

“十三五”国家重点出版物出版规划项目

能源革命与绿色发展丛书

智能电网关键技术研究与应用丛书

大规模 风电基地

网源协调 控制技术

马世英 陈得治 王青 等著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

“三五”国家重点出版物出版规划项目

能源革命与绿色发展丛书

智能电网关键技术研究与应用丛书

大规模风电基地网源 协调控制技术

马世英 陈得治 王 青 汪宁渤 宋墩文

著



机械工业出版社

大型风电基地规模化建设、集中式接入,并通过特高压/高压交、直流输电系统大容量、远距离送至负荷中心进行消纳是中国风电特有的开发模式。但是,由于风电具有不同于火电等常规电源的特性,因此集中式接入与输送的电网风险凸显,安全防御难度加大。

本书立足于我国大型风电基地交、直流输送工程,计及风电不同于常规电源的波动特性、涉网特性以及电力电子化特征等,分析大型风电基地集中接入、特高压/高压交、直流外送的电网运行特性,梳理电网存在的运行风险。针对风险的防控,提出大型风电基地交、直流外送系统有功频率、无功电压、弱阻尼等问题的优化控制技术,提升电网暂态稳定性、电压稳定性以及防控风电规模化脱网的电网二、三道安全防线的紧急控制技术,增强风火打捆不同类型电源涉网性能与电网协调性的网源协调控制技术,以及充分利用特高压/高压直流快速可控特点的直流送风电的调控技术。基于上述特性与控制的成果,探讨构建大型风电基地交、直流外送安全防御系统的设计原则、组织架构、主要功能模块与关键技术等。本书部分成果已用于实际大型风电基地输电工程中,提升了电网安全防御性,促进了风电规模化的消纳。

本书可供从事电力系统规划、运行、控制及管理工作的工程技术人员学习使用,也可作为高校电气工程专业教材和从事电力系统专业领域研究工作人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

大规模风电基地网源协调控制技术/马世英等著. —北京:机械工业出版社, 2018. 7

(能源革命与绿色发展丛书·智能电网关键技术研究与应用丛书)

“十三五”国家重点出版物出版规划项目

ISBN 978-7-111-60621-5

I. ①大… II. ①马… III. ①风力发电-电网-协调控制 IV. ①TM614

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第178190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:翟天睿

责任校对:刘志文 封面设计:马精明

责任印制:张博

三河市宏达印刷有限公司印刷

2019年1月第1版第1次印刷

184mm×260mm·17.5印张·2插页·424千字

0 001—2 600册

标准书号:ISBN 978-7-111-60621-5

定价:118.00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

封面防伪标均为盗版

教育服务网:www.cmpedu.com

前 言

中国风电虽然起步较晚，但装机容量增长速度最快，规划建设八个千万千瓦级风电基地除江苏、山东以外全部集中在风能资源丰富的三北地区，但中国的负荷中心主要集中在自然条件较好、人口稠密的东南沿海地区，即使是三北地区的负荷中心也远离风电基地，因此，形成了风电资源与负荷的逆向分布。大型风电基地距离负荷中心较远，需通过特高压/超高压交、直流将风电电力大容量、远距离输送至负荷中心进行消纳，风电以基地形式大规模建设、集中接入，并通过特高压/超高压交、直流系统送至负荷中心已成为了中国风电的主要开发模式之一。

大型风电基地与特高压/超高压交、直流系统耦合作用，其运行防控需深入研究。首先，风电功率的不确定性可能会导致系统出现数百万千瓦的随机功率缺额，对电网的安全稳定运行构成一定威胁。同时风电具有弱无功支撑、低故障穿越能力、与系统松耦合等电力电子化特征，决定了风电的涉网特性不同于火电等常规电源，大规模接入后给电网安全稳定运行带来的影响也具有特殊性；另一方面，中国虽然大力开展特高压交、直流建设，但由于直流系统的配套火电、水电等常规电源建设滞后，交、直流系统建设步调不同步等原因，中国电网的建设仍处于过渡期，过渡期电网呈现“强直弱交”特征，集中接入的规模化风电与“强直弱交”电网耦合作用，电网运行风险愈加凸显，控制难度进一步加大。风电作为可再生能源虽然需要充分利用，但受电网传输能力和电网安全稳定约束等制约，存在风电接入及送出受限等问题，导致弃风等现象的出现，系统经济性难以保证，这种情况在实际的新疆、甘肃等地大型风电基地外送工程中已存在，从一定程度上制约了风电的发展。

为解决大规模风电基地特高压/超高压交直流系统大容量、远距离外送的电网安全问题，进一步促进风电大规模的消纳，急需计及大规模风电的涉网特性及与大电网的交互耦合作用，从网源协调角度研究大规模风电基地交、直流外送的协调控制等若干关键技术，在此基础上，研发大规模风电基地交、直流外送的协调控制及安全防御系统，以提高大型风电基地输送的安全稳定水平，提升风电的送出及消纳能力。

在本书编写过程中，申洪、罗煦之、侯俊贤、董毅峰、万磊、宋新立、吴国旻等提供了有益的帮助，研究生逢博、方攀宇、陈赟、吕思昕、黄国林、陈钊、孟琛等完成了书中的部分算例，在此谨对他们表示衷心的感谢！

目 录

前 言

第 1 章 中国风电大规模发展模式	1
1.1 中国风电发展情况概述	1
1.2 大型风电基地开发实例	2
1.2.1 酒泉风电基地开发实例	2
1.2.2 宁夏风电基地开发实例	5
1.2.3 新疆哈密风电基地开发实例	9
1.3 面临的问题与挑战	12
1.3.1 大型风电基地交、直流外送的协调优化控制问题	12
1.3.2 大型风电基地交、直流外送的安全稳定紧急控制问题	12
1.3.3 大型风电基地交、直流外送的网源协调运行问题	12
1.3.4 大型风电基地交、直流外送的新技术控制问题	13
1.3.5 大型风电基地交、直流外送的安全稳定控制应用系统建设问题	13
第 2 章 机组和直流系统基本特性及仿真建模	14
2.1 风电机组基本特性及仿真建模	14
2.1.1 风电机组基本特性	14
2.1.2 风电通用部分模型	16
2.1.3 固定转速风电系统	22
2.1.4 双馈风电系统	23
2.1.5 直驱风电系统	32
2.1.6 风电场聚合模型	36
2.2 火电机组基本特性及仿真建模	39
2.2.1 励磁系统	39
2.2.2 调速系统	50
2.2.3 涉网保护	54

2.3 直流系统特性及仿真建模	64
2.3.1 直流系统特性	66
2.3.2 直流系统模型概述	69
2.3.3 直流系统机电暂态模型	74

第3章 大型风电基地交、直流外送系统的优化控制

3.1 引言	86
3.2 大型风电基地接入的频率优化控制技术	86
3.2.1 大型风电基地接入的系统频率特性	87
3.2.2 大型风电基地接入的系统频率优化控制	100
3.3 大型风电基地接入的电压优化控制技术	111
3.3.1 风电接入无功电压特性及控制原理	112
3.3.2 大型风电基地高压交、直流输电系统无功配置情况	116
3.3.3 输电通道多 FACTS 的无功电压响应控制	117
3.3.4 平抑电压波动的多类型无功设备协调控制策略	124
3.4 大型风电基地外送的系统阻尼优化控制技术	128
3.4.1 阻尼特性分析原理及风电接入影响	129
3.4.2 大型风电基地外送的系统阻尼特性	132
3.4.3 提升风电基地外送系统阻尼特性的优化策略	139
3.5 提升输送风电平滑性的协调优化控制策略	141
3.5.1 风火打捆交流外送通道输电极限	141
3.5.2 交、直流输送波动性风电的电力优化组织策略	141

第4章 大型风电基地交、直流外送系统的紧急控制技术

4.1 引言	147
4.2 大型风电基地外送暂稳特性及风火协调切机策略	148
4.2.1 风电基地外送典型系统的暂态稳定性	148
4.2.2 大型风电基地外送的暂态稳定性	157
4.2.3 提升暂态稳定性的风火协调切机策略	161
4.3 大型风电基地外送的电压安全问题紧急控制策略	169
4.3.1 直流换相失败暂态过电压特性及控制	169
4.3.2 直流闭锁后暂态过电压特性分析及控制	175
4.4 风电大规模脱网的紧急控制策略	179
4.4.1 风电大规模脱网下的电网运行风险	179
4.4.2 应对风电脱网下电网运行风险的策略	181
4.5 大型风电基地外送第三道防线适应性分析及优化	186
4.5.1 风电接入高周切机适应性分析及优化	186
4.5.2 风电接入振荡解列适应性分析及优化	195

第 5 章	提高火电机组网源协调性能的调控技术	202
5.1	引言	202
5.2	应对风电波动的火电机组频率调控技术	202
5.2.1	风速波动下火电机组的一次调频特性	202
5.2.2	应对风机脱网的频率紧急调控策略	206
5.3	应对风电波动的火电机组电压调控技术	212
5.3.1	风电接入对系统调压特性的影响	212
5.3.2	火电机组调压特性	213
5.3.3	应对风机脱网的电压调控策略	215
5.4	火电机组涉网保护的协调优化配置技术	219
5.4.1	低励限制	219
5.4.2	过励限制	226
5.4.3	超速保护	230
5.4.4	失步保护	238
第 6 章	提升大型风电基地外送安全性的直流附加控制技术	246
6.1	引言	246
6.2	直流附加控制技术概述	246
6.3	提升风电外送暂态稳定性的直流紧急控制技术	249
6.4	平抑风电外送弱阻尼振荡的直流功率调制技术	252
6.5	响应风电功率波动的直流频率调制技术	256
6.6	提升风电脱网安全性的直流紧急控制技术	259
第 7 章	风火打捆交、直流源网协调安全稳定控制系统架构	263
7.1	系统建设的必要性	263
7.2	系统设计原则	263
7.2.1	指导思想	263
7.2.2	安全稳定运行原则	264
7.2.3	输电能力最大化原则	264
7.2.4	新能源出力优先原则	264
7.2.5	协同配合控制原则	264
7.2.6	资源整合及复用原则	265
7.3	控制系统架构	265
7.3.1	总体架构	265
7.3.2	调度中心站	265
7.3.3	协调控制主站	266
7.3.4	控制子站	267

7.3.5 执行站	267
7.4 系统关键技术	267
7.4.1 数据整合及模型处理	267
7.4.2 可控制区域生成	267
7.4.3 在线安全预警	267
7.4.4 辅助决策与校正控制	268
7.4.5 新能源接纳能力评估	269
7.5 系统对外接口	269
7.5.1 与调度自动化系统接口	269
7.5.2 与风光预测系统接口	269
7.5.3 与风电有功功率控制系统接口	269
7.5.4 与安全稳定控制系统接口	269

第 1 章

中国风电大规模发展模式

1.1 中国风电发展情况概述

随着中国经济的高速发展，能源需求快速增长，长期以来，中国能源消费结构以煤炭为主，导致了我国主要污染物排放指标居高不下。中国政府承诺，单位 GDP 二氧化碳排放、非化石能源占一次能源消费的比例要大幅降低，这对于中国清洁能源的发展规模和速度提出了空前的期望和要求。因此，进一步加快发展水电、风电和太阳能等可再生能源成为履行承诺的必然选择。在可再生能源中，水电的开发技术最成熟，目前具备条件的水电项目基本已经开发、正在开发或准备开发，新规划的水电项目面临着土地资源、环境保护、生态保护和移民搬迁等因素的制约，尤其是国际河流的水电项目开发更是面临着国际环境的制约，进一步增加水电开发规模存在着很大的不确定性。风电是除了水电以外开发技术最成熟、成本最低的可再生能源，也是最具大规模开发价值的可再生能源。随着国际市场化石能源价格的不断上涨，风电成本已经与传统火电、核电成本接近，低于生物质、太阳能等其他可再生能源的发电成本。近年来，随着风电设备制造水平的不断提高，大规模开发的规模效益逐步显现，中国风电的建设成本已经开始呈现逐年下降的趋势。

中国风电虽然起步较晚，但装机容量增长速度最快，已在甘肃、内蒙古、新疆、河北、吉林、江苏沿海及海上规划建设了多个千万千瓦级风电基地。另外，中国还批准了多个百万千瓦级风电基地，多个省份也分别批准了大批 50MW 级风电项目，未来中国风电高速发展的态势仍将延续。中国风电资源丰富的地区大多远离负荷中心，当地电网结构薄弱、接纳风电的能力弱，采用大规模集中开发、集中接入，并通过特高压/超高压交、直流系统远距离输送至负荷中心消纳已经成为了中国风电的主要开发模式之一。

单个风电场或需要集中送出的风电总装机容量规模越来越大，接入电网的电压等级越来越高，交、直流输送的距离越来越远，风电设备制造技术水平较低，风电并网及送出矛盾极其突出。

1.2 大型风电基地开发实例

1.2.1 酒泉风电基地开发实例

1.2.1.1 风电场分布位置及容量

甘肃是全国风能资源较丰富的省份之一。甘肃风能资源主要集中在河西地区，酒泉位于甘肃省河西地区的西端，总面积为 19.2 万 km^2 ，约占全国总面积的 2%。根据中国气象局风能资源评估报告，甘肃酒泉 50m 高度风能资源三级以上的面积为 4.7 万 km^2 ，潜在开发量约 210GW，可开发装机容量约 82GW，位居中国前列。

酒泉风电基地开发区域北部是以马鬃山为代表的北山山系，中部为平坦的沙漠戈壁，南部为祁连山脉，两山夹一谷的地形成为东西风的通道。区域风速主要集中在 4.0 ~ 12.0m/s，年平均风速为 5.0 ~ 6.5m/s，年有效风能储量在 800kWh/ m^2 以上，年平均有效风能密度在 150W/ m^2 以上，年有效风速利用小时数在 6000h 以上，另外，该地区具有工程地质条件好、戈壁荒滩地多、地势平坦、交通运输便利等优越条件，是中国适宜建设大型风电场的区域之一，酒泉风电基地的开发主要集中在玉门、瓜州、马鬃山三个区域。甘肃风能资源分布如图 1-1 所示。

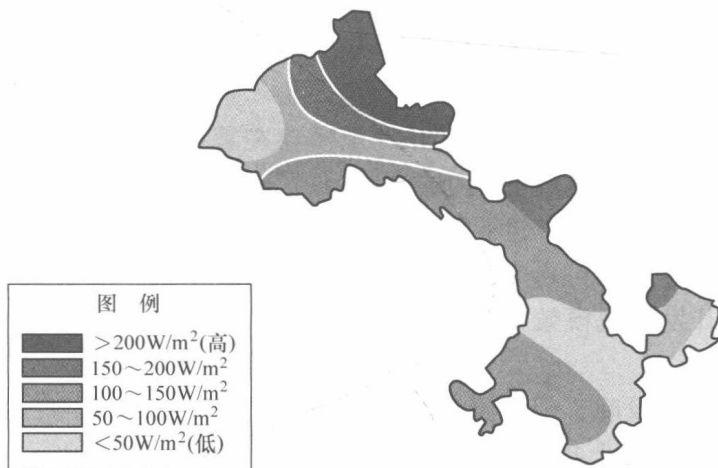


图 1-1 甘肃风能资源分布图

酒泉风电基地一期规划总装机容量 5160MW，2010 年左右建成投运；二期规划总装机容量 8000MW，2015 年左右建成投运。酒泉风电采用千万千瓦级风电基地规模化集中接入、特高压/超高压远距离输电的开发方式。

1.2.1.2 风电场内电气接线

以酒泉装机容量为 200MW 的典型风电场为例来说明酒泉风电场内部的电气接线，风电场共有 134 台单机容量为 1.5MW 的风力发电机组，共分成 12 组（每组接 11 或 12 台机组不等），每组的各台发电机采用单机联单元变 0.69/35kV 的形式接至 35kV 架空线，架空线汇集每组的 11 或 12 台风电机组，经一条 35kV 电缆接至风电场升压站 35kV 母线，接线形式

示意图如图 1-2 所示。

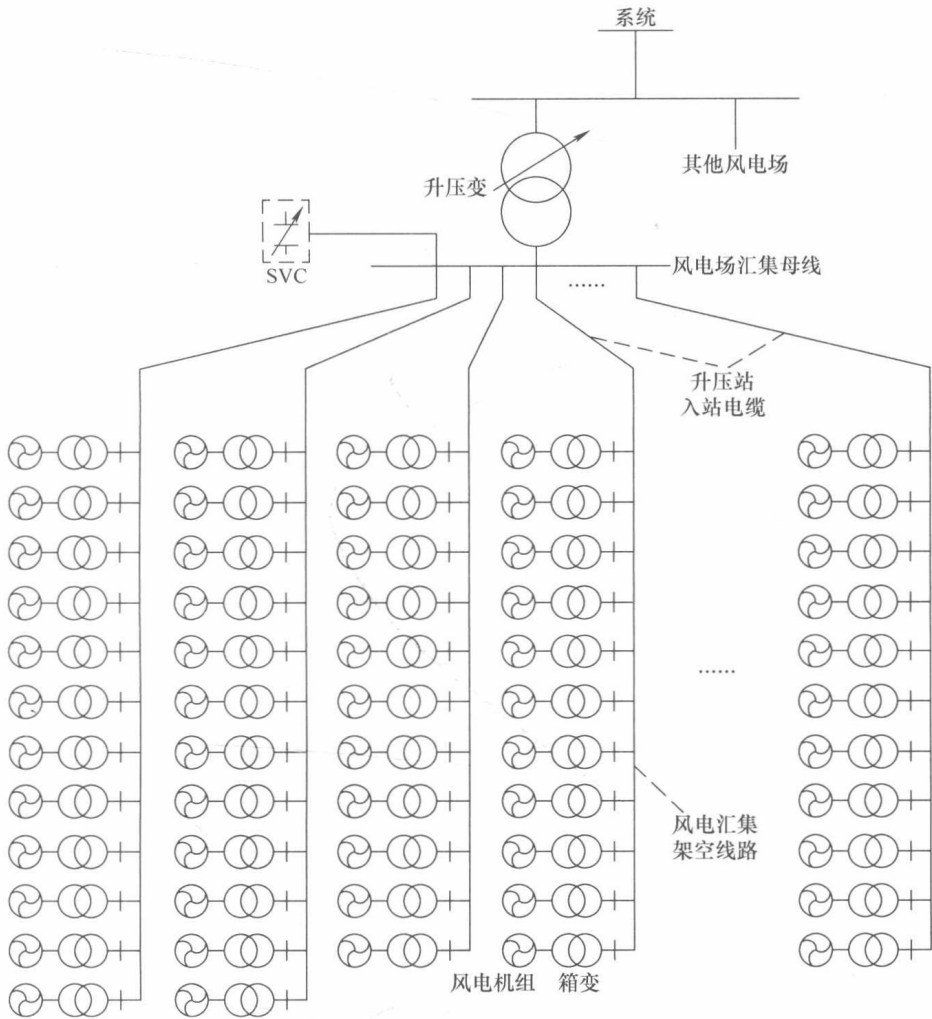


图 1-2 风电场内部典型电气接线示意图

1.2.1.3 风电场接入及输电方案

1. 酒泉风电基地一期方案

酒泉风电基地一期装机约 5160MW，其中，安西地区装机 4050MW，玉门地区装机 1110MW。除考虑少量风电场以 110kV 电压等级接入地区电网外，其他多数风电场通过新建 330kV 升压站汇集后送入 750kV 电网。

建设七个 330kV 升压站，分别为北大桥东（ $3 \times 240\text{MVA}$ ）、北大桥西（ $3 \times 240\text{MVA}$ ）、干河口东（ $3 \times 240\text{MVA}$ ）、干河口西（ $3 \times 240\text{MVA}$ ）、干河口北（ $2 \times 240\text{MVA}$ ）、桥湾（ $3 \times 240\text{MVA}$ ）、昌马西（ $3 \times 240\text{MVA}$ ）。其中，龙源风电场（300MW）和北大桥东风电场（ $2 \times 200\text{MW}$ ）接至北大桥东 330kV 变，北大桥西风电场（ $3 \times 200\text{MW}$ ）接至北大桥西 330kV 变，干河口东风电场（ $3 \times 200\text{MW}$ ）接至干河口东 330kV 变，干河口西风电场（ $3 \times 200\text{MW}$ ）接至干河口西 330kV 变，干河口北风电场（ $2 \times 200\text{MW}$ ）接至干河口北 330kV 变，桥湾风电场（ $3 \times 200\text{MW}$ ）接至桥湾 330kV 变，昌马西风电场（ $3 \times 200\text{MW}$ ）接至昌马西 330kV 变。330kV 升压站的电压等级为 35/330kV，各风电场的风电机组经箱式变直接升压至 35kV，在

风电场内汇集后由 35kV 线路引接至 330kV 升压站 35kV 侧。

以上风电场经 330kV 变电站汇集后,再进一步向 750kV 变电站汇集,具体方案如下:

建设 750kV 敦煌变电站,容量为 $2 \times 2100\text{MVA}$,北大桥东、北大桥西、干河口东、干河口西、干河口北、桥湾 330kV 升压变各以 1 回 330kV 线路接入敦煌变。

建设 750kV 酒泉变电站,容量为 $1 \times 2100\text{MVA}$,昌马西 330kV 升压变以 1 回 330kV 线接入玉门镇变,在地区电网消纳部分风电后,剩余风电出力通过 330kV 线路上网到酒泉变。

酒泉风电基地一期输电方案具体如下:

1) 新建敦煌—酒泉—河西—武胜 750kV 双回输电线路,其中,敦煌—酒泉线路长度为 279km、酒泉—河西线路长度为 372km、河西—武胜线路长度为 196km,计及哈密站的输变电工程,哈密—敦煌—酒泉—河西—武胜输电线路即为新疆—西北 750kV 交流联网第一通道。

2) 新建敦煌 750kV 变,变电容量为 $2 \times 2100\text{MVA}$;新建酒泉 750kV 变,变电容量为 $1 \times 2100\text{MVA}$;新建河西 750kV 变,变电容量为 $1 \times 2100\text{MVA}$;新建武胜 750kV 变,变电容量为 $1 \times 2100\text{MVA}$ 。

酒泉风电基地一期 5160MW 风电的汇集接入及输电方案如图 1-3 所示。

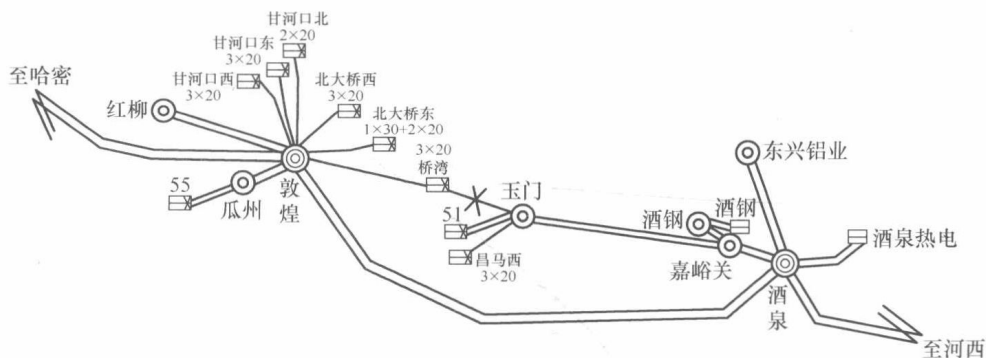


图 1-3 酒泉风电基地一期风电的汇集接入及输电方案示意图

2. 酒泉风电基地二期的方案

为支持“疆电外送”,解决“十二五”期间青海电网缺电问题及酒泉、哈密风电接入、送出问题,并为地区新能源及经济的发展创造有利条件,在新疆与西北 750kV 交流联网第一输电通道基础上建设第二通道输变电工程。

750kV 第二通道工程起点为哈密变,落点为青海柴达木变。线路中间落点 750kV 哈密换流站、哈密南变、沙州变和鱼卡开关站。该工程包括扩建哈密、敦煌、柴达木变电所,新建 750kV 哈密南变电所、沙州变电所、鱼卡开关站,新建哈密—哈密换流站—哈密南—沙州—鱼卡—柴达木双回 750kV 线路、沙州—敦煌双回 750kV 线路。新建 750kV 线路长度约为 $2 \times 1099\text{km}$ 。该工程已于 2013 年 6 月建成投运。

为合理利用资源,实现能源资源更大范围优化配置;满足酒泉大规模风电、煤电送出的需要,促进甘肃地方经济发展;保障湖南能源安全及负荷增长的需要;落实我国能源战略,实现特高压远距离、大容量电力输送,规划建设酒泉—湖南特高压直流输电工程(简称“酒湖”特高压直流),工程输电电压等级为 $\pm 800\text{kV}$,输电规模 8000MW,起点为甘肃酒

泉, 途经甘肃、陕西、重庆、湖北、湖南四省一市, 落点湖南, 线路长度约 2490km; 酒泉侧换流站接入系统方案为换流站通过 3 回 750kV 线路接入桥湾 750kV 变。

酒泉风电基地二期合计 8000MW, 分为 3000MW、5000MW 两批建设。第一批 3000MW 风电的接入系统方案具体如下:

按就近原则分为 5 组, 每组容量为 600~800MW, 每组风电共用 1 座 330kV 风电汇集升压站, 共建设 5 座 330kV 风电汇集升压站, 即桥六八、安二三、安北四、安六马二、麻黄滩一。

将布隆吉 110kV 开关站升压改造为 330kV 变电站, 安装 2 台 150MVA 主变, 将目前瓜州—布隆吉双回 330kV 架设 110kV 运行的线路恢复 330kV 电压等级运行, 线路敦煌侧改接进 750kV 敦煌变。将一期桥湾 330kV 风电升压站~敦煌 750kV 变 330kV 线路“π”接入布隆吉变。

“桥六八”升压站出 1 回 330kV 线路接入 750kV 敦煌变; “安二三”升压站出 1 回 330kV 线路接入 330kV 布隆吉变; “安北四”升压站出 1 回 330kV 线路接入布隆吉变; “安六马二”升压站出 1 回 330kV 线路接入布隆吉变; “麻黄滩一”升压站出 1 回 330kV 线路接入玉门变。

二期后续 5000MW 风电接入系统方案具体如下:

汇集需要新建 8 座 330kV 升压站、扩建“麻黄滩一”升压站。新建 330kV 升压站中, 七墩滩一、马鬃山第一、马鬃山第二、安五六各新建 1 回 330kV 线路接入桥湾 750kV 变; 安一、二、三、桥七、八利用布隆吉变—敦煌 750kV 变线路接入桥湾 750kV 变; 桥六、七、八安一利用布隆吉变—敦煌 750kV 变线路接入敦煌 750kV 变。

酒泉风电基地二期合计 8000MW 的汇集接入及输电方案如图 1-4 所示。

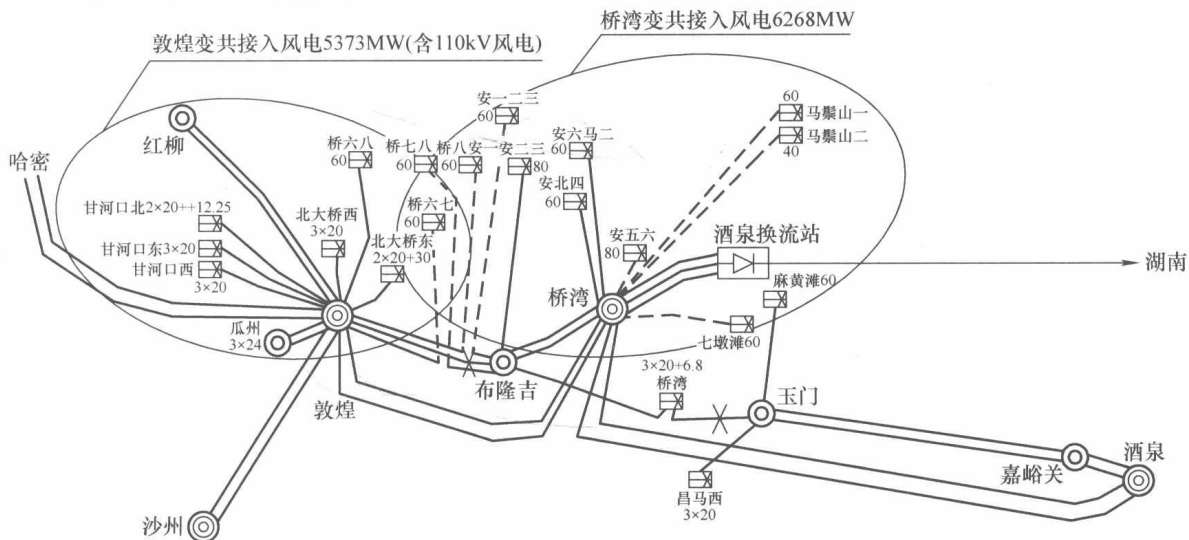


图 1-4 酒泉风电基地二期 8000MW 接入及输电系统方案示意图

1.2.2 宁夏风电基地开发实例

1.2.2.1 宁夏风能概述

宁夏风能新能源储量丰富, 开发潜力大, 应用前景广阔。风能资源总储量为

2250 万 kW, 风能资源丰富及较丰富区面积为 2506km²。风能资源主要分布在贺兰山、六盘山以及宁夏中部的红寺堡开发区等。各地年平均风速为 2.0~7.0m/s, 贺兰山、六盘山是全区年平均风速的最大中心, 分别为 7.0m/s、5.8m/s, 麻黄山为宁夏年平均风速的次大中心, 为 4.0m/s。宁夏风速有明显的季节性变化, 春季风速最大、冬季次之、秋季较小、夏季最小(仅相当于春季的 70%左右)。

根据相关机构出具的《宁夏风能资源评价报告》计算结果, 结合年平均风速分布和年平均风能密度分布, 可将宁夏划分为五个风能区, 见表 1-1。

表 1-1 宁夏风能资源分布情况表

风能区	年平均风功率密度/(W/m ²)	年平均风速/(m/s)	分布区域
极丰富区	≥200	5.8~7.0	贺兰山、六盘山的山顶和山峰
丰富区	150~200	5.8~7.0	青铜峡西北、石嘴山惠农、正谊关、同心县韦州冲积洪积平原
较丰富区	100~200	4.3~5.6	罗山、香山附近
一般区	50~100	3.1~4.0	盐池县麻黄山、海原、兴仁及泾源等地
贫乏区	≤50	1.5~3.0	区内其他地区

1.2.2.2 宁夏风电接入方案

宁夏各风电场将以 10kV 线路打捆升压至 110kV 电压等级, 再采用 110kV 送出线路接入系统中的 220kV 变电站或 330kV 变电站。风力发电机与配变之间采用一机一变单元接线方式, 利用电缆连接。

以如下区域的风电接入为例来说明通过 110kV 送出线路接入 220kV 变电站的方案, 如图 1-5 所示。

1) 贺兰山风电场包括头关、西场区、东场区、续建风电场, 通过 110kV 升压变分别送至西夏、平吉堡、新梁 220kV 变电站;

2) 青铜峡天净风电场升压接入盛家墩 110kV 变电站, 再送至小坝 220kV 变电站;

3) 石嘴山风电场升压后接入柳园 110kV 变电站, 再送至落石滩 220kV 变电站;

4) 红寺堡、长山头风电场通过 110kV 升压变送至恩和 220kV 变电站。

以如下区域的风电接入为例来说明通过 110kV 送出线路接入 330kV 变电站的方案, 如图 1-6 所示。

1) 宁东风电场一、二期通过 110kV 升压变送至甜水河 330kV 变电站; 宁东风电场三、四期接入系统分为两个方案: 方案一是升压后接入永利 110kV 变电站, 同时送至甜水河和徐家庄 330kV 变电站; 方案二是升压后接入马家滩 110kV 变电站, 再送至盐州 330kV 变电站;

2) 中卫风电场升压后接入马场湖 110kV 变电站, 再送至迎水桥 330kV 变电站;

3) 红寺堡风电场三、四期通过 110kV 升压变送至侯桥 330kV 变电站;

4) 太阳山、麻黄山风电场经 110kV 升压变送至罗山 330kV 变电站;

5) 固原月亮山风电场升压后接入西吉 110kV 变电站, 再送至固原 330kV 变电站。

按照规划, 近期目标年开发并网的风电装机容量约 8300MW。

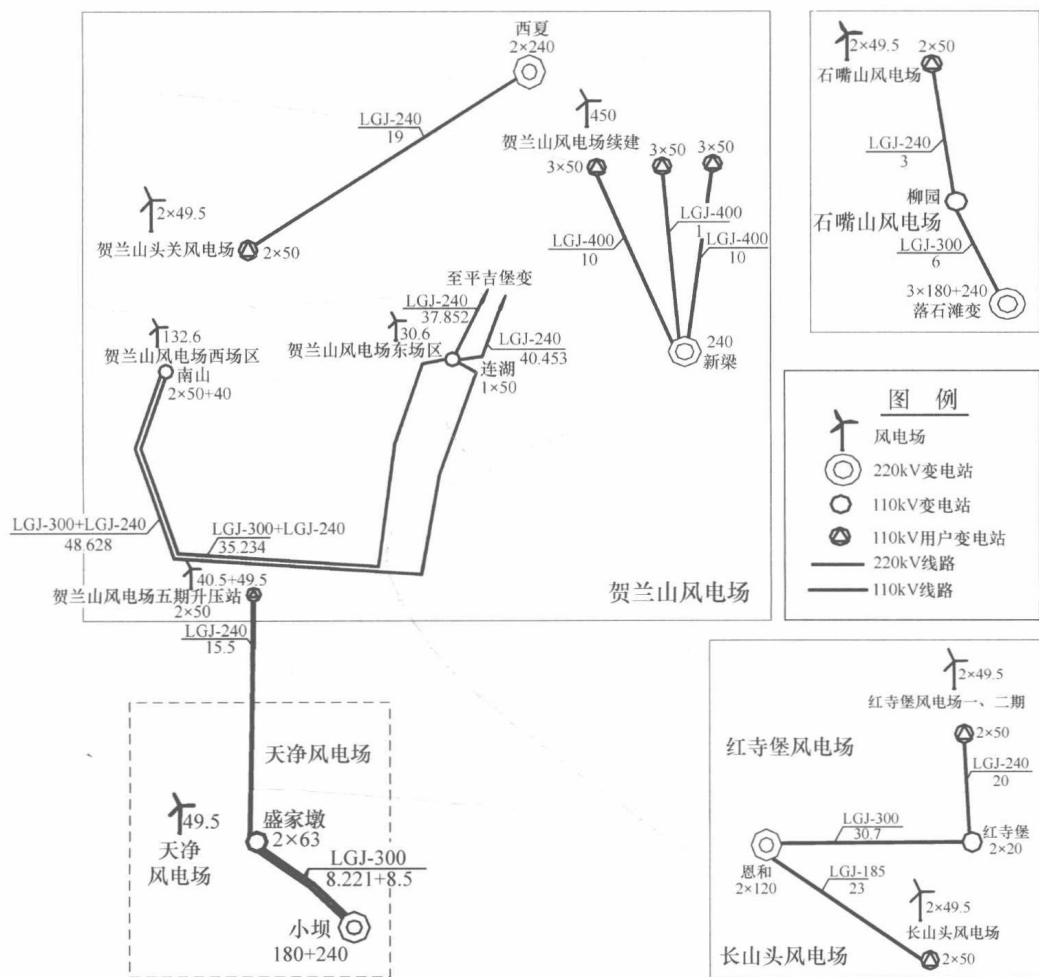


图 1-5 宁夏风电接入 220kV 变电站示意图

宁夏风电主要分布于宁东、吴忠等六个地区，目标年各地区接入风电装机规模预计如下：①宁东地区约 1985MW；②固原地区约 220MW；③石嘴山地区约 110MW；④吴忠地区约 4637MW；⑤银川地区约 158MW；⑥中卫地区约 1212MW。

除了风电，还有大量光伏接入，目标年投运的光伏约为 3700MW，风光能源合计约为 12000MW，宁夏形成千万千瓦级风光混合能源基地，采用大规模分散与集中并存的方式接入电网，目标年风、光场站接入电网总体示意图如图 1-7 所示。

同时，宁夏新增约 12000MW 的火电机组，并建设 ± 800 kV 太阳山—浙江（简称“灵绍”）特高压直流，连同已建设的 ± 600 kV 银东超高压直流，宁夏电网形成了近电气距离的大规模新能源集中接入、高比例、高密度风火打捆超/特高压多直流外送格局及方案。

1.2.2.3 宁夏风电外送直流工程

1. 银东超高压直流输电工程

银东直流输电工程是世界上第一个 ± 660 kV 电压等级的直流输电工程，西起宁夏银川东换流站，东至山东青岛换流站，线路长度 1335km，经过宁夏、陕西、山西、河北和山东等 5 省区 43 个县（市），工程双极总输电容量 4000MW。该工程将成为西北电网向华北电网送电的重要输电通道，是国家“西电东送”的重点电网建设项目。工程建成投运后，我国西

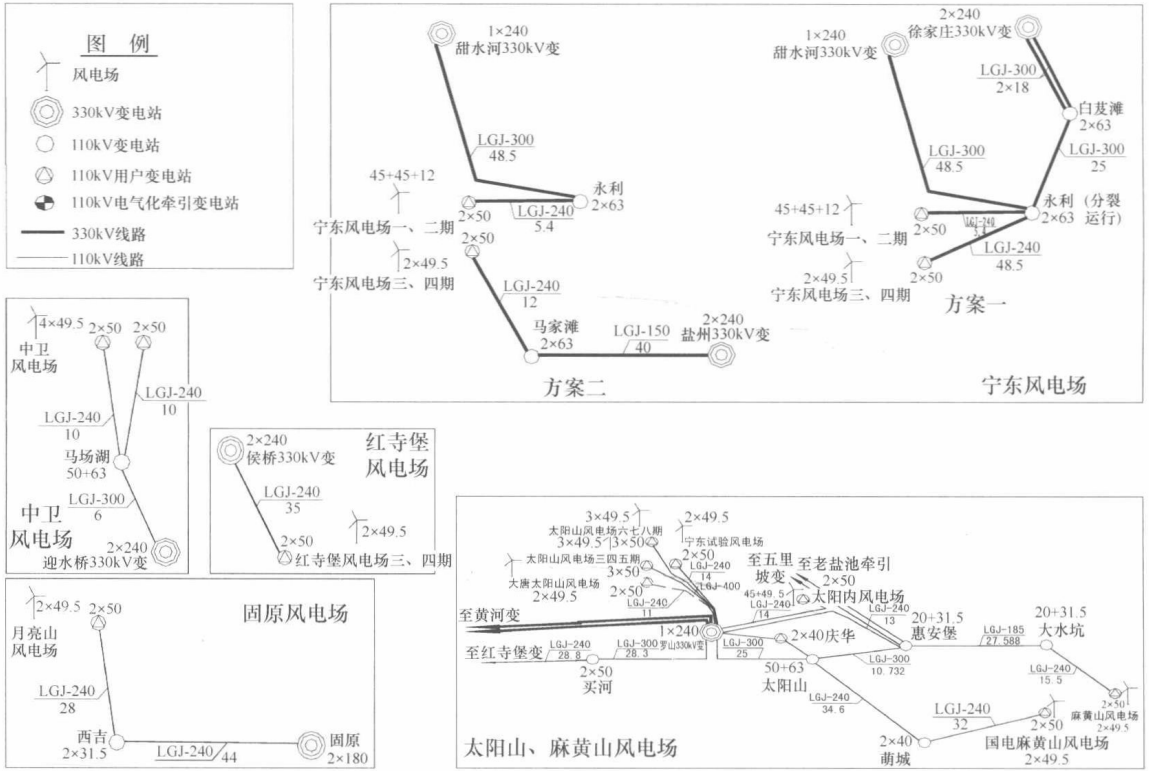


图 1-6 宁夏风电接入 330kV 变电站示意图

北地区黄河上游水电和宁东火电打捆直送山东，输送电量相当于新建 7 座 600MW 机组，使宁夏乃至西北地区资源优势转化为经济优势，极大缓解了山东省电力供应紧张、能源资源短缺的压力，提高山东电网运行的经济性和可靠性，为山东乃至华北地区经济社会发展提供可靠电力保障。

银东直流工程于 2008 年 12 月核准开工建设，2009 年 6 月、7 月两端换流站实质性开工，工程于 2010 年 9 月 30 日线路全线架通，2010 年 11 月 8 日完成系统调试，2010 年 11 月 25 日极 I 系统一次性通过 14 天试运行。试运行期间，工程保持单极 2000MW 的额定功率输送容量，由宁东煤电基地向山东电网输送电量 6.76 亿 kWh，实现直接经济效益 7000 余万元。2010 年 11 月 28 日 19 时，极 I 系统正式投入商业运行，随即满负荷从宁夏宁东煤电基地向山东输电，输送功率达 2000MW。2011 年 3 月，工程极 II 系统建成投运后，向山东送电的能力提高到 4000MW，达到山东电网当时负荷的 1/10。工程导线采用特高强钢芯铝合金绞线，每相四分裂，在世界上首次采用 1000mm² 大截面导线。

2. 灵绍特高压直流输电工程

灵绍直流西起宁夏回族自治区灵武市境内太阳山换流站，东至浙江省诸暨市境内绍兴换流站，途经宁夏、陕西、山西、河南、安徽、浙江 6 省区，线路全长 1735.5km。该工程于 2015 年左右建成投产，工程投运有利于将宁夏煤炭、风光等资源优势转化成经济优势，促进宁夏地区经济社会发展，同时缓解浙江地区能源供需矛盾，满足其电力需求。

工程输电电压等级为 ±800kV，输电规模 8000MW，包括 2 个完整单极，每个完整单极由 2 个 12 脉动换流单元串联组成。太阳山换流站共布置 4 大组 16 小组交流滤波器，每小组

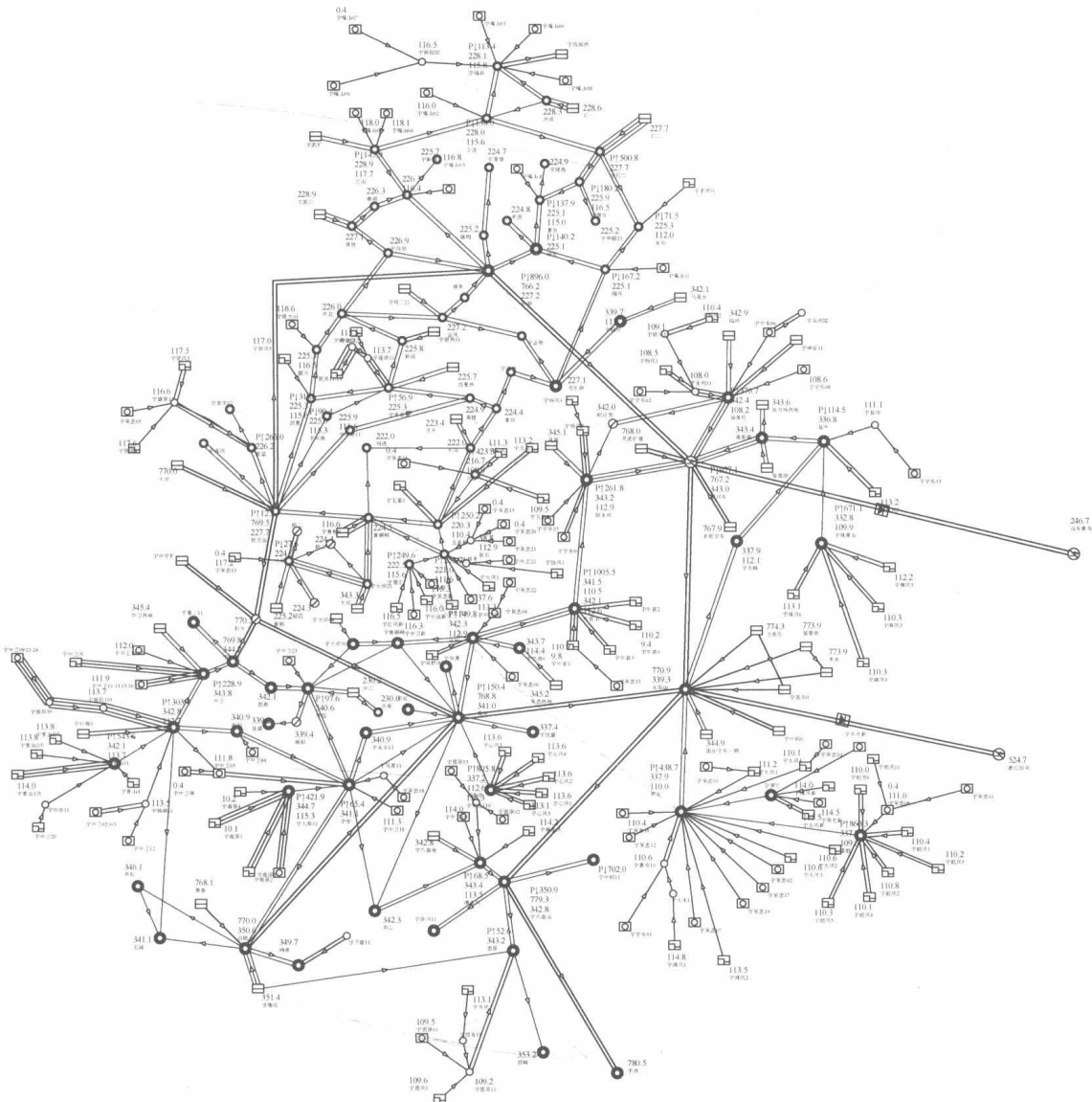


图 1-7 宁夏目标年风光混合能源基地接入电网示意图

容量为 295Mvar，总无功补偿容量 4720Mvar，换流站 750kV 母线装设 2×210 Mvar 高抗。浙江换流站共布置 4 大组 17 小组交流滤波器 and 高压并联电容器，每小组容量 291Mvar，总无功补偿容量 4947Mvar。

太阳山换流站近区配套电源共 7600MW，分别是枣泉 (2×600 MW)、鸳鸯湖 (2×1000 MW)、方家庄 (2×1000 MW)、国华 (2×600 MW)、中铝 (2×600 MW) 电厂。

太阳山换流站通过 6 回 750kV 线路与主网相连，分别是太阳山—银川东 750kV 双回路（非同塔双回）、太阳山—黄河 750kV 双线（非同塔双回）、太阳山—六盘山 750kV 双线（同塔双回）。

1.2.3 新疆哈密风电基地开发实例

1.2.3.1 哈密地区风电基地开发

新疆风能资源总储量约为 8.72×10^5 MW，为全国陆上风能总储量的 1/4，是中国风能开