

轨道交通

柔性牵引供电关键技术

及其电能质量治理研究

林云志 金涛 主编

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

随着高速铁路和地铁等轨道交通技术的迅猛发展,电力电子技术及柔性化交直流供电系统等方面的研究及应用受到了广大国内外学者越来越多的关注。本书详细介绍了电力电子技术及柔性化交直流供电的基本理论以及该理论在轨道交通中的应用。重点介绍了逆变器在柔性轨道交通供电系统运行时的输出电流控制及输出电压控制、贯通式同相供电技术以及基于 UPQC 的电能质量治理。

本书可供从事轨道交通、新能源并网、电力电子建模与控制、预测控制算法及其工程应用的教师、研究生、工程技术人员等参考和阅读。

版权所有,侵权必究。举报:010-62782989, beiqinquan@tup.tsinghua.edu.cn。

图书在版编目(CIP)数据

轨道交通柔性牵引供电关键技术及其电能质量治理研究/林云志,金涛主编. —北京:清华大学出版社,2023.9

ISBN 978-7-302-63796-7

I. ①轨… II. ①林… ②金… III. ①城市铁路—轨道电路—牵引供电系统—柔性结构—研究 IV. ①TM922.31

中国国家版本馆 CIP 数据核字(2023)第 105799 号

责任编辑:王 欣 赵从棉

封面设计:常雪影

责任校对:薄军霞

责任印制:沈 露

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社 总 机:010-83470000 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者:三河市龙大印装有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:11.5

字 数:275 千字

版 次:2023 年 10 月第 1 版

印 次:2023 年 10 月第 1 次印刷

定 价:68.00 元

产品编号:100459-01

《轨道交通柔性牵引供电关键技术及其电能质量治理研究》

编写委员会

主 编：林云志 金 涛

编写人员：韩志伟 王道敏 鲁玉桐 余 刚 李增勤
 孙明新 王 颖 李熙光 李汉卿

清华大学出版社

清华大学出版社

前言

作为电气化铁路总里程、运能世界第一的国家,我国轨道交通技术以其高密度运输、安全准点等优点,在国民经济中起着越来越重要的作用。轨道交通是以电能为动力,以轮轨为运转方式,具有快速、大运量的交通运转系统。其中,干线电气化铁路的供电方式仍以异相供电系统为主,列车及相关用电设备的电力供应通过牵引所获得,电气化铁路区域的电力系统能力、电能质量等直接影响列车运行。电气化铁路牵引供电系统存在的过分相环节也降低了列车运行速度,牵引供电系统采用单相交流供电(AC 25kV),系统负荷为典型三相不对称负荷,产生的负序电流流入电网增加了电力系统的功率,使负序问题更加突出,牵引系统等非线性负载也会把多次谐波电流引入电网从而引起电能质量问题。

随着高速铁路和地铁等轨道交通技术的迅猛发展,电力电子技术及柔性化交直流供电系统等方面的研究及应用受到了广大国内外本领域学者越来越多的关注,柔性交直流供电系统的发展为轨道交通的供电方式提供了另一种探索方向,有利于提升牵引供电质量并解决列车的过分相问题。本书内容涵盖了轨道交通、能量路由器、新能源并网、电力电子建模与控制、预测控制算法等相关研究领域,其中重点介绍了逆变器的离网和并网控制、贯通式同相供电系统和基于 UPQC 的电能质量管理,对比了多种控制算法的优点和不足,可供从事相关行业的教师、研究生、工程技术人员等参考和阅读。

本书共分为 10 章。第 1 章为绪论,主要介绍本书的研究背景,总结国内外轨道交通牵引供电系统的研究现状,分析轨道交通柔性供电关键技术以及存在的电能质量问题和治理方法。第 2 章为基于能量路由器的轨道交通柔性供电系统,首先建立了能量路由器的轨道交通供电系统架构,然后进行了相关的供电工作模式分析和源端、负荷端变换器设计,在此基础上提出了能量路由器的协调控制策略方法和理论。第 3 章至第 5 章为模型预测控制技术在轨道交通供电系统中的应用研究。根据传统三相两电平逆变器的拓扑结构建立离散数学模型,对模型预测控制策略进行了详细介绍,随后针对传统基于模型预测控制策略的逆变器共模电压抑制方案所存在的电流畸变率较大的问题,提出基于优化虚拟电压矢量选择的逆变器输出共模电压抑制方案,同时提出一种以模型预测控制算法为基础的并网逆变器输出电流及功率协调控制策略,分析了具有建模误差补偿的离网型逆变器多步模型预测电压控制,并探讨了其在轨道交通供电中的应用。第 6 章为轨道交通贯通式同相供电技术,包括工作原理、控制方案设计、相关建模与仿真分析等。第 7、8、9 章涉及 UPQC 在轨道交通微电网中的电能质量,包括基于 UPQC 的系统结构、补偿量检测方法、电能质量控制策略等。

第10章为实验结果与分析,通过半实物仿真系统 RT-LAB 对本书所提策略进行实验分析,同时对本书重点理论和方法进行实验验证。

本书成果得到国家自然科学基金联合基金重点项目(U2034201)、国家自然科学基金面上项目(51977039)、中国中铁重大科技项目(2019-重大-11)、中央引导地方科技发展专项(2021L3005)等课题的资助。同时在研究过程中,得到清华大学、福州大学、北京交通大学、中国中铁股份有限公司、中国中车股份有限公司、北京市基础设施投资有限公司、北京市轨道交通建设管理有限公司、福州地铁集团有限公司、北京市轨道交通运营管理有限公司等单位领导及专家的指导,特别是中国中铁股份有限公司劳模工作创新工作室联盟及福州大学先进电气与轨道交通装备研究院,在此表示诚挚谢意。本书参考了国内外柔性交直流供电及电能质量等方面的著作和论文,并在书中每章末尾列出了相关参考文献,在此对其作者表示衷心感谢。

本书旨在抛砖引玉,希望能对读者有所裨益,并恳请广大读者批评指正。

作者

2023年4月

目录

第 1 章 绪论	1
1.1 课题研究背景及意义	1
1.2 轨道交通供电系统的研究现状	4
1.2.1 国内外牵引供电系统的研究现状	4
1.2.2 国内外柔性供电系统的研究现状	5
1.2.3 国内外同相供电系统的研究现状	6
1.3 电力电子逆变器关键问题及其运行控制技术研究现状	7
1.4 轨道交通电能质量问题及其研究现状	11
参考文献	13
第 2 章 基于能量路由器的轨道交通柔性供电系统	17
2.1 基于能量路由器的轨道交通供电系统架构	17
2.2 轨道交通能量路由器工作模式分析	20
2.3 能量路由器的源端口及交直流负荷端口变换器设计	21
2.4 能量路由器的协调控制策略	25
2.5 本章小结	27
参考文献	27
第 3 章 三相两电平逆变器的模型预测共模电压抑制策略	29
3.1 三相两电平逆变器数学模型	29
3.2 模型预测控制及三相两电平逆变器输出共模电压分析	30
3.3 传统三相两电平模型预测共模电压抑制策略	33
3.3.1 无零矢量模型预测共模电压抑制策略	33
3.3.2 加入权重系数的模型预测共模电压抑制策略	33
3.4 基于优化虚拟矢量的模型预测共模电压抑制策略	34
3.4.1 虚拟矢量的构造	34
3.4.2 SVPWM 分扇区原理	35

3.4.3 仿真分析与验证	36
3.5 本章小结	38
参考文献	39
第4章 电网故障条件下并网逆变器电流质量及功率协调控制策略	40
4.1 不平衡电网下的并网同步锁相环技术	40
4.1.1 基于单同步参考坐标系锁相环	40
4.1.2 改进型单同步参考坐标系锁相环	41
4.1.3 解耦双同步参考坐标系锁相环	42
4.1.4 仿真分析与验证	44
4.2 并网逆变器的数学建模	47
4.2.1 三电平中性点箝位并网逆变器的数学模型	47
4.2.2 电网电压发生不平衡现象时并网逆变器的数学模型	50
4.3 并网逆变器的不平衡电流及功率振荡灵活控制	51
4.3.1 参考电流值计算	52
4.3.2 考虑电流平衡及功率波动的参考电流算法	53
4.3.3 控制方案的总体流程分析	57
4.3.4 仿真分析与验证	57
4.4 本章小结	62
参考文献	62
第5章 具有建模误差补偿的离网型逆变器多步模型预测电压控制	64
5.1 三电平 NPC 离网型逆变器的离散数学模型	64
5.2 多步模型预测电压控制策略	66
5.2.1 传统单步模型预测电压控制的局部最优问题分析	66
5.2.2 多步模型预测电压控制策略	67
5.3 仿真验证与分析	70
5.3.1 稳态分析	70
5.3.2 暂态分析	71
5.4 本章小结	73
参考文献	73
第6章 轨道交通贯通式同相供电技术	75
6.1 贯通式同相供电系统结构	75
6.2 贯通式同相供电系统工作原理	77
6.3 静止电能变换器的控制方案设计	79
6.4 贯通式同相供电系统仿真分析	82
6.5 新型柔性牵引供电系统(贯通式同相供电)	83

6.5.1 高原山地铁路特征	83
6.5.2 新型柔性牵引供电系统(贯通式同相供电)设计	83
6.5.3 新型柔性牵引供电系统(贯通式同相供电)的工程验证	85
6.6 本章小结	88
参考文献	89
第7章 基于UPQC的轨道交通微电网系统结构和工作原理	91
7.1 UPQC分类与拓扑结构	91
7.1.1 UPQC分类	91
7.1.2 UPQC-R/L拓扑结构	92
7.2 基于三相三线制的UPQC系统	93
7.2.1 UPQC工作原理与功率流动	93
7.2.2 UPQC单相等效电路	94
7.2.3 UPQC状态空间方程	95
7.2.4 UPQC相间耦合	97
7.3 基于UPQC的电网结构	98
7.3.1 基于UPQC-DG _{separated} 的微电网结构	98
7.3.2 基于UPQC-DG _{DC-link} 的微电网结构	99
7.3.3 成本分析与性能对比	101
7.3.4 基于UPQC改善微电网电能质量的控制目标	101
7.4 本章小结	102
参考文献	102
第8章 UPQC补偿量检测方法和锁相环性能研究	104
8.1 补偿量检测方法概述	104
8.1.1 基于 $p-q$ 理论的检测方法	104
8.1.2 基于 i_p-i_q 理论的检测方法	105
8.1.3 基于自适应谐波的检测方法	106
8.1.4 基于神经网络的检测方法	107
8.1.5 基于 $dq0$ 坐标变换的检测方法	107
8.2 补偿量检测方法仿真研究	109
8.2.1 电网正常运行工况下仿真研究	110
8.2.2 电网电压发生三相不平衡工况下仿真研究	111
8.2.3 补偿量检测方法仿真研究小结	113
8.3 不平衡电网下的锁相环性能分析	113
8.3.1 基本锁相环	113
8.3.2 同步旋转参考坐标系锁相环	114

8.3.3	双二阶广义积分器锁相环	116
8.3.4	解耦双同步参考坐标系锁相环	118
8.4	不平衡电网下的锁相环性能仿真分析研究	120
8.4.1	基于不同锁相环检测电压信号仿真研究	120
8.4.2	基于不同锁相环基波和谐波检测仿真研究	123
8.4.3	不平衡电网下的锁相环性能仿真分析小结	125
8.5	本章小结	125
	参考文献	125
第9章	基于UPQC改善微电网电能质量控制策略	127
9.1	基于DDSRF-PLL的UPQC控制策略研究	127
9.1.1	控制策略概述	127
9.1.2	基于DDSRF-PLL的UPQC控制策略	132
9.1.3	基于DDSRF-PLL的UPQC控制策略仿真分析	134
9.2	改善微电网电能质量仿真研究	136
9.2.1	配电网发生三相电压暂降/骤升	137
9.2.2	配电网处于稳态/电压中断工况	138
9.2.3	配电网发生三相电压不平衡故障或电压谐波畸变	139
9.2.4	微电网切入三相不平衡负载	140
9.2.5	微电网非线性负载发生突变	141
9.3	基于对等控制的UPQC微电网运行模式	142
9.3.1	微电网控制模式	142
9.3.2	基于对等控制模式的微电网模型	143
9.3.3	基于对等控制的下垂控制器设计	144
9.4	基于对等控制的微电网运行仿真研究	146
9.4.1	微电网并网运行模式与孤岛运行模式之间灵活切换	147
9.4.2	微电网孤岛运行模式下的增/切负荷运行	148
9.4.3	微电网孤岛运行模式下切DG与增/切负荷运行	149
9.5	本章小结	150
	参考文献	150
第10章	实验结果与分析	152
10.1	RT-LAB实验平台	152
10.1.1	RT-LAB实验平台组成	152
10.1.2	RT-LAB实验平台工作原理	153
10.2	能量路由器逆变器相关验证分析	154
10.2.1	实验平台	154
10.2.2	硬件电路设计	157

10.2.3 并网实验	159
10.2.4 离网实验	161
10.3 电能质量治理验证与分析	163
10.3.1 不平衡电网下的锁相环性能分析实验验证	164
10.3.2 基于不同锁相环的基波和谐波检测实验验证	165
10.3.3 基于 DDSRF-PLL 的 UPQC 控制策略实验验证	166
10.4 本章小结	168
参考文献	168

清华大学出版社

清华大学出版社

第1章

绪 论

1.1 课题研究背景及意义

城市轨道交通是世界公认的具有运量大、能耗低、污染少、快捷、舒适、安全等特点的绿色环保交通运输体系,在缓解城市交通压力、改善居民出行及物资流通条件、充分利用土地资源、合理调整城市布局、促进城市可持续发展和城市建设等方面发挥着重要的作用^[1]。

目前,国内许多大型城市逐步建立了以地铁为主要运输方式,多种轨道交通类型相辅相成的城市轨道交通系统^[2],多种轨道交通系统在城市公共交通中起到了非常重要的作用,有些城市的轨道交通载客量已经占城市总客运量的 50%~80%,名副其实地成为城市交通的骨干网络^[3],带动了城市的可持续发展。

首先,随着城市轨道交通运营里程的迅速增加,地铁运营能耗越来越大。据统计,地铁实际电能消耗分布统计图如图 1-1 所示,其中牵引供电占据了 46%左右,牵引供电系统由牵引变电所、牵引网、钢轨、回流线等部分组成,其电能消耗主要来自电客车的运行牵引,该电能消耗同时也是城市轨道交通供电系统中能源消耗的主要部分。城市轨道交通已成为城市用电大户,其节能减排问题日益突出。近年来,多种技术被应用于轨道交通以降低车辆运行能耗,如车体轻量化设计、列车牵引变压变频(variable voltage and variable frequency, VVVF)传动方式、光伏接入、再生制动电能吸收装置等。

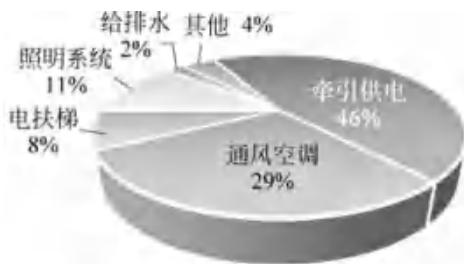


图 1-1 地铁实际电能消耗分布统计

其次,随着全球经济社会的快速发展、全球人口的急剧增长、全球气候环境日益恶劣以及全球不可再生能源尤其是化石资源的储备量日益减少,将发展可再生的清洁能源作为长期发展的重要举措正受到全球越来越多国家的重视^[4]。最新的《世界能源发展报告》中指出,光伏发电、风力发电以及生物质能发电已成为世界各国发展新能源的主要目标,并且朝着高效、清洁、多样化的方向快速转型^[5-6]。图 1-2 为根据《2019 新能源市场长期展望(NEO)》报告所预测的 2050 年前全球风力发电和太阳能发电的占比,从图 1-2 可以看出,在未来的 50 年清洁能源特别是风力发电和太阳能发电在全球各个国家都将会得到大力的发展,并将在全球发电量中占据很大的比重。

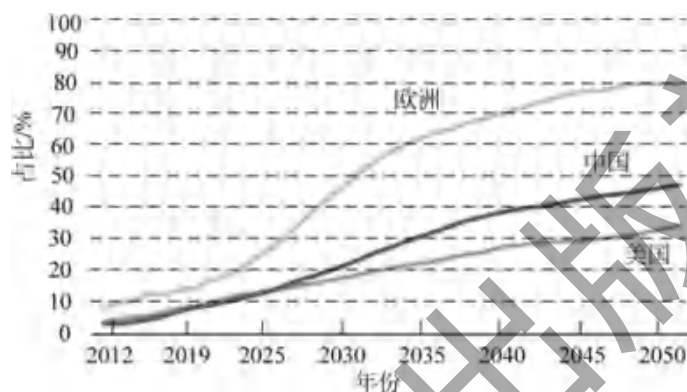


图 1-2 全球风力发电和太阳能发电量预测占比

我国风力发电和太阳能发电持续保持较快的发展,截至 2018 年,我国风力发电新增装机量 2026 万 kW,装机总规模增至 1.84 亿 kW,比同期增长了 12.4%。同时,根据最新的电力行业年度发展报告,我国风力发电、太阳能发电合计发电量及占比呈逐年上升的趋势,如图 1-3 所示。因此,加快发展新能源发电与轨道交通系统相结合是未来电力系统的重要发展方向。

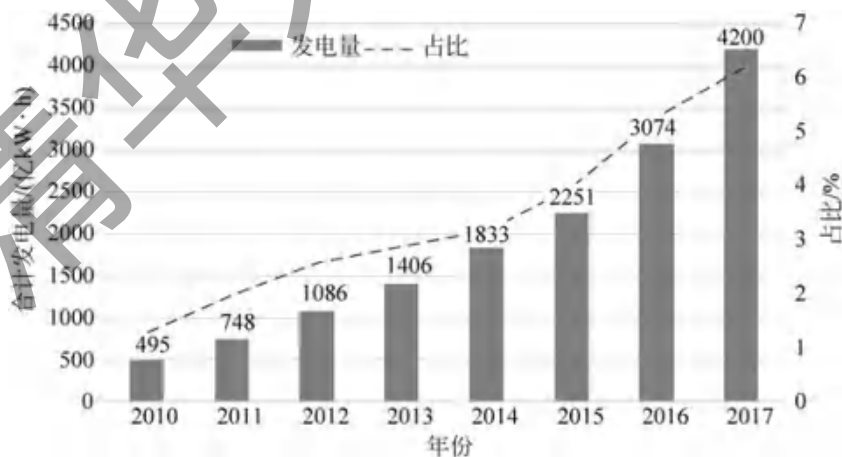


图 1-3 中国风力发电和太阳能发电合计发电量及占比

在能源和环境的双重压力下,由于可再生清洁能源发电所固有的特点,例如发电规模较小且较为分散、受环境影响较大导致间歇发电、与负荷中心相距较远等,对可再生能源发电经传统直流输电技术或交流输电技术进行并网存在较大的困难。同时,随着城市的不断发

展及城区负荷的快速增长,对电网容量也需要进一步扩充,电网建设相对滞后并且输电走廊紧张,线路输送负载不均衡及利用率低等问题日益突出,如何在现有输电条件的基础上,采用新的输电模式和技术手段,提升输电线路传输能力,是当前城市电网面对的一大挑战^[7-9]。

有别于传统的基于自然换相技术的电流源型换流器的高压直流输电(high voltage direct current transmission based on current sourced converter,CSC-HVDC),基于电压源型换流器的高压直流输电(high voltage direct current transmission based on voltage sourced converter,VSC-HVDC)是一种全新的输电模式,具有较大的发展潜力。与传统直流输电方式相比,以可控关断器件、电压源型换流器和脉宽调制(pulse width modulation,PWM)控制技术为基础的柔性直流输电技术具有较为明显的优势:在相同的输电走廊条件下,线路的输电能力得以较大提升;不需要开发新的输电走廊,在原有输电走廊基础上进行直流电缆的地下铺设不仅可以减小线路辐射,并且对环境的破坏也较小;对换流站内部设备采用模块化封装设计,从而便于安装,对换流站整体可设计在地下,从而节约地上土地资源;由于换流站采用绝缘栅双极晶体管(insulated gate bipolar translator,IGBT)、门极可关断晶闸管(gate turn-off thyristor,GTO)等全控型器件,从而可以灵活快速地实现有功、无功的独立控制。上述良好的技术性能基础,以及城市电网存在的问题和未来发展的要求,使得多端柔性直流输电技术在城市电网改造中有着较为广阔的应用前景^[9-12]。但目前多端柔性直流工程基本上都是用于大规模风电场互联、孤立海岛电网供电等领域,对其应用于城市输电网中的情况国内外还少有涉及,也缺乏足够的技术储备。

多端柔性直流输电系统是在双端柔性直流输电系统基础上通过增加换流站数目而来的。双端柔性直流输电系统结构图如图 1-4 所示,双端系统的运行状态对任一换流站的故障敏感性较高,而多端系统则受某一换流站故障的影响较小。多端系统还具有运行模式灵活、可控性较好及可靠性较高等优势,从而使其在风能、太阳能等可再生能源发电并网、局部区域中低压输配电网、城市电网扩容改造等领域均具有较大的发展潜力,适合应用于城市输配电网,多端系统未来必将成为构成城市供配电网的重要组成部分^[12-15]。

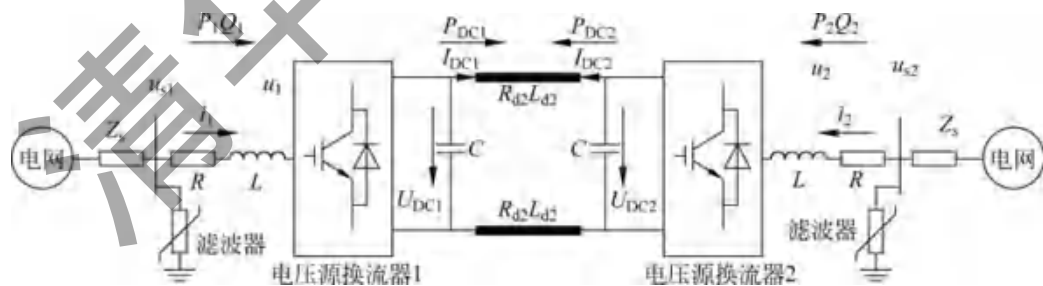


图 1-4 双端柔性直流输电系统结构图

能量路由器技术是解决当前能源危机和优化能源结构的必然选择,也是提供安全、可靠、优质电能服务的必要前提。由于轨道交通中存在各种电力转换装置、不同的电力转换模式以及多个电源,轨道交通电力网的控制具有一定的复杂性。随着现代技术的进步,许多高精度电子设备和智能电表在电能质量方面的要求越来越高。由于轨道交通系统本身的特殊性,其电能质量不仅与内部分布式电源、能量存储和负载操作特性有关,并且与连接的配电网网络之间存在相互影响作用,所以对于轨道交通电能质量的监测十分重要。

1.2 轨道交通供电系统的研究现状

1.2.1 国内外牵引供电系统的研究现状

国内外的研究人员为了解决电气化铁路中牵引负荷引起的三相电压不平衡问题、电分相问题提出了很多的方法,德国采用 15 kV、16.7 Hz 的非工频供电,这就从根本上避免了三相电压不平衡问题,但是这种供电方式与我国国情不符。文献[16]中日本学者通过铁路静止无功调节(railway static power conditioner, RPC)装置对负序功率进行补偿,该装置同时对谐波有很好的滤除作用,但电分相问题仍然没有得到很好的处理。文献[17]提出了组合式同相供电技术,为解决电气化铁路电分相及电能质量问题提供了很好的途径。组合式同相供电技术也于 2014 年 12 月在山西中南部铁路通道重载综合试验段沙峪牵引变电所成功投入运行。另外,2018 年 7 月采用同相供电技术的温州市域铁路 S1 线一期接触网一次送电成功,更加证明了同相供电技术在牵引供电领域的可靠性。

在电缆广泛应用于城市供电网络的环境下,电缆的优点日益被大众认识和了解,电力电缆具有良好的供电能力,但由于前些年电缆造价相对昂贵,电缆极少用于电气化铁路的供电,日本在局部电气化铁路使用电力同轴电缆(coaxial cable, CC)供电方式^[18]。随着电缆制造技术的发展和提高、电力电缆在供电领域的广泛应用,电力电缆在电气化铁路的供电应用前景广阔。在电气化铁路运用电缆进行供电的研究中,最开始是将电缆用于电气化铁路的长距离供电上,文献[19,20]对电力电缆阻抗和容性参数的计算和电气特性进行了研究。文献[21]推导了电缆+自耦变压器(auto-transformer, AT)供电方式的牵引网电流分布、牵引网等值阻抗、电压降落及电压损失的数学表达式,建立了电缆的仿真模型。文献[22]对电缆的供电原理和特性进行了分析,计算了不同截面积电缆与接触线分流系数,对电缆的波阻抗和自然功率进行了分析,并将电缆牵引供电的能力与 AT 供电方式进行比较,得出了电缆供电方式下的供电能力优于 AT 供电方式下的供电能力的结论。文献[23]对与新型牵引供电系统相似的新型电缆供电技术进行了研究,提出了新型电缆供电系统中电缆牵引网等效模型,理论上分析了新型电缆牵引供电系统牵引网电流分布、牵引网电压损失。文献[24]以大秦铁路为研究对象,针对大秦铁路负荷特征,对大秦铁路运用新型电缆供电方案进行改造设计,对主变电所(110 kV)供电电缆和牵引变电所进行了设计及配置,并从外部电源投资、设备利用率、过分相装置投资、线路运量提升以及再生制动能量利用等方面计算了改造方案的一次性投资及经济效益,利用系统动力学模型将新型电缆供电方案与既有供电方案做经济性对比分析,给出了新型电缆供电方案的经济性优势以及技术优势。

在牵引供电网电压损失的计算方式上,文献[25]提出,由于高速铁路功率因数接近于 1,所以传统的工程计算方法不适用于计算高速铁路牵引网电压损失,文献作者建议采用电压降模值计算方法。文献[26]指出,采用工程近似方法计算交直交型机车在牵引供电系统中产生的电压损失存在较大误差,分析了误差产生的原因,提出采用向量计算方法的建议。

近几年对城市轨道交通使用交流制供电的研究越来越多,许多轨道交通项目也运用了交流制供电,比如成都地铁 17、18 号线的设计采用 25 kV 交流制供电。文献[27]从运输便捷性、系统可靠性和方案经济性三项市域轨道交通牵引供电制式选择的基本原则对市域规

划线三种牵引供电方案进行对比分析,给出了市域规划线的交流制式和双制式两个优选方案。为了避免现行直流牵引供电系统的迷流,同时发挥其无分相的优势,文献[28]提出并研究了一种交流牵引供电系统,这种系统结构与本书中新型牵引供电系统结构已大体相似。文献[29]对城市轨道交通交流供电方案进行了分析,对集中式和分散式交流供电结构从理论与经济性两方面进行了比较,得出了采用集中式工频单相交流供电方案更好的结论。

针对城市轨道交通应用交流制式的研究与发展,结合组合式同相供电技术与电缆供电方式的优点,文献[30]在干线铁路同相供电和城市轨道工频交流供电的基础上,以实现干线铁路和城市轨道无分相、不间断供电和彼此互联互通为目标,提出了一种新型牵引供电系统适用于干线铁路与城市轨道相统一的牵引供电方式,该新型牵引供电系统由主变电所和牵引供电网组成,牵引供电网由供电网、牵引所和牵引网组成,供电网和牵引网实行梯级供电,即本书中所研究的新型牵引供电系统;该文献对牵引网的接触供电与集电方式进行了研究,提出了一种新的接触带接触供电方式;同时该文献对新型牵引供电系统中的供电网电压等级和牵引网电压等级选取提出了方向,但两层供电网的电压等级还需进行进一步的研究与确定,相关的一些技术及问题也亟待研究。

1.2.2 国内外柔性供电系统的研究现状

柔性直流输电是通过运用电压源型换流器技术,采用绝缘栅双极晶体管,运用脉宽调制技术来进行整流逆变的,是一种新型高压直流输电方式,相对于传统直流输电,其优势非常明显。近年来柔性直流输电高速发展,目前限制柔性直流输电系统电压等级和容量提升的主要因素是电缆的电压等级和现有绝缘栅双极晶体管等电力电子器件的发展水平。采用电缆供电方式,能极大地减少高原、沙漠、沿海等严酷地区灾害天气对输电线路的干扰,电网故障后的快速恢复控制能力也大大增强,从而提高了供电可靠性。随着电力电子器件耐压水平的日益提高,以及高压电缆的不断发展,柔性直流输电系统的容量和电压传递等级也会发生巨大的飞跃。

目前柔性直流输电在工程上的应用很多,其中比较著名的有欧洲伊斯特互联(Estlink)工程、传斯贝尔联络(Trans Bay Cable)工程、哥特兰(Gotland)工程、克劳斯-桑德互联(Cross Sound Cable)工程等。最近几年来,我国也逐渐加大对柔性直流输电工程的研究,建设了上海南汇柔性直流输电示范工程、大连柔性直流输电工程、舟山柔性直流输电工程等。国外的几项柔性直流工程建设的主要作用是满足本地区供电需求,在地区之间实现系统的互联,提高供电的可靠性。我国的柔性直流输电工程应用,在满足供电需求、提高电网稳定性的前提下,作为试点,进行了实验性的研究。我国国土面积辽阔,不同区域气候差异较大,风电资源丰富,目前电力系统多为交流输电形式,风电并网困难。上海南汇柔性直流输电示范工程研究风电并网技术,其传输容量为20 MW,综合考虑输电系统损耗以及IGBT串联的可实现性,确定示范工程的额定直流电压为 ± 30 kV,以该工程为依托,通过短路试验,实现了风电并网,提高了风电场的低电压穿越能力。2012年,大连市开始建设柔性直流输电工程,该工程将大连市北部主网和市区南部港东地区电网相连接,额定容量为1000 MW,直流电压达到 ± 320 kV,输送距离约60 km,换流阀控制技术的研究达到世界领先水平。舟山柔性直流输电工程则面向对无源网络的供电,该工程包含5个换流站,系统总容量为1000 MW,其中最大的换流站容量为400 MW,直流电压等级达到了 ± 200 kV,以该工程为

契机,实现柔性直流输电对孤岛供电领域的初步研究,同时也对未来柔性直流输电的发展趋势,即多端柔性直流提供技术和工程上的良好借鉴。

我国电网从 2006 年起大力发展柔性直流输电技术,近年来已有多条线路投入运行,而在铁路方面并未开展实际应用。当前铁路输电情况迫切需要我们寻求新的技术来满足当前铁路快速发展的需求。柔性直流输电技术,控制灵活,优势明显,作为一种前沿技术,其在铁路供电领域的应用会给铁路供电技术带来新的突破。此外,当前柔性直流输电的主要发展方向为多端直流输电。多端直流输电(multi-terminal HVDC)是直流电网发展的初级阶段,是由 3 个以上换流站通过串联、并联或混联方式连接起来的输电系统,能够实现多点受电,适用于铁路沿线区间架设箱式变电站的供电形式。由于柔性直流输电在构建多端系统方面具有的独特技术优势,柔性直流输电技术在铁路供电系统中会有很好的应用。

近年来,日本也在不断进行新技术的研究,尝试着将直流输电方式应用于铁路供电领域。日本铁道综研所开发了接触网电压不变,架设高压输电线供电的高压直流输电形式,其结构如图 1-5 所示。在长距离输电过程中,电容效应造成线路末端电压升高,对于产生的低电压穿越效应可以通过柔性直流输电技术加以解决。在较为偏远的地区或者人迹罕至的沙漠地带,由于铁路沿线电力供电环节的外部电源不能及时引入,不得不采取长距离供电方式,进而引起供电质量下降的问题。对于该问题可以通过柔性直流输电技术的应用加以解决,实现对铁路系统电能质量的提高,通过实现风能、太阳能等新型能源的并网,及时提供所需电能,不受较偏远地区地理环境的制约,使新能源为铁路机车和 10 kV 电力供电系统提供电能支援,从而解决外部电源不能及时引入的问题,保证铁路系统的正常供电。这也是本书的主要研究方向,该研究方向具备创新性,结合未来铁路电力供电系统发展的趋势,探讨柔性直流输电在铁路电力系统中的应用。在本书后续章节中,将对柔性直流输电技术原理进行系统介绍,结合当前铁路电力系统实际情况,在不同运行条件下,利用仿真软件进行分析,得到仿真结果,前瞻铁路电力供电技术的发展,并为此项技术的应用奠定理论基础。

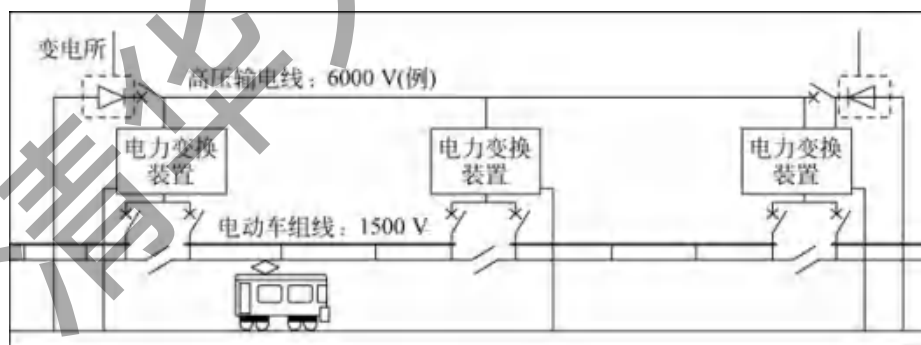


图 1-5 日本高压直流输电形式

1.2.3 国内外同相供电系统的研究现状

同相供电技术最早由西南交通大学李群湛教授提出,旨在解决干线铁路的电能质量问题和列车过分相问题^[31]。针对电气化铁路电能质量问题,日本从牵引变压器接线方式、补偿及滤波方面入手^[32-33],研制了铁路静止无功调节(RPC)装置,实现了补偿负序和抑制谐波的功能^[34]。RPC 装置虽可解决电能质量问题,但仍保留了电分相。德国联邦铁路通过

采用低频单相交流制(15 kV, 16.67 Hz)实现电网侧和牵引侧的有效“隔离”,可以取消电分相,但成本过高严重制约其发展^[35-36]。

对于同相供电技术,经过长时期研究和发展,现已积累了大量理论研究成果和工程应用经验。理论成果方面,多集中于对同相供电装置拓扑结构、控制策略、容量优化配置和可靠性分析等方面进行研究,例如,舒泽亮教授等人构建了具备有功平衡、无功补偿和滤波功能的背靠背单相变流器的综合补偿模型及控制策略^[37-38],陈民武等人对同相供电系统控制策略以及同相供电装置可靠性问题展开了研究^[39-40],黄小红等人提出了基于模块化 H 桥和 VV 接线变压器的同相供电系统^[41],张丽艳等人提出了同相供电装置容量的优化配置方法^[42]。

在工程应用方面,依托“十一五”国家科技支撑计划重点项目,由西南交通大学联合有关单位研制了世界首套同相供电装置,于 2010 年 10 月在成(都)昆(明)线眉山牵引变电所投入试运行,运行结果表明,同相供电装置性能稳定,运行可靠,可有效解决电能质量问题和电分相问题。为提高同相供电系统的技术性和经济性,依托中国铁路总公司科技开发计划重大课题,研制了世界首套单三相组合式同相供电装置,于 2014 年 12 月在山西中南部铁路通道重载综合试验段沙峪牵引变电所投入运行,进一步促进了同相供电技术的成熟。2018 年 10 月,世界首套单相组合式同相供电装置也已在国家战略新兴产业示范线工程温州轨道交通 S1 线投入运行,标志着同相供电技术不仅可以应用于干线铁路和重载铁路,还可以应用于城市轨道交通,对促进城市轨道交通发展具有重要意义。

大量的基础理论研究和实际工程应用标志着同相供电技术已日趋成熟,然而,目前针对城市轨道交通采用组合式同相供电技术的研究并不多见,已有的牵引供电仿真模型对牵引所和牵引网的建模并不能很好适应城市轨道交通同相牵引供电系统。此外,同相供电装置内部构造复杂,功率模块长期工作在高频开关状态下,是系统可靠性的薄弱环节,同时其成本高昂,如何在工程设计阶段平衡好可靠性与经济性,实现同相供电装置容量的优化配置具有重要的意义。因此,有必要针对上述问题进行深入研究。

1.3 电力电子逆变器关键问题及其运行控制技术研究现状

随着“西气东输”国家战略的全面推进,大量西部地区的清洁新能源所产生的电能需要经过远距离高压输电输送到东部地区。但是高压输电线路常常受到雷击、狂风、冰雹等极端气候的影响,这将会严重影响到电网系统的正常稳定运行,甚至会引起较大的经济问题,影响系统供电的可靠性。因此,在新能源发电系统中,要求新能源发电既具有并网的能力,又具有作为分布式电源在离网状态下的运行能力,尤其是在偏远地区、暂未并入电网的地区以及海岛上,从而需要大量结合适用于孤岛运行的新能源发电系统^[43-44]。

为了体现出新能源发电系统的优点,从而更好地发挥新能源发电系统的优势,必须要求能够开发出性能优越的新能源发电系统^[45-46]。而要能够达到这一目标,必须解决以下几个关键技术问题。

1. 电网同步接入

对于并网逆变器来说,当新能源发电系统接入电网时逆变器输出电压必须与电网电压

同步,这时才能将新能源发电系统并入电网中。因此,在并网逆变器控制中需要准确检测电网电压相位及频率^[47-48]。对于并网逆变器同步问题可分为两种情况进行讨论。一种情况是并网逆变器即将并入电网之前,此时,逆变器的输出电压相位必须与电网电压相位相同,这样才能达到并入电网的要求。逆变器输出电压与电网电压不同步便并入电网将会导致逆变器输出电流产生较高的脉冲,从而可能危害到电网系统中的各个装置,甚至严重影响整个电网系统的安全^[49]。另一种情况为逆变器已经并入电网且正在运行中,此时,逆变器需要与所连接的电源保持同步,否则电网系统将无法正常运行。依据实际采用的不同的控制策略,需要从电网端测得电网的相位、频率以及电压幅值。

2. 能量转换控制

在新能源发电逆变器系统中,能量转换技术是至关重要的核心技术之一。能量转换技术是指将新能源发出的电能通过变换器技术转换为所需的直流电能或交流电能的技术^[50]。随着新能源发电系统中分布式电源并网容量的不断增加,如何保证在不影响逆变器输出电能质量的情况下提高系统能量转换效率成为新能源发电系统所需重点突破的关键技术之一。目前,提高新能源发电逆变器能源转换效率的方法主要有两种:一种方法是硬件方式,即改变并网逆变器的拓扑结构;另一种方法为软件方式,即采用不同的控制策略。

3. 低电压穿越

随着新能源发电技术的快速发展,大量新能源发电装置接入电网中。当电网发生某种故障时,若接入电网的大容量新能源发电系统无法稳定电网的电压及频率,将会对整个电力系统的安全稳定运行造成较大的影响。因此,根据电网准则要求,当电网发生短时电压降落时并网逆变器需要具备故障穿越的能力。图 1-6 给出了大中型光伏电站的低电压穿越能力要求。根据《光伏发电站接入电力系统技术规定》(GB/T 19964—2012)中所提出的要求^[51],当光伏发电站的并网点电压低于 20% 的额定电压时,并网逆变器可以脱离电网,若未达到这一条件则要求并网逆变器必须在不脱网的情况下连续运行 1 s,即应该具备一定的低电压穿越能力^[52]。

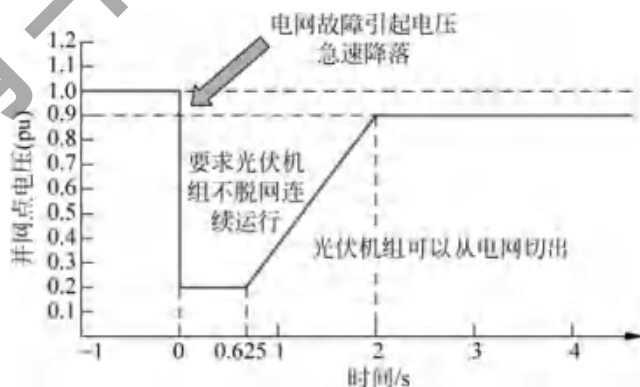


图 1-6 大中型光伏电站的低电压穿越能力要求^[52]

对于新能源逆变器的控制需要解决几个关键的问题。例如,如何控制逆变器使其既能运行在并网模式下又能运行在离网模式下^[53-54];如何解决由于逆变器在离网运行模式与

并网运行模式之间相互切换而导致的逆变器输出电能质量下降问题；如何实现离网状态和并网状态的可靠切换。另外，还有如何达到并网逆变器输出电压与电网电压同步以保证并网逆变器有效接入电网^[55-57]，从而使得新能源发电系统并入电网时对电网的影响达到最小，以及逆变器在离网运行状态下当负载为不平衡负载或非线性负载时如何提高输出负载的电能质量。

为了实现以上控制目标，必须要设计出合理有效的控制方法来控制逆变器。本节将分别阐述比例积分(proportional integral, PI)控制、比例谐振(proportional resonant, PR)控制、模型预测控制(model predictive control, MPC) 3 种控制策略各自的优缺点。

1. PI 控制

PI 控制的物理原理较为清晰，其结构较为简单，较为容易实现并且能够获得较为良好的动态及稳态响应。对于直流无振荡分量，PI 控制可以实现无静差实时的跟踪，但当需要获取诸如电网中的交流信号时，PI 控制将无法准确跟踪参考量，从而使得输出存在一定的误差。并且，若选择的调节参数不够合理，其逆变器输出电流将会有较大的偏差，甚至超过元器件所允许的最大电流，从而可能会造成较大的安全隐患。图 1-7 给出了传统 PI 控制框图，图中采用两个 PI 控制器对并网逆变器进行 PI 双环控制。首先采用电压外环 PI 控制器得到电压值，并基于该值设置参考电流，最终经过 PWM 生成控制信号，从而实现对参考电流的准确跟踪。另外，针对传统 PI 控制在检测交流信号时会出现稳态偏差的问题，有学者在电压外环中加入逆变器直流侧电压和并网电流等前向反馈环节。该 PI 控制策略提高了控制器对于系统的动态响应速度，并且能够满足直流侧母线电压的稳定。但是这种控制策略具有一定的局限性，当电网发生某种故障而导致电网三相电压不对称时，这种方法将无法达到较好的控制效果。

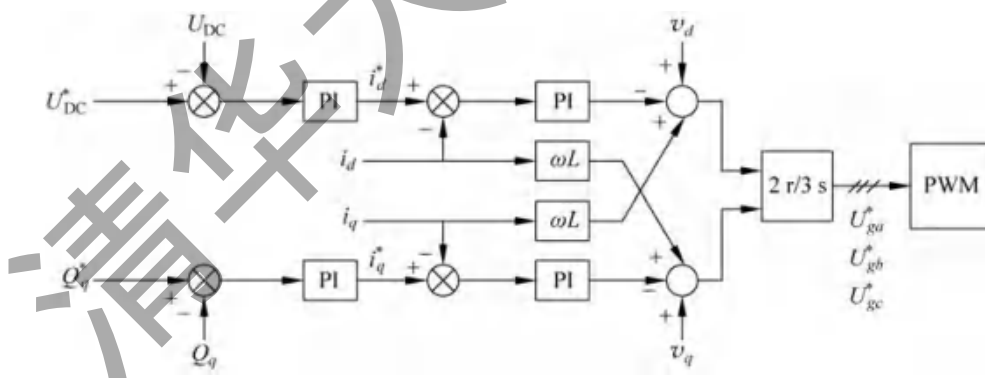


图 1-7 传统 PI 控制框图

2. PR 控制

PR 控制是对 PI 控制的改进，并加入谐振环节以控制系统在谐振频率点的开环增益，因此能够增加整个控制系统对于干扰的抵抗能力。PR 控制能够较为有效地解决传统 PI 控制器无法对交流信号进行准确跟踪的问题^[58-60]。传统 PR 控制框图如图 1-8 所示。相比于 PI 控制，PR 控制只需在 $\alpha\beta$ 坐标系下完成，无需进行烦琐的 dq 坐标变换。

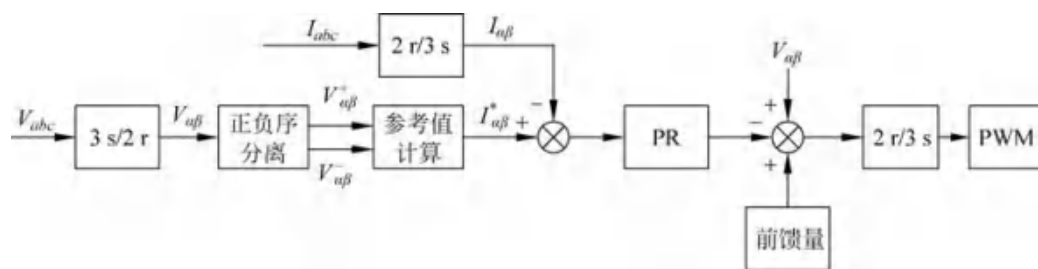


图 1-8 传统 PR 控制框图

3. 模型预测控制

近几年,随着微型处理器运算能力的大大提高以及数字信号处理技术的快速发展,模型预测控制(MPC)技术在电气化领域尤其是电力电子方面被越来越广泛地应用。模型预测控制技术是最近兴起的一种新型控制技术^[61-63]。图 1-9 表示经典模型预测控制框图。MPC 的基本思路为,通过搭建系统数学模型来求解变量在未来时刻的变化,利用代价函数来实现控制器对于控制量的约束,最后通过代价函数寻优寻得最优控制行为。

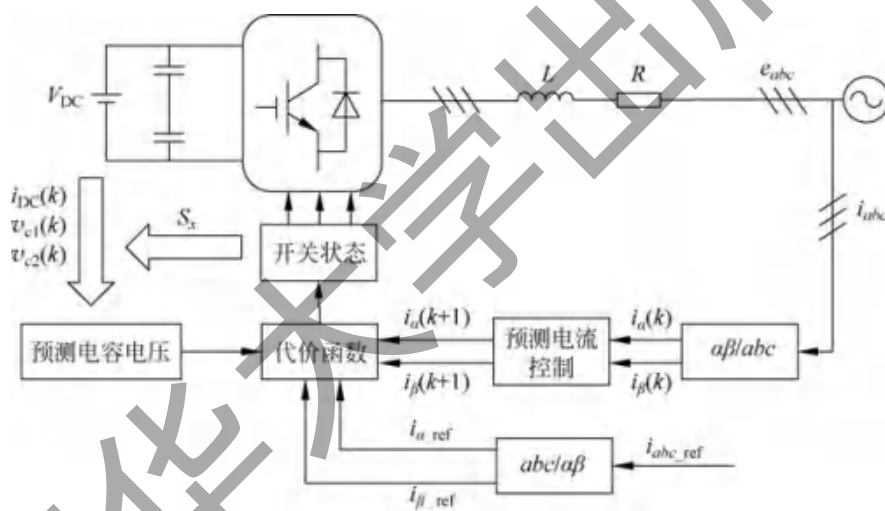


图 1-9 经典模型预测控制框图

表 1-1 比较了几种不同的逆变器控制策略的优缺点。可以看出,相比于其他控制策略,模型预测控制策略具有约束条件处理简单,能够实现对于死区时间的补偿,可顺利地多变量系统上应用以及可针对具体的应用领域修改、扩展等优点^[64-67]。目前,模型预测控制技术已经被广泛应用于电机控制、并网型逆变器、离网型逆变器以及高压直流输电系统等多个领域中^[68-71]。结合以上比较,本书采用模型预测控制对逆变器进行控制。

表 1-1 不同控制策略的优缺点比较

控制策略	优点	缺点
PI 控制	物理意义清晰,结构简单	对交流信号无法实现准确跟踪,响应速度慢、参数影响大
PR 控制	只需在 $\alpha\beta$ 坐标系下进行控制,易实现无误差调节和低次谐波补偿	对器件参数精度和数字系统精度要求高,只对固定频率有效

续表

控制策略	优点	缺点
模型预测控制	控制灵活,无需 PWM 调制器,具有较好的动稳态性能 ^[65]	逆变器开关频率不固定 ^[66]

1.4 轨道交通电能质量问题及其研究现状

随着轨道交通网络全面采用交直交牵引技术,以及电网的快速发展,轨道交通电能质量得到根本性的改善,主要干线铁路的电压偏差、谐波电压、负序、功率因数指标大幅好转,大部分牵引变电所都达到相关标准的要求。同时,由于还有部分边远地区铁路使用既有的直流牵引机车,以及新技术、新设备的运用,电能质量还存在如下问题,即轨道交通网络的电能质量将同时受到外部配电网和内部运行特性的影响。

公共连接点(point of common coupling,PCC)处的电压暂降/骤升、三相不平衡和电压谐波是外部配电网对轨道交通电能质量的主要影响。由于线路阻抗的存在,在切入和切除大容量单相/三相负载时,配电网电压将发生改变。当切入三相不平衡或非线性负载时,配电网电压将会三相不平衡或含有谐波。如果轨道交通系统处于并网运行状态,那么将由外部配电网提供它稳定运行所需要的电压和频率参考。外部配电网的电压问题会通过 PCC 传输至轨道交通,这会影响轨道交通母线电压质量和轨道交通的正常运行。外部配电网电压暂降/骤升问题会影响轨道交通网络中 PQ 控制和下垂控制(droop control)效果,导致轨道交通中电压波动和功率振荡,这将在严重的情况下引起电压保护动作,导致分布式电源断开。配电网中的大量单相/三相负载将导致 PCC 处电压处于三相不平衡状态,同时影响三相电力电子设备和电动机的正常运行。由于非线性负载的存在,外部配电网含有较多的谐波,这加剧了轨道交通的谐波污染,而且还与轨道交通中的各种电力电子设备相互作用从而引起谐波共振。因此,由于外部配电网的电能质量问题会通过 PCC 传递到轨道交通内部,如果不采取一定的措施,则会进一步对轨道交通电能质量造成影响,轨道交通将频繁地切换到孤岛运行模式,同时失去外部配电网的频率和电压支持,从而降低了轨道交通运行的可靠性。

轨道交通内部电能质量问题可分为 4 个方面:

(1) 电压波动和闪变:可再生能源的启动和关闭会受到环境和当地供电用户等因素的干扰。由于可再生能源的出力具有随机性和间歇性的特点,导致功率输出不规律和突然的功率变化,以上所提问题的出现都会对轨道交通的电能质量产生重大影响。通常,如果将分布式电源接入不当的位置以及采取不合适的控制策略,都会导致轨道交通网络中电压波动和闪变。

(2) 谐波和直流注入:除电压与频率波动外,谐波是对电网的第三大危害。大多数分布式电源使用电力电子功率变流器来连接轨道交通系统,如果切换设备次数过多,会导致轨道交通中电压和电流发生畸变现象。产生非线性负荷的设备称为谐波源,非线性负荷也是轨道交通谐波的另一个主要来源。

(3) 继电保护整定困难:分布式电源必须与轨道交通中的原始继电保护装置配合,故

障出现的时候,需要立刻将轨道交通与分布式电源的联系隔断,否则将会造成重合闸操作失败。微电网在不同点功率注入会减小继电保护的覆盖范围,如果继电器没有方向灵敏度,从微电网注入电流就会导致线路继电器故障。

(4) 短路电流增大:当轨道交通连接上大电网时,如果大电网发生故障导致供电困难时,这时轨道交通系统会向大电网注入大电流来维持稳定,但这样将会造成短路电流比之前变大许多倍,如果不能解决这个问题,严重的话将会造成整个系统崩溃。如果发生接地故障,接地电流会过高从而导致大地电位升高,并会影响通信设备的正常运行。

随着单相/不平衡负载、非线性负载以及分布式电源接入轨道交通中,当前涌现出了许多轨道交通电能质量问题。通常,这些问题是电压变化、谐波畸变、电压/电流不平衡等。为了改善这些电能质量问题,需要进行轨道交通电能质量治理,一般从以下两个方面着手:一方面是通过采用电能质量治理装置来对轨道交通系统的电能质量进行被动治理,比如采用动态电压恢复器、有源电力滤波器、静止无功发生器、配电网静止同步补偿器、统一电能质量调节器等装置来改善电网的电能质量;另一方面是从轨道交通中分布式电源出发,通过采取一定的控制策略对轨道交通系统的电能质量进行主动治理。当今国内外对于微电网电能质量的研究对轨道交通电能质量的改善具有很大的参考价值。

(1) 微电网电能质量被动治理措施研究现状。文献[72]设计了基于光蓄发电的动态电压恢复器来改善微电网电能质量,它的工作原理是,提供一个与主电路串联的可控电压,以保持负载电压的期望幅值和相位角。采用微电网中的储能系统作为动态电压恢复器的储能单元,这种运行方式可以有效消除电压跌落或闪变等情况,提高微电网的电能质量。文献[73]设计了一种新型的背靠背变流器,该装置的作用是解决配电网电压不平衡而引起的微电网中电压不平衡问题。文献[74]提出了一种基于直流有源滤波器(DC active power filter, DC-APF)来抑制直流母线电压纹波的方案,该方案在交直流混合微电网中得到了很好的验证,该方案能够提高系统的供电可靠性。文献[75]提出了一种太阳能光伏发电分布式静态补偿器(PV-DSTATCOM)并网系统的控制方法,通过向电网和所连接的负荷供电来改善微电网电能质量,并且在不同天气条件下,依然能够保证优质的供电质量。文献[76]设计了一种微电网和 SVG(static var generator, 静止无功发生器)组成的无功电压控制系统,该系统能够快速调整无功电压,抑制微电网母线电压波动,提高微电网电能质量。文献[77]介绍了一种三相单级太阳能光伏集成统一电能质量调节器(PV-UPQC)的设计与性能分析。并联变流器除了补偿负载电流谐波外,还具有从光伏阵列中提取功率的双重功能。串联变流器对电压暂降/骤升等电能质量问题进行补偿。文献[78]设计了一种新型的微电网统一电能质量调节器,它由超级电容器储能系统(supercapacitor energy storage system, SESS)、光伏阵列、DC/DC 变流器、并联逆变器组成,它能充分利用光伏电池发出的能量,对微电网的各种电能质量问题进行处理。

(2) 电能质量主动治理措施研究现状。为了抑制微电网系统中谐波和无功电流等问题,文献[79]提出了一种有效的利用多功能并网逆变器(multi-functional grid-tied inverter, MFGTI)协调控制方案,通过实验验证了所提控制策略在治理微电网电能质量问题方面的有效性和正确性。文献[80]提出将分布式发电系统与 UPQC 相结合,将孤岛检测技术和重连技术(IR)作为二次控制技术引入 UPQC,这种结构称为 UPQC_{μg}-IR,这种技术可以抑制微电网中电压和电流的干扰。为了解决微电网中光伏发电引起的功率不平衡问题,文献

[81]提出了一种基于两级斜坡限制最优调度的光伏微电网控制策略,通过该控制策略可以有效地找到常规发电蓄能系统的最优运行方案。当微电网处在孤岛运行模式下,微电网中的电能质量将会随着感应电动机的启动和功率变化发生改变,为了改善这一情况,文献[82]提出一种改进的自适应暂态下垂控制与PQ控制相结合的协调控制策略,来实现微电网内部的功率平衡。为了改善传统的孤岛检测存在的可靠性较差、实时性不好等问题,文献[83]将混沌理论应用于并网模式与孤岛模式转换的过程中,对电网电压进行分析和相空间重构,从而提高了被动孤岛检测的实时性与准确性。文献[84]以基于下垂控制并联电压源逆变器构成的微电网系统为研究对象,针对并网谐波电流过高的问题,提出了一种能够成功降低微电网中并网电流总谐波畸变率(total harmonic distortion, THD)的控制策略,该控制策略同时能够提高微电网电能质量和电压源逆变器对电压/电流补偿量的追踪能力。

参考文献

- [1] 孙宁,李照星,杨润栋,等.城市轨道交通车辆应用技术[M].北京:中国铁道出版社,2014.
- [2] 中国城市轨道交通协会.城市轨道交通2018年度统计和分析报告[J].城市轨道交通,2019(4): 16-34.
- [3] 罗晓,江家骅.城市轨道交通规划环境影响评价[M].北京:中国环境科学出版社,2008.
- [4] 钟庆昌,霍尔尼克.新能源接入智能电网的逆变控制关键技术[M].北京:机械工业出版社,2016.
- [5] LAI J, LU X, WANG F, et al. Broadcast gossip algorithms for distributed peer-to-peer control in AC microgrids[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2019, 55(3): 2241-2251.
- [6] NEJABATKHAH F, LI Y, TIAN H. Power quality control of smart hybrid AC/DC microgrids: an overview[J]. IEEE Access, 2019, 7: 52295-52318.
- [7] 汤广福.基于电压源换流器的高压直流输电技术[M].北京:中国电力出版社,2009.
- [8] 李庚银,吕鹏飞,李广凯,等.轻型高压直流输电技术的发展与展望[J].电力系统自动化,2007,27(4): 77-81.
- [9] BAHRMAN M P, JOHNSON B K. The ABCs of HVDC transmission technologies: an overview of high voltage direct current systems and applications[J]. IEEE Power & Energy Magazine, 2007(3)/(4): 32-44.
- [10] LU W X, OOI B T. Optimal acquisition and aggregation of offshore wind power by multiterminal voltage-source HVDC[J]. IEEE Transaction on Power Delivery, 2003, 18(1): 201-206.
- [11] 徐政,陈海荣.电压源换流器型直流输电技术综述[J].高电压技术,2007,33(1): 1-10.
- [12] HERTEM D V, GHANDHARI M. Multi-terminal VSC HVDC for the European super grid: obstacles[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2010, 14(9): 3156-3163.
- [13] 殷自力,梁海峰,李庚银,等.基于模糊自适应PI控制的柔性直流输电系统实验研究[J].电力自动化设备,2008(7): 49-53.
- [14] 胡东良.基于VSC-HVDC风电场联网及其对HVDC稳定性研究[D].保定:华北电力大学,2008.
- [15] LIANG J, GOMIS-BELLMUNT O, EKANAYAKE J, et al. Control of multi-terminal VSC-HVDC transmission for offshore wind power[C]. Proceedings of the 44th International Universities Power Engineering Conference(UPEC), September 1-4, 2009: 1-5.
- [16] UZUKA T, IKEDO S, UEDA K, et al. Voltage fluctuation compensator for Shinkansen[J]. Electrical Engineering in Japan, 2010, 162(4): 25-34.
- [17] 李群湛.论新一代牵引供电系统及其关键技术[J].西南交通大学学报,2014,49(4): 559-568.
- [18] 李群湛,贺建闽.牵引供电系统分析[M].3版.成都:西南交通大学出版社,2012.

- [19] 钱洁. 电力电缆电气参数及电气特性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
- [20] 刘卓辉. 铁路贯通电缆容性参数及仿真的研究[J]. 电气化铁道, 2009(2): 5-9.
- [21] 王辉. 电气化铁路长距离供电技术方案研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2017.
- [22] 蓝波. 电气化铁路新型电缆牵引供电技术方案研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2015.
- [23] 郭鑫鑫. 电气化铁路电缆牵引网研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2016.
- [24] 周强. 电气化铁路新型电缆供电技术经济性研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2015.
- [25] 王琦, 解绍锋, 冯金博, 等. 电气化铁道牵引供电系统电压水平评估[J]. 电力系统及其自动化学报, 2014, 28(1): 53-56.
- [26] 解绍锋. 牵引供电系统电压损失计算方法探讨[J]. 电气化铁道, 2011, 22(6): 1-3.
- [27] 李乾. 市域轨道交通牵引供电制式选择的若干问题研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2015.
- [28] 李群湛. 城市轨道交通交流牵引供电系统及其关键技术[J]. 西南交通大学学报, 2015, 50(2): 199-207.
- [29] 李玉光. 城市轨道交通交流供电方案探讨[D]. 成都: 西南交通大学, 2017.
- [30] 李群湛. 论干线铁路与城市轨道统一牵引供电方式[J]. 中国科学: 技术科学, 2018, 48(11): 1179-1189.
- [31] 李群湛. 论新一代牵引供电系统及其关键技术[J]. 西南交通大学学报, 2014, 49(4): 559-568.
- [32] MASATO A, YASUJI H, YOSHINOBU K. Development of power feeding transformer for Shinkansen suitable for extra high voltage substation[J]. Railway General Technical Journal, 2002, 16(6): 11-14.
- [33] HORIGUCHI A, MORIMOTO H, SUZUKI A. New type feeding transformer for AC traction[C]. In Proceedings of the 8th World Congress on Railway Research(WCRR 2008), May 18-22, 2008.
- [34] MORIMOTO H, ANDO M, MOCHINAGA Y, et al. Development of railway static power conditioner used at substation for Shinkansen[C]. Proceedings of Power Conversion Conference (PCC), April 02-05, 2002. IEEE, 2002.
- [35] WREDE H, UMBRIGHT N. Development of a 413 MW railway power supply converter[C]. Proceedings of the 35th Annual Conference of IEEE-Industrial-Electronics-Society, November 03-05, 2009. IEEE, 2009.
- [36] 门汉文. 德国统一后的电气化铁路概况[J]. 电气化铁道, 1997(1): 1-7.
- [37] SHU Z, XIE S, LU K, et al. Digital detection, control, and distribution system for co-phase traction power supply application[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(5): 1831-1839.
- [38] SHU Z, XIE S, LI Q. Single-phase back-to-back converter for active power balancing, reactive power compensation, and harmonic filtering in traction power system[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(2): 334-343.
- [39] 陈民武, 罗杰, 解绍锋. Vx 接线组合式同相供电系统建模与分析[J]. 西南交通大学学报, 2016, 51(5): 886-893.
- [40] 陈民武, 宋雅琳, 刘琛, 等. 同相供电系统潮流控制器可靠性建模与冗余分析[J]. 电网技术, 2017, 41(12): 4022-4029.
- [41] HUANG X, LI Q. Hybrid integrated power flow controller for cophase traction power systems in electrified railway[C]. Proceedings of the 2015 International Conference on Electrical and Information Technologies for Rail Transportation. Berlin, Springer, 2016.
- [42] 张丽艳, 李群湛, 易东. 同相供电系统同相供电装置容量的优化配置[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(8): 59-64.
- [43] 汪飞. 可再生能源并网逆变器的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2005.
- [44] 曾正, 赵荣祥, 汤胜清, 等. 可再生能源分散接入用先进并网逆变器研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(24): 1-12.

- [45] 张迪,苗世洪,赵健,等.分布式发电市场化环境下扶贫光伏布点定容双层优化模型研究[J]. 电工技术学报,2019,34(10): 19-30.
- [46] 张雪妍,马伟明,付立军,等.基于模式切换的逆变器与发电机并联控制策略[J]. 电工技术学报,2017,32(18): 220-229.
- [47] 张东.电网电压不平衡条件下并网逆变器控制策略研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学,2015.
- [48] 郭磊,王丹,刁亮,等.针对电网不平衡与谐波的锁相环改进设计[J]. 电工技术学报,2018,33(6): 1390-1399.
- [49] 郭小强,刘文钊,王宝诚,等.光伏并网逆变器不平衡故障穿越限流控制策略[J]. 中国电机工程学报,2015,35(20): 5155-5162.
- [50] 顾浩瀚,蔡旭,李征.基于改进型电网电压前馈的光伏电站低电压穿越控制策略[J]. 电力自动化设备,2017,44(7): 13-19,31.
- [51] 韩海娟,牟龙华,张凡,等.考虑 IIDG 低电压穿越时的微电网保护[J]. 中国电机工程学报,2017,37(1): 124-134.
- [52] 沈虹,周文飞,王怀宝,等.基于无功电流控制的并网逆变器孤岛检测[J]. 电工技术学报,2017,32(16): 294-300.
- [53] 潘国清,曾德辉,王钢,等.含 PQ 控制逆变器型分布式电源的配电网故障分析方法[J]. 中国电机工程学报,2014,34(4): 555-561.
- [54] 姜惠兰,李天鹏,吴玉璋.双馈风力发电机的综合低电压穿越策略[J]. 高电压技术,2017,43(6): 324-330.
- [55] 刘璐,耿华,马少康,等.低电压穿越过程中 DFIG 型风电场同步稳定及无功电流控制方法[J]. 中国电机工程学报,2017,37(15): 4399-4407.
- [56] 马临超,蒋炜华,薛宝星. NPC 型三电平永磁同步风力发电并网逆变器模型预测控制满足低电压穿越要求研究[J]. 电力系统保护与控制,2017,44(16): 151-156.
- [57] 杭丽君,李宾,黄龙,等.一种可再生能源并网逆变器的多谐振 PR 电流控制技术[J]. 中国电机工程学报,2012,32(12): 51-58.
- [58] 胡巨,赵兵,王俊,等.三相光伏并网逆变器准比例谐振控制器设计[J]. 可再生能源,2014,32(2): 152-157.
- [59] 张海洋,许海平,方程,等.基于比例积分-准谐振控制器的直驱式永磁同步电机转矩脉动抑制方法[J]. 电工技术学报,2017,32(19): 41-51.
- [60] RODRIGUEZ J, CORTES P. Predictive control of a three-phase inverter[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2004, 40(9): 561-563.
- [61] KOURO S, CORTES P, VARGAS R, et al. Model predictive control——A simple and powerful method to control power converters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(6): 1826-1838.
- [62] 沈坤,章兢,王玲,等.三相电压型逆变器模型预测控制[J]. 电工技术学报,2013,28(12): 283-289.
- [63] 徐艳平,张保程,周钦.永磁同步电机双矢量模型预测电流控制[J]. 电工技术学报,2017,32(20): 222-230.
- [64] 汪杨俊.模型预测控制在大功率低开关频率并网逆变器中的应用[D]. 合肥: 合肥工业大学,2015.
- [65] 公铮,伍小杰,戴鹏.模块化多电平换流器的快速电压模型预测控制策略[J]. 电力系统自动化,2017,41(1): 122-127.
- [66] 张虎,张永昌,杨达维.基于双矢量模型预测直接功率控制的双馈电机并网及发电[J]. 电工技术学报,2016,31(5): 69-76.
- [67] RODRIGUEZ J, PONTT J, SILVA C A, et al. Predictive current control of a voltage source inverter[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2007, 54(1): 495-503.
- [68] 侯庆庆.基于 MPC 的三相离网逆变器控制方法的研究[D]. 合肥: 安徽大学,2016.

- [69] 蔡儒军. 三相四桥臂有源电力滤波器控制策略研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2016.
- [70] 柳志飞, 杜贵平, 杜发达. 有限集模型预测控制在电力电子系统中的研究现状和发展趋势[J]. 电工技术学报, 2017, 32(22): 58-69.
- [71] 陆治国, 王友, 廖一茜. 基于光伏并网逆变器的一种矢量角补偿法有限控制集模型预测控制研究[J]. 电网技术, 2018, 42(2): 548-554.
- [72] 成瑞芬, 韩肖清, 王鹏, 等. 微电网动态电压恢复器运行模式研究[J]. 电网技术, 2013, 37(3): 610-615.
- [73] 王强钢, 周念成, 颜伟, 等. 采用背靠背变流器接入配电网改善低压微网电压质量的控制设计[J]. 电工技术学报, 2013, 28(4): 171-181.
- [74] 郭振, 乐全明, 郭力, 等. 交直流混合微电网中直流母线电压纹波抑制方法[J]. 电网技术, 2017, 41(9): 168-176.
- [75] SINGH B, KANDPAL M, HUSSAIN I. Control of grid tied smart PV-DSTATCOM system using an adaptive technique[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(5): 3986-3993.
- [76] 易桂平. 微网环境下多源并网运行及复合控制研究[D]. 南京: 东南大学, 2015.
- [77] DEVASSY S, SINGH B. Design and performance analysis of three-phase solar PV integrated UPQC[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2018, 54(1): 73-81.
- [78] 蒋玮, 陈武, 胡仁杰. 基于超级电容器储能的微网统一电能质量调节器[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(1): 85-90.
- [79] 曾正, 邵伟华, 赵伟芳, 等. 多功能并网逆变器与并网微电网电能质量的分摊控制[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(19): 4947-4955.
- [80] KHADEM S K, BASU M, CONLON M F. Intelligent islanding and seamless reconnection technique for microgrid with UPQC[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2015, 3(2): 483-492.
- [81] ZHAO J, XU Z. Ramp-limited optimal dispatch strategy for PV-embedded microgrid[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(5): 4155-4157.
- [82] 朱鑫, 刘俊勇, 刘洋, 等. 基于滑模变结构的含不平衡负荷微电网控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(6): 25-32.
- [83] 戈阳阳, 马少华, 李洋, 等. 基于混沌特性的微电网孤岛检测技术[J]. 电网技术, 2016, 40(11): 3453-3458.
- [84] 冯伟, 孙凯, 关雅娟, 等. 基于分层控制的微电网并网谐波电流主动抑制控制策略[J]. 电工技术学报, 2018, 33(6): 1400-1409.



基于能量路由器的轨道交通柔性供电系统

2.1 基于能量路由器的轨道交通供电系统架构

随着电力改革与市场化的推进,未来电能的交易必将趋于更加自由和灵活,新能源发电渗入配电端,电能从单向流动变为多向流动,而传统的电力系统和电力设备往往被动地调节功率平衡,对功率流的主动控制与分配较为困难,无法满足供电形式多样性、能量多向流动以及功率流的主动调控等要求,无法满足未来电力市场化的需要。

因此有必要使城市轨道交通供电网实现新能源接入、能量多向流动、能量快速重新平衡分配等功能,从而进一步提高轨道交通能源利用率,减少能量损耗,提高运行效率及经济效益。基于电力电子变换技术的能量路由器(energy route, ER)作为实现能源互联网的关键部件之一,可整合多种分布式电源及储能单元,使其与轨道交通供电网络配合向负载供电,这是实现电能多向控制、新能源从单一集中式向分布式控制发展以及轨道交通多类负载接入的有效方案。

能量路由器作为轨道交通中分布式电源、无功补偿设备、储能设备、负荷等的智能接口,应该在保证电能质量的前提下,灵活地管理区域电网内部及整个轨道交通供电网络中的动态电能。对电能路由器的基本要求主要有^[1]: ①接口的即插即用; ②能够实现电压变换、电气隔离、能量流向可控、提升电能质量; ③能够根据故障情况或系统需要,自主地与主网分离和并网,提高电网的自愈性; ④实时通信技术; ⑤用户电能消耗查询技术。

在 2001 年,美国电力科学研究院就对电网中互联系统的问题进行了相关研究,提出未来电网产业的发展将与计算机产业相似,并在 2008 年开始了“智能通用变压器”(intelligent universal transformer, IUT)的研发。图 2-1 为 IUT 的结构^[2],其功能主要为代替传统变压器,采用级联 H 桥结构,DC/DC 级用串联谐振变换器降压,直流侧采用 SiC 二极管整流桥

连接 400 V 低压直流母线,最后采用全桥逆变连接交流低压母线。该变压器采用超级门极可关断晶闸管(super gate turn-off thyristor,SGTO)^[3],单模块的功率最高可至 25 kV · A,最高开关频率可以达 50 kHz。该变压器在传统变压器功能的基础上,提供了交直流端口,相比于传统变压器,容量也有所上升,缺点是,由于主要采用二极管整流,功率无法实现双向传递,从而限制了其灵活性。

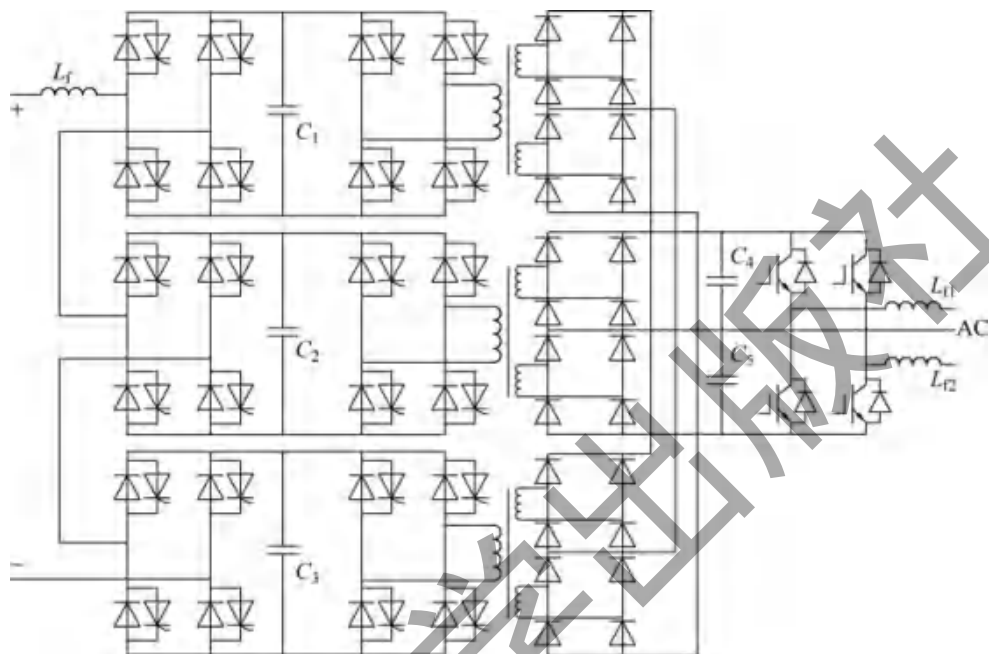


图 2-1 美国电科院 IUT 拓扑

未来可再生电能传输与管理(the future renewable electric energy delivery and management, FREEDM)为美国国家科学基金项目,其根据网络技术中的核心路由器提出了“能量路由器”的概念。图 2-2 中的固态变压器为 FREEDM 的核心部件^[4]。输入端为 7.2 kV 的单相交流电,与配电网相连。输出端为两个端口,分别为 400 V 直流电和单相 240 V/120 V 交流电。与配网连接的高压侧,由级联全桥拓扑组成,采用了 6.5 kV 的 Si IGBT。中间隔离单元为起到降压作用的 DC 变换单元,将 3.8 kV 的高压直流转换为 400 V 的低压直流。低压侧为逆变级,将直流电流转换为 240 V 或 120 V 的低压交流电。但是器件的限制导致了各个级的开关频率不够高(整流单元 1080 Hz,DC 变换级 3.6 kHz,逆变级 10.8 kHz),使得整个系统体积和重量巨大,噪声过高,并且严重限制了动态性能,难以实际应用。

在 2008 年,德国研究人员提出了 E-Energy 理念和能源互联网计划,并进行了投资和项目实施。瑞士苏黎世联邦理工学院(ETH Zurich)设计了适用于智能微电网的 1 MV · A 固态变压器。设计大容量固态变压器的目的是满足电能路由器适用于主干电路的要求。其架构和功能与 FREEDM 中的固态变压器类似,输入端连接配电网,输出端为三相交流 400 V。其优点是:提高了开关频率,达到 20 kHz;由于整流级和 DC 变换级都采用了二极管箝位三电平结构,提高了输入端的耐压水平,减小了变压器体积。该固态变压器模块拓扑如图 2-3 所示^[5]。