

21世紀永續能源叢書

風力發電技術

張希良 ■ 主編

郭興家 張勝雄 林矩民 ■ 編修

Wind Energy
Generation Technology



21 Century Sustainable
Energy Series

21世紀永

風力發電技術

張希良 ■ 主編

郭興家 張勝雄 林矩民 ■ 編修

*Wind Energy
Generation Technology*



*21 Century Sustainable
Energy Series*

風力發電技術/張希良主編--初版--
臺北縣中和: 新文京開發, 2007.09
面; 公分 --(21世紀永續能源: 4)
ISBN 978-986-150-727-9(平裝)

1.風力發電

448.165

96017027

21・世・紀・永・續・能・源・叢・書
21 Century Sustainable Energy Series

風力發電技術

Wind Energy Generation Technology

書 號 ◆ TE04
主 編 ◆ 張希良
編 修 者 ◆ 郭興家 張勝雄 林矩民
出 版 者 ◆ 新文京開發出版股份有限公司
地 址 ◆ 235-57 台北縣中和市中山路二段 362 號 9 樓
電 話 ◆ (02)2244 8188
傳 真 ◆ (02)2244 8189
E-mail ◆ service@wun-ching.com.tw
網 址 ◆ www.wun-ching.com.tw
郵政劃撥 ◆ 戶名／新文京開發出版股份有限公司
帳 號／1958730-2
初 版 ◆ 2007 年 9 月 20 日
國際書號 ◆ ISBN／978-986-150-727-9
法律顧問 ◆ 蕭雄淋 律師

建議售價：390 NTD

編修、編著者簡介

主編

張希良

學歷

清華大學博士研究畢業

能源經濟博士學位

經歷

清華大學能源環境經濟研究院副教授

中國能源系統分析研究室副主任

清華大學國際技術轉移中心副主任

中國能源研究會農村能源專業委員副主任

繁體版編修

郭興家

學歷

成功大學機械工程研究所博士

逢甲大學自動控制研究所碩士

經歷

台灣機械公司工程師

吳鳳技術學院機械科主任

高雄師範大學工教係教授兼電腦中心主任

成功大學系統及船舶機電系教授、系主任、所長

財團法人金屬工業研究發展中心執行長

張勝雄

學歷

國立中央大學光電博士

經歷

遠東技術學院電機系副教授

遠東技術學院電機系主任

遠東技術學院電子系主任

台北科技大學兼任講師

中原大學物理系專任助教

同欣電子工廠專案工程師

中央大學大氣物理系專任研究助理

台達電子公司光電系統工程師

台南縣創新技術服務中心技術顧問團指導員
電力電子甲級、乙級證照監評委員

林矩民

學歷

成功大學電機工程學士

經歷

遠東科大學電機系助理教授

成功大學電機系研究助理

國防大學中正理工學院教官



出版前言

能源是人類社會存在與發展的物質基礎。過去 200 多年，建立在煤炭、石油、天然氣等化石燃料基礎上的能源體系極大地推動了人類社會的發展。然而，人們在物質生活和精神生活不斷提高的同時，也越來越感悟到大規模使用化石燃料所帶來的嚴重後果：資源日益枯竭，環境不斷惡化，還誘發了不少國與國之間、地區之間的政治經濟糾紛，甚至衝突和戰爭。因此，人類必須尋求一種新的、清潔、安全、可靠的永續能源系統。

台灣地狹人稠，目前石化能源泰半仰賴進口，不僅面臨能源價格波動影響民生經濟，同時也面臨日益嚴峻的環境惡化的衝擊。因此，對台灣而言，發展永續能源是一項走出困境的契機。

大陸在經濟急速成長的同時也面臨了化石燃料資源有限以及環保要求日益提高的挑戰。面對這樣的能源發展形勢，化學工業出版社組織了一批知名學者和專家，編撰這套《21 世紀永續能源叢書》。新文京有鑑於台灣對永續能源發展的需求，特別予以引進，並委聘張勝雄教授組織十餘位在台灣任教於大學、科大、技術學院的教授們合力編修為繁體字版。

本叢書共計六冊，包括：能源與永續發展、太陽能發電技術與應用、核能開發與應用、風力發電技術、氫能——21 世紀的綠色能源、生質能源——綠色黃金開發技術等。內容十分廣泛、豐富和充實，包括資源評價，新的工藝技術特性介紹，開發應用中的經濟性和環境影響，還涉及到推廣應用和產業化發展中的政策和機制等。

在能源領域中，這套叢書無論在深度和廣度上都具有相當的學術水準和實用價值，不僅為能源工作者提供了豐富的能源科學技術方面的專業知

識、資訊和綜合分析的政策工具，而且也能使廣大讀者更好地瞭解當今世界正在走向一個永續發展的、與環境友好的能源新時代，因此值得一讀。

本叢書適合做為大專院校能源相關課程教材，以及相關研究及從業人員自修的參考。

文京出版機構 謹識

（本文係依王大中院士前言修改）



序

風能是太陽能的一種轉化形式，是一種不產生任何污染物排放的可再生的自然能源。

風能開發利用已有數千年的歷史。在蒸汽機發明以前，風能就曾作為重要的動力，用於船舶航行、提水飲用和灌溉、排水造田、磨面和鋸木等。在幾千年前，埃及的風帆船就在尼羅河上航行。中國是最早使用帆船和風車的國家之一，至少在三千年前的商代就出現了帆船。唐代有「乘風破浪會有時，直掛雲帆濟滄海」的詩句，可見那時風帆船已廣泛用於江河航運。方以智著的《物理小識》記載有：「用風帆六幅，車水灌田，淮陽海皆為之」，描述利用風車驅動水車灌田的場景。

受化石能源資源日趨枯竭、能源供應安全和保護環境等的驅動，自 20 世紀 70 年代中期以來，世界主要發達國家和一些發展中國家都重視風能的開發利用。特別是自 20 世紀 90 年代初以來，現代風能最主要的利用形式——風力發電的發展十分迅速，世界風電機裝機容量的年平均增長率超過了 30%，從 1993 年的 216 萬千瓦上昇到 2003 年的 4030 萬千瓦。

與此同時，限制風能大規模商業開發利用的主要因素——風力發電成本在過去的 20 年中有了大幅的下降。隨風力資源不同、風電場規模不同和採用技術不同，風力發電成本也有所不同。目前，低風力發電成本已降至 3~5 美分/千瓦時，高風力發電成本也降到 10~12 美分/千瓦時。到 2010 年，它們將分別降到 2~4 美分/千瓦時和 6~9 美分/千瓦時，達到和化石能源發電相競爭的水平。

隨著風能這一態勢的發展，世界風電機的裝機容量到 2020 年預計會達到 12.45 億千瓦，發電量占世界電力消費量的 12%。因此，風能將是 21 世紀最有發展前景的綠色能源，是人類社會經濟可持續發展的主要新動力源。

本書介紹了風能最主要的利用形式——風力發電的原理和技術，概要描述了世界風能開發利用的歷史、現狀和發展趨勢，總結了中國、歐盟、美國和印度風能開發利用的實踐和經驗，介紹了鼓勵風能開發利用的主要政策工具與制度安排，論述了風能開發利用在實現社會經濟可持續發展和保護環境中的作用。

本書共分 7 章，由北京清華大學能源環境經濟研究院和核能與新能源研究院的研究人員編寫：第 1 章由張希良編寫；第 2 章由張希良、汪婧編寫；第 3 章由汪婧、鄭彤編寫；第 4 章由陳榮、鄭彤編寫；第 5 章由美國加州大學柏克萊分校的 Joanna Lewis（清華大學高級訪問學者）編寫，陳榮、戴凌燕翻譯；第 6 章由王本編寫；第 7 章由戴凌燕譯編。繁體字版由郭興家、張勝雄、林矩民三位教授編修，使本書成為適合台灣相關課程教學使用的教材，並提供台灣讀者更廣泛認識世界風能發電發展現況。

編修者 謹識

目 錄

Chapter 1 技術、制度與世界風能發展 1

- 1.1 人類開發利用風能的歷史 2
- 1.2 開發利用風能的動因 4
 - 1.2.1 經濟面 4
 - 1.2.2 環境面 5
 - 1.2.3 社會面 6
 - 1.2.4 技術面 6
- 1.3 世界風能開發現狀與展望 6
- 1.4 世界鼓勵風能開發利用的政策措施 9
 - 1.4.1 長期保護性電價 9
 - 1.4.2 再生能源配比制政策 10
 - 1.4.3 公共利益基金 12
 - 1.4.4 招投標政策 13
- 1.5 中國大陸風能發展需要制度創新 14
 - 1.5.1 國家目標制度 14
 - 1.5.2 長期保護性電價制度 14
 - 1.5.3 電網企業社會普遍服務制度 15
 - 1.5.4 財政專項資金制度 15
 - 1.5.5 石化燃料稅制度和再生能源稅收減免制度 15

Chapter 2 風力發電原理和技術 17

- 2.1 風與風能的形成 18
- 2.2 風能的基本特徵 18

2.2.1	風速	19
2.2.2	風級	19
2.2.3	風能密度	20
2.2.4	風能的計算	21
2.3	風力發電原理	22
2.4	風力發電機安裝場地選擇	28
2.5	風力發電系統的種類	29
2.6	風力發電技術的經濟性	31
2.6.1	微小型離網風力發電技術	31
2.6.2	中大型併網風力發電技術	32
2.7	風力發電技術的發展趨勢	34
2.7.1	單機容量增大	34
2.7.2	風力發電機槳葉的變化	34
2.7.3	塔架高度上升	36
2.7.4	控制技術的發展	36
2.7.5	海上風力發電	36

Chapter 3 中國風力發電發展 37

3.1	中國的風能資源	39
3.1.1	影響中國風能資源的因素	39
3.1.2	中國風能資源的特點	43
3.1.3	中國風能資源的區劃	45
3.2	離網戶用小型風力發電	51
3.2.1	行業發展歷程	51
3.2.2	產業現狀	54

- 3.2.3 機組的技術特點及參數 56
- 3.2.4 潛在市場及發展趨勢 58
- 3.2.5 障礙與問題 65
- 3.2.6 政策與建議 66
- 3.3 併網風力發電 68
 - 3.3.1 產業發展歷程 68
 - 3.3.2 產業發展現狀 71
 - 3.3.3 潛在市場及發展趨勢 78
 - 3.3.4 新疆達坂城風力發電廠 80
 - 3.3.5 廣東南澳風力發電廠 81
 - 3.3.6 內蒙古輝騰錫勒風力發電廠 81
 - 3.3.7 障礙與政策 84

Chapter 4 歐盟風力發電發展 89

- 4.1 丹麥——世界風機生產基地 90
 - 4.1.1 發展風力發電的背景 90
 - 4.1.2 風力資源 91
 - 4.1.3 風力發電發展成就 92
 - 4.1.4 風機產業的發展現狀 93
 - 4.1.5 政策環境 96
 - 4.1.6 風力發電產業的發展前景和困難 99
- 4.2 德國——世界風力發電的領頭羊 99
 - 4.2.1 發展背景 99
 - 4.2.2 風力資源 101
 - 4.2.3 風力發電現狀 101
 - 4.2.4 風力發電技術的發展 105

- 4.2.5 鼓勵政策 107
- 4.3 英國——大步前進中的風力發電產業 109
 - 4.3.1 發展背景 109
 - 4.3.2 風力資源 110
 - 4.3.3 風力發電現狀 110
 - 4.3.4 鼓勵政策 111

Chapter 5 美國風力發電 123

- 5.1 美國風能利用歷史 124
- 5.2 加州的風力發電開發 126
 - 5.2.1 加州風力發電開發的政策經驗 126
 - 5.2.2 加州風力發電產業的衰落 129
 - 5.2.3 小型風機在加州的發展 129
- 5.3 美國風力發電利用的趨勢 130
 - 5.3.1 再生能源配額制 131
 - 5.3.2 美國風能產業 133
 - 5.3.3 海上風力發電開發 134
 - 5.3.4 未來發展方向 135
- 5.4 中美在風力發電行業的合作 136
 - 5.4.1 政府間的技術交流 136
 - 5.4.2 商業合作 139
 - 5.4.3 技術轉移 139

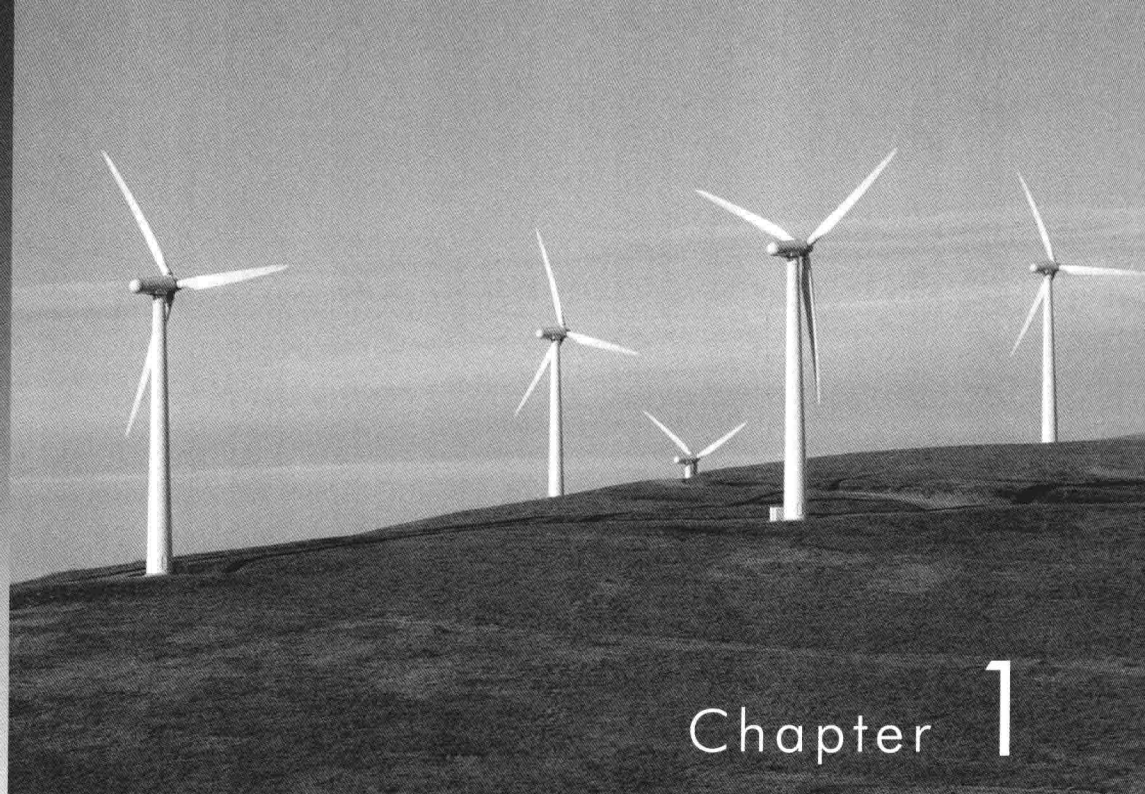
Chapter 6 印度的風能利用 143

- 6.1 印度風能利用概述 144**
 - 6.1.1 印度的風力資源 144
 - 6.1.2 印度風力裝置容量 145
 - 6.1.3 環境與社會效益 147
- 6.2 印度風能發展的歷史回顧 147**
- 6.3 印度風能發展現狀 149**
- 6.4 印度政府相關的鼓勵政策 150**
 - 6.4.1 財政支持政策 150
 - 6.4.2 實行租賃政策 151
 - 6.4.3 發揮民營企業的作用 152
 - 6.4.4 實行新的鼓勵措施 152
- 6.5 印度政府推動風能利用的具體措施 153**
 - 6.5.1 推廣示範開發 153
 - 6.5.2 制定綜合指導方針 153
 - 6.5.3 建立風能創業園區 154
 - 6.5.4 建立風能技術中心 154
 - 6.5.5 風力發電專案的審核 155

Chapter 7 風能政策設計 157

- 7.1 風能政策分類和評估準則 158**
 - 7.1.1 風能政策工具分類 158
 - 7.1.2 政策評估準則 158
- 7.2 主要風能政策簡介 163**
 - 7.2.1 長期保護性電價 163

7.2.2	配比制	167
7.2.3	公共利益基金	170
7.2.4	特許權招標	173
7.3	各國風能政策實施比較	175
7.3.1	美國	177
7.3.2	德國	178
7.3.3	丹麥	180
7.3.4	荷蘭	181
7.3.5	英國	181
7.3.6	印度	183
7.3.7	共性分析	185
	參考文獻	187



Chapter 1

技術、制度與世界風能發展

- 1.1 人類開發利用風能的歷史
- 1.2 開發利用風能的動因
- 1.3 世界風能開發現狀與展望
- 1.4 世界鼓勵風能開發利用的政策措施
- 1.5 中國大陸風能發展需要制度創新