

中国制造2025前沿技术丛书

智能电网关键技术研究与应用丛书

# 柔性直流 输电系统

徐政 等著

第2版



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS



中国制造2025 前沿技术丛书  
智能电网关键技术研究与应用丛书

# 柔性直流输电系统

第2版

徐 政  
肖晃庆 张哲任 薛英林 刘高任 唐 庚  
许 烽 王世佳 屠卿瑞 管敏渊 刘 昇  
李宇骏 潘伟勇 于 洋 肖 亮 郝全睿  
潘武略 张 静 陈海荣

著



机械工业出版社

本书系统讲述了柔性直流输电的理论和应用。内容包括柔性直流输电系统的特点和应用,模块化多电平换流器(MMC)的工作原理、主电路参数选择与损耗计算,两端柔性直流输电系统与多端柔性直流输电网的控制和故障保护策略,单向点对点柔性直流输电系统,交流线路改造成直流线路的拓扑结构及特性研究,柔性直流输电应用于海上风电场接入电网,柔性直流输电系统的电磁暂态仿真方法和机电暂态仿真方法,柔性直流输电换流站的绝缘配合设计,MMC 阀的设计等。

本书适合于从事柔性直流输电技术研究、开发、应用的技术人员和电力系统科研、规划、设计、运行的工程师,以及高等学校电力系统专业的教师和研究生阅读。

## 图书在版编目(CIP)数据

柔性直流输电系统/徐政等著. —2 版. —北京:机械工业出版社, 2016. 11

(中国制造 2025 前沿技术丛书·智能电网关键技术研究与应用丛书)

ISBN 978-7-111-55336-6

I. ①柔… II. ①徐… III. ①直流输电-电力系统  
IV. ①TM721.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 267482 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:闫洪庆 朱林

责任校对:杜雨霏 封面设计:鞠杨

责任印制:李洋

保定市 中画美凯印刷有限公司印刷

2017 年 2 月第 2 版第 1 次印刷

184mm×260mm·31.25 印张·2 插页·749 千字

0001—3000 册

标准书号:ISBN 978-7-111-55336-6

定价:180.00 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

## 第2版前言

自本书第1版出版以来,基于模块化多电平换流器(MMC)的柔性直流输电技术得到了更广泛的应用和发展,主要表现在两个方面:一是两端系统的电压等级和容量快速提升,二是多端系统和直流电网技术更趋于成熟。在此背景下,结合浙江大学交直流输电研究团队近年来在此领域所取得的新进展,我们对本书第1版作了较大篇幅的扩充,以充分反映柔性直流输电技术的新发展。此外,与第1版相比,第2版在系统性和完整性方面得到了加强,符号和术语也得到了进一步的规范。第2版各章的主要作者如下:第1章由徐政、陈海荣、潘武略、张静撰写,第2章由徐政、肖晃庆、张哲任、潘伟勇撰写,第3章由徐政、肖晃庆、张哲任、屠卿瑞、潘武略、张静撰写,第4章由徐政、肖晃庆、屠卿瑞、管敏渊、刘高任、张哲任、刘昇、陈海荣撰写,第5章由徐政、肖晃庆、张哲任、薛英林撰写,第6章由徐政、薛英林、肖晃庆、管敏渊撰写,第7章由徐政、张哲任、刘高任、肖晃庆、唐庚、许烽撰写,第8章由徐政、王世佳、肖晃庆、刘高任、薛英林、唐庚、潘武略撰写,第9章由徐政、许烽撰写,第10章由徐政、肖晃庆、李宇骏、于洋撰写,第11章由徐政、唐庚、刘高任撰写,第12章由徐政、刘昇、肖亮撰写,第13章由徐政、张哲任撰写,第14章由徐政、张哲任、郝全睿撰写,附录由徐政撰写。全书由徐政统稿。

限于作者水平和时间仓促,书中难免存在错误和不妥之处,恳请广大读者批评指正。作者联系方式:电话:0571-87952074,电子信箱:hvdc@zju.edu.cn。

徐 政

2016年10月

于浙江大学求是园

# 第 1 版前言

柔性直流输电指的是基于电压源换流器 (Voltage Source Converter, VSC) 的高压直流输电 (HVDC), ABB 公司称其为 HVDC Light, 西门子公司称其为 HVDCPLUS, 国际上的通用术语是 VSC-HVDC。这种技术既适合于小容量 (可以到数个 MW) 输电, 也适合于大容量输电, 更适合于电网之间的异步互连, 是输配电技术领域的一项重大突破, 将会对未来电力系统的发展方式产生深远影响。

1990 年, 加拿大 McGill 大学的 Boon-Teck Ooi 等人首先提出用脉冲宽度调制 (PWM) 控制的电压源换流器 (VSC) 进行直流输电。1997 年 3 月, ABB 公司进行了首次 VSC-HVDC 的工业试验, 即瑞典中部的 Hellsjon 工程 (10kV、150A、3MW、10km)。1999 年, ABB 公司在 Gotland 岛投入了世界上第一个商业化的柔性直流输电工程 (80kV、350A、50MW、70km)。2001 年, 德国慕尼黑联邦国防军大学的 Rainer Marquardt 提出了模块化多电平电压源换流器 (MMC) 的概念。2010 年 11 月, 世界上第一个基于模块化多电平电压源换流器的柔性直流输电 (MMC-HVDC) 工程——Trans Bay Cable 工程 ( $\pm 200\text{kV}$ 、1000A、400MW、86km) 在美国旧金山市投入运行, 西门子公司是该工程的换流站设备供应商。

柔性直流输电技术相比于传统直流输电技术, 其优势主要表现在: ①没有无功补偿问题; ②没有换相失败问题; ③可以为无源系统供电; ④可同时独立调节有功功率和无功功率; ⑤谐波水平低; ⑥适合构成多端直流系统; ⑦占地面积小。柔性直流输电的主要应用领域包括: ①远距离大容量输电; ②异步联网; ③海上风电场接入电网; ④分布式电源接入电网; ⑤向海上或偏远地区供电; ⑥构筑城市直流配电网; ⑦提高电能质量, 向重要负荷供电。

由于柔性直流输电技术发展时间还不长, 特别是基于模块化多电平换流器的柔性直流输电 (MMC-HVDC) 技术发展时间更短, 第一个商业化工程仅仅投运两年多时间, 因此这方面的专门著作还很少。而世界范围内柔性直流输电工程增长很快, 我国在柔性直流输电工程方面进展也很快, 国家电网公司和南方电网公司已有数个 MMC-HVDC 工程正在建设中, 因此, 迫切需要一本系统性地介绍柔性直流输电理论和应用的专著, 本书正是在这样的背景下开始撰写的。本书总结了浙江大学交直流输配电研究团队在柔性直流输电领域的工作积累, 是本研究团队共同努力的结晶。本书的第 1 章由徐政、陈海荣撰写, 第 2 章由徐政、潘伟勇、屠卿瑞、管敏渊、潘武略撰写, 第 3 章由屠卿瑞撰

写,第4章由管敏渊撰写,第5章由屠卿瑞撰写,第6章由管敏渊撰写,第7章由唐庚撰写,第8章和第9章由张哲任撰写,第10章由薛英林撰写,第11章由唐庚撰写,第12章由徐政、李宇骏、张静撰写,第13章由唐庚撰写,第14章由刘昇撰写,全书由徐政统稿。

与本书相关的研究工作得到了国家863高技术基金项目(2012AA050205, 2012AA051704)的资助,在此表示感谢。

限于作者水平和时间仓促,书中难免存在错误和不妥之处,恳请广大读者批评指正。作者联系方式:电话:0571-87952074,电子信箱:hvdc@zju.edu.cn。

徐 政

2012年8月

于浙江大学求是园

# 本书所用的机构缩略语

ABB	Asea Brown Boveri Ltd.	电力和自动化技术领域的厂商
BPA	Bonneville Power Administration	美国博纳维尔电管局
CENELEC	European Committee for Electrotechnical Standardization	欧洲电工标准化委员会
CEPEL	Name of research organization (of Brazil)	巴西的一个研究机构
CESI	Name of research organization (of Italy)	意大利的一个研究机构
CPRI	Central Power Research Institute (of India)	印度的中央电力研究院
CIGRÉ	Conseil International des Grands Réseaux Électriques, International Council on Large Electric Systems	国际大电网会议
DKE	Deutsche Kommission Elektrotechnik	德国电工委员会
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers	美国电气电子工程师协会
INELFE	Interconnecteur Electrique France- Espagne	法国-西班牙直流联网工程的业主公司
IREQ	Institute of research of Hydro-Québec, Varennes, Québec	魁北克水电局的研究所
REE	Red Eléctrica de España	西班牙电网公司
RTE	Réseau de Transport d'Electricité	法国电网公司
RTDS	Real Time Digital Simulator Technologies Inc.	实时数字仿真器技术公司
Siemens	Manufacturer of electrical equipment	西门子



# 本书所用的首字母缩略语

BCU	Basic Converter Unit	基本换流器单元
CCSC	Circulating Current Suppressing Controller	环流抑制控制器
CCSM	Cross Connected Sub-Module	交叉型子模块
CDSM	Clamping Double Sub-Module	钳位双子模块
CHB	Cascaded H Bridge	级联 H 桥
C-MMC	MMC using CDSM MMC using CCSM	采用钳位双子模块的模块化多电平换流器, 或采用交叉型子模块的模块化多电平换流器
C-MMC-HVDC	MMC using CDSM based High Voltage Direct Current	采用钳位双子模块的模块化多电平换流器的高压直流系统
CM	Current Modulator	电流调制器
DDSRF	Decoupled Double Synchronous Reference Frame	正负序解耦双同步旋转坐标系
DDSRF-PLL	Decoupled Double Synchronous Reference Frame - Phase Locked Loop	基于双同步旋转坐标变换正负序解耦技术的锁相环
DFIG	Doubly Fed Induction Generator	双馈感应发电机
DS	Director Switch	导通开关
FBSM	Full Bridge Sub-Module	全桥子模块
F-MMC	MMC using FBSMs	采用全桥子模块的模块化多电平换流器
FRC	Fully Rated Converter	全功率换流器
FSIG	Fixed Speed Induction Generator	定速感应发电机
GSC	Grid Side Converter	网侧换流器
GTO	Gate Turn-Off thyristor	门极关断晶闸管
HBSM	Half Bridge Sub-Module	半桥子模块
HCMC	Hybrid Cascaded Multilevel Converter	混合级联多电平换流器
H-MMC	MMC using HBSM	采用半桥子模块的模块化多电平换流器
HVDC	High Voltage Direct Current	高压直流输电



IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor	绝缘栅双极型晶体管
KCL	Kirchhoff's Current Law	基尔霍夫电流定律
KVL	Kirchhoff's Voltage Law	基尔霍夫电压定律
LCC	Line Commutated Converter	电网换相换流器
LCC-C-MMC	Line Commutated Converter with MMC using CDSMs	采用 LCC 和钳位双子模块 MCC 构成的混合式直流输电系统
LCC-HVDC	Line Commutated Converter based High Voltage Direct Current	采用 LCC 的高压直流输电
LCS	Load Commutation Switch	负载转移开关
MB	Main breaker	主断路器
MCOV	Maximum value of Continuous Operating Voltage	最大持续运行电压
MMC	Modular Multilevel Converter	模块化多电平换流器
MMCB	Modular Multilevel Converter Bank	模块化多电平换流器组
MMPFC	Modular Multilevel Power Flow Controller	模块化多电平潮流控制器
MOA	Metal-Oxide Arrester	金属氧化物避雷器
MPPT	Maximum Power Point Tracking	最大功率点跟踪
NLC	Nearest Level Control	最近电平控制
NLM	Nearest Level Modulation	最近电平调制
pu	per unit	标么值
PCC	Point of Common Coupling	公共连接点
PCOV	Peak value of Continuous Operating Voltage	持续运行电压峰值
PI	Proportional Integral Controller	比例积分控制器
PLL	Phase Locked Loop	锁相环
PRC	Proportional Resonant Controller	比例谐振控制器
PSC	Power Synchronization Control	功率同步控制
PWM	Pulse Width Modulation	脉冲宽度调制
RSC	Rotor Side Converter	转子侧换流器
RSI WV	Required Switching Impulse Withstand Voltage	要求的操作冲击耐受电压
SCR	Short Circuit Ratio	短路比
SHEPWM	Selective Harmonic Elimination Pulse Width Modulation	特定谐波消去脉宽调制
SHESM	Selective Harmonic Elimination Stair Modulation	特定谐波消去阶梯波调制

SIPL	Switching Impluse Protective Level	操作冲击保护水平
SM	Sub- Module	子模块
SPWM	Sinusoidal Pulse Width Modulation	正弦脉宽调制
SRF-PLL	Synchronous Reference Frame - Phase Locked Loop	基于同步旋转坐标变换的锁相环
SSIWV	Specified Switching Impluse Withstand Voltage	额定操作冲击耐受电压
STATCOM	Static Synchronous Compensator	静止同步补偿器
SVC	Space Vector Control	空间矢量控制
SVM	Space Vector Modulation	空间矢量调制
THD	Total Harmonic Distortion	总谐波畸变率
TPS- HVDC	Tripole Structure based HVDC	三极高压直流输电
TWBS- HVDC	Three- Wire Bipole Structure based HVDC	三线双极高压直流输电
UFD	Ultra- Fast Disconnecter	超高速隔离开关
VBE	Valve Base Electronics	阀基电子设备
VDCOL	Voltage Dependent Current Order Limit	低压限流
VDPOL	Voltage Dependent Power Order Limit	低压限功率控制
VISMA	Virtual Synchronous Machine	虚拟同步机
VSC	Voltage Source Converter	电压源换流器
VSC- HVDC	Voltage Source Converter based High Voltage Direct Current	电压源换流器型高压直流输电
VSC- MTDC	Voltage Source Converter based Multi- Terminal Direct Current	电压源换流器型多端直流输电

# 本书所用的主要物理量符号

$C_0$	子模块电容
$C_{\text{arm}}$	桥臂等效电容
$C_{\text{ph}}$	相单元等效电容
$C_{\text{mmc}}$	MMC 集总等效电容
$C_p$	风力机的功率系数
$C_{\text{sm}}$	子模块等效电容
$dq$	以电网角频率 $\omega$ 正方向（逆时针）旋转的坐标系
$d^2q^2$	以 2 倍电网角频率 $2\omega$ 正方向（逆时针）旋转的坐标系
$d^{-1}q^{-1}$	以电网角频率 $\omega$ 反方向（顺时针）旋转的坐标系
$d^{-2}q^{-2}$	以 2 倍电网角频率 $2\omega$ 反方向（顺时针）旋转的坐标系
$D$	发电机运动方程中的阻尼系数
$D_g$	发电机的阻尼系数
$D_t$	风力机的阻尼系数
$D_{\text{tg}}$	风电机组轴系阻尼系数
$D_{\text{tot}}$	风电机组的集总阻尼系数
$e_{\text{pc}}$	外部电压加在 MMC c 相“上桥臂”上的电压
$E_{\text{arm}}(t-h)$	离散化处理后的整个桥臂的戴维南等效电势
$E_{\text{nj}}$	j 相下桥臂电抗器与子模块相接的点
$E_{\text{off}}$	IGBT 的关断损耗能量
$E_{\text{on}}$	IGBT 的开通损耗能量
$E_{\text{rec}}$	二极管的关断损耗能量
$E_{\text{smeq}}(t-h)$	离散化处理后的子模块戴维南等效电势
$E_{\text{swl}}$	一个基波周期内必要开关损耗对应的能量
$E_{\text{sw,add}}$	附加开关损耗对应的能量
$f$	电网频率
$f_0$	电网额定频率
$f_1$	MMC 电平数与控制器控制频率完全呈线性关系的分界点
$f_2$	使 MMC 子模块电平利用率达到最大的控制器控制频率
$f_{\text{ctrl}}$	MMC 控制频率
$f_{\text{res}}$	MMC 在直流侧呈现的等效阻抗所对应的谐振频率

$f_{sw,ave}$	MMC 中 IGBT 的平均开关频率
$h$	(1) 表示谐波次数; (2) 表示时域仿真时的积分步长
$H$	(1) 发电机惯性时间常数; (2) MMC 等容量放电时间常数
$H_1$	风力机的惯性常数
$H_g$	发电机的惯性常数
$H_{tot}$	风力机与发电机的集总惯性常数
$i$	(1) 表示电流瞬时值的一般性符号; (2) 表示逆变侧
$i_{arm}$	MMC 的桥臂电流
$i_{cmmc}$	MMC 直流侧等效电路中流过等效电容的电流
$i_{c,na}, i_{c,nb}, i_{c,nc}$	MMC 下桥臂三相子模块电容电流集合平均值
$i_{c,pa}, i_{c,pb}, i_{c,pc}$	MMC 上桥臂三相子模块电容电流集合平均值
$i_{c,rj}$	$j$ 相 $r$ 桥臂子模块电容电流集合平均值
$i_{c,rj-i}$	$j$ 相 $r$ 桥臂第 $i$ 个子模块电容电流
$i_{CE}$	IGBT 导通时流过的电流
$i_{cirj}$	$j$ 相环流, $i_{cirj} = \frac{1}{2}(i_{pj} + i_{nj})$
$i_{cird}, i_{cirq}$	MMC 三相环流的 $d$ 轴分量和 $q$ 轴分量
$i_D$	二极管导通时流过的电流
$i_d^*$	MMC 采用内外环控制器时由外环控制器产生的内环电流控制器 $d$ 轴电流指令值
$i_{dH}^*$	直流电压裕额控制器中由高电压限值控制器决定的 $d$ 轴电流指令值
$i_{dL}^*$	直流电压裕额控制器中由低电压限值控制器决定的 $d$ 轴电流指令值
$I_{dmax}^*$	直流电压裕额控制器的 $d$ 轴电流上限值
$I_{dmin}^*$	直流电压裕额控制器的 $d$ 轴电流下限值
$i_{dP}^*$	直流电压裕额控制器中由定直流功率控制器决定的 $d$ 轴电流指令值
$i_{dc}$	MMC 直流侧电流瞬时值
$i_{dcf}$	MMC 直流侧故障后的故障分量, 其由 $-U_{dcf0}$ 单独作用产生
$i_{na}, i_{nb}, i_{nc}$	MMC 下桥臂各相电流
$i_{pa}, i_{pb}, i_{pc}$	MMC 上桥臂各相电流
$i_{pa\infty}$	MMC 在发生直流侧短路故障闭锁后的 $a$ 相上桥臂稳态电流
$i_{rd}, i_{rq}$	DFIG 转子电流的 $d$ 轴和 $q$ 轴分量
$i_{rj}$	$j$ 相 $r$ 桥臂电流
$i_{sd}, i_{sq}$	风力发电机定子电流的 $dq$ 轴分量
$i_{sm}$	流入子模块的电流
$i_{VT1}, i_{VD1}, i_{VT2}, i_{VD2}$	MMC 子模块中开关管 $VT_1$ 、 $VD_1$ 、 $VT_2$ 、 $VD_2$ 的电流
$i_{V1}$	子模块中流过上管 $VT_1$ 或其反并联二极管 $VD_1$ 的电流
$i_{V2}$	子模块中流过上管 $VT_2$ 或其反并联二极管 $VD_2$ 的电流
$i_{va}, i_{vb}, i_{vc}$	MMC 阀侧交流相电流
$i_{va}^+, i_{vb}^+, i_{vc}^+$	MMC 阀侧交流三相电流正序分量

$i_{va}^-, i_{vb}^-, i_{vc}^-$	MMC 阀侧交流三相电流负序分量
$i_{v\alpha}^-, i_{v\beta}^-$	MMC 阀侧三相电流的 $\alpha$ 轴和 $\beta$ 轴分量
$i_{vd}^-, i_{vq}^-$	MMC 阀侧三相交流电流的 $d$ 轴分量和 $q$ 轴分量
$i_{vd}^*, i_{vq}^*$	MMC 阀侧三相交流电流的 $d$ 轴分量和 $q$ 轴分量的参考值 (注: 右上角带“*”的, 在本书中表示参考值, 后面不再一一列出)
$i_{vd}^+, i_{vq}^+$	$i_{v\alpha}^-, i_{v\beta}^-$ 通过正向旋转坐标变换得到的 $dq$ 坐标系中的 $d$ 轴和 $q$ 轴分量
$\overline{i_{vd}^-}, \overline{i_{vq}^-}$	$i_{v\alpha}^-, i_{v\beta}^-$ 通过反向旋转坐标变换得到的 $d^{-1}q^{-1}$ 坐标系中的 $d$ 轴和 $q$ 轴分量
$\overline{i_{vdq}^+}$	$i_{vd}^+, i_{vq}^+$ 中的直流分量
$\widehat{i_{vdq}^+}$	$i_{vd}^+, i_{vq}^+$ 中的 2 次谐波分量, 等于 $\overline{i_{vdq}^-}$ 在 $d^2q^2$ 坐标系中的投影
$\widetilde{i_{vdq}^+}$	$i_{vd}^+, i_{vq}^+$ 中的高次谐波分量
$\overline{i_{vdq}^-}$	$i_{vd}^-, i_{vq}^-$ 中的直流分量
$\widehat{i_{vdq}^-}$	$i_{vd}^-, i_{vq}^-$ 中的 2 次谐波分量, 等于 $\overline{i_{vdq}^+}$ 在 $d^{-2}q^{-2}$ 坐标系中的投影
$\widetilde{i_{vdq}^-}$	$i_{vd}^-, i_{vq}^-$ 中的高次谐波分量
$I_{c,peak}$	子模块电容电流的峰值
$I_{c,rms}$	子模块电容电流的有效值
$I_{VD1,peak}$	子模块 IGBT <sub>1</sub> 反并联二极管 VD <sub>1</sub> 电流的峰值
$I_{VD1,rms}$	子模块 IGBT <sub>1</sub> 反并联二极管 VD <sub>1</sub> 电流的有效值
$I_{VD2,peak}$	子模块 IGBT <sub>2</sub> 反并联二极管 VD <sub>2</sub> 电流的峰值
$I_{VD2,rms}$	子模块 IGBT <sub>2</sub> 反并联二极管 VD <sub>2</sub> 电流的有效值
$I_{dc}$	MMC 直流侧电流直流分量
$I_{dc0}$	MMC 直流侧故障前的电流初始值
$I_{dcB}$	MMC 在发生直流侧短路故障闭锁瞬间的直流侧电流值
$I_{dci}$	三线双极直流系统中逆变侧正极或负极换流器输出的电流
$I_{dcm}$	三极或三线双极直流系统中的调制极电流 (稳态)
$I_{den}$	三极或三线双极直流系统中的负极电流 (稳态)
$I_{dep}$	三极或三线双极直流系统中的正极电流 (稳态)
$I_{dcN}$	MMC 直流侧电流额定值
$I_{dcr}$	三线双极直流系统中整流侧正极或负极换流器输出的电流
$I_{des}$	MMC 直流侧等效电路中与网侧有功对应的直流电流
$I_{deT}$	MMC 在发生直流侧短路故障闭锁后交流开关跳开瞬间的直流侧电流值
$I_{dc\infty}$	MMC 在发生直流侧短路故障闭锁后的直流侧稳态电流
$I_{dcim}$	三极或三线双极直流系统中的逆变侧调制极电流
$I_{dcin}$	三极或三线双极直流系统中的逆变侧负极电流
$I_{dcip}$	三极或三线双极直流系统中的逆变侧正极电流
$I_{derm}$	三极或三线双极直流系统中的整流侧调制极电流
$I_{derN}$	三极或三线双极直流系统中的整流侧负极电流

$I_{\text{derp}}$	三极或三线双极直流系统中的整流侧正极电流
$I_{\text{high}}$	三极或三线双极直流系统中的电流高值
$I_{\text{lim}}$	三极或三线双极直流系统中每极导线的电流热极限值
$I_{\text{low}}$	三极或三线双极直流系统中的电流低值
$I_{\text{mod}}$	三极或三线双极直流系统中的调制极电流幅值
$I_{\text{paB}}$	MMC 在发生直流侧短路故障闭锁瞬间的 a 相上桥臂电流值
$I_{\text{ref}}$	避雷器参考电流, 定义为大于此电流后避雷器上产生的热效应将非常明显
$I_{\text{rN}}$	MMC 桥臂电流额定值
$I_{\text{r2m}}$	r 桥臂二倍频环流的幅值
$I_{\text{s3m}}$	桥臂电抗器虚拟等电位点上发生三相短路时的阀侧线电流幅值
$I_{\text{st}}$	充电时联接变压器网侧相电流幅值
$I_{\text{VT1, peak}}$	子模块 IGBT <sub>1</sub> 电流的峰值
$I_{\text{VT1, rms}}$	子模块 IGBT <sub>1</sub> 电流的有效值
$I_{\text{VT2, peak}}$	子模块 IGBT <sub>2</sub> 电流的峰值
$I_{\text{VT2, rms}}$	子模块 IGBT <sub>2</sub> 电流的有效值
$I_{\text{v}}$	MMC 交流侧输出相电流基波有效值
$I_{\text{v}}^{+}$	MMC 阀侧交流相电流正序基波幅值
$I_{\text{v}}^{+h}$	MMC 阀侧交流相电流正序 $h$ 次谐波幅值
$I_{\text{v}}^{-}$	MMC 阀侧交流相电流负序基波幅值
$I_{\text{v}}^{-h}$	MMC 阀侧交流相电流负序 $h$ 次谐波幅值
$I_{\text{vm}}$	MMC 交流侧输出相电流基波幅值
$I_{\text{vmmax}}$	MMC 阀侧交流相电流幅值的最大值
$I_{\text{vN}}$	MMC 交流侧基波电流额定值 (标么值)
$j$	表示 a、b、c 三相中的任意一相
$k$	$k = 1, 2, 3 \dots$ 为正整数
$k_{\text{rank}}$	电容电压采用保持因子排序时的保持因子
$K$	电压下斜控制中电压下斜曲线的斜率
$K_{\text{mod}}$	三极或三线双极直流系统中的电流调制率, 定义为正极线或负极线中流过的最大电流与最小电流的比值
$K_{\text{shift}}$	三极或三线双极直流系统中的电流转移率, 定义为调制极的直流电流值与正极线或负极线中流过的最大直流电流的比值
$K_{\text{tg}}$	轴系的弹性系数
$K_{\text{U}}$	负荷电压控制器中的比例系数
$L$	表示电感或电抗的通用符号
$L_0$	MMC 桥臂电抗器的电感
$L_{\mu}$	从直流侧看进去 LCC 的内电感
$L_{\text{ac}}$	换流器交流出口到交流系统等效电势之间的等效电感 (包含系统等效电感和变压器漏电感)

$L_d, L_q$	同步发电机 $dq$ 轴自感
$L_{dc}$	考虑平波电抗器和故障线路后的电感
$L_{dcB}$	MMC 闭锁前的最大直流短路电流等于闭锁后的直流短路电流所对应的平波电抗器电感值
$L_{dm}$	发电机 $d$ 轴励磁电感
$L_{line}$	直流线路电感
$L_{ls}, L_{lr}$	DFIG 定子和转子的漏感
$L_m$	DFIG 励磁电感
$m$	MMC 的输出电压调制比, 等于调制波相电压幅值除以 $U_{dc}/2$
$m_{min}$	MMC 的输出电压调制比的最小值
$m_{max}$	MMC 的输出电压调制比的最大值
$n$	(1) 表示非特定的数量; (2) 表示直流系统的负极; (3) 表示 MMC 的下桥臂
$n_{level}$	MMC 输出的电压阶梯波中的电压阶梯数, 即 MMC 输出的实际电平数
$n_{nj}$	某时刻 $j$ 相下桥臂投入的子模块个数
$n_{on,k}$	第 $k$ 个 IGBT 器件在一个工频周期内开通的次数
$n_{pj}$	某时刻 $j$ 相上桥臂投入的子模块个数
$N$	一个桥臂上的子模块个数
$N_{arm}$	某桥臂可投入运行的所有子模块个数
$\Delta N_{dc}$	MMC 设计时考虑的冗余子模块数目
$N_{on}$	某桥臂当前控制时刻需投入的子模块个数
$N_{on,old}$	某桥臂前一控制时刻需投入的子模块个数
$\Delta N_{on}$	某桥臂当前控制时刻相比前一控制时刻需投入的子模块数目的增量
$N_{op}$	MMC 运行时桥臂上需投入的最大子模块数目
$\Delta N_{op}$	MMC 桥臂子模块数 $N$ 与 $N_{op}$ 之差
$N_{pair}$	同步发电机极对数
$p$	(1) 表示瞬时有功功率的一般性符号; (2) 表示直流系统的正极; (3) 表示 MMC 的上桥臂
$p_s$	MMC 交流母线注入交流电网的瞬时有功功率
$p_s^+$	由正序电压和正序电流构成的 MMC 交流母线注入系统瞬时有功功率
$p_v$	MMC 交流出口注入交流电网的瞬时有功功率
$P$	表示基波有功功率或平均功率的一般性符号
$P_D$	二极管的总损耗功率
$P_{Deon}$	二极管的通态损耗功率
$P_{dc}$	MMC 注入直流侧的功率
$P_{dc}^*$	调度中心下发给换流站的功率指令值
$\Delta P_{dc}^*$	功率指令值的增量



$P_{\text{demark}}$	电压基准换流站的实发功率
$P_{\text{demark}}^*$	电压基准换流站的功率指令值
$P_{\text{diff}}$	从 MMC 桥臂电抗器虚拟等电位点 diff 注入交流电网的基波有功功率
$P_e$	发电机输出的电磁功率
$P_{\text{grid}}$	FRC 风电机组网侧换流器输出的有功功率
$\Delta P_{\text{grid}}^*$	二次调压时计算出来的全网功率指令值增量
$P_m$	传递到发电机转子的机械功率
$P_{\text{off}}$	IGBT 的关断损耗功率
$P_{\text{on}}$	IGBT 的开通损耗功率
$P_r$	DFIG 转子输出的有功功率
$P_{\text{rec}}$	二极管的反向恢复损耗功率
$P_s$	(1) MMC 交流母线注入交流电网的基波有功功率; (2) 发电机定子输出的有功功率
$P_{\text{swl}}$	必要开关损耗对应的功率
$P_T$	IGBT 的总损耗功率
$P_{\text{Tcon}}$	IGBT 的通态损耗功率
$P_v$	MMC 交流出口注入交流电网的基波有功功率
$q$	表示瞬时无功功率的一般性符号
$q_s$	MMC 交流母线注入交流电网的瞬时无功功率
$q_s^+$	由正序电压和正序电流构成的 MMC 交流母线注入系统瞬时无功功率
$q_v$	MMC 交流出口注入交流电网的瞬时无功功率
$Q$	表示基波无功功率的一般性符号
$Q_{\text{diff}}$	从 MMC 桥臂电抗器虚拟等电位点 diff 注入交流电网的基波无功功率
$Q_s$	MMC 交流母线注入交流电网的基波无功功率
$Q_v$	MMC 交流出口注入交流电网的基波无功功率
$r$	(1) 表示电阻的一般性符号; (2) 用来表示 MMC 的上桥臂 p 或下桥臂 n; (3) 表示整流侧
$r_{\text{CE}}$	IGBT 的通态电阻
$r_D$	二极管的通态电阻
$R$	表示电阻的一般性符号
$R_0$	模拟 MMC 桥臂和换流变压器损耗的等效电阻
$R_{\text{arm}}$	离散化处理后整个桥臂的戴维南等效电阻
$R_{\text{dc}}$	考虑平波电抗器和故障线路后的电阻
$R_{\text{de}}$	MMC 桥臂子模块设计冗余度
$R_{\text{dis}}$	MMC 直流侧短路时闭锁前 MMC 放电的等效电阻
$R'_{\text{dis}}$	全桥子模块 MMC 直流侧短路时闭锁后 MMC 放电的等效电阻

$R_{\text{lim}}$	限流电阻
$R_{\text{line}}$	直流线路电阻
$R_{\text{op}}$	MMC 桥臂子模块运行冗余度
$R_r$	风力发电机转子绕组电阻
$R_s$	风力发电机定子绕组电阻
$R_{\text{smeq}}$	离散化处理后的子模块戴维南等效电阻
$R_{\text{sys}}$	交流系统等效电阻
$s$	异步电机中的转差率
$S_{\text{diffN}}$	MMC 在桥臂电抗器虚拟等电位点输出的额定容量
$S_{\text{na}}, S_{\text{nb}}, S_{\text{nc}}$	MMC 下桥臂三相平均开关函数
$S_{\text{pa}}, S_{\text{pb}}, S_{\text{pc}}$	MMC 上桥臂三相平均开关函数
$S_{rj}$	MMC 的 $j$ 相 $r$ 桥臂的平均开关函数
$S_{rj_i}$	$j$ 相 $r$ 桥臂第 $i$ 个子模块的开关函数
$S_s$	换流站的视在容量, 即从换流站注入交流系统的复功率模值
$S_v$	MMC 阀侧的视在容量
$S_{vN}$	MMC 阀侧的额定容量
$t$	时间
$T$	电网工频周期
$T_{3s-2s}$	从 $abc$ 三相静止坐标系变换到 $\alpha\beta$ 静止坐标系的变换矩阵
$T_{2s-dq}(\theta)$	从 $\alpha\beta$ 二相静止坐标系变换到 $dq$ 旋转坐标系的变换矩阵
$T_{3s-dq}(\theta)$	从 $abc$ 三相静止坐标系变换到 $dq$ 旋转坐标系的变换矩阵
$T_{3s-dq}(-\theta)$	从 $abc$ 三相静止坐标系变换到 $d^{-1}q^{-1}$ 旋转坐标系的变换矩阵
$T_{3s-dq}(-2\theta)$	从 $abc$ 三相静止坐标系变换到 $d^{-2}q^{-2}$ 旋转坐标系的变换矩阵
$T_{\text{const}}$	三极或三线双极直流系统中的状态恒定周期
$T_{\text{ctrl}}$	MMC 控制周期
$T_{dq-3s}(\theta)$	从 $dq$ 旋转坐标系变换到 $abc$ 三相静止坐标系的变换矩阵
$T_{dq-3s}(-\theta)$	从 $d^{-1}q^{-1}$ 旋转坐标系变换到 $abc$ 三相静止坐标系的变换矩阵
$T_{dq-3s}(-2\theta)$	从 $d^{-2}q^{-2}$ 旋转坐标系变换到 $abc$ 三相静止坐标系的变换矩阵
$T_e$	发电机电磁转矩
$T_{\text{full}}$	三极或三线双极直流系统中的全状态转换周期
$T_j$	功率器件的结温
$T_m$	传递到发电机转子的机械转矩
$T_{\text{mod}}$	三极或三线双极直流系统中状态转换过程持续的时间
$T_t$	作用在风力机上的机械转矩
$T_{\text{tozero}}$	全桥子模块 MMC 在发生直流侧短路故障时闭锁后直流电流下降到零所需要的时间
$T_{\text{zero}}$	三极或三线双极直流系统中状态转换时调制极电流保持为零的时间
$u_{\text{arm}}$	桥臂等效电势