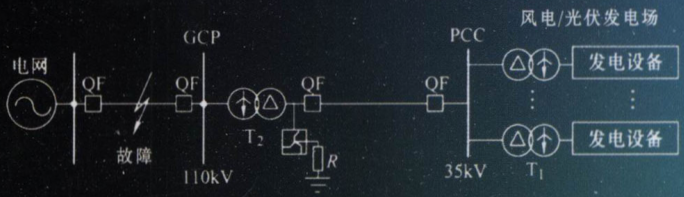
“十二五”国家重点图书出版规划项目

电力电子
新技术系列图书
New Technology Series in Power Electronics



耿华 刘淳 张兴 杨耕 编著

新能源并网发电系统的低电压穿越

XINNENGYUAN BINGWANG FADIAN XITONG DE DIDIANYA CHUANYUE

机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

“十二五”国家重点图书出版规划项目
电力电子新技术系列图书

新能源并网发电系统的低电压穿越

耿 华 刘 淳 张 兴 杨 耕 编著

机械工业出版社

具备低电压穿越能力是大规模新能源发电系统接入电网的必要条件，该条件对保障新能源发电系统的健康并网运行具有重要作用。本书以低电压穿越导则的背景、内容和发展趋势为基础，重点以风力和光伏并网发电系统为例，从单台设备和发电场两个层面，分别对直接耦合型、半耦合型和非耦合型新能源并网发电系统的低电压穿越难点和方法进行了系统阐述，同时对新能源并网发电系统的低电压穿越测试流程进行了介绍。

本书可供新能源发电技术、电力电子技术、自动控制技术及电工电能新技术应用领域的工程技术人员和研究人员阅读和参考，也可作为大专院校相关专业的教师和研究生的参考书。

图书在版编目（CIP）数据

新能源并网发电系统的低电压穿越/耿华等编著. —北京：机械工业出版社，2014.3

（电力电子新技术系列图书）

“十二五”国家重点图书出版规划项目

ISBN 978-7-111-45974-3

Ⅰ.①新… Ⅱ.①耿… Ⅲ.①新能源－发电－低电压运行 Ⅳ.①TM61

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2014）第 034695 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：罗 莉 责任编辑：罗 莉

版式设计：常天培 责任校对：陈 越

封面设计：马精明 责任印制：刘 岚

北京圣夫亚美印刷有限公司印刷

2014 年 6 月第 1 版第 1 次印刷

169mm×239mm · 18 印张 · 343 千字

0 001— 3000 册

标准书号：ISBN 978-7-111-45974-3

定价：69.80 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	
社服务中心：	（010）88361066	教 材 网：	http://www.cmpedu.com
销 售 一 部：	（010）68326294	机工官网：	http://www.cmpbook.com
销 售 二 部：	（010）88379649	机工官博：	http://weibo.com/cmp1952
读者购书热线：	（010）88379203	**封面无防伪标均为盗版**	

第 2 届
电力电子新技术系列图书
编 辑 委 员 会

主　任： 徐德鸿

副主任： 白继彬　牛新国　康　勇　李崇坚　杨　耕

委　员：（按姓名拼音字母排序）

白继彬　陈　坚　陈道炼　陈守良　陈治明
高艳霞　郭　宏　郭世明　康　勇　李崇坚
李永东　刘进军　吕征宇　牛新国　潘三博
阮新波　孙流芳　孙玉坤　王旭东　王兆安
肖湘宁　徐德鸿　徐殿国　杨　耕　杨　旭
张　波　张　兴　张承慧　张卫平　赵善麒
赵争鸣　钟彦儒　周　波　周雒维　查晓明

秘书组： 陈守良　孙流芳　杨　旭（兼）　罗　莉

电力电子新技术系列图书
序　　言

1974 年美国学者 W. Newell 提出了电力电子技术学科的定义，电力电子技术是由电气工程、电子科学与技术和控制理论三个学科交叉而形成的。电力电子技术是依靠电力半导体器件实现电能的高效率利用，以及对电机运动进行控制的一门学科。电力电子技术是现代社会的支撑科学技术，几乎应用于科技、生产、生活各个领域：电气化、汽车、飞机、自来水供水系统、电子技术、无线电与电视、农业机械化、计算机、电话、空调与制冷、高速公路、航天、互联网、成像技术、家电、保健科技、石化、激光与光纤、核能利用、新材料制造等。电力电子技术在推动科学技术和经济的发展中发挥着越来越重要的作用。进入 21 世纪，电力电子技术在节能减排方面发挥着重要的作用，它在新能源和智能电网、直流输电、电动汽车、高速铁路中发挥核心的作用。电力电子技术的应用从用电，已扩展至发电、输电、配电等领域。电力电子技术诞生近半个世纪以来，也给人们的生活带来了巨大的影响。

目前，电力电子技术仍以迅猛的速度发展着，电力半导体器件性能不断提高，并出现了碳化硅、氮化镓等宽禁带电力半导体器件，新的技术和应用不断涌现，其应用范围也在不断扩展。不论在全世界还是在我国，电力电子技术都已造就了一个很大的产业群。与之相应，从事电力电子技术领域的工程技术和科研人员的数量与日俱增。因此，组织出版有关电力电子新技术及其应用的系列图书，以供广大从事电力电子技术的工程师和高等学校教师和研究生在工程实践中使用和参考，促进电力电子技术及应用知识的普及。

在 20 世纪 80 年代，电力电子学会曾和机械工业出版社合作，出版过一套电力电子技术丛书，那套丛书对推动电力电子技术的发展起过积极的作用。最近，电力电子学会经过认真考虑，认为有必要以“电力电子新技术系列图书”的名义出版一系列著作。为此，成立了专门的编辑委员会，负责确定书目、组稿和审稿，向机械工业出版社推荐，仍由机械工业出版社出版。

本系列图书有如下特色：

本系列图书属专题论著性质，选题新颖，力求反映电力电子技术的新成就和新经验，以适应我国经济迅速发展的需要。

理论联系实际，以应用技术为主。

本系列图书组稿和评审过程严格，作者都是在电力电子技术第一线工作的专

家，且有丰富的写作经验。内容力求深入浅出，条理清晰、语言通俗，文笔流畅，便于阅读学习。

本系列图书编委会中，既有一大批国内资深的电力电子专家，也有不少已崭露头角的青年学者，其组成人员在国内具有较强的代表性。

希望广大读者对本系列图书的编辑、出版和发行给予支持和帮助，并欢迎对其中的问题和错误给予批评指正。

电力电子新技术系列图书
编辑委员会

序

新能源发电的规模化应用是应对全球能源和环境危机的战略选择之一，已受到世界各国的高度重视。近年来，随着新能源发电技术本身的进步和各国政府激励性政策的推动，以风力发电和光伏发电为代表的新能源发电技术发展迅速，已成为电力供应的重要组成部分。

与常规发电相比，新能源发电在长时间尺度上的静态输出功率特性具有波动性和不确定性；同时由于采用电力电子变流器并网，新能源发电在短时间尺度上的动态响应特性与常规发电相比也存在着较大的差异。随着新能源发电装机规模的持续扩大，电力系统的安全稳定运行面临着日益严峻的新挑战和新问题。

低电压穿越性能是保障大规模新能源接入情况下电力系统安全稳定运行的必要条件，已成为各国对新能源发电设备并网的强制性要求。相比于同步发电机，电力电子变流器过载能力低、可控性强、响应速度快，实现新能源发电的低电压穿越存在着电网故障状态检测、发电设备控制及机电应力设计等一系列理论和技术挑战。同时，随着新能源发电在电力系统中注入率的提高，对新能源发电低电压穿越性能的要求也将不断变化和发展，大规模接入情况下的低电压穿越问题仍将是未来发电设备制造和电力系统运行控制的重要研究课题。

目前国内外有关新能源发电低电压穿越的系统性和专门性的论著还较少见，《新能源并网发电系统的低电压穿越》一书及时地填补了这一空白。该书以风力发电和光伏发电系统为对象，全面地总结了有关新能源发电并网导则的提出和发展历程，详细地讨论了各种不同结构风力发电和光伏发电系统的数学建模和控制方法。基于对电网故障过程中各关键电气量故障特征的总结和归纳，作者对以锁相环为核心的各种快速故障特征检测方法做了深入细致的分析和比较。在这个基础上，本书集中讨论了各种不同结构发电系统低电压穿越的实现方法，包括基于单机的常规穿越方法和基于多机的集中穿越方法，并讨论了不同实现方法对发电设备动态过程的影响。本书的内容较全面地反映了目前国内外学术界在这一领域的研究状态，也融入了作者对这一问题的诸多独到见解，对从事新能源发电设备制造以及电力系统规划运行的有关工程技术人员具有重要的参考价值。

希望该书的出版对新能源发电事业的健康发展能起到积极的推动作用。

陈坚　2014 年 1 月于华中科技大学

前　言

随着能源危机和环境恶化的加剧，新能源的开发和应用受到世界各国的日益重视。并网发电是新能源的最主要应用形式之一。随着技术的进步和政府鼓励性政策的推动，部分新能源发电，如风力发电和光伏发电，在经济性上已逐步达到与常规能源可竞争的水平。

为提高新能源发电系统的性能和效率，电力电子设备得到大量应用。与基于同步发电机组的传统发电系统相比，基于电力电子设备的新能源发电系统响应速度更快、控制更灵活。然而，由于电力电子设备的输出特性和电力电子器件的耐流、耐压能力远异于同步发电机组，该差异对传统电力系统的运行方式将产生巨大影响，并且该影响随着新能源发电规模的扩大而愈加显著。在已知的新能源发电系统中，风力和光伏发电系统的规模化发展最为迅速，在某些国家，如德国、西班牙、丹麦和中国等，大规模风电和光伏电力的接入已对电力系统的稳定运行带来了许多新问题。

为充分利用新能源且保障电力系统的安全运行，各国电网运营商相继颁布了针对新能源电力的并网导则以规范其输出特性。“低电压穿越”是这些并网导则的核心要求之一，也是当前新能源并网发电技术的难点之一，目前已成为新能源电力设备制造企业的主要技术门槛之一。

基于上述背景，本书以风力发电和光伏发电系统为例，讨论低电压穿越技术的要求、难点和方法，以期从理论分析和工程应用角度为解决此技术难题提供思路。一方面，风力发电和光伏发电系统已具备规模化发展的条件，在电网中所占的比例已不可忽略，相关的并网导则也已比较完善；另一方面，其他形式新能源发电系统的外特性与风力及光伏发电系统有相似之处，在实现规模化发展之后，本书的相关结果也可供解决同类问题所借鉴。

全书共分为 8 章，第 1 章从宏观上介绍了新能源并网发电系统的总体概况，包括风力和光伏发电系统的国内外产业和技术发展现状；第 2 章简单讨论了新能源并网发电系统的静动态特性以及大规模新能源电力接入对电力系统的影响，并以风力发电和光伏发电系统为例，重点介绍了典型并网导则的背景、发展和具体要求；第 3 章介绍了并网型风电系统的数学模型和控制方法，包括直接耦合型、半耦合型和非耦合型单机风力发电系统的构成、数学模型和控制策略以及大规模风电场的数学模型与控制策略；第 4 章介绍了并网型光伏发电系统的数学模型和控制方法，包括光伏电池和光伏变流器的数学模型、不同结构下光伏变流器的控制方法，以及光伏

发电系统的孤岛效应和反孤岛策略；第 5 章讨论了对称和非对称电网故障的典型特征及电网故障的快速检测方法；第 6 章讨论了直接耦合型、半耦合型和非耦合型单机新能源发电系统的低电压穿越方法，包括电网故障对不同类型新能源发电系统的影响，以及故障初始、持续和切除三个阶段中新能源发电系统的低电压穿越方法；第 7 章讨论了多机系统发电场的集中式低电压穿越方法，重点针对低电压穿越能力有限的直接耦合型和半耦合型风电场，讨论如何采用额外的并联式或串联式辅助装置以改善其低电压穿越性能；第 8 章介绍了低电压故障穿越的测试技术，包括实验室条件下的低电压故障模拟方法，以及风电和光伏发电系统的低电压穿越测试流程和要求。

本书由清华大学耿华博士、杨耕教授和合肥工业大学刘淳博士、张兴教授合作编著。其中耿华博士编写了全书大纲、前言、第 2、3 章以及第 5～7 章；刘淳博士编写了第 1 章、第 4 章和第 8 章。全书由杨耕教授和张兴教授统稿。

在本书的编写过程中，华中科技大学陈坚教授、袁小明教授、胡家兵教授和黄清军博士研究生、合肥阳光电源公司的赵为博士提出了很多宝贵意见和建议。此外，中国东方电气集团中央研究院的周宏林博士，清华大学自动化系研究生肖帅、奚鑫泽、郑重、李隆基、郭云璐和曹仲，合肥工业大学电气与自动化工程学院研究生陈晓静、谢韦伟、祝青、李飞和余畅舟等参与了参考文献整理、文档初稿编写修订与绘图等工作。在此一并向他们表示衷心的感谢。在本书的编写过程中，我们参阅了大量的论著和文献。其主要部分已列入了参考文献中。在此也对参考文献的作者表示衷心的感谢。

与本书有关的研究工作得到了国家自然科学基金（61104046，61273045，51361135705，51077034）、清华大学自主科研计划、台达环境与教育基金（DREG2012001）、北京高校“青年英才计划”等课题的支持，在此一并向上述项目的资助单位致以衷心的谢意。

感谢电力电子新技术系列图书编委会和机械工业出版社对本书写作的指导和支持。

由于作者水平有限，疏漏甚至谬误在所难免，敬请读者不吝赐教。

作者

2013 年 12 月于清华园

目　录

电力电子新技术系列图书序言
序
前言
物理量符号表
缩略语
第 1 章　绪论 …… 1
1.1　新能源并网发电系统概述 …… 1
1.2　风电系统概述 …… 4
1.2.1　风电产业的发展现状 …… 5
1.2.2　并网风电系统的技术现状 …… 9
1.3　光伏发电系统概述 …… 12
1.3.1　光伏发电产业的发展现状 … 12
1.3.2　并网光伏发电系统的技术现状 …… 16
1.4　小结 …… 21
参考文献 …… 21
第 2 章　新能源并网发电系统的并网导则 …… 23
2.1　新能源并网发电系统的特点 …… 23
2.1.1　静态特性 …… 24
2.1.2　动态特性 …… 24
2.2　新能源并网发电系统对电力系统的影响 …… 25
2.2.1　静态特性的影响 …… 25
2.2.2　动态特性的影响 …… 26
2.3　新能源并网发电系统的并网导则 …… 28
2.3.1　并网导则的背景和发展 …… 28
2.3.2　并网导则的主要内容 …… 32
2.4　新能源发电系统并网导则的发展趋势 …… 43
2.5　小结 …… 44
参考文献 …… 44
第 3 章　并网型风力发电系统的数学模型和控制方法 …… 47
3.1　单机风电系统的数学模型 …… 47
3.1.1　机械系统的数学模型 …… 48
3.1.2　电气系统的数学模型 …… 52
3.2　单机风电系统的控制 …… 62
3.2.1　定速风电系统的控制 …… 62
3.2.2　变速风电系统的控制 …… 63
3.3　风电场的数学模型与控制方法 … 74
3.3.1　风电场的数学模型 …… 74
3.3.2　风电场的控制 …… 75
3.4　小结 …… 77
参考文献 …… 77
第 4 章　并网型光伏发电系统的数学模型和控制方法 …… 80
4.1　光伏发电系统的数学模型 …… 80
4.1.1　光伏电池的数学模型 …… 81
4.1.2　具有局部最大功率点的光伏组件数学模型 …… 83
4.1.3　光伏发电系统中的功率变流器 …… 85
4.2　光伏发电系统的控制 …… 86
4.2.1　光伏发电系统的最大功率点跟踪控制 …… 86
4.2.2　光伏发电系统的局部最大功率点跟踪控制 …… 90
4.3　光伏并网逆变器控制 …… 91
4.3.1　两级式光伏并网逆变器的 MPPT 控制 …… 91
4.3.2　单级式光伏并网逆变器的 MPPT 控制 …… 94
4.4　光伏并网逆变器的孤岛效应及反孤岛策略 …… 96
4.4.1　基于并网逆变器的被动式反孤岛策略 …… 98
4.4.2　基于并网逆变器的主动式反孤岛策略 …… 98
4.5　光伏发电场的数学模型和控制方法 …… 99
4.6　小结 …… 99

参考文献 …… 100
第 5 章　电网故障的特征与检测 … 103
5.1　电网故障的特征 …… 103
5.1.1　电网的结构与故障 …… 103
5.1.2　典型电网故障特征 …… 104
5.2　电网故障的快速检测 …… 110
5.2.1　锁相环的一般结构 …… 110
5.2.2　基于旋转坐标系的锁相环 …… 119
5.2.3　静止坐标系下的锁相环 …… 125
5.2.4　不同锁相环的性能比较 …… 127
5.3　小结 …… 128
参考文献 …… 128
第 6 章　新能源并网发电系统低电压故障的单机穿越方法 …… 131
6.1　低电压穿越的三个阶段 …… 131
6.2　直接耦合型风电系统的低电压穿越 …… 132
6.2.1　低电压故障对直接耦合型风电机组的影响 …… 132
6.2.2　低电压穿越方法 …… 135
6.3　半耦合型双馈风电系统的低电压穿越 …… 140
6.3.1　低电压故障对双馈风电机组的影响 …… 141
6.3.2　低电压穿越方法 …… 149
6.4　非耦合型发电系统的低电压穿越 …… 186
6.4.1　低电压故障对非耦合型风电机组的影响 …… 187
6.4.2　非耦合型风电机组的低电压故障穿越方法 …… 188
6.4.3　低电压故障对光伏发电系统的影响 …… 199
6.4.4　光伏发电系统低电压穿越策略 …… 201
6.4.5　仿真结果分析 …… 204
6.5　小结 …… 205
参考文献 …… 205
第 7 章　新能源并网发电系统低电压故障的集中穿越方法 …… 211
7.1　集中式低电压穿越辅助装置 …… 211
7.1.1　并联式低电压穿越辅助装置 …… 212
7.1.2　串联式低电压穿越辅助装置 …… 216
7.2　多机风电系统的低电压故障穿越方法 …… 218
7.2.1　多机恒速风电系统的低电压穿越 …… 218
7.2.2　多机双馈风电系统的低电压穿越 …… 228
7.3　小结 …… 235
参考文献 …… 235
第 8 章　电网故障模拟和低电压穿越测试 …… 237
8.1　电网故障模拟 …… 237
8.1.1　电网模拟器的分类与原理 …… 239
8.1.2　电力电子式电网模拟器 …… 242
8.1.3　阻抗分压式电网模拟器 …… 244
8.2　风力机与光伏电池特性模拟 …… 246
8.3　新能源发电系统的低电压穿越测试 …… 246
8.3.1　新能源发电系统测试规程 …… 247
8.3.2　风电系统低电压穿越测试流程与内容 …… 249
8.3.3　光伏发电系统低电压穿越测试的流程与内容 …… 251
8.3.4　“发电机 – 变流器”低电压穿越测试 …… 251
8.3.5　风电系统仿真模型的低电压穿越测试 …… 253
8.3.6　光伏发电系统仿真模型的低电压穿越测试 …… 257
8.4　小结 …… 258
参考文献 …… 258
附录 …… 260
附录 A　标幺值的规定 …… 260
附录 B　仿真、实验参数 …… 260
附录 C　最优控制问题的求解过程 … 265
附录 D　最优规划问题的求解过程 … 267

物理量符号表

$\boldsymbol{A}$　双馈发电机磁链模型 $\boldsymbol{A}=\begin{bmatrix} -\overline{\omega}_{s} & \omega_{s} & \overline{\omega}_{sm} & 0 \\ -\omega_{s} & -\overline{\omega}_{s} & 0 & \overline{\omega}_{sm} \\ \overline{\omega}'_{rm} & 0 & -\overline{\omega}'_{r} & \omega_{sr} \\ 0 & \overline{\omega}'_{rm} & -\omega_{sr} & -\overline{\omega}'_{r} \end{bmatrix}$

A　光伏电池常数因子，光伏电池品质因数

A_{m}　电气量测试数据基频正序分量的标幺值

A_{pn}　pn 结结面积

A_{s}　电气量仿真数据基频正序分量的标幺值

a　120°相移算子

C　变流器直流母线电容

C_{p}　风能利用系数

C_{pmax}　最大风能利用系数

C_{pv}　光伏电池侧电容

D　占空比

D_{G}，D'_{G}　发电机的阻尼系数和等效阻尼系数

D_{n}，D_{p}　电子和空穴的扩散系数

D_{WT}　风力机阻尼系数

E_{g}　半导体材料的带隙

F_{1}　稳态区间的平均偏差

F_{2}　暂态区间的平均偏差

F_{3}　稳态区间的平均绝对值偏差

F_{4}　暂态区间的平均绝对值偏差

F_{5}　稳态区间的最大偏差

$\dot{I}^{+}$，$\dot{I}^{-}$，$\dot{I}^{0}$　正负零序电流相量

I_{0}　光伏电池二极管暗电流

$\dot{I}_{a}$，$\dot{I}_{b}$，$\dot{I}_{c}$　abc 相电流相量

I_{D}　二极管电流/光伏电池扩散电流

I_{D0}　无光照时光伏电池的饱和电流

I_{EUT}　故障测试设备输出电流

I_{f}　励磁电流

I_{mpp}　光伏电池最大功率点电流

I_{r_lim}　最大转子电流有效值

I_{sc}　短路电流，光伏电池激发电流

$i_{\mathrm{dc_inv}}$	变流器逆变侧输入电流
$i_{\mathrm{dc_rc}}$	变流器整流侧输出电流
i_{ga}，i_{gb}，i_{gc}	电网 abc 相电流
i_{gd}，i_{gq}	电网电流 dq 轴分量
$i_{\mathrm{gq+}}^{+*}$，$i_{\mathrm{gq-}}^{-*}$	正负序无功电流指令
i_{q}^{+*}	正序无功电流给定
i_{q}^{+}	正序无功电流
$\boldsymbol{i}'_{\mathrm{r}}$	转子电流矢量
$\boldsymbol{i}'^{*}_{\mathrm{r}}$	转子电流矢量给定
i'_{rd}，i'_{rq}	转子 dq 轴电流
$i'_{\mathrm{rm_max}}$	转子最大电流
$\boldsymbol{i}_{\mathrm{s}}$	定子电流矢量
i_{sd}，i_{sq}	定子 dq 轴电流
J_1，J_2	齿轮箱低速轴和高速轴的转动惯量
J_{G}	发电机转子转动惯量
J_{L}	等效风电机组转子转动惯量
J_{WT}，J'_{WT}	风力机风轮转动惯量和等效风轮转动惯量
K	玻耳兹曼常数，光伏温度与环境温度转换系数
K_{End}	仿真测试数据终止序号
K_{g}	齿轮箱传动比
K_{s}	轴刚性系数
K_{sG}	发电机侧齿轮箱轴的刚性系数
K'_{sG}	风力机组传动轴等效刚性系数
K_{sr}	定转子绕组匝数比
K_{Start}	仿真测试数据起始序号
K_{sWT}	风力机侧齿轮箱轴的刚性系数
k_{T}	磁链跟踪系数
$\boldsymbol{L}^{-1}$	电感矩阵的逆矩阵 $\boldsymbol{L}^{-1}=\dfrac{1}{L_{\mathrm{s}}L'_{\mathrm{r}}-L_{\mathrm{m}}^{2}}\begin{bmatrix} L'_{\mathrm{r}} & 0 & -L_{\mathrm{m}} & 0 \\ 0 & L'_{\mathrm{r}} & 0 & -L_{\mathrm{m}} \\ -L_{\mathrm{m}} & 0 & L_{\mathrm{s}} & 0 \\ 0 & -L_{\mathrm{m}} & 0 & L_{\mathrm{s}} \end{bmatrix}$
L_0	三相四桥臂变流器零序通道电感
L_{g}	变流器并网电感
L'_{lr}	绕组折算后的转子漏感
L_{ls}，L_{lr}	定子和转子漏感
L_{m}	旋转坐标系下的定转子间的互感
L_{md}，L_{mq}	发电机 dq 轴励磁电感
L_{s}，L'_{r}	定子和转子电感
m_{a}，m_{b}，m_{c}	三相调制比

m_d，m_q	旋转变换的等效 dq 轴调制比
N_A，N_D	受主杂质和施主杂质浓度
N_C，N_V	导带和价带的有效态密度
P_c	变流器有功功率
P_{em}	电磁功率
P_m	风力机捕获的机械功率
P_{mec}	发电机输入的机械功率
P_n	风电场额定输出功率
P_{opt}	最优功率
P_{out}	风电场输出有功功率
P'_r，Q'_r	折算后转子输出有功功率
P_s，Q_s	定子输出有功、无功功率
P_s^*，Q_s^*	定子有功、无功功率给定值
P_w	风力机输入功率
P_{x0}^+，P_{x0}^-	正负序有功功率，$x=g$，c 分别表示网侧变流器电网侧和交流输出侧变量
$P_{x\cos}$，$P_{x\sin}$	二倍频波动有功功率，$x=g$，c 分别表示网侧变流器电网侧和交流输出侧变量
p_n	极对数
Q	电子电荷常量
Q_{Lls}	定子漏感无功功率
Q'_{Llr}	频率折算后转子漏感无功功率
Q_{Lm}	励磁电感无功功率
Q_{x0}^+，Q_{x0}^-	正负序无功功率，$x=g$，c 分别表示网侧变流器电网侧和交流输出侧变量
$Q_{x\cos}$，$Q_{x\sin}$	二倍频波动无功功率，$x=g$，c 分别表示网侧变流器电网侧和交流输出侧变量
q	90°移项算子，电子电荷量
R	风力机叶片扫掠圆半径
R_{cb}	撬棒电路电阻
R_g	变流器并网电阻
R_l	传输线路电阻
R_L	光伏电池外接负载
R_r	转子电阻
R'_r	绕组折算到定子侧后的转子电阻
R_s	定子电阻
R_{SDBR}	SDBR 阻值
R_{sh}	旁漏电阻
S	风力机叶片的扫掠面积，辐射照度
S_a，S_b，S_b	三相桥臂开关函数

s，s_0　转差率和额定转差率

T　光伏电池温度

T_1　齿轮箱输入转矩

T_2　齿轮箱输出转矩

T_{air}　环境温度

T_e　发电机电磁转矩

$\boldsymbol{T}_{2r/2s}$　两相旋转至两相静止坐标变换阵 $\boldsymbol{T}_{2r/2s}=\begin{bmatrix}\cos\theta & -\sin\theta\\ \sin\theta & \cos\theta\end{bmatrix}$

$\boldsymbol{T}_{2s/2r}$　两相静止至两相旋转坐标变换阵 $\boldsymbol{T}_{2s/2r}=\begin{bmatrix}\cos\theta & \sin\theta\\ -\sin\theta & \cos\theta\end{bmatrix}$

$\boldsymbol{T}_{2s/2s+}$　正序分量变换阵 $\boldsymbol{T}_{2s/2s+}=\frac{1}{2}\begin{bmatrix}1 & -q\\ q & 1\end{bmatrix}$

$\boldsymbol{T}_{2s/2s-}$　负序分量变换阵 $\boldsymbol{T}_{2s/2s-}=\frac{1}{2}\begin{bmatrix}1 & q\\ -q & 1\end{bmatrix}$

$\boldsymbol{T}_{2s/3s}$　两相静止至三相静止坐标变换阵 $\boldsymbol{T}_{2s/3s}=\begin{bmatrix}1 & 0\\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2}\\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2}\end{bmatrix}$

$\boldsymbol{T}_{3s/2s}$　三相静止至两相静止坐标变换阵 $\boldsymbol{T}_{3s/2s}=\frac{2}{3}\begin{bmatrix}1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2}\\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2}\end{bmatrix}$

$\boldsymbol{T}_{3s/3s+}$　正序分量变换矩阵 $\boldsymbol{T}_{3s/3s+}=\frac{1}{3}\begin{bmatrix}1 & a & a^2\\ a^2 & 1 & a\\ a & a^2 & 1\end{bmatrix}$

$\boldsymbol{T}_{3s/3s-}$　负序分量变换矩阵 $\boldsymbol{T}_{3s/3s-}=\frac{1}{3}\begin{bmatrix}1 & a^2 & a\\ a & 1 & a^2\\ a^2 & a & 1\end{bmatrix}$

$\boldsymbol{T}_{3s/3s0}$　正序分量变换矩阵 $\boldsymbol{T}_{3s/3s0}=\frac{1}{3}\begin{bmatrix}1 & 1 & 1\\ 1 & 1 & 1\\ 1 & 1 & 1\end{bmatrix}$

T_s　开关周期

T_{WT}，T'_{WT}　风力机机械转矩和等效机械转矩

U　电压幅值

$\dot{U}^+$，$\dot{U}^-$，$\dot{U}^0$　正负零序电压相量

$\dot{U}_a$，$\dot{U}_b$，$\dot{U}_c$　abc 相电压相量

U_{dc}　变流器直流母线电压

U_{mpp}　最大功率点电压

U_{min}，U_{max}　规定电压的最小、最大幅值

U_{mpp}	光伏电池最大功率点电压
U_n	额定电压
U_{oc}	光伏电池的开路电压
U_{peak}，I_{peak}	转子侧变流器输出电压、电流最大值
U_{pv}	光伏电池输出电压
U_s	定子端电压
u_{abc}	三相静止坐标系下电压变量
u_c	变流器输出电压
u_{cd}^*，u_{cq}^*	变流器输出 dq 轴电压给定值
u_{cd}，u_{cq}	变流器输出 dq 轴电压
u_{dq}	两相同步旋转坐标系下电压变量
$\boldsymbol{u}_g$	电网电压矢量
$\boldsymbol{u}_g^+$，$\boldsymbol{u}_g^-$	电网电压矢量正负序分量
u_{gabc}	三相静止坐标系下电网电压
u_{gd}，u_{gq}	电网电压 dq 轴分量
u_{gm}^*	电网相电压幅值给定值
u_{gm}	电网相电压幅值
u_r'	转子电压
$\boldsymbol{u}_r'$	发电机转子电压矢量
u_{rd}'，u_{rq}'	绕组折算到定子侧后的发电机转子端 dq 轴电压
u_s	定子电压
$\boldsymbol{u}_s$	发电机定子端电压矢量
u_{sd}，u_{sq}	发电机定子侧 dq 轴电压
u_{xd+}^+，u_{xq+}^+	正序电压 dq 分量，$x=g$，c 分别表示网侧变流器电网侧和交流输出侧变量
u_{xd-}^-，u_{xq-}^-	负序电压 dq 分量，$x=g$，c 分别表示网侧变流器电网侧和交流输出侧变量
$\lvert\boldsymbol{u}_{gdq+}^+\rvert$，$\lvert\boldsymbol{u}_{gdq-}^-\rvert$	正负序电压幅值
$u_{\alpha\beta}$	两相静止坐标系下电压变量
v	风速
X_1	限流电抗
X_2	短路电抗
X_l	传输线路电抗
X_{ls}，X_{lr}'	定转子漏抗
X_m	励磁电抗
Z^+，Z^-，Z^0	正负零序阻抗
Z_f	GCP 和故障点之间的短路阻抗
Z_s	电网与 GCP 之间的线路阻抗
α	阻抗角
α_0	晶闸管的触发延迟角
β	风力机桨距角
β_{ref}	风力机桨距角给定值

ΔU	电网电压跌落比例
Δu_{gd}，Δu_{gq}	变流器 dq 轴前馈补偿项
δ	定子电压不平衡度
ζ	阻尼比
θ	a 轴和 d 轴之间的夹角
$\hat{\theta}^{+}$	锁相环输出的正序电压矢量的相位信号
θ_1	齿轮箱低速侧位置角
θ_2	齿轮箱高速侧位置角
θ_G	发电机位置角
θ_r	转子位置角
θ_s	风力机轴与发电机轴的扭角
θ_{WT}	风力机位置角
λ	叶尖速度比
λ_{opt}	最优叶尖速度比
λ_{max}	最大叶尖速度比
ρ	空气密度
σ	漏磁系数
τ_n，τ_p	电子和空穴的少子寿命
φ	相位跳变角
Ψ_d，Ψ_q	磁链 dq 分量
Ψ'_{rd}，Ψ'_{rq}	转子 dq 轴磁链
$\boldsymbol{\Psi}_s^{+}$，$\boldsymbol{\Psi}_s^{-}$，$\boldsymbol{\Psi}_{sdc}$	定子磁链矢量正负序和直流分量
$\boldsymbol{\Psi}_s$，$\boldsymbol{\Psi}'_r$	定转子磁链矢量
Ψ_{sd}，Ψ_{sq}	定子 dq 轴磁链
Ψ_α，Ψ_β	磁链 αβ 分量
Ω_1，Ω_2	齿轮箱低速轴和高速轴的机械角速度
Ω_R，ω_r	发电机机械角速度和旋转电角速度
Ω_S，ω_s	机械同步角速度和同步旋转电角速度
Ω_{WT}	风力机角速度
ω_c	截止角频率
ω_{rm}	异步风电机组临界角速度
$\overline{\omega}_s$，$\overline{\omega}'_r$	定转子磁链直流分量的衰减速度，$\overline{\omega}_s = R_s L'_r/(L_s L'_r - L_m^2)$ $\overline{\omega}'_r = R'_r L_s/(L_s L'_r - L_m^2)$
$\overline{\omega}_{sm}$，$\overline{\omega}'_{rm}$	定转子磁链之间的耦合强度，$\overline{\omega}_{sm} = R_s L_m/(L_s L'_r - L_m^2)$ $\overline{\omega}'_{rm} = R'_r L_m/(L_s L'_r - L_m^2)$
ω_{sr}	转差电角速度