

分布式光伏并网系统 关键技术研究

Research on Key Technologies of
Distributed Photovoltaic Grid-connected System

吴文进 著



中国科学技术大学出版社

分布式光伏并网系统 关键技术研究

Research on Key Technologies of
Distributed Photovoltaic Grid-connected System

吴文进 著



中国科学技术大学出版社

内 容 简 介

本书以分布式光伏系统为研究对象,建立逆变器并网系统受控源等效电路模型,系统地揭示了光伏单机和多机并网系统的谐波分布规律与谐振机理,并给出了谐波谐振抑制策略。

本书便于读者自学和进一步深入研究,适合国内高校、科研院所和光伏技术企业等相关师生、研究人员、技术开发人员教学科研参考需要。

图书在版编目(CIP)数据

分布式光伏并网系统关键技术研究/吴文进著. —合肥:中国科学技术大学出版社,2019.6

ISBN 978-7-312-04517-2

I. 分… II. 吴… III. 太阳能光伏发电—研究 IV. TM615

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 171853 号

出版 中国科学技术大学出版社
安徽省合肥市金寨路 96 号,230026
<http://press.ustc.edu.cn>
<https://zgkxjdxcb.tmall.com>
印刷 合肥市宏基印刷有限公司
发行 中国科学技术大学出版社
经销 全国新华书店
开本 710 mm×1000 mm 1/16
印张 12.5
字数 259 千
版次 2019 年 6 月第 1 版
印次 2019 年 6 月第 1 次印刷
定价 45.00 元

前 言

当前,我国经济正处于高速发展时期,经济总量已经稳居世界第二位,煤炭、石油和天然气的消耗量巨大,同时产生的二氧化硫和二氧化碳的年排放量均居世界前列,能源短缺与环境污染问题已成为我国社会可持续发展的两大难题。2015 年 12 月 12 日,在巴黎气候变化大会上通过的《巴黎协定》确定了将全球平均气温较工业化前水平升高控制在 2°C 之内的发展目标,进一步降低碳排放已成为全球各国的共识。为了保护我们赖以生存的自然环境及实现可持续发展,可再生能源的利用是必然趋势。世界各国纷纷开始调整自身的能源结构,不断加重可再生能源在整个能源消耗中的比重,提高其开发与利用程度。太阳能以其环境友好、使用安全方便和储量丰富等优点,已被国际社会公认为最理想的替代能源。在我国,太阳能开发利用的潜力非常广阔,理论储量达每年 17000 亿吨标准煤。

我国光伏产业起步于 20 世纪 70 年代,20 世纪 90 年代为稳步发展时期,现在已经进入了快速发展阶段。在“十二五”时期,我国光伏产业技术进步显著,光伏制造和应用规模均居世界前列;根据国家能源局发布的《太阳能发展“十三五”规划》,“十三五”时期,我国太阳能产业将继续进行技术升级、降低成本、扩大应用,将实现不依赖国家补贴的市场化自我持续发展,成为实现 2020 年和 2030 年非化石能源分别占一次能源消费比重 15% 和 20% 目标的重要力量;预计到 2020 年底,我国太阳能光伏电站累计装机容量将会达到 150 GW,其中分布式电站为 70 GW。在国家政策的推动下,分布式光伏电站已经进入普及化应用时期,相关的理论研究和技术研发开始面临一些急需解决的关键问题,这其中就包括分布式光伏系统建模问题和提高并网电能质量以及并网稳定性的问题。

对分布式光伏电站进行研究,首先需要建立其数学模型。所建模型应能准确反映分布式光伏电站运行特性,且具有一定的通用性,应能为分布式光伏并网系统的谐波谐振机理分析研究提供理论基础。光伏并网逆变器在额定工作状态时引入的谐波有限,可以由光伏系统内部的无源元器件补偿掉,进入电网的谐波可忽略不计。但光伏发电系统的输出功率与光照强度呈线性关系,因而受天气频繁复杂变化影响的分布式光伏电站常出现远低于额定工况的运行状态。当光伏并网逆变器工作在非额定状态下时,如光照受云层急剧变化影响而导致输出功率远低于额定功率时,其输出电流谐波将超过额定工况时谐波的 5~10 倍,并且其输出功率越低,输出电流的谐波含量越高;当电网支撑力较弱时,输出电流谐波也会远高于电

网支撑强时的谐波含量。随着分布式光伏装机容量在电力系统中所占的比重越来越大,进入电网谐波的影响会越来越大。如何建立准确反映运行特性的数学模型并依据模型对分布式光伏并网系统的谐波源及其与电网的交互影响进行分析,找出谐波分布规律,为分布式光伏系统设计提供理论支持,以便确保整个电网安全、稳定运行,是一个急需解决的关键问题。

同时,分布式光伏系统大多接入低压配电网,处于电网末梢,变压器、输电线路以及大量本地阻感性负荷的接入均会引起电网阻抗变化与频率偏移及电压波动,激发分布式光伏电站与电网之间的谐振,进而影响 LCL 逆变器自身谐振尖峰抑制及其输出有功与无功动态调节过程。另外随着分布式光伏的推广使用,装机容量的增加,多逆变器并联接入配电网已经很常见,多机并联将会导致逆变器系统输出的等效阻抗发生变化,当输出等效阻抗与电网阻抗匹配时,也会引起光伏电站与电网之间的谐振。当谐波激励源频率与谐振频率相等时,会导致分布式光伏并网系统出现谐振过电压和过电流,引发谐波含量超标等电能质量问题,严重时,会影响并网逆变器的稳定运行,造成并网逆变器无故障跳闸。因而,如何对分布式光伏系统的谐振机理进行分析并提出有效的抑制措施,同样是当前需要解决的关键问题。

本书以分布式光伏单机并网系统和多机并网系统为研究对象,分析了系统的组成原理,建立了逆变器受控源等效电路模型,基于模型分析了单机和多机系统的谐波谐振特性,为分布式光伏逆变器的设计提供了理论参考。

第 1 章全面系统地回顾了光伏技术的发展历史、应用现状和发展前景,分析了当前分布式光伏技术在推广应用中出现的关键技术问题及研究现状。

第 2 章在分析分布式光伏并网系统组成的基础上,首先给出了硅太阳能电池的建模分析;其次给出了逆变器前级 DC/DC 变换电路、后级 DC/AC 变换电路以及并网接口滤波电路的建模分析,基于电网电压定向的常规并网控制策略,并通过控制框图的等效变换,提出了一种逆变器受控源等效电路模型,给出了模型参数的详细计算,模型能准确反映逆变器并网运行时的工作特性,并具有一定的通用性,为逆变器并网系统的谐波谐振机理研究提供了理论基础。

第 3 章分析了分布式光伏并网系统谐波源及其谐波的交互影响。首先基于二重傅里叶积分分析方法分别对 SPWM 调制、SVPWM 调制和死区设置条件下逆变桥输出电压进行了谐波频谱分析,推导出了输出电压谐波的解析解,并对其谐波分布进行了分析;研究了变压器、电力负荷的输出电流谐波特性。其次基于谐波源的等效模型,仿真分析了逆变器、负载和配电网之间的谐波交互影响,得出了光伏多机接入系统的谐波分布特点。

第 4 章分析了单机并网系统和多机并网系统的谐振特性。首先分析了 LCL 滤波电路在不同谐波源激励下展现出的谐振特性,电网参数的变化以及逆变器并联合数的变化,均会引起滤波并网接口网络的谐振特性发生变化。其次基于常规 PI 控制策略的逆变器受控源等效电路模型,研究了单机系统和多机系统的谐振特

性,分析了控制参数、电网参数以及并网逆变器数量的变化对系统谐振特性的影响。针对有源阻尼方法,详细推导了基于电容电流反馈控制策略的逆变器受控源等效电路模型;提出了一种 PIR 控制器的谐波谐振抑制策略,实现了对特定频次谐波电流的抑制,同时 PIR 控制器对来自其他逆变器以及复杂电网背景的特定频次谐波均能进行大幅衰减,抑制其对并网电流的影响,降低了系统发生谐振的可能性。

本书力求视野开阔,抓住当前分布式光伏技术在推广应用中出现的关键问题进行重点分析,提出了单逆变器并网系统和多逆变器并网系统的受控源等效电路模型,模型符合系统在谐波电压激励作用下产生较大谐波电流的串联谐振特点,为更精确地计算系统的谐振点提供了有效方法。全书思路清晰,分析过程层层推进,系统地揭示了单逆变器并网系统和多逆变器并网系统的谐波分布规律与谐振机理,便于读者自学和进一步深入研究,可以满足国内高校、科研院所和光伏技术企业等相关师生和技术开发人员的教学科研参考需要。

感谢我的导师、合肥工业大学苏建徽教授对本书研究工作的指导,感谢合肥工业大学能源研究所的各位老师和同学,以及安庆师范大学物理与电气工程学院的各位同事对本书研究工作提供的支持和帮助。

本书的研究工作得到了国家重点研发计划“智能电网技术与装备”重点专项(2017YFB0903503)、国家自然科学基金(51207040、51407057)、安徽省自然科学基金(1708085ME132)和安庆市科技计划重点项目(20130302)的支持,作者在此一并表示感谢。

由于作者水平有限,加之时间仓促,书中存在缺点和错误在所难免,恳请广大读者批评指正。

安庆师范大学物理与电气工程学院

吴文进

2019 年 1 月

目 录

前言	(i)
第 1 章 绪论	(1)
1.1 光伏技术的发展历史、应用现状及其发展前景	(1)
1.2 分布式光伏并网系统关键技术问题分析	(3)
1.3 分布式光伏并网系统关键技术研究现状分析	(12)
第 2 章 分布式光伏并网系统建模研究	(15)
2.1 分布式光伏接入方案及单机并网系统的基本组成	(15)
2.2 任意辐照度和温度条件下硅太阳能电池模型研究	(17)
2.3 前级 DC/DC 变换电路建模	(28)
2.4 后级 DC/AC 及 LCL 滤波电路建模	(34)
2.5 逆变器并网控制策略及其等效电路模型	(42)
2.6 本章小结	(54)
第 3 章 分布式光伏并网系统谐波源及谐波交互分析研究	(55)
3.1 并网逆变器引起的谐波分析	(55)
3.2 变压器的非线性特性引起的谐波分析	(78)
3.3 配电网负荷谐波特性分析	(82)
3.4 谐波源等效模型	(84)
3.5 谐波交互分析	(85)
3.6 本章小结	(105)
第 4 章 分布式光伏并网系统谐振机理分析及其抑制策略研究	(107)
4.1 LCL 滤波电路谐振机理分析	(107)
4.2 单机并网系统谐振机理分析	(123)
4.3 多机并网系统谐振机理分析	(130)

4.4 基于有源阻尼方法的谐振抑制策略研究	(147)
4.5 并网仿真实验	(171)
4.6 本章小结	(175)
第 5 章 总结与展望	(177)
5.1 研究工作总结	(177)
5.2 研究工作展望	(178)
参考文献	(180)

第 1 章 绪 论

1.1 光伏技术的发展历史、应用现状及其发展前景

1954 年,在美国的贝尔实验室,实验人员发现了硅在掺入一定量的杂质后对光更加敏感这一物理现象,随后制造出第一块太阳能电池,开始了光伏发电技术的起步。1958 年,美国发射的人造卫星开始使用光伏发电技术,随后几乎所有的人造卫星、航天飞机、空间站等太空飞行器都利用光伏电池作为主要的电源,各国航空事业的发展促进了光伏发电技术的应用和发展^[1-3]。

20 世纪 60 年代至 70 年代,日益增长的石油和煤炭的消耗量及其带来的环境污染问题开始使人们认识到常规化石能源的局限性、有限性和不可再生性,逐渐意识到新能源对国家安全和全球环境的重要性。于是各国政府开始开展光伏发电技术的开发和应用,在此期间,出现了工业和民用的太阳电池和光伏发电系统技术开发公司,相应的产品开始应用在小电源、远程通信等领域。1971 年,我国首次成功地将光伏发电技术应用于“东方红二号”卫星上。

20 世纪 80 年代,太阳能发电技术没有实现重大突破,太阳能光伏产品生产成本依然较高,缺乏核心竞争力,提高效率和降低成本的目标未能实现,光伏产业商业化目标进展缓慢。我国在“六五”(1981~1985)和“七五”(1986~1990)期间对光伏应用示范项目开始给予支持,对光伏产业的发展有一定的促进作用。

20 世纪 90 年代,由于光伏电池生产技术的提高及其生产成本的下降,用光伏电池作为常规能源的替代能源进行太阳能并网发电和作为用户电源供电成为可能,并在全世界范围内迅速发展。例如,日本率先提出的“新阳光计划”和“用户补贴”政策,美国克林顿政府提出的“百万太阳能屋顶计划”。在政府政策的激励下,光伏发电技术得到快速的推广和应用。1998 年,我国建成第一套多晶硅电池及应用系统示范项目,天威英利新能源有限公司董事长苗连生成为中国太阳能产业第一个“吃螃蟹”的人,但在 2001 年以前,中国光伏电池和组件产能不超过 2 MWp。

进入 21 世纪,太阳能产业得到了轰轰烈烈的发展,许多国家政府加强了对新

能源行业支持的补贴力度,太阳能发电装机容量得到了迅猛的增长。在欧洲,以德国“上网电价法”为代表的各项激励政策下,光伏电站已经成为上好的投资项目和对能源及环境可持续性发展有贡献的项目。受益于太阳能发电需求的猛烈增长,我国太阳能电池产业发展迅速,2001 年,无锡尚德太阳能公司成立,首次使我国太阳能电池和组件产能超过 10 MWp,到 2007 年,我国拥有光伏电池厂约 70 家,光伏组件厂近 300 家,太阳能电池及光伏组件产量已然跃居世界第一^[4-10]。在光伏电池转换效率方面,多晶硅太阳能电池最高转换效率达到了 20.3%。近 5 年来,随着光伏电池和逆变器生产成本的持续降低,进一步推动了全世界的光伏产业快速扩张,尤其是以中国、美国、日本和欧洲为代表的光伏产业的崛起使得光伏发电成为新能源产业闪耀的新星^[11-19]。截至 2016 年底,全球太阳能光伏装机总容量累计超过 300 GW,其中,中国装机总容量累计达到 78 GW。图 1.1 给出了 2000 年以来全球光伏装机总容量发展趋势^[12-14]。

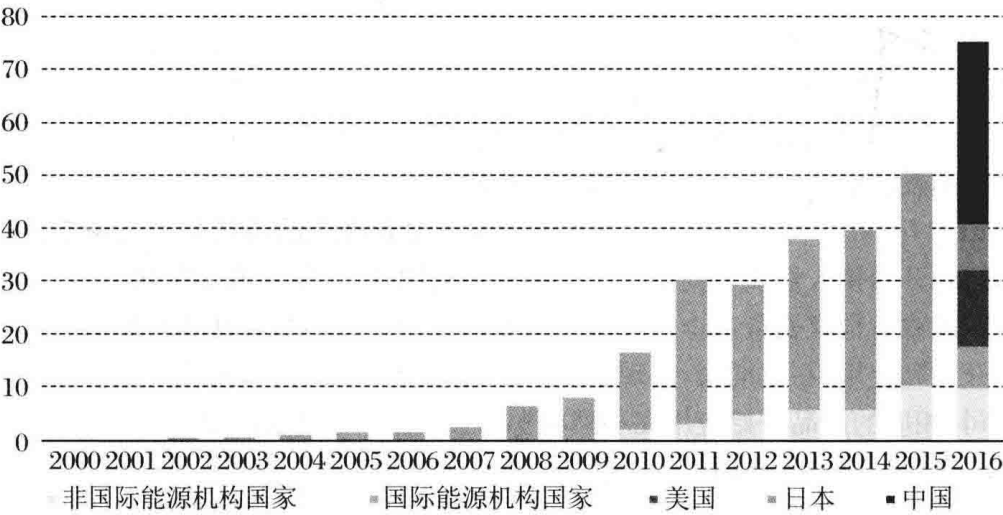


图 1.1 全球光伏装机总容量发展趋势图

2016 年,全球新增光伏装机容量达 75 GW,其中,中国光伏新增装机容量为 34.54 GW,连续 4 年居全球首位;美国新增 14.7 GW 光伏装机容量,排名第二;排名第三至第五的分别是日本(8.6 GW)、印度(4 GW)和英国(2 GW)。从区域发展的角度来看,亚洲是全球最大的光伏市场,占比约 67%,中国是主要的贡献者。图 1.2 为截至 2016 年底,全球装机容量排名前十国家和地区的统计数据,包括 2016 年新增装机容量数据和累计装机总容量数据。同时,我国分布式光伏发电装机容量发展迅速,2016 年新增装机容量为 4.24 GW,比 2015 年新增分布式装机容量增长 200%,截至 2016 年底我国分布式光伏装机容量累计达 10.32 GW。中东部地区分布式光伏增长相对较快,新增装机排名前 5 位的省份分别是浙江(0.86 GW)、山东(0.75 GW)、江苏(0.53 GW)、安徽(0.46 GW)和江西(0.31 GW)。2017 年上半年,光伏行业由于“630”抢装,上半年新增装机

24.4 GW,同比增长 9%,其中分布式光伏新增 7 GW,为 2016 年同期新增规模的近 3 倍;从新增装机分布上来看,中东部仍然是我国光伏发电热点地区,其中华东和华中地区占比超过全国的 50%。国家能源局在《太阳能发展“十三五”规划》中提出:在具备场址、资源、就近接入、就地消纳等建设条件的地区推动分布式光伏发电系统的全面开放建设,形成多元化的分布式光伏利用市场。在全国范围重点发展以大型工业园区、经济开发区、公共设施、居民住宅等为主要依托的屋顶分布式光伏发电系统,充分利用具备条件的农业设施、闲置场地等扩大利用规模,逐步推广光伏建筑一体化工程;探索移动平台光伏发电系统、移动光伏供电基站等新型的商业利用模式。预计到 2020 年,我国累计分布式光伏发电装机规模将超过 70 GW^[15-17]。

2016年新增光伏装机容量 量排名前十国家和地区				2016年光伏装机总容量 排名前十国家和地区			
1		China	34.5 GW	1		China	78.1 GW
2		USA	14.7 GW	2		Japan	42.8 GW
3		Japan	8.6 GW	3		Germany	41.2 GW
4		India	4 GW	4		USA	40.3 GW
5		UK	2 GW	5		Italy	19.3 GW
6		Germany	1.5 GW	6		UK	11.6 GW
7		Korea	0.9 GW	7		India	9 GW
8		Australia	0.8 GW	8		France	7.1 GW
9		Philippines	0.8 GW	9		Australia	5.9 GW
10		Chile	0.7 GW	10		Spain	5.5 GW

图 1.2 光伏装机容量排名前十国家和地区统计数据

当今世界面临着经济和社会可持续发展的双重挑战,人类必须解决能源和环境问题,在资源和环保的双重制约下发展经济,这就需要我们寻找清洁环保、储量丰富的可替代能源。储量丰富的太阳能资源,为大力发展太阳能光伏发电提供了有利条件,也为从战略上彻底改善能源结构和能源的可持续性发展提供了有利条件。根据国际权威机构预测,到 2030 年,可再生能源在总能源结构中将占到 30% 以上,其中,太阳能光伏发电在世界总电力的供应中达到 10% 以上;2040 年可再生能源占总能耗 50% 以上,其中,太阳能光伏发电将占总电力的 20% 以上;到 21 世纪末,可再生能源在能源结构中 will 占到 80% 以上,太阳能发电占到 60% 以上,由此可以显示出光伏发电的重要战略地位^[18,19]。

1.2 分布式光伏并网系统关键技术问题分析

光伏发电具有随机性和间歇性的特点,其运行机理和常规发电机组存在较大差异,分布式光伏电站并网势必会对电力系统的安全稳定运行带来严峻的挑战。

但鉴于分布式光伏电站良好的发展前景,进行分布式光伏的关键技术领域研究十分必要。而对光伏电站关键技术进行研究首先需要建立可以准确反映实际光伏电站运行特性的数学模型。目前对于分布式光伏发电系统中各个组成模块的建模已经有学者开展了相关的研究工作,但其模型的精确性不够,针对谐波谐振特性分析问题,模型的通用性和适应性仍需要进一步研究。

分布式光伏并网发电系统在光伏发电中距离负荷中心最近,效益最明显。该系统主要与面向用户的配电网相连接,具有多机并联、多点接入、随机分散等特点。随着分布式光伏并网发电规模的不断扩大,并网节点的增多,发电功率大范围的随机波动及并网发电装置的电流谐波和扰动等,势必会影响配电网的供电质量和运行安全保护等。此外,规模化、多逆变器接入的光伏发电系统,其产生的谐波电流总量将会较大,各机组之间也可能产生谐波叠加放大作用,将影响电网供电质量。因此,针对分布式光伏多机并网系统的特点,研究系统并网电流谐波谐振特性及其抑制方法,将会为分布式发电系统并网电能质量的提高提供重要的理论基础和设计指导^[20,21]。

1.2.1 分布式光伏并网系统建模问题分析

分布式光伏并网发电单元由光伏阵列、汇流器、单级式或双级式逆变器、滤波器及变压器等模块构成,由光伏阵列产生的直流电经过汇流器、逆变器、滤波器和变压器等模块转化为与电网同频的交流电送入电网。光伏发电单元建模的一般思路是首先对发电单元的各个组成模块建模,在此基础上再建立发电单元的整体数学模型。

如何建立更为精确的光伏电池模型和光伏逆变器并网系统模型,为分布式光伏系统的设计及其分布规划提供更合理的理论分析工具是亟待解决的关键问题。

关于光伏电池模型的研究,在支持光伏发电系统的数字仿真、输出功率预测、运行调度和优化设计时,均需要对光伏电池及其阵列的电气特性进行精确建模。硅光伏电池在工程应用中占主导地位,其单二极管等效电路模型在理论仿真研究中最常用,由于其数学方程表达式中含有五个需要确定的参数(光伏电池光生电流 I_{ph} 、二极管反向饱和电流 I_{sat} 、串联等效电阻 R_s 、并联等效电阻 R_{sh} 和二极管质量因子 A),通常称其为五参数模型。仅利用标准测试条件下的开路电压 U_{oc} 、短路电流 I_{sc} 、最大功率点电压 U_m 和最大功率点电流 I_m ,如何用更加优化的算法对模型五参数进行精确求解,并同时精确给出电池模型参数随辐照强度和温度的变化关系是需要进一步研究的问题。关于光伏逆变器并网系统模型的研究,逆变器并网电流的谐波谐振主要由逆变桥输出的谐波电压或并网节点谐波电压激励产生,现有的电流源型的逆变器等效电路模型不符合在谐波电压的作用下通过系统在谐振频率下形成的近似短路回路作用产生大谐振电流的串联谐振特点,因而如

何建立电压源型的阻抗串联等效电路模型也是需要进一步研究的问题。

1.2.2 分布式光伏并网系统谐波问题分析

电力系统的谐波问题研究始于 20 世纪 20 年代,当时由于使用静止汞弧变流器而造成了电压、电流波形的畸变,引起科研人员关注并开始研究。目前由于大量电力电子装置在电力系统、工业、家庭中的普遍应用,所产生的谐波对电网的影响日益严重^[22,23]。

在理想的供配电系统中,总希望电压和电流为工频正弦波形。其中正弦电压可表示为如下形式:

$$u(t) = \sqrt{2}U\sin(\omega t + \alpha) \quad (1.1)$$

式中, U 为电压有效值; α 为初相角; ω 为角频率, $\omega = 2\pi f$, f 为频率,一般为工频 50 Hz, $T = \frac{1}{f}$ 为周期。但由于非线性负荷的存在,配网中的电压波形往往偏离正弦波形而发生畸变。

对于频率为工频的非正弦电压 $u(\omega t)$,一般满足狄利克雷条件,可分解为傅里叶级数形式:

$$u(\omega t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos(n\omega t) + b_n \sin(n\omega t)) \quad (1.2)$$

其中

$$a_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} u(\omega t) d(\omega t), \quad a_n = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} u(\omega t) \cos(n\omega t) d(\omega t),$$

$$b_n = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} u(\omega t) \sin(n\omega t) d(\omega t) \quad (n = 1, 2, \dots)$$

傅里叶级数还可以写成如下形式:

$$u(\omega t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \int_0^{2\pi} c_n \sin(n\omega t + \varphi_n) \quad (1.3)$$

其中

$$c_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}, \quad \varphi_n = \arctan(a_n/b_n),$$

$$a_n = c_n \sin \varphi_n, \quad b_n = c_n \cos \varphi_n \quad (n = 1, 2, \dots)$$

在式(1.2)给出的傅里叶级数中,频率为 $\frac{\omega}{2\pi}$ 的分量称为基波;频率为大于 1 整数倍基波频率的分量称为谐波。谐波次数为谐波频率和基波频率的整数比。

对于非正弦电流,以上公式及定义同样适用,把式中 $u(\omega t)$ 换成 $i(\omega t)$ 即可。

由于电力系统一般是由双向对称的元件组成的,这些元件产生的电压和电流具有半波对称性,半波对称性的特点是: $f\left(t \pm \frac{T}{2}\right) = -f(t)$, 即没有直流分量且偶

次谐波被抵消,此特点使我们可以忽略电力系统中的偶次谐波。

在对称的三相电路中,三相电压可以表示为

$$U_a = U_m \cos(\omega t), \quad U_b = U_m \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right), \quad U_c = U_m \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \quad (1.4)$$

设 a 相电压所含的 n 次谐波为

$$u_{an}(t) = \sqrt{2}U_n \sin(n\omega t + \varphi_n) \quad (1.5)$$

则 b 、 c 相电压所含 n 次谐波就分别为

$$u_{bn}(t) = \sqrt{2}U_n \sin\left(n\omega t - \frac{2n\pi}{3} + \varphi_n\right), \quad u_{cn}(t) = \sqrt{2}U_n \sin\left(n\omega t + \frac{2n\pi}{3} + \varphi_n\right) \quad (1.6)$$

分析以上各式可以得出:①当 $n=3k$ ($k=1,2,3,\dots$) 时,三相电压谐波的大小和相位均相同,为零序谐波;②当 $n=3k+1$ ($k=1,2,3,\dots$) 时,谐波相序是 $a \rightarrow b \rightarrow c$,即这些次数的谐波是正序谐波;③当 $n=3k-1$ ($k=1,2,3,\dots$) 时,谐波相序是 $c \rightarrow b \rightarrow a$,即这些次数的谐波是负序谐波。在三相对称电路中,谐波也是三相对称的。无论是三相三线电路还是三相四线电路,相电压中可以包含零序谐波,但线电压中都不含有零序谐波。电流谐波分析与电压谐波相同,对于各相电流来说,在三相三线电路中,没有零序谐波电流,而在三相四线电路中,中心点接地的情况下零序谐波电流可以从中性线流过。另外,在平衡的配网系统中,网络的线性性决定了不同次谐波的响应是相互独立的,可以对各次谐波分别建立等效电路(在频域中)求解电流和电压,再利用线性网络的叠加原理求出总的响应。

谐波的危害包含多个方面。谐波会使公共电网中的元件产生附加损耗,降低发电、输电及用电设备的效率。谐波会影响各种电气设备的正常工作,使电机负载产生机械振动、噪声和过电压;使变压器局部严重过热;使电容器和电缆设备过热,加速其绝缘材料老化。谐波会引起新能源并网系统发生并联谐振和串联谐振,从而使部分频段谐波放大,加重了其危害性,甚至导致系统不稳定,引起安全生产事故。谐波会导致继电保护装置误动作,使电气测量仪表不准确,对附近的通信系统产生噪声干扰,降低通信质量,严重时会导致通信信息的丢失,使通信系统无法工作。

分布式光伏多机并网系统运行的稳定性与并网的电能质量也同样受到各种谐波的影响,其中的谐波源主要来自于两个方面:其一是复杂电网背景谐波,电网背景谐波取决于区域电网内的用户负载以及电网本身电力电子装置的使用情况;其二是逆变器系统本身的电路元部件及其控制方式产生的谐波。光伏逆变器对电网注入的电流谐波影响范围广,改变了电压平均值,造成电压闪变,产生谐波畸变功率,使得功率因数下降^[24,25]。

谐波标准是控制谐波含量的主要技术依据,是确保谐波源(用户)和电网之间相互协调、安全和经济运行的重要标准。通常涉及的指标参数如下:

① n 次谐波电压含有率,以 HRU_n (Harmonic Ratio U_n) 表示; n 次谐波电流含有率,以 HRI_n (Harmonic Ratio I_n) 表示。

$$HRU_n = \frac{U_n}{U_1} \times 100\%, \quad HRI_n = \frac{I_n}{I_1} \times 100\% \quad (1.7)$$

其中, U_n 为第 n 次谐波电压的有效值; U_1 为基波电压的有效值; I_n 为第 n 次谐波电压的有效值; I_1 为基波电压的有效值。

② 谐波电压含量 U_H 和谐波电流含量 I_H 。分别定义为

$$U_H = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} U_n^2}, \quad I_H = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2} \quad (1.8)$$

③ 电压谐波总畸变率 THD_u (Total Harmonic D_u) 和电流谐波总畸变率 THD_i (Total Halminic D_i)。分别定义为

$$THD_u = \frac{U_H}{U_1} \times 100\%, \quad THD_i = \frac{I_H}{I_1} \times 100\% \quad (1.9)$$

目前多数国家采用谐波总畸变率(THD_u 、 THD_i)和 n 次谐波含有率(HRU_n 、 HRI_n)两个标准来衡量正弦波形的畸变情况。低压电网一般采用 5% 作为电压谐波总畸变率标准,电网电压等级越高,谐波电压标准越严格。

国际电工委员会(IEC)制定了电磁兼容(EMC)61000 系列标准,IEC 61000-2-2《公用低压供电系统低频传导干扰和信号的兼容性水平》规定了低压电网中单次谐波电压兼容性水平,如表 1.1 所示。从表 1.1 可以看出,不同次数的谐波电压限值标准不尽相同,高次谐波电压限值标准要高于低次谐波电压限值标准,3 倍数次奇次谐波电压限值标准要高于非 3 倍数次奇次谐波电压限值标准。

表 1.1 中低压配网中谐波限值标准

奇次谐波(3 倍数次)		奇次谐波(非 3 倍数次)		偶次谐波	
谐波次数 h	谐波电压/%	谐波次数 h	谐波电压/%	谐波次数 h	谐波电压/%
3	5	5	6	2	2
9	1.5	7	5	4	1
15	0.3	11	3.5	6	0.5
21	0.2	13	3	8	0.5
>21	0.2	17	2	10	0.5
		19	1.5	12	0.2
		23	1.5	>12	0.2
		25	1.5		
		>25	$0.2 + 1.3 \times (25/h)$		

我国于 1993 年颁布了相关方面的国家标准 GB/T 14549 — 1993《电能质量—公用电网谐波》，以将公用电网的谐波量控制在允许范围内，确保配网系统中的供电质量，防止谐波对各种电气设备造成危害，保证配网系统和用户设备安全经济运行。该标准中规定的公用电网谐波电压限值标准如表 1.2 所示^[26,27]。

表 1.2 我国公用电网谐波限值标准

电网标称电压/kV	电压总谐波畸变率/%	各次谐波电压含有率/%	
		奇次谐波	偶次谐波
0.38	5.0	4.0	2.0
6	4.0	3.2	1.6
10	4.0	3.2	1.6
35	3.0	2.4	1.2
66	3.0	2.4	1.2
110	2.0	1.6	0.8

光伏并网逆变器的并网电流 *THD* 及各次谐波含量的限值标准，在 IEEE Std 929 — 2000 中已经做出了相关规定，在逆变器以额定功率运行时，其并网电流 *THD* 应小于 5%，其中奇次谐波电流限值标准如表 1.3 所示，偶次谐波电流限值为同范围内奇次谐波含量的 25%^[28]。

表 1.3 IEEE Std 929 — 2000 光伏并网逆变器谐波限值标准

奇次谐波	谐波含量	奇次谐波	谐波含量
3~9 次	<4%	23~33 次	<0.6%
11~15 次	<2%	>33 次	<0.3%
17~21 次	<1.5%		

1.2.3 分布式光伏并网系统谐振问题分析

物理学上的共振是指两个振动频率相同的物体，当其中一个发生振动时，引起另一个物体随之振动的现象。在电磁学中，将由激励源引起的共振现象称之为“谐振”，包括串联谐振和并联谐振。图 1.3 给出了几种谐振电路，图 1.3(a)为 RLC 串联谐振电路，图 1.3(b)为 GLC 并联谐振电路，图 1.3(c)为 LLC 串并联谐振电路，图 1.3(d)为 CCL 串并联谐振电路。

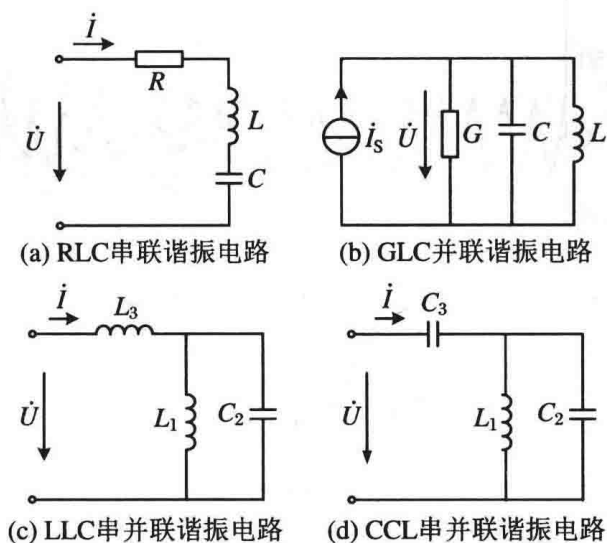


图 1.3 基本谐振电路

对于电路的某一端口或某一支路来说,发生谐振的基本条件是端口或支路上的电压与电流同相位,即有 $\text{Im}(Z(j\omega)) = 0$ 或 $\text{Im}(Y(j\omega)) = 0$ 时,则认为电路的这个端口或这条支路发生了谐振。虽然谐振电路拓扑形式有多种,但谐振现象的本质表现形式只有两种:一种表现为在谐波电压的作用下通过系统在谐振频率下形成的近似短路回路作用产生大谐振电流的串联谐振;另一种表现为在谐波电流的作用下通过系统在谐振频率下形成的近似开路作用产生大谐振电压的并联谐振^[29]。谐振电压和谐振电流在很多情况下使系统不能稳定工作甚至使电气设备遭到破坏,其危害性极大,所以在工程技术上有必要具体分析系统电路发生谐振的可能性,研究系统发生谐振的机理,避免谐振现象的发生。

对于高密度分布式光伏接入系统,其入网电流的谐振现象可能有多种表现形式,它既可以表现在某台或某几台逆变器的输出电流上,也可能表现在系统总的输出电流上。在 MATLAB 环境下可以对各种谐振现象进行模拟,图 1.4 给出了不同状况下逆变器并网系统出现谐振现象时输出电流的波形。