



能源革命与绿色发展丛书

新疆大学“211工程”优秀学术著作出版基金资助



THE THEORY AND APPLICATION
OF MODERN ELECTRIC POWER SYSTEM
CLEAN ECONOMIC DISPATCH

现代电力系统
洁净经济调度理论与应用

袁铁江 孙谊娟 陈来军
李建林 晁勤 等

著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

能源革命与绿色发展丛书

新疆大学“211 工程”优秀学术著作出版基金资助

现代电力系统洁净经济 调度理论与应用

袁铁江 孙谊嫔 陈来军 李建林 晁 勤 魏 韩 著
张增强 常喜强 彭生江 张 龙 靖 峰 李 亮

机械工业出版社

本书主要介绍了大规模风电并网的现代电力系统洁净经济调度涉及的理论和应用技术,包括高准确度风电功率多尺度预报技术、储能技术、风火电运行成本计算、大规模风电并网电力系统的调度控制技术等,结合案例阐述了电力系统洁净经济调度对于风电发展的决定性意义。

通过本书,读者能够便捷地了解现代大规模风电并网电力系统洁净经济调度的最新进展,可为风力发电、储能技术和电力市场等相关领域的专业技术人员和政策研究人员提供参考,也可相关专业高等院校师生的学习和研究工作提供帮助。

图书在版编目(CIP)数据

现代电力系统洁净经济调度理论与应用/袁铁江等著. —北京:机械工业出版社,2016.5

(能源革命与绿色发展丛书)

ISBN 978-7-111-53754-0

I. ①现… II. ①袁… III. ①电力系统调度-经济调度-研究
IV. ①TM73

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 103820 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:付承桂 责任编辑:付承桂 张沪光

责任校对:薛娜 责任印制:常天培

北京圣夫亚美印刷有限公司印刷

2016 年 7 月第 1 版第 1 次印刷

169mm×239mm·10.75 印张·212 千字

0001—2000 册

标准书号:ISBN 978-7-111-53754-0

定价:49.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线:010-88361066 机工官网:www.cmpbook.com

读者购书热线:010-68326294 机工官博:weibo.com/cmp1952

010-88379203 金书网:www.golden-book.com

封面无防伪标均为盗版

教育服务网:www.cmpedu.com

前言

由于风电出力预测难、波动、间歇和不可控等特性，导致风电难于大规模积极、有效地调度并网，因此大规模风电并网的现代电力系统洁净经济调度成为亟待研究解决的问题。为满足广大间歇式新能源发电科技工作者的需求，我们编写了这本《现代电力系统洁净经济调度理论与应用》。

本书主要总结了新疆大学袁铁江博士/晁勤教授新能源并网技术研究团队、清华大学陈来军博士团队、国网新疆电力公司电力科学研究院、国网新疆电力公司经济技术研究院等单位多年来在风力发电并网调度技术方面的研究成果。在针对高准确度风电功率预报、利用储能平滑风电出力、风火电运行成本等影响风电并网调度关键问题研究的基础上，综合实际案例阐述了电力系统洁净经济调度对于风电发展的决定性意义，归纳出兼顾风电特性、环境保护和系统经济运行的新的电力系统调度策略。

本书的主要创新性工作体现为：构建的多尺度相互协调的调度模式不但保证了风电场计划出力能够跟踪其预报出力值，且能够自平滑风电出力预报误差、波动、间歇和反调峰等出力特性对电网的影响，在确保基于风电出力预报的风电调度计划被有效执行的同时，兼顾全网运行的经济性和安全稳定等多重优化目标，同时成功地将一个包括环境保护和经济运行等多重目标的优化问题，转化为一个类似传统电力系统经济调度的单目标优化问题；在单目标经济调度的基础上，衍生出具有实质性突破的电力系统多目标经济调度模式。通过本书，读者能够便捷地了解现代大规模风电并网电力系统洁净经济调度的最新进展，为未来国家相关标准或者规范的制定提供了一定的依据，有利于推动风电大规模并网发电和促进能源节约、环境保护和电力技术的研究和进步。

本书由新疆大学副教授、清华大学博士后袁铁江和国网新疆电力公司电力科学研究院高级工程师孙谊嫒统稿，新疆大学晁勤教授和中国电力科学研究院李建林教授负责全书的审阅。具体参与编写的人员有：袁铁江、孙谊嫒和张龙编写了第1章和第6章；袁铁江、晁勤、李建林和陈来军编写了第2章、第3章和第4章；袁铁江、孙谊嫒和晁勤编写了第5章和第6章；清华大学陈来军博士和魏韩博士负责编

写了第7章；国网新疆电力公司经济技术研究院的张增强和彭生江，主要参与了第5章关于电价部分的编写工作；国网新疆电力公司电力调度通信中心高级工程师常喜强参与了第6章的部分编写工作，并对第5章和第6章进行了校阅；中国电建集团西北勘测设计研究院高级工程师靖峰和新疆水利水电勘测设计研究院高级工程师李亮参与编写了第2章和第3章；国网新疆电力公司电力科学研究院高级工程师张龙负责了全书附录的编写和部分图表的绘制工作。

感谢新疆杰出青年自然科学基金项目、国家自然科学基金项目（51167018、51367018、51577163）、新疆大学“211工程”优秀学术著作出版基金等为本书出版提供的支持。

感谢清华大学梅生伟教授和范文慧教授、新疆大学研究生院王维庆教授对本书撰写给予的悉心指导和帮助！

感谢新疆大学电气工程学院307实验室研究生蔡高雷、李国军、张恒等在本书撰写过程中所做的资料整理等辛勤的工作。还要感谢书中引注和未曾引注的所有文献作者的辛勤工作。

大规模风电并网现代电力系统洁净经济调度的理论和应用技术有待进一步的探索和完善，囿于著者的知识和经验，书中的观点和结论难免有瑕疵，恳请读者不吝赐教！

参数与变量汇总表

变 量	单 位	名 称
a_i, b_i	/	CCP 机组 i 的发电成本系数
a_j, b_j	/	传统机组 j 的发电成本系数
a, b, c	/	火电机组的耗量特性系数
c_1	元/MW · h	单位快速启停机组容量价格
c_2	元/MW · h	单位可中断负荷容量价格
C_{ap}	MW	风电场开机容量
c_i	/	CCP 机组 i 的备用成本系数
c_j	/	传统机组 j 的备用成本系数
$C_{S \max. n}$	MW · h	第 n 个储能系统允许的最大剩余电量
$C_{S \min. n}$	MW · h	第 n 个储能系统允许的最小剩余电量
C_{tw}	MW · h	风电场全寿命周期的发电量
E_i^{Cf}	t	CCP 机组 i 预调度的 CO ₂ 捕捉量, $E^{Cf} = E_i^{Cf} , \forall i$
E_i^{Cr}	t	CCP 机组 i 再调度的 CO ₂ 捕捉量, $E^{Cr} = E_i^{Cr} , \forall i$
e_i	/	CCP 机组 i 的排放系数
e_j	/	传统机组 j 的排放系数
$e_{\max}$	/	风电绝对误差限值
e_{pk}	/	风电出力初步预报实际绝对误差
E_{pk}	/	时段 k 风电场功率预报绝对误差
E_{pk}^*	/	时段 k 风电预报出力误差预测值
$e_{w \max}$	/	风电场功率预报系统最大预报误差
$f_{wextr. k}^*$	元/MW · h	k 时段单位风电备用容量的电量成本
$f_{ccwpgcc. k}$	元/MW · h	k 时段单位风电并网条件建设补偿成本
$f_{ccwpgcc}$	元/MW · h	单位风电并网运行条件建设补偿成本
F_l^C	MW	传输线 l 的容量
$F_{\max}^C$	\$/MW · h	发电成本上界
f_{cpdo}	元/MW · h	单位风电电力发展需求成本
f_{dk}	元/MW · h	k 时段单位风电弃风运行补偿成本
$F_{\max}^E$	t/MW · h	碳排放上界

(续)

变 量	单 位	名 称
f_{ep}	元	单位风电环境损益成本
f_r	元/MW · h	单位储能投资成本
f_{Topk}	元	火电机组的营运成本
$f_{T,k}$	元	k 时段火电成本
f_{wetr}	元/MW · h	单位风电并网其他条件建设投资成本
f_{wfix}	元/MW · h	单位风电全寿命周期内固定投资成本
f_{wrc}	元/MW · h	k 时段单位风电备用容量补偿成本
i	/	CCP 索引
j	/	传统机组索引
k	/	风电场索引
k	/	可靠系数
$k_{ccwpgcc}$	/	k 时段风电并网条件建设补偿成本系数
K_j 和 t_j	/	常系数
KPI	/	节点有功裕度系数
k_{sp}	/	快速启动机组开始开机时段
K	个	风电场数
l	/	传输线索引
M	/	火电机组总数
N	/	风电场数目
n	/	研究周期时段总数
N_y	/	风电场设计使用年数
p_{pk}^*	MW	k 时段修正后的风电场短期出力预报值
p_{pk}^{**}	MW	k 时段风电功率短期预报序列值
p_{extr}^+	MW	系统正常的正事故备用
p_{extr}^-	MW	系统正常的负事故备用
$\overline{p_{pks-1h}^{after}}$	MW	后一个小时风电场预报出力均值
p_{pks-1h}^{after}	MW	计划期内 k 时段风电功率实时预报值
$\overline{p_{wm,k-1h}^{after}}$	MW	后一个小时风电日前调度计划均值
$p_{wm,k-1h}^{after}$	MW	计划期内 k 时段风电日前计划值
P_{AGC-0}	MW	AGC 机组当前出力
$P_{AGC-max}$	MW	AGC 机组当前出力下限
$P_{AGC-min}$	MW	AGC 机组当前出力上限

(续)

变 量	单 位	名 称
$p_{\text{pks}-1h}^{\text{before}}$	MW	前一个小时风电场预报出力均值
p_i^B	MW · h	CCP 机组 i 捕捉系统的固定能耗
p_{epdo}	元/MW · h	单位传统能源电能支付风电补贴费用
p_{extr}	MW	系统正常的事故备用
p_{FH}	MW	k 时段系统负荷
p_{th}	MW	系统最大负荷
$p_{\text{FHsp}, k}$	MW	k 时段可中断负荷的容量
p_j^f	MW	传统机组 j 预调度的出力, $p^f = p_j^f $, $\forall j$
$p_{\text{G}, k}$	MW	火电机组计划出力
p_i^{Gf}	MW	CCP 机组 i 预调度的总出力, $p^{\text{Gf}} = p_i^{\text{Gf}} $, $\forall i$
p_i^{Gr}	MW	CCP 机组 i 再调度的总出力, $p^{\text{Gr}} = p_i^{\text{Gr}} $, $\forall i$
p_i	/	风电备用容量调用概率
p_i^l/p_i^u	/	CCP 机组 i 的最小/最大出力
p_j^l/p_j^u	/	传统机组 j 的最小/最大出力
p_{Mi}	MW	临界状态时风电场有功出力
p_{mk}	MW	k 时段风电场实际出力值
p_i^{Nf}	MW	CCP 机 i 预调度的网侧出力, $p^{\text{Nf}} = p_i^{\text{Nf}} $, $\forall i$
p_i^{Nr}	MW	CCP 机组 i 再调度的网侧出力, $p^{\text{Nr}} = p_i^{\text{Nr}} $, $\forall i$
p_{Oi}	MW	某状态时风电场有功出力
$p_{\text{pk}, -\delta}$	MW	风电功率扩展实时预报值
p_{pk}	MW	k 时段风电场功率预报值
$p_{\text{pk}, n-25\%}$	MW	第 n 个风电场超短期预报值
p_j^r	MW	传统机组 j 再调度的出力, $p^r = p_j^r $, $\forall j$
$p_{\text{s max}}$	MW	储能系统最大充放电功率
$p_{\text{s}, n}$	MW	第 n 个储能系统充放电功率
$p_{\text{Se}, n}$	MW	第 n 个储能系统额定充放电功率
p_{se}	MW	储能系统额定充放电功率
p_{sk}	MW	k 时段储能装置平均充放电功率
p_{S}	MW	储能系统充放电功率
p_{Tep}	元/MW · h	单位火电环境损益补偿成本价格
p_{Tmax}	MW	传统能源机组出力上限值
p_{Tmin}	MW	传统能源机组出力下限值

(续)

变 量	单 位	名 称
p_T	MW	火电机组的出力
$p_{Tsp, k-1h}$	MW	后一个小时快速启停机组出力
$p_{Tsp, k}$	MW	k 时段快速启停机组出力
$p_{Tsp, \max, j, k}$	MW	k 时段第 j 个快速启停机组出力上限值
$p_{Tsp, \min, j, k}$	MW	k 时段第 j 个快速启停机组出力下限值
$p_{T, j-25\%}$	MW	第 j 个快速启停机组计划出力
$p_{T, m-0}$	MW	第 m 个火电机组当前出力
$p_{T, m-25\%}$	MW	第 m 个火电机组计划出力
$p_w \max$	MW	PCC 点电网能够接受的风电场最大容量
$p_{w, n-0}$	MW	第 n 个风电场当前出力值
p_{wbg}	元/MW · h	风电上网标杆电价
p_{wc1}	元/MW · h	备用容量的容量价格
p_{wc2}	元/MW · h	备用容量的电量价格
p_{we}	MW	风电场额定装机容量
$p_{wextr, k}$	MW	k 时段风电备用容量
p_{wfix}	元/MW · h	单位风电营运成本
p_{wr}	MW	风电场容量
$p_{w, n, k}$	MW	k 时段第 n 个风电场日前调度计划出力
p_{pk}	MW	实际风电功率值包络线序列值
q	/	负荷索引
Q_q	MW	负荷 q 的功率需求
R_i^a	%/min	CCP 机组 i 的爬坡率
R_j^a	%/min	传统机组 j 的爬坡率
r_i^c	MW	CCP 机组 i 提供的旋转备用容量, $r^c = r_i^c , \forall i$
$R_{down, k}$	/	系统负备用率
r_j^c	MW	传统机组 j 提供的旋转备用容量, $r^c = r_j^c , \forall j$
$R_{up, k}$	/	系统正备用率
s	/	场景索引
s_0	MW · h	储能装置最小剩余电量
s_k	MW · h	储能充放电量
$S_{Tsp, j}$	元	快速启停机组 j 开机费用

(续)

变 量	单 位	名 称
T	h	单位时段时长
$T_{\text{stop}, j, k-1}$	h	第 j 个快速启停机组连续停运时间
$T_{\text{Tsp max}, j, k}$	h	k 时段第 j 个快速启停机组最大开机时间
T_y	h	风电场平均年等效发电小时数
v_j	/	快速启停机组启停状态
v_k	/	不确定集合中的附加变量, $v = v_k , \forall k$
w	/	扩展不确定矢量, $w = w^r, v $
W	/	日前调度周期总的时段数
W_1	/	$+\infty$ 区调度计划期时段数
w_i^C	MW · h/tCO ₂	CCP 机组 i 捕捉单位 CO ₂ 的能耗
w_k^f	MW	风电场 k 出力预测值, $w^f = w_k^f , \forall k$
w_k^h	MW	风电场 k 出力预测区间之半, $wh_k = 0.5 (wu_k - wl_k)$
w_k^l	MW	风电场 k 出力下界
w_k^r	/	风电场 k 的实际出力, 不确定集合中的变量, $w^r = w_k^r , \forall k$
w_{total}	MW · h	全网传统形式能源年发电量
w_k^u	MW	风电场 k 出力上界
w_{wtotal}	MW · h	全网风电年发电量
x	/	预调度策略矢量, $x = p^{\text{Gr}}, p^{\text{Nr}}, E^{\text{Gr}}, r^{\text{C}}, p^{\text{f}}, r^{\text{G}} $
y	/	再调度策略矢量, $y = p^{\text{Gr}}, p^{\text{Nr}}, E^{\text{Gr}}, p^{\text{r}} $
Γ	/	不确定性的预算
Δp^*	MW	预报出力修正后的误差量
Δp_k	MW	火电机组的出力增量
Δp	MW	预报出力修正前的误差量
Δt	s	调度时段时长
$\partial, \beta, \gamma, \zeta, \lambda$	/	火电机组的排污特性系数
ϑ	/	不合理弃风情景 1 的概率
γ_i	/	CCP 机组 i 的捕捉效率
ε_r	/	总预测误差的上界
η	/	风电利润率
θ	/	不合理弃风情景 2 的概率
κ	/	风电预报误差影响因子

(续)

变 量	单 位	名 称
$\lambda_{\max}$	MW	风电出力波动极限幅值
μ_1 、 μ_2	/	可中断负荷权重系数
ξ	/	风电场总的弃风比例
$\xi_{\text{Tdown}, m, k}$	MW/min	k 时段第 m 个火电机组出力下降速度
$\xi_{\text{Tsp, down}, j, k}$	MW/min	k 时段第 j 个快速启停机组出力下降速度
$\xi_{\text{Tsp, up}, j, k}$	MW/min	k 时段第 j 个快速启停机组出力上升速度
$\xi_{\text{Tup}, m, k}$	MW/min	k 时段第 m 个火电机组出力上升速度
π_{il}	/	从 CCP 机组 i 到传输线 l 的功率转移分布因子
π_{jl}	/	从传统机组 j 到传输线 l 的功率转移分布因子
π_{kl}	/	从风电场 k 到传输线 l 的功率转移分布因子
π_{ql}	/	从负荷 q 到传输线 l 的功率转移分布因子
ρ_{T}	/	火电耗量成本系数
ψ_0	MW · h	储能最优剩余电量

目 录

前言

参数与变量汇总表

第 1 章 绪论	1
1.1 现代电力系统洁净经济调度的概念	1
1.2 大规模风电并网的现代电力系统洁净经济调度的基本问题	3
1.3 国内外研究现状与分析	5
1.4 本书的主要内容	8
参考文献	10
第 2 章 现代电力系统洁净经济调度中风电场功率预报研究	15
2.1 引言	15
2.2 基于 BP-ANN 的风电场功率预报	16
2.2.1 概述	16
2.2.2 基于 BP-ANN 的风电场功率预报建模	16
2.3 基于误差预测风电功率预报误差一次修正	18
2.3.1 基于 BP-ANN 的风电功率预报误差预测建模	18
2.3.2 基于误差预测的风电功率预报误差一次修正建模	18
2.4 基于储能技术风电功率预报误差二次修正	24
2.5 仿真测试	25
2.6 小结	29
参考文献	29
第 3 章 风电场出力预报预评估	32
3.1 引言	32

3.2 风电场出力预报预评估概念	32
3.3 风电场出力预报预评估标准或原则及其判据建模	33
3.4 风电场出力短期预报预评估判据建模	34
3.5 算例研究	36
3.5.1 基于 IEEE-30 节点 6 机测试系统算例仿真	36
3.5.2 基于某区域电网的实例应用研究	39
3.6 小结	41
参考文献	42
 第 4 章 风电场储能容量优化配比研究	43
4.1 引言	43
4.2 补偿风电功率预报误差的储能系统容量配比	44
4.3 抑制风电出力反调峰和宽幅波动的储能系统容量配比	45
4.3.1 基于电网负荷分布规律的风电反调峰判据	45
4.3.2 风电宽幅波动判据	46
4.3.3 储能系统抑制风电反调峰和宽幅波动的容量配比计算模型	49
4.4 风电并网系统经济调度中储能容量优化配比	51
4.5 风电场储能系统运行仿真软件(容量配置计算)开发及测试	53
4.5.1 风电场储能系统运行仿真软件开发	53
4.5.2 风电场储能系统容量配比规划软件(SSOAS)测试	54
4.6 小结	69
参考文献	69
 第 5 章 风电和火电运行成本	71
5.1 引言	71
5.2 风电运行成本建模	72
5.2.1 克服大比例风电并网和运行问题的措施及其对风电成本的影响	72
5.2.2 基于储能技术的风电并网条件建设补偿成本计算模型	73
5.2.3 基于储能技术并网的高穿透功率风电备用容量惩罚成本计算模型	74
5.2.4 基于储能并网的高穿透功率风电弃风运行补偿成本计算模型	78
5.2.5 风电并网对电力市场和政策的挑战及对风电成本的影响	78
5.2.6 风电 CPDO 计算模型	79

5.2.7 风电运行价值计算模型	80
5.3 火电运行成本建模	81
5.4 小结	83
参考文献	84
第6章 大规模风电并网现代电力系统单一目标洁净经济调度	86
6.1 引言	86
6.2 大规模风电并网现代电力系统调度计划的标尺体系构建	87
6.2.1 广域时间尺度上风电出力特性及对电网调度计划的影响	87
6.2.2 基于误差分层平抑的风电出力预报误差带标尺体系构建	89
6.2.3 风电并网系统调度多维标尺体系构建	90
6.3 大规模风电并网现代电力系统单一目标洁净经济调度计划建模	92
6.3.1 日前调度计划建模	92
6.3.2 $+\infty$ 调度计划建模	95
6.3.3 $+\delta$ 调度计划建模	97
6.3.4 25% 调度计划建模	97
6.4 遗传算法	99
6.5 基于某区域电网的算例仿真测试	101
6.5.1 算例介绍	101
6.5.2 日前调度计划	104
6.5.3 $+\infty$ 调度计划和 $+\delta$ 调度计划	107
6.5.4 25% 调度计划	109
6.6 小结	113
参考文献	113
第7章 大规模风电并网现代电力系统多目标洁净经济调度	116
7.1 引言	116
7.2 数学建模	117
7.2.1 CCPs 建模	117
7.2.2 风电不确定性建模	118
7.2.3 鲁棒洁净经济调度计划建模	119
7.3 解决方案	121
7.4 案例研究	126
7.4.1 PJM5 节点系统	126

7.4.2 IEEE 118 节点系统	131
7.5 小结	134
参考文献	135
附录	138
附表1 日前调度计划	138
附表2 快速启停机组计划	141
附表3 计及快速启停机组的 $+\delta$ 调度增量计划	142
附表4 计及快速启停机组的 $+\delta$ 调度计划	145
附表5 25% 调度增量计划	149
附表6 基于 $+\delta$ 和 25% 计划的实际出力计划	152
附表7 F1 风电场配套储能系统充放电基值	155
附表8 F2 风电场配套储能系统充放电基值	156

第 1 章

绪 论

1.1 现代电力系统洁净经济调度的概念

当前,人类面临着越来越严峻的能源短缺和环境污染的困局。自从第一次工业革命以来,支撑人类社会发展的能源主要以煤炭、石油和天然气等化石能源为主。化石能源的大规模开发和利用逐渐累积产生了两个方面的问题:

(1) 能源短缺

化石能源的可采储量逐年减少,可以预见的是,按照当前人类社会经济发展对化石能源的需求量和消耗速度,化石能源的枯竭的前景越来越清晰,据测算全球化石能源剩余可开采储量总计约 900 亿余吨标准煤,乐观的最长可开采时间约 100 年左右,也就是说如果没有其他替代手段,到 22 世纪初,人类社会将不再能够获得可靠的化石能源供给。因此,支撑人类社会可持续发展的能源供给问题必须解决。

(2) 环境污染

伴随着化石能源的开采和使用过程,大量的固体、液体和气体废弃物被排放到地表及其临近空间,导致人类赖以生存的土壤、水体和大气环境被污染,严重威胁人类社会的可持续发展。进入 21 世纪后,在我国北京等地反复出现的严重雾霾天气,就是这种问题的集中反映,也警示我们环境污染问题的解决已经刻不容缓。

幸运的是人类正走在解决这些问题的正确道路上,大规模发展清洁可再生的风电和光伏等电能(本书主要以风电并网系统为依据来论述环境经济调度问题,后文均以风力发电为论述依据),大规模替代传统上依靠燃烧煤炭、石油和天然气等化石能源产生的电能,逐步减少直至停止对化石能源的依赖,既可以确保能源的永续供给,又可以克服能源供给产生的环境污染问题。

然而,风电替代化石电能是一个发展和渐进的过程,体现为风电在总的电能供给中的比例的逐渐提高。随着风电并网比例的提高,风电出力具有的间隙和波动等特性,对现代电力系统的安全稳定、电能质量和经济运行等方面的影响也逐渐增强,相应的解决措施也不同。

在 20 世纪末期至 21 世纪第一个十年,风电并网比例较低,风电穿透功率鲜有

超过 30% 的,通过行政管制等方法可以确保风电全额调度并网,风电并网产生的问题一般都通过强化电网网架结构、优化系统策略和提高传统化石电源的旋转备用等措施来消弭。

进入 21 世纪的第二个十年,尤其是近年来,随着风电大规模的发展,风电的成本也随之大幅度降低,在部分国家与地区甚至与传统的化石能源电源的成本相差无几,风电的穿透功率急剧增加,单纯依靠管制的方法确保风电并网的局限性逐渐暴露,为了确保电力系统的安全稳定运行,大规模的弃风限电现象时有发生,并且大有愈演愈烈之势。2015 年 9 月 28 日,在大风呼啸的情况下,国内某大型风电场弃风限电创下 79% 的惊人比例,损失电量 1304 万 $\text{kW} \cdot \text{h}$,直接经济损失 600 余万元。事实上,大规模的风电消纳一直都是世界性难题,这只是高穿透功率背景下,我国和世界范围内风电消纳困境的一个缩影。大规模的弃风限电对电源企业生产经营会造成负面影响,然而,如果不顾电网运行约束强制风电并网消纳,电网的安全稳定运行较易受到威胁。

显然,在消纳不力的背景下,一味强化风电装机容量目标,进一步提高风电穿透功率,只会进一步恶化弃风限电趋势,在造成大量社会资源浪费的同时,也难以实现以风电替代化石能源达到节能减排的目标。在风电高穿透功率背景下,不能从电源侧解决风电出力特性与电网安全稳定运行对电源出力可控可调要求之间的矛盾,继续通过行政管制等手段强制风电并网消纳,也无异于饮鸩止渴,既难以从技术上保证并网消纳目标的实现,又很难真正实现节能减排目标的达成。比如,这种情况下,大规模风电并网容易形成“挤出效应”,极端情况下常规火电机组不得不喷油运行,系统运行的经济和节能减排目标均难以保证。

风电属于清洁可再生能源,是解决日益严峻的能源枯竭和环境污染挑战时的必然选择。在高穿透功率背景下,传统的电能价格形成机制下,电价不能反映风电的清洁属性,传统电力系统经济调度手段,侧重于系统运行的经济性目标的达成,无法保证风电并网发电。在高穿透功率背景下,传统的行政管制干预下的调度策略,不能反映风电的间隙和波动等特性对系统运行约束的影响,侧重于系统运行的节能减排目标的达成,无法保证现代电力系统安全稳定、电能质量优质和经济性等运行目标的实现。在高穿透功率背景下,能够充分反映传统电力系统经济调度的公平竞争属性,又能够兼顾传统的行政管制干预下的调度策略的节能减排目标的新的现代电力系统调度策略——现代电力系统环境经济调度或者现代电力系统洁净经济调度策略应运而生。

本书所定义的现代电力系统洁净经济调度的概念可以表述为,在高穿透功率背景下,通过储能等技术手段或者方法,风电等各种间歇式电源能够有效消弭其自身对电网的威胁,相应的成本视为风电等间歇式电源的成本,各种形式的电能价格均计及了建设和运行等内部成本,也考虑了能源生产所产生的环境污染和资源消耗等