

前 言

电力系统的谐波问题最早可追溯到 20 世纪 20 年代，在使用静止汞弧变流器时产生了电压、电流波形的畸变，谐波问题开始引起研究人员的关注。到 20 世纪中叶，高压直流输电技术的发展进一步推进了对变流器谐波问题的研究。70 年代以来，电力电子技术的飞速发展使得各类电力电子装置在不同领域的应用日益广泛，谐波造成的危害也日趋严重。近年来，随着新型电力系统的建设，电力电子设备在系统中的占比不断提升，这些非线性电子电力装置的开关特性将不可避免地产生大量谐波电流注入电力系统，系统的谐波问题日益复杂多变，其受重视程度也在不断提高。

新型电力系统中各类电力电子装置在源网荷中得到广泛应用，突破了传统电力系统中的诸多固有瓶颈：可以实现电能的高效能转换，将电力系统中的能量转换为所需的形式，提高能源利用效率；可以实现对电能的精确控制和调节，包括电压、电流、频率等参数，面对不同工况和应用需求具有高度可控性和灵活性；可以实现设备集成和模块化设计，节省安装空间和成本，相较于传统电力设备具有更高的功率密度；可以快速调节电力系统的工作状态，提高系统的动态稳定性和响应速度。电力电子设备依托自身诸多优势，不仅提升了电力系统发、输、配、用各环节的能量转换效率，也减少了能源浪费和环境污染。例如，直流输电中的相控换流装置、全控换流装置及模块化多电平换流装置，光伏、风电等新能源并网逆变器，居民家用电器中常见的整流装置等，这些电力电子设备的应用充分表明，电力电子化已成为新型电力系统的重要特征。

新能源机组、柔性输电设备、变频器等电力电子装置在新型电力系统中的规模化应用，对于提升我国输配电网智能化水平、助力“双碳”目标实现具有重要的意义。然而，电力电子装置具有显著的非线性耦合特性，其种类愈发多样且谐波特性各异，不同频次谐波间存在相互影响，谐波产生机理愈加复杂。实测数据表明，不控整流类谐波源产生的耦合谐波超 40%，分布式光伏产生的耦合谐波超 15%。同时，光伏、风电等新能源受自然环境的影响而变化，电动汽车、柔性负荷与用户的使用习惯紧密相关，源荷谐波随机性增强，谐波运行特性多变且分析困难。此外，谐波源的谐波发射特性不仅与自身的特点和工作状况有关，还会受到其他谐波源的影响。多类型谐波源之间相互影响，且随着电力电子化程度的提高，其交互程度不断加深，不同频次电压、电流之间的耦合增强，电力系统谐波分析难度增大。

针对非线性电力电子装置的多频耦合谐波解析难题，本书在充分研究国内外学者在非线性电力电子装置谐波分析方面已经取得的进展基础上，系统性分析电流源型整流装置、电压源型整流装置、晶闸管控制电抗器、两电平全控型换流器、模块化多电平换流器、背靠背换流器等不同类型电力电子装置的多频耦合特性，从机理分析、数据驱动的角度开展谐波源模型建立并将所提出的模型应用到谐波潮流和谐振分析中，可为谐波评估、谐波抑制提供理论模型，对分析电力电子设备谐波特性、提升电力系统优质供电能力奠定理论基础。

本书作者共同拟订了大纲，完成了统稿，其中，山东大学孙媛媛教授撰写了第1~4章，四川大学肖先勇教授与王杨研究员撰写了第6、7、11章，青岛大学谢香敏副教授撰写了第8~10章，华东交通大学高波副教授撰写了第5章。

山东大学电气工程学院李亚辉老师、四川大学电气工程学院王翰文老师全程参与了本书的整理工作，郑伟杰、李佳奇、刘福朝直接参与了谐波耦合建模部分的研究，李博文、单鹏博、王明晨、庄静茹、路彤、张安彬、徐龙威、孟广泽、尹书林、赖逸柔、丁玉昊、王伟明、王赛、余孝磊、夏菲、田旭、李思颖等研究生参加了插图绘制和文字校对工作，对他们付出的辛劳表示感谢。感谢国家自然科学基金项目(U23B20116、52177104)和山东省泰山学者青年专家计划项目的资助。本书工作由 Wilsun Xu 教授指导，在此表示衷心的感谢。在本书的撰写过程中，作者参阅了大量的文献资料和学术著作，借此机会谨向原文献作者表示衷心的感谢。

本书内容体现的研究成果是阶段性的，鉴于作者水平有限，书中不妥之处在所难免，恳请广大读者批评指正。

作 者

2025年8月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 背景及意义	1
1.2 电力电子装置谐波源	1
1.2.1 相控型电力电子装置	2
1.2.2 全控型电力电子装置	4
1.3 谐波源模型	6
1.3.1 恒流源模型	6
1.3.2 诺顿模型	7
1.3.3 谐波耦合模型	8
参考文献	10
第 2 章 电流源型整流装置的谐波耦合建模	12
2.1 概述	12
2.2 电流源型整流装置的特性分析	12
2.2.1 电压电流调制关系	12
2.2.2 整流装置频域谐波表征	14
2.3 单相整流装置的谐波耦合模型	16
2.3.1 单相整流装置谐波耦合建模	16
2.3.2 考虑换相过程的谐波耦合建模	21
2.3.3 谐波耦合特性分析	23
2.4 三相整流装置的谐波耦合模型	26
2.4.1 三相整流装置的谐波耦合建模	26
2.4.2 考虑换相过程的谐波耦合建模	27
2.4.3 考虑三相不平衡的谐波耦合建模	29
2.4.4 谐波耦合特性分析	32
2.5 多脉波整流装置的谐波耦合模型	36

2.5.1	多脉波整流装置的谐波耦合建模	36
2.5.2	考虑三相不平衡的谐波耦合建模	42
2.5.3	谐波耦合特性分析	45
2.6	本章小结	48
	参考文献	49
第3章	电压源型整流装置的谐波耦合建模	50
3.1	概述	50
3.2	电压源型整流装置的特性分析	50
3.2.1	等效电路	50
3.2.2	开关特性	51
3.3	单相电压源型整流装置谐波耦合模型	52
3.3.1	触发角与关断角	52
3.3.2	单相电压源型整流装置谐波耦合建模	53
3.3.3	谐波耦合特性分析	57
3.4	三相电压源型整流装置谐波耦合建模	58
3.4.1	工作状态分析与确定	58
3.4.2	交流电流连续下的谐波耦合建模	59
3.4.3	交流电流断续下的谐波耦合建模	62
3.4.4	谐波耦合特性分析	67
3.5	三相电压源型整流装置的工作状态判定与灵敏度分析	73
3.5.1	工作状态判定	73
3.5.2	电路参数对工作状态的影响	76
3.6	本章小结	79
	参考文献	79
第4章	晶闸管控制电抗器的谐波耦合建模	81
4.1	概述	81
4.2	TCR 运行特性分析	81
4.2.1	TCR 等效电路结构	81
4.2.2	TCR 开关特性	82
4.3	单相 TCR 的谐波耦合模型	83

4.3.1 单相 TCR 开关函数	83
4.3.2 单相 TCR 谐波耦合建模	84
4.3.3 谐波耦合特性分析	86
4.4 三相 TCR 谐波耦合模型	88
4.4.1 三相 TCR 开关函数	88
4.4.2 三相 TCR 谐波耦合建模	89
4.4.3 谐波耦合特性分析	91
4.5 TCR 的简化谐波耦合模型	93
4.5.1 TCR 的谐波耦合影响分析	93
4.5.2 TCR 的简化谐波耦合建模	96
4.5.3 仿真验证	97
4.6 本章小结	98
参考文献	99
第 5 章 两电平全控型换流器谐波耦合建模	100
5.1 概述	100
5.2 两电平 VSC 运行特性分析	100
5.2.1 VSC 的拓扑结构	100
5.2.2 VSC 的控制策略	101
5.2.3 VSC 的谐波产生	103
5.3 单相两电平 VSC 的谐波耦合模型	105
5.3.1 单相 VSC 的谐波耦合建模流程	106
5.3.2 谐波耦合特性分析	113
5.4 三相 VSC 的谐波耦合模型	117
5.4.1 三相 VSC 的谐波耦合建模流程	117
5.4.2 考虑三相不平衡的谐波耦合建模	121
5.4.3 谐波耦合特性分析	129
5.5 本章小结	137
参考文献	137
第 6 章 模块化多电平换流器谐波耦合建模	139
6.1 概述	139

6.2	模块化多电平换流器拓扑结构及控制策略	139
6.2.1	模块化多电平换流器的拓扑结构	139
6.2.2	模块化多电平换流器的控制策略	140
6.2.3	模块化多电平换流器的谐波产生	148
6.3	模块化多电平换流器的谐波耦合模型	149
6.3.1	模块化多电平换流器的谐波耦合建模流程	151
6.3.2	谐波耦合特性分析	159
6.4	本章小结	161
	参考文献	161
第7章	背靠背换流器谐波耦合建模	163
7.1	概述	163
7.2	背靠背换流器拓扑结构及控制策略	163
7.2.1	背靠背换流器的拓扑结构	163
7.2.2	背靠背换流器的控制策略	165
7.2.3	背靠背换流器的谐波产生	166
7.3	DFIG 的谐波耦合模型	166
7.3.1	背靠背换流器的谐波耦合建模流程	167
7.3.2	谐波耦合特性分析	173
7.4	VSC-HVDC 输电系统的谐波耦合模型	180
7.4.1	VSC-HVDC 输电系统的谐波耦合建模流程	180
7.4.2	谐波耦合特性分析	186
7.5	本章小结	188
	参考文献	189
第8章	基于电压自适应的谐波源耦合建模	190
8.1	概述	190
8.2	基于实测数据的谐波耦合建模	191
8.2.1	低压设备的谐波特性分析	191
8.2.2	单谐波源耦合模型建立	192
8.2.3	基准谐波耦合模型参数求解	193
8.3	考虑电压波动的谐波耦合建模	195

8.3.1 供电电压和谐波电流的波动性分析	195
8.3.2 电压自适应谐波耦合模型	196
8.3.3 低压设备多状态谐波耦合建模	200
8.3.4 谐波耦合模型建立总流程	201
8.4 谐波耦合特性分析	202
8.4.1 基于广义线性复偏最小二乘法的模型验证	203
8.4.2 电压动态自适应谐波耦合模型验证	206
8.4.3 低压配电系统谐波评估	210
8.5 本章小结	215
参考文献	216
第 9 章 集合性源荷的谐波源概率耦合建模	218
9.1 概述	218
9.2 集合性谐波源的谐波特性分析与谐波耦合模型	219
9.2.1 低压配电系统供电电压与谐波电流特性分析	219
9.2.2 谐波耦合模型建立	221
9.2.3 分时段概率谐波耦合建模	227
9.2.4 基于数据驱动的集合性谐波源的谐波耦合模型建立总流程	232
9.3 谐波耦合特性分析	234
9.3.1 UD-HCM 的实验验证	234
9.3.2 分段概率 UD-HCM 的特性分析	239
9.3.3 中压配电系统的概率性谐波评估	242
9.4 本章小结	245
参考文献	245
第 10 章 基于谐波耦合的概率谐波潮流计算	247
10.1 概述	247
10.2 基于谐波耦合的确定性潮流方程的建立	248
10.2.1 图论的介绍	248
10.2.2 基波潮流的计算	251
10.2.3 谐波潮流的计算	252
10.3 分段概率谐波潮流的计算	254

10.3.1 基于场理论的概率谐波潮流估测·····	254
10.3.2 分段概率谐波潮流计算总流程·····	256
10.4 算例分析·····	257
10.4.1 IEEE 13 节点测试系统验证·····	257
10.4.2 IEEE 123 节点测试系统验证·····	262
10.4.3 IEEE 8500 节点测试系统验证·····	267
10.5 本章小结·····	269
参考文献·····	270
第 11 章 基于谐波耦合模型的谐振分析·····	272
11.1 概述·····	272
11.2 谐波耦合模型的降维方法·····	273
11.3 模态分析法基本概念·····	276
11.4 元件模态灵敏度分析·····	277
11.5 计及谐波耦合特性的谐振稳定性分析方法·····	278
11.6 算例分析·····	279
11.6.1 高压直流输电系统验证·····	279
11.6.2 海上风电并网系统验证·····	297
11.7 本章小结·····	301
参考文献·····	301
附录 A·····	303
附录 B·····	310
附录 C·····	314

第1章 绪 论

1.1 背景及意义

随着可再生能源规模化开发、更大范围优化资源配置、负荷节能效率提升等需求持续推进^[1]，电力电子装置在电力系统发电、输电、配电、用电各环节得到了广泛应用，机电-电磁变换装置逐步被电力电子装置取代已成为电力系统发展的重要趋势，电源、电网和负荷形态发生了深刻变化^[2,3]。电源侧，新能源机组以换流器为接口并网，以提升其发电效率和并网能力；电网侧，高压直流输电迅猛发展，以实现长距离、大容量、跨区域输电目标；负荷侧，变频驱动的高铁列车、电动汽车等电力电子负荷广泛接入，以提升其能效与灵活性^[4]。随着电力系统的不断发展，电力电子装置规模还将进一步提升，不仅会造成电力系统谐波超标，还可能引起电力系统局部并联谐振或串联谐振，导致谐波含量放大、设备烧毁等问题^[5,6]。此外，谐波还可能引起继电保护和自动装置误动作，威胁电力系统的稳定运行^[7]。

电力电子化背景下，电力系统谐波问题也呈现出新的特征。新能源发电、直流输电、柔性负荷等谐波源种类愈发多样，其电力电子电路拓扑结构互不相同，且控制策略存在差异，谐波产生的机理愈加复杂。同时，光伏、风电等新能源受自然环境条件变化的影响，其谐波特性呈现随机性特征；多类型负荷的谐波特性与用户使用习惯紧密相关，且不同运行状态之间谐波特性存在差异，系统谐波具有明显的动态特征，给谐波分析造成困难。此外，谐波源的谐波发射特性不仅与自身的特点和工作状况有关，还会受到相邻谐波源的影响，多类谐波源之间相互耦合影响，谐波机理分析难度进一步增大。

为保障大规模异构电力电子装置接入下电力系统具有优质的供电水平，有必要对谐波产生机理及其影响进行分析，同时这也可对电能质量问题的针对性治理提供有力支撑。为准确分析、评估大规模电力电子装置接入所带来的谐波问题，本书通过建立各类型电力电子装置的谐波耦合分析模型，描述了谐波电压与谐波电流之间的耦合关系，并利用谐波耦合模型对谐波潮流、谐振及小干扰稳定性进行研究，支撑电力系统优质可靠运行。

1.2 电力电子装置谐波源

新型电力系统中电力电子控制与装置广泛存在，电力电子器件按照一定规律

随时间导通和关断,器件开通前后电路具有不同的运行状态,即使是在标准正弦供电电压下,这类装置也将向系统注入大量谐波,电压、电流关系呈现明显的非线性特征。按照谐波源的电路拓扑结构与其电路结构参数的不同,本书将现有谐波源分为不控型电力电子装置、相控型电力电子装置和全控型电力电子装置,其中不控型电力电子装置的建模可理解为相控型电力电子装置的一种特殊形式,在此不再单独对其进行分析。

1.2.1 相控型电力电子装置

相控型电力电子装置是指以晶闸管为基本元件组成的具备交直流电能转换能力的电路,在实际应用中,典型的相控型整流装置主要包括:单相/三相电流源型整流装置、单相/三相电压源型整流装置以及晶闸管控制电抗器。

直流侧带平波电抗器或直流电机负载的电流源型整流装置,是最早出现的电力电子装置谐波源,其输出电流相对恒定,注入电网的谐波主要由电力电子器件的开关特性决定。一般情况下,电流源型整流装置电流总谐波畸变率在 30% 以上,实际应用中需要安装滤波装置进行滤波。电流源型整流装置已在高压直流输电、直流电机供电、通信设备电源、电动汽车、电解、冶金等领域获得广泛应用,其电路结构如图 1-1 所示。图中, u_{ac} 为整流装置的供电电压, i_{ac} 为交流电流, L_c 为换相电感, $T_1 \sim T_6$ 为晶闸管, i_{dc} 为直流侧电流, u_{dc} 为直流侧电压, R 为直流负载的等效电阻, L 为负载的等效电抗, E_{dc} 为整流装置的直流电压源, i_A 、 i_B 、 i_C 为 A、B、C 三相电流。另外,在三相电流源型整流装置的基础上,通过将多个整流电路串联或并联,形成的多脉波整流装置,不仅具备相对平稳、控制方式简单等优势,而且交流侧电能质量更好、功率密度更高,在高压直流输电、变频调速、飞机电源系统等场合得到应用。

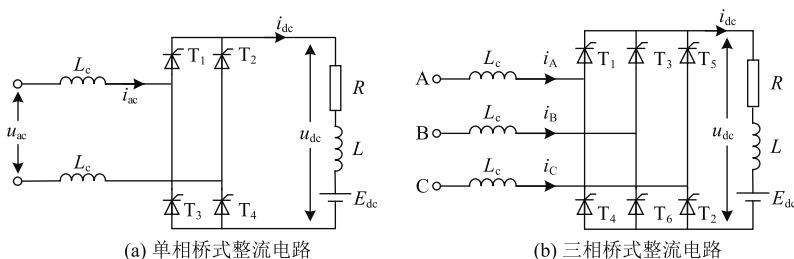


图 1-1 电流源型整流装置

电压源型整流装置直流侧并联大的滤波电容,虽然理想条件下直流侧电压恒定,但在实际情况中直流侧电压是有纹波的,且产生的纹波电压与负载特征有关,其电路结构如图 1-2 所示。图中, $D_1 \sim D_6$ 为二极管, C 为等效电容。电压源型整

流装置所产生的电流总谐波畸变率较高,如三相电压源型整流装置在连续工作状态下的电流总谐波畸变率达到45%以上,而断续工作状态下所产生的电流总谐波畸变率可高达160%。电压源型整流装置的应用也十分广泛,日常家用电器设备,如电视机、空调、笔记本电脑、计算机主机、显示器等都含有单相电压源型整流装置。另外,在电力、机械、冶金、化工、纺织、造纸、供水、供电等行业广泛存在的交-直-交变频器,就是利用三相电压源型整流装置将交流电转换为相对稳定的直流电。

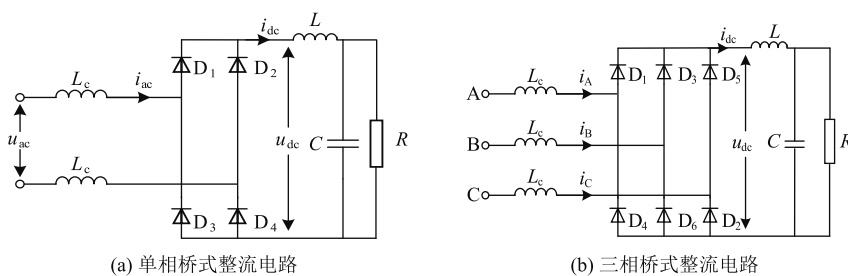


图 1-2 电压源型整流装置

晶闸管控制电抗器(thyristor controlled reactor, TCR)由两个反并联的晶闸管串联一个电抗器组成,通过控制晶闸管的导通时间,晶闸管控制电抗器的有效电抗可以连续变化,是静止无功补偿中的重要组成元件,其电路结构如图 1-3 所示。图 1-3(a)中, T_1 、 T_2 为晶闸管, U_L 为电抗器电压, I_{TCR} 为流过 TCR 的电流, U 为供电电压;图 1-3(b)中, T_{AB1} 、 T_{AB2} 、 T_{BC1} 、 T_{BC2} 、 T_{CA1} 、 T_{CA2} 为晶闸管, I_A 、 I_B 、 I_C 和 I_{AB} 、 I_{BC} 、 I_{CA} 分别是三相 TCR 的相电流和线电流, U_A 、 U_B 、 U_C 分别是三相 TCR 的相电压。TCR 作为可变电感,所吸收的无功功率可以快速、平滑地调节,因此其和晶闸管投切电容器(thyristor switched capacitor, TSC)一起成为电力系统中无功补偿和电压调节的重要手段。但 TCR 在运行过程中,将产生奇次低频谐波电流并注入系统中,已成为系统中的典型谐波源之一。

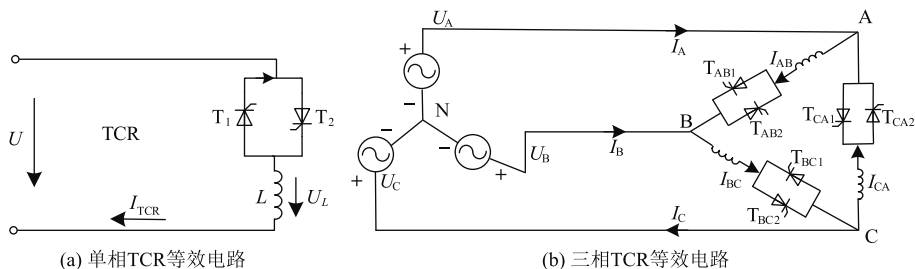


图 1-3 晶闸管控制电抗器

1.2.2 全控型电力电子装置

随着绝缘栅双极型晶体管(insulated-gate bipolar transistor, IGBT)、门极关断晶闸管(gate turn-off thyristor, GTO)等开关器件的普及,全控型电压源型换流器具有了双向潮流、有功功率和无功功率独立控制等多种优良特点,近年来得到广泛应用。由于全控型电压源型换流器的开关频率较高,因此其谐波模型与相控型电力电子装置存在较大差异。本书重点针对三相全控型换流器进行介绍,结合换流器电平数目及常见拓扑结构将其分为两电平换流器、模块化多电平换流器、背靠背换流器。全控型电力电子装置根据其使用场景也可以划分为整流装置和逆变装置,二者建模原理相似,本书以全控型逆变装置为例对两电平换流器、模块化多电平换流器进行分析,而背靠背换流器则同时包含了整流装置和逆变装置。

两电平电压源型换流器在 35kV 及以下电压等级具有较高的成本效率比,因此在配电系统中的应用更为广泛^[8]。两电平电压源型换流器的谐波主要由脉冲宽度调制(pulse width modulation, PWM)产生^[9],而频域响应特性则受到控制系统的影响,其电路结构如图 1-4 所示。图中, $S_1 \sim S_6$ 为 IGBT, $S_1 \sim S_6$ 表示各开关器件的开关函数, U_A 、 U_B 、 U_C 表示三相交流侧电压, I_A 、 I_B 、 I_C 表示三相交流侧电流, C 表示直流侧等效电容。三相两电平电压源型换流器一般由 6 个 GTO 或 IGBT 开关器件组成,通过脉冲宽度调制控制开关器件的开通和关断,其交流侧通过 L、LC 或 LCL 形式的滤波器与电网连接,直流侧与电容器相连以维持直流电压^[10,11]。

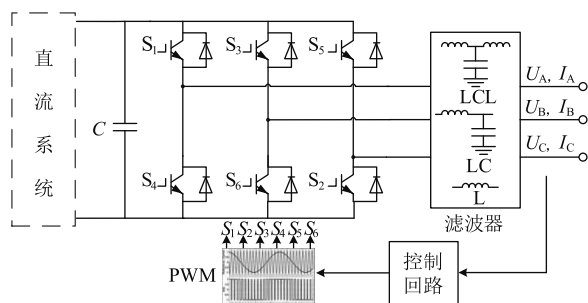


图 1-4 三相两电平电压源型换流器

模块化多电平换流器采用级联式结构,可将耐压等级较低的功率器件拓展用于中/高压大功率场合,并具备模块化设计、易于生产维护、可靠性高以及开关频率较低等优点,在柔性直流输电、低频输电、大功率电机驱动、电力电子变压器等应用场合得到了广泛应用,其电路结构如图 1-5 所示。 u_{dcu} 和 u_{dcl} 分别是正、负极直流电压, i_{Au} 、 i_{Al} 分别为 A 相上、下桥臂电流, u_{Au} 、 u_{Al} 分别为 A 相上、下桥臂电压, i_{Ag} 、 u_{Ag} 为 A 相交流侧基频电流和电压, L_{arm} 、 R_{arm} 分别为桥臂电感和电阻。模块化多电平换流器由三个相单元、六个桥臂组成,每个桥臂由多个 (N 个)

相同的子模块(SM)级联组成,其通过分配上、下桥臂上投入的子模块个数来控制换流器输出多电平波形。相较于两电平换流器,模块化多电平换流器能够克服过高的开关损耗、IGBT 串联带来的静态与动态均压、电磁干扰、较高的器件开关一致性需求等问题,但也存在子模块电容电压波动及其引发的相间环流波动、交流侧电流畸变等问题,其建模因子模块电容电压波动及其引发的相间环流波动而更为复杂。

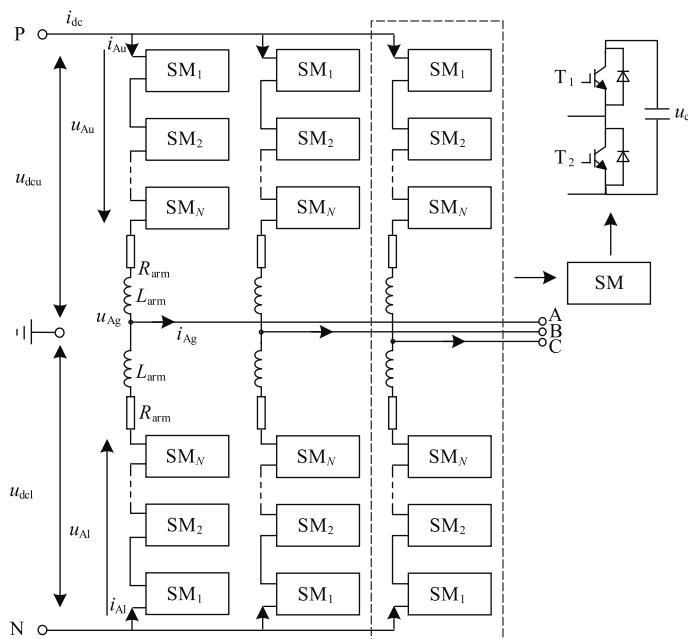


图 1-5 三相模块化多电平换流器

背靠背换流器是将两个电压源型换流器通过直流链路相连,实现交-直-交变换的电力电子装置,被广泛应用于柔性直流输电、直驱风机、双馈感应发电机(doubly-fed induction generator, DFIG)中。以 DFIG 为例,可将背靠背换流器分别记为网侧换流器(grid side converter, GSC)和转子侧换流器(rotor side converter, RSC),基于背靠背换流器的 DFIG 系统电路结构如图 1-6 所示。图中, L_f 和 R_f 分别为滤波器电感和电阻, U_{dc} 为直流侧电压, U_{cr} 、 U_{cg} 为 RSC 和 GSC 交流侧电压, I_{dcr} 、 I_{deg} 为 RSC 和 GSC 直流侧电流, U_g 为并网点电压, PCC 为公共连接点,电网用戴维南电路等效,其等效电压和阻抗分别为 U_{gs} 和 Z_{gs} , u_{sabc} 为感应电机定子交流侧电压, i_{rabc} 为感应电机转子交流侧电流。相较于单个电压源型换流器,背靠背换流器存在两个换流器之间的谐波耦合,因此具有更强的非线性特征,其谐波分析也更为复杂。

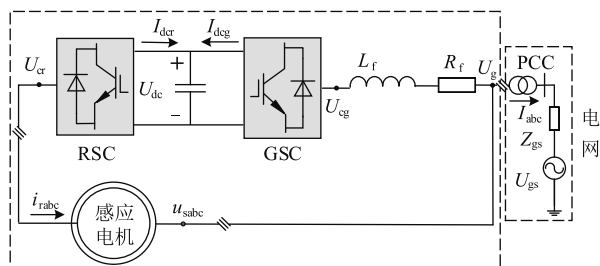


图 1-6 基于背靠背换流器的 DFIG 系统

1.3 谐波源模型

谐波源建模在谐波特性分析、交互影响和责任划分等方面均具有重要作用,恰当准确的谐波源模型能够降低分析的复杂程度,减小分析误差。目前,谐波源模型总体可分为三类:恒流源模型(constant current source, CCS)、诺顿模型(Norton model, NM)和谐波耦合模型(harmonic coupled model, HCM),而每类又可分别采用机理分析和数据驱动的方法进行建模。在采用频域建模方法对谐波源特性进行分析时,谐波源端口处各次谐波电压和谐波电流可采用统一函数表达式 $g_h(\cdot)$ 进行表示:

$$\dot{I}_h = g_h(C_h, \dot{U}_1, \dot{U}_2, \dots, \dot{U}_K) \quad (1-1)$$

式中, $\dot{I}_h$ 为第 h 次谐波电流相量; $\dot{U}_h$ 为第 h 次谐波电压相量; K 为考虑的最高次谐波次数; C_h 为当前运行工况参数,通常是一组功率参数。

1.3.1 恒流源模型

1) 机理分析方法

恒流源模型是目前最简单也是使用最广泛的一类谐波源模型^[12,13]。该模型不计及节点电压谐波分量对注入谐波电流的影响^[14],近似认为谐波源所产生的谐波电流仅取决于其所在节点的外加基波电压,其等效电路如图 1-7 所示。谐波源产生的谐波电流仅受其运行工况和外电路基波电压的影响,而与外电路的阻抗无关,如式(1-2)所示。

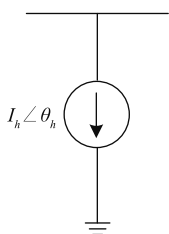


图 1-7 恒流源模型等效电路

$$\dot{I}_h = g_h(\dot{U}_1) \quad (1-2)$$

若假定基波电压保持不变,则谐波源各次谐波注入电流为恒定值,此时谐波源可被视为内阻抗无穷大的各次谐波电流源。谐波电流的幅值和相位根据基频下谐波源的电流幅值和相位以及谐波源的典型谐波频谱可根据式(1-3)和式(1-4)计算得到。

$$I_h = I_1 \frac{I_{h\text{-spectrum}}}{I_{1\text{-spectrum}}} \quad (1-3)$$

$$\theta_h = \theta_{h\text{-spectrum}} + h(\theta_1 - \theta_{1\text{-spectrum}}) \quad (1-4)$$

式中, I_h 为谐波源第 h 次谐波电流有效值; θ_h 为谐波源第 h 次谐波电流相位; I_1 为谐波源基波电流有效值; θ_1 为谐波源基波电流相位; $I_{1\text{-spectrum}}$ 为谐波源典型谐波频谱的基频电流有效值; $\theta_{1\text{-spectrum}}$ 为谐波源典型谐波频谱的基频电流相位; $I_{h\text{-spectrum}}$ 为谐波源典型谐波频谱的第 h 次谐波电流有效值; $\theta_{h\text{-spectrum}}$ 为谐波源典型谐波频谱的第 h 次谐波电流相位。

恒流源模型可根据谐波频谱建立模型, 应用较为便捷^[15]。但实际场景中, 谐波源的谐波电流会受其供电侧谐波电压的影响。另外, 恒流源模型未考虑背景影响, 模型精度较低。在实际应用场景中使用谐波源的典型谐波频谱可能会导致结果不精确^[16], 恒流源模型也因此正逐步被其他频域模型取代。

2) 数据驱动方法

基于机理分析的时域建模方法各参数物理意义明确、可解释性较强、建模精度较高, 但面对耦合系统时, 模型会由复杂的多元微分方程组构成, 建模工作量较大, 也会使后续的方程组求解较为烦琐。因此, 在面对当今电力系统中复杂拓扑结构的电力电子类谐波源时, 数据驱动的建模方法不失为一种好的选择。

基于实测数据的时域建模方法实质上是分析时间序列的映射回归问题, 通过拟合和预测时间序列获取谐波时变状态, 目前在算法领域已取得了一定的研究成果, 如将卷积神经网络、长短期记忆神经网络应用于拟合和预测时间序列, 可以实现对谐波电流的预测。

1.3.2 诺顿模型

1) 机理分析方法

在恒流源模型的基础上并联各次谐波阻抗构建的诺顿模型^[17], 能够体现同次谐波电压和谐波电流的耦合效应, 其等效电路如图 1-8 所示。与恒流源模型相似, 诺顿模型中的恒定谐波电流源由谐波源所在节点的基波电压确定, 因此可将谐波源的各次谐波注入电流表示为基波电压和同次谐波电压的函数, 如式 (1-5) 所示。

$$\dot{I}_h = g_h(\dot{U}_1, \dot{U}_h) \quad (1-5)$$

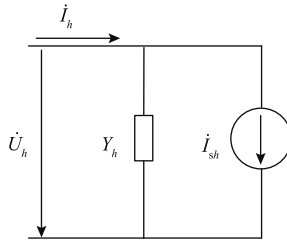


图 1-8 诺顿模型等效电路

对于各次谐波，诺顿模型分别用一个恒流源和一个恒定的谐波导纳并联来表示其谐波特性^[16,18]，即

$$\dot{I}_h = \dot{I}_{sh} + Y_h \dot{U}_h \quad (1-6)$$

式中， $\dot{U}_h$ 为谐波源第 h 次谐波电压； $\dot{I}_{sh}$ 为恒流源谐波电流； Y_h 为第 h 次谐波的导纳。

诺顿模型考虑了基波电压和同次谐波电压对谐波电流的影响。研究表明，某一特定频次的谐波电流也会受到其他各次谐波电压的影响，即不同次谐波间同样存在耦合关系，但在诺顿模型中不能得到体现，导致模型精度不高。

2) 数据驱动方法

为采用数据驱动方法确定谐波诺顿模型参数，需要两个不同系统电压运行状态下的参数，改变运行状态一般采用投切电容器、并联阻抗等方法来实现，具体计算方式如下：

$$Y_h = \frac{\dot{I}_h^{(2)} - \dot{I}_h^{(1)}}{\dot{U}_h^{(2)} - \dot{U}_h^{(1)}} \quad (1-7)$$

$$\dot{I}_{sh} = \dot{I}_h^{(1)} - Y_h \dot{U}_h^{(1)} = \dot{I}_h^{(2)} - Y_h \dot{U}_h^{(2)}$$

式中， $\dot{U}_h^{(1)}$ 和 $\dot{I}_h^{(1)}$ 分别为状态切换前第 h 次谐波电压和电流； $\dot{U}_h^{(2)}$ 和 $\dot{I}_h^{(2)}$ 分别为状态切换后第 h 次谐波电压和电流。该方式的优势在于不需要了解具体电路参数，而是通过两种不同系统电压运行状态下的电压、电流数据即可获得模型参数^[28]。

1.3.3 谐波耦合模型

1) 机理分析方法

为提高谐波建模精度，早在 1997 年 Fauri 就提出了采用交叉频率导纳矩阵来表征非线性负荷的谐波特性^[19,20]，而后逐渐发展为谐波耦合模型^[21,22]。谐波耦合模型能够根据不同电力电子装置的特性，建立各次谐波电压与谐波电流间的耦合关系，其基本形式如下：

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \vdots \\ \dot{I}_h \\ \vdots \\ \dot{I}_H \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & \cdots & Y_{1k} & \cdots & Y_{1K} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ Y_{h1} & \cdots & Y_{hk} & \cdots & Y_{hK} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ Y_{H1} & \cdots & Y_{HK} & \cdots & Y_{HK} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \vdots \\ \dot{U}_k \\ \vdots \\ \dot{U}_K \end{bmatrix} = \mathbf{Y} \begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \vdots \\ \dot{U}_k \\ \vdots \\ \dot{U}_K \end{bmatrix} \quad (1-8)$$

式中, $\dot{I}_h$ 为谐波源交流侧的第 h 次谐波电流相量值; $\dot{U}_k$ 为交流侧第 k 次谐波电压相量值; $\mathbf{Y}$ 为谐波耦合导纳矩阵, 其中矩阵元素为各次谐波电压与谐波电流对应的耦合关系, Y_{hk} 表示为第 k 次谐波电压与第 h 次谐波电流之间的耦合导纳, 其幅值越大表明耦合强度越高。目前, 已有较多建立谐波耦合模型的方法, 如扩展谐波域法、动态相量法、谐波状态空间法等, 模型物理意义明确、可解释性较强, 适用于电力系统电力电子装置谐波特性分析。

2) 数据驱动方法

数据驱动方法主要针对具体结构未知、模型参数难以准确衡量的谐波源, 具有一定的通用特征, 能够隐式地反映各次谐波之间的耦合关系, 适应电力系统的动态变化过程。数据驱动方法首先被应用于诺顿模型中, 该方法仅需测量两组不同系统运行状态下的公共连接点数据, 即可对模型参数进行拟合, 后续研究人员提出了基于谐波耦合模型的数据驱动方法^[23]。

最小二乘法是获取谐波耦合模型参数的有效方法之一, 但最小二乘法易受异常值的影响, 导致其在实际电力系统中遇到突发故障或测量噪声时, 有可能会产生异常数据^[24], 因此为提高模型鲁棒性, 现有研究采用偏最小二乘法、稳健最小二乘法、复回归最小二乘法等多种方法, 以降低异常数据对建模结果的影响。另外, 利用径向基神经网络、广义回归神经网络、支持向量机等机器学习方法也可获取谐波模型参数, 该方法以黑箱的形式构建输入与谐波量的非线性映射关系, 挖掘出隐含的联系^[25,26]。但基于机器学习的谐波建模方法需要大量实测数据支撑, 且所建模型主要依靠算法自身的非线性映射能力, 各参数之间的关系不够明确。

综上所述, 谐波源建模主要采用恒流源模型、诺顿模型和谐波耦合模型, 通过机理分析和数据驱动两种方式进行建模。随着新能源及电力电子类负荷广泛接入电力系统, 时域建模方法在对系统建模时的工作量将明显增加。因此, 本书以频域建模为基础, 分别采用机理分析和数据驱动方法, 利用谐波耦合模型表征谐波源的谐波产生特性, 模型兼具了高建模精度与低复杂性的优点, 同时模型中元素具有明确的物理意义, 可用于表示不同频次谐波电压与谐波电流之间的耦合关系, 为谐波评估、谐波抑制等理论与应用提供了模型基础。

参 考 文 献

- [1] 肖湘宁. 电能质量分析与控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [2] 辛保安, 单葆国, 李琼慧, 等. “双碳”目标下“能源三要素”再思考[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(9): 3117-3126.
- [3] Song K J, Wu M L, Yang S B, et al. High-order harmonic resonances in traction power supplies: A review based on railway operational data, measurements, and experience[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(3): 2501-2518.
- [4] Meyer J, Blanco A M, Domagk M, et al. Assessment of prevailing harmonic current emission in public low-voltage networks[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(2): 962-970.
- [5] Wei M J, Shi F, Zhang H X, et al. Wideband synchronous measurement-based detection and location of high impedance fault for resonant distribution systems with integration of DERs[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2023, 14(2): 1117-1134.
- [6] Salles D, Jiang C, Xu W, et al. Assessing the collective harmonic impact of modern residential loads — Part I: Methodology [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(4): 1937-1946.
- [7] 孙华东, 徐式蕴, 许涛, 等. 电力系统安全稳定性的定义与分类探析[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(21): 7796-7809.
- [8] GIGRE Working Group 36-05. Harmonics, characteristic parameters, methods of study, estimates of existing values in the network[J]. Electra, 1981, 77: 35-54.
- [9] de Jesus Chavez J, Ramirez A I, Dinavahi V, et al. Interfacing techniques for time-domain and frequency-domain simulation methods[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(3): 1796-1807.
- [10] Chavez J J, Ramirez A, Dinavahi V. Dynamic harmonic domain modelling of synchronous machine and transmission line interface[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2011, 5(9): 912-920.
- [11] Segundo-Ramírez J, Medina A. An enhanced process for the fast periodic steady state solution of nonlinear systems by Poincaré map and extrapolation to the limit cycle[J]. International Journal of Nonlinear Sciences and Numerical Simulation, 2010, 11(8): 661-670.
- [12] Cunill-Sola J, Salichs M. Study and characterization of waveforms from low-watt (<25W) compact fluorescent lamps with electronic ballasts[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22(4): 2305-2311.
- [13] Lian K L, Noda T. A time-domain harmonic power-flow algorithm for obtaining nonsinusoidal steady-state solutions[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(3): 1888-1898.
- [14] 李亚辉, 孙媛媛, 李可军, 等. 不平衡供电条件下多脉动整流器的谐波特性分析[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(23): 152-161.
- [15] İnci M, Büyük M, Demir M H, et al. A review and research on fuel cell electric vehicles: Topologies, power electronic converters, energy management methods, technical challenges, marketing and future aspects[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021, 137: 110648.
- [16] Xu W. Component modeling issues for power quality assessment[J]. IEEE Power Engineering