.4.3.1	基本工作原理 .....	20
2.4.3.2	光伏电池模块和阵列 .....	21
2.4.3.3	光伏系统结构 .....	22

2.4.4	微小型风力发电机 .....	23
2.4.4.1	水平轴风力发电机 .....	23
2.4.5	储能设备 .....	24
2.4.5.1	电池组 .....	25
2.4.5.2	超级电容器 .....	26
2.4.5.3	飞轮储能系统 .....	27
2.5	分布式发电接入配电网的技术挑战 .....	29
2.5.1	电压分布 .....	29
2.5.2	稳态和短路电流 .....	32
2.5.3	配电网保护体系 .....	32
2.5.4	电能质量 .....	33
2.5.5	分布式电源稳定性 .....	34
2.5.6	电网运行 .....	34
2.5.7	孤岛和孤岛运行 .....	35
2.6	小结 .....	42
<b>3</b>	<b>微型发电和微型电网的概念及模型 .....</b>	<b>43</b>
3.1	简介 .....	43
3.2	微电网概念的建立 .....	44
3.2.1	CERTS 微电网概念 .....	45
3.2.1.1	CERTS 微电网构架 .....	45
3.3	微电网的运行和控制结构 .....	47
3.3.1	微电网通信系统 .....	50
3.4	微型电源动态模型 .....	51
3.4.1	固体氧化物燃料电池 (SOFC) .....	52
3.4.2	单轴微型燃气轮机 (SSMT) .....	55
3.4.2.1	单轴微型燃气轮机有功控制 .....	57
3.4.2.2	单轴微型燃气轮机引擎 .....	58
3.4.2.3	永磁同步发电机 .....	58
3.4.2.4	机组侧逆变器 .....	59
3.4.3	光伏电池板 .....	60
3.4.3.1	配置最大功率点跟踪系统的光伏阵列 .....	61
3.4.4	微型风力发电机 .....	63
3.4.4.1	风力透平机 .....	63
3.4.4.2	鼠笼式感应发电机 .....	64

3.4.5	储能设备模型	65
3.4.6	并网逆变器	65
3.4.6.1	PQ 逆变器控制	67
3.4.6.2	电压源逆变器控制	68
3.4.6.3	暂态过载或短路状态下的逆变器建模	70
3.4.7	电网和负载模型	71
3.5	小结	71

## **4** 微电网紧急控制策略 ..... 72

4.1	简介	72
4.2	基于控制分类的微型电源	73
4.3	孤岛运行状态下的微电网控制	75
4.3.1	单主运行	76
4.3.2	多主运行	76
4.4	紧急策略	78
4.4.1	频率控制	78
4.4.1.1	一次调频控制	78
4.4.1.2	二次调频控制	80
4.4.2	负荷减载	81
4.4.3	电压控制	81
4.5	低压微电网故障恢复服务	84
4.5.1	传统电力系统的黑启动	86
4.5.1.1	传统电力系统故障恢复策略	87
4.5.1.2	电力系统故障恢复方案	88
4.5.1.3	电力系统故障恢复过程中的特殊问题	89
4.5.1.4	传统电力系统和微电网故障恢复比较	92
4.5.2	微电网黑启动	93
4.5.2.1	一般性假设	94
4.5.2.2	微电网黑启动顺序	95
4.6	小结	96

## **5** 孤岛和黑启动状态下的微电网紧急控制策略评估 ..... 97

5.1	简介	97
5.2	微电网测试系统	97
5.3	计划形成的孤岛运行微电网	99

5.4	非计划形成的孤岛运行微电网 .....	101
5.4.1	微电网运行场景 .....	102
5.4.2	单主控制策略 .....	103
5.4.2.1	微电网从中压系统吸收功率情况 .....	103
5.4.2.2	微电网向中压电网输送功率情况 .....	109
5.4.2.3	孤岛运行后的负荷状态 .....	111
5.4.3	多主控制策略 .....	113
5.4.3.1	微电网从中压电网吸收功率情况 .....	113
5.4.3.2	微电网向中压电网输送功率情况 .....	118
5.4.3.3	孤岛运行时的负荷状态 .....	120
5.5	微电网黑启动 .....	121
5.5.1	故障恢复初始步骤 .....	123
5.5.2	微电网黑启动程序长期过程仿真 .....	125
5.6	小结 .....	129
<b>6</b>	<b>孤岛微电网稳定性评估 .....</b>	<b>131</b>
6.1	简介 .....	131
6.2	微电网能量平衡问题 .....	131
6.3	微电网稳定性评估工具 .....	135
6.3.1	人工神经网络 .....	135
6.3.1.1	人工神经网络的训练 .....	137
6.3.2	数据集生成 .....	138
6.3.3	生成数据集数字平台建设 .....	140
6.3.4	人工神经网络结构训练 .....	140
6.3.5	防御控制措施的制定 .....	141
6.4	结果和讨论 .....	143
6.5	小结 .....	148
<b>7</b>	<b>结论 .....</b>	<b>149</b>
7.1	本书主要贡献 .....	149
7.2	未来工作建议 .....	151
<b>附录 A</b>	<b>测试系统仿真参数 .....</b>	<b>153</b>
<b>附录 B</b>	<b>动态仿真平台 .....</b>	<b>160</b>
<b>参考文献</b>	<b>.....</b>	<b>165</b>



# 1 简介

## 1.1 背景和目的

基于规模效应经济概念的电力系统发电方式已有 50 多年的发展历史，其基础是大规模的集中式发电（水电厂、火电厂和核电厂）和远距离输电技术。这种发电模式导致许多国家能源供应链过多依赖进口化石燃料或核材料。根据美国政府能源部门统计报告预测，按照当前的能源政策发展，2005~2030 年，全球能源消耗量将增加 50%，即从 2005 年的 462 千万亿 BTU（英热单位，1BTU $\approx$ 1055 焦耳）发展到 2015 年的 563 千万亿 BTU 和 2030 年的 695 千万亿 BTU；发电量将从 2005 年的 17.3Tkw·h 增长到 2015 年的 24.4Tkw·h 和 2030 年的 33.3Tkw·h，发电量几乎翻一番。该报告还预测，非经济发展合作组织（Organisation for Economic Cooperation and Development, OECD）国家的发电量将保持 4% 的年增长率，OECD 成员国将保持 1.3% 的年增长率<sup>[1]</sup>。欧盟（European union, EU）内部能源需求将持续增长，未来 25 年，进口燃料将增长 50%~70%，或更少<sup>[2]</sup>。

越来越多国家的能源需求增长将依赖进口燃料，国际政治的稳定性将直接影响其国内基本能源价格和安全。此外，不断增长的环保意识和气候变化问题也将影响一些国家的能源利用模式。事实上，能源已成为各国社会经济发展的基础，能源短缺将显著影响亿万人民的经济发展和社会福利。化石燃料和核材料供应的安全性、经济的可持续发展、气候变化等已成为一个国家制定能源政策的重要考虑因素。受这些因素的驱动，欧盟制定了一系列宏伟目标<sup>[3]</sup>：

- (1) 到 2020 年，削减温室气体（Greenhouse Gases, GHG）排放量 20%；
- (2) 到 2020 年，提高能源效率 20%；
- (3) 到 2020 年，将可再生能源应用比例提升至 20%。

发展分布式发电（Distributed Generation, DG）和可再生能源发电技术是确保目标实现的关键手段。分布式发电和可再生能源（Renewable Energy Sources, RES）涵盖了一系列技术（风电、光伏发电、燃料电池、微型燃气轮机，以及一系列最新的应用组合），并适合用户现场应用。同时，为实现有关宏伟目标，电网必须做好大规模应用和吸纳这些新兴技术的准备。大规模的分布式发电应用将改变集中发电模式，有利于环境友好型技术的消纳。这种发展模式将