ICS 27.180

CCS F 11



中华人民共和国国家标准

GB/T XXXXX-XXXX/IEC TR 61400-21-3:2019

风能发电系统 电气特性测量和评估 风 力发电机组谐波模型及应用

Wind energy generation systems-Measurement and assessment of electrical

characteristics—Wind turbine harmonic model and its application

(IEC TR 61400-21-3:2019, Wind energy generation systems—Measurement and assessment of electrical characteristics—Wind turbine harmonic model and its application, IDT)

(在提交反馈意见时,请将您知道的相关专利连同支持性文件一并附上)

(征求意见稿)

202X-XX-XX 发布

202X-XX-XX 实施

国家市场监督管理总局 国家标准化管理委员会 发布

目 次

引言	前 言
1 范围 1 2 規范性引用文件 1 3 术语、定义和缩略语 2 3.1 术语和定义 2 3.2 缩略语 7 4 概述 8 4.1 引言 8 4.2 背景 8 5 最低要求建议 11 5.1 概述 11 5.2 应用 11 5.1 概述 11 5.2 应用 12 5.4 谐波模型端口 12 5.6 结构 12 5.6 结构 13 6 与其他标准文件的接口 13 6.1 GB/T 20320—2022, 附录 E-风力发电机组和风力发电场电能质量评估 14 7.1 概述 14 7.2 戴维南/诺顿等效电路 15 7.3 等效谐波电压电流源 15 7.4 吸述 21 8.1 总则 21 8.1 总则 21 8.3 模型验证 21 8.3 模型验证 21 8.3 模型验证 21 8.4 虚拟电网 22 多考文献 24	引 言 III
2 规范性引用文件	1 范围1
3 术语、定义和缩略语 2 3.1 术语和定义 2 3.2 缩略语 7 4 概述 8 4.1 引言 8 4.2 背景 8 5 最低要求建议 11 5.1 概述 11 5.2 应用 11 5.4 谐波模型端口 12 5.5 输出变量 12 5.6 结构 13 6 与其他标准文件的接口 13 6.1 GBT 20320—2022, 附录 D-谐波评估 13 6.2 GBT 20320—2022, 附录 E-风力发电机组和风力发电场电能质量评估 14 7.1 概述 14 7.2 戴维南/诺顿等效电路 15 7.3 等效谐波电压/电流源 15 7.4 风力发电机组类型 17 8 验证 21 8.1 意则 21 8.1 意则 21 8.1 意则 21 8.1 意则 21 8.3 模型验证 21 8.3 模型验证 21 8.4 虚拟电网 21 8.4 虚拟电网 21 8.4 虚拟电网 21 8.5 使派 21 8.4 虚拟电网 21 8.5 模型 21 8.5 模型 <	2 规范性引用文件1
3.1 术语和定义 2 3.2 缩略语 7 4 概述 8 4.1 引言 8 4.2 背景 8 5 最低要求建议 11 5.1 概述 11 5.2 应用 11 5.1 概述 11 5.2 应用 11 5.3 输入参数 12 5.4 谐波模型端口 12 5.5 输出变量 12 5.6 结构 13 6 与其他标准文件的接口 13 6.1 GB/T 20320—2022, 附录 D-谐波评估 13 6.2 GB/T 20320—2022, 附录 E-风力发电机组和风力发电场电能质量评估 14 7.1 概述 14 7.1 概述 14 7.1 概述 14 7.1 概述 14 7.3 等效谐波电压/电流源 15 7.4 风力发电机组类型 17 8 延正 21 8.1 意则 21 8.2 概述 21 8.3 模型验证 21 8.4 虚拟电网 22 9 局限性 22 参考文献 24	3 术语、定义和缩略语2
3.2 缩略语 7 4 概述 8 4.1 引言 8 4.2 背景 8 5 最低要求建议 11 5.1 概述 11 5.2 应用 11 5.1 概述 11 5.2 应用 11 5.3 输入参数 12 5.4 谐波模型端口 12 5.5 输出变量 12 5.6 结构 13 6 与其他标准文件的接口 13 6.1 GB/T 20320—2022, 附录 D-谐波评估 13 6.2 GB/T 20320—2022, 附录 E-风力发电机组和风力发电场电能质量评估 14 7.1 概述 14 7.2 戴维南/诺顿等效电路 15 7.3 等效谐波电压/电流源 15 7.4 风力发电机组类型 17 8 验证 21 8.1 总则 21 8.2 概述 21 8.3 模型验证 21 8.4 虚拟电网 22 9 局限性 22 参考文献 24	3.1 术语和定义2
4 概述 8 4.1 引言 8 4.2 背景 8 5 最低要求建议 11 5.1 概述 11 5.2 应用 11 5.3 输入参数 12 5.4 谐波模型端口 12 5.5 输出变量 12 5.6 结构 13 6 与其他标准文件的接口 13 6.1 GB/T 20320—2022, 附录 D-谐波评估 13 6.2 GB/T 20320—2022, 附录 E-风力发电机组和风力发电场电能质量评估 14 7.1 概述 14 7.1 概述 14 7.2 戴维南/诺顿等效电路 15 7.4 风力发电机组类型 17 8 验证 21 8.1 总则 21 8.2 概述 21 8.3 模型验证 21 8.4 虚拟电网 22 9 局限性 22 参考文献 24	3.2 缩略语
4.1 引言 8 4.2 背景 8 5 最低要求建议 11 5.1 概述 11 5.1 概述 11 5.2 应用 11 5.3 输入参数 12 5.4 谐波模型端口 12 5.5 输出变量 12 5.6 结构 13 6 与其他标准文件的接口 13 6.1 GB/T 20320—2022, 附录 D-谐波评估 13 6.2 GB/T 20320—2022, 附录 E-风力发电机组和风力发电场电能质量评估 14 7.1 概述 14 7.2 戴维南/诺顿等效电路 15 7.3 等效谐波电压/电流源 15 7.4 风力发电机组类型 17 8 验证 21 8.1 总则 21 8.2 概述 21 8.3 模型验证 21 8.4 虚拟电网 22 9 局限性 22 参考文献 24	4 概述
4.2 背景 8 5 最低要求建议 11 5.1 概述 11 5.2 应用 11 5.3 输入参数 12 5.4 谐波模型端口 12 5.5 输出变量 12 5.6 结构 13 6 与其他标准文件的接口 13 6.1 GB/T 20320—2022, 附录 D-谐波评估 13 6.2 GB/T 20320—2022, 附录 E-风力发电机组和风力发电场电能质量评估 14 7.1 概述 14 7.2 戴维南/诺顿等效电路 15 7.3 等效谐波电压/电流源 15 7.4 风力发电机组类型 17 8 验证 21 8.1 总则 21 8.3 模型验证 21 8.4 虚拟电网 22 9 局限性 22 参考文献 24	4.1 引言
5 最低要求建议 11 5.1 概述 11 5.2 应用 11 5.3 输入参数 12 5.4 谐波模型端口 12 5.5 输出变量 12 5.6 结构 13 6 与其他标准文件的接口 13 6.1 GB/T 20320—2022, 附录 D-谐波评估 13 6.2 GB/T 20320—2022, 附录 E-风力发电机组和风力发电场电能质量评估 14 7 谐波模型 14 7.1 概述 14 7.2 戴维南/诺顿等效电路 15 7.3 等效谐波电压/电流源 15 7.4 风力发电机组类型 17 8 验证 21 8.1 总则 21 8.2 概述 21 8.3 模型验证 21 8.4 虚拟电网 22 9 局限性 22 参考文献 24	4.2 背景
5.1 概述 11 5.2 应用 11 5.3 输入参数 12 5.4 谐波模型端口 12 5.5 输出变量 12 5.6 结构 13 6 与其他标准文件的接口 13 6.1 GB/T 20320—2022, 附录 D-谐波评估 13 6.2 GB/T 20320—2022, 附录 E-风力发电机组和风力发电场电能质量评估 14 7 谐波模型 14 7.1 概述 14 7.2 戴维南/诺顿等效电路 15 7.3 等效谐波电压/电流源 15 7.4 风力发电机组类型 17 8 验证 21 8.2 概述 21 8.3 模型验证 21 8.4 虚拟电网 22 9 局限性 22 参考文献 24	5 最低要求建议
5.2 应用 11 5.3 输入参数 12 5.4 谐波模型端口 12 5.5 输出变量 12 5.6 结构 13 6 与其他标准文件的接口 13 6.1 GB/T 20320—2022, 附录 D-谐波评估 13 6.2 GB/T 20320—2022, 附录 E-风力发电机组和风力发电场电能质量评估 14 7 谐波模型 14 7.1 概述 14 7.2 戴维南/诺顿等效电路 15 7.3 等效谐波电压/电流源 15 7.4 风力发电机组类型 17 8 验证 21 8.1 总则 21 8.1 总则 21 8.3 模型验证 21 8.4 虚拟电网 21 8.4 虚拟电网 22 参考文献 24	5.1 概述
5.3 输入参数 12 5.4 谐波模型端口 12 5.5 输出变量 12 5.6 结构 13 6 与其他标准文件的接口 13 6.1 GB/T 20320—2022, 附录 D-谐波评估 13 6.2 GB/T 20320—2022, 附录 E-风力发电机组和风力发电场电能质量评估 14 7 谐波模型 14 7.1 概述 14 7.2 戴维南/诺顿等效电路 15 7.3 等效谐波电压/电流源 15 7.4 风力发电机组类型 17 8 验证 21 8.1 总则 21 8.1 总则 21 8.3 模型验证 21 8.4 虚拟电网 22 9 局限性 22 参考文献 24	5.2 应用11
5.4 谐波模型端口 12 5.5 输出变量 12 5.6 结构 13 6 与其他标准文件的接口 13 6.1 GB/T 20320—2022,附录 D-谐波评估 13 6.2 GB/T 20320—2022,附录 E-风力发电机组和风力发电场电能质量评估 14 7 谐波模型 14 7.1 概述 14 7.2 戴维南/诺顿等效电路 15 7.3 等效谐波电压/电流源 15 7.4 风力发电机组类型 17 8 验证 21 8.1 总则 21 8.1 总则 21 8.1 总则 21 8.1 总则 21 8.4 虚拟电网 21 8.4 虚拟电网 22 9 局限性 22 参考文献 24	5.3 输入参数12
5.5 输出变量. 12 5.6 结构. 13 6 与其他标准文件的接口 13 6.1 GB/T 20320—2022, 附录 D-谐波评估 13 6.2 GB/T 20320—2022, 附录 E-风力发电机组和风力发电场电能质量评估 14 7 谐波模型 14 7.1 概述 14 7.2 戴维南/诺顿等效电路 15 7.3 等效谐波电压/电流源 15 7.4 风力发电机组类型 17 8 验证 21 8.1 总则 21 8.1 总则 21 8.3 模型验证 21 8.4 虚拟电网 22 9 局限性 22 参考文献 24	5.4 谐波模型端口12
5.6 结构 13 6 与其他标准文件的接口 13 6.1 GB/T 20320—2022,附录 D-谐波评估 13 6.2 GB/T 20320—2022,附录 E-风力发电机组和风力发电场电能质量评估 14 7 谐波模型 14 7.1 概述 14 7.2 戴维南/诺顿等效电路 15 7.3 等效谐波电压/电流源 15 7.4 风力发电机组类型 17 8 验证 21 8.1 总则 21 8.1 总则 21 8.4 虚拟电网 21 8.4 虚拟电网 22 9 局限性 22 参考文献 24	5.5 输出变量12
6 与其他标准文件的接口 13 6.1 GB/T 20320—2022, 附录 D-谐波评估 13 6.2 GB/T 20320—2022, 附录 E-风力发电机组和风力发电场电能质量评估 14 7 谐波模型 14 7.1 概述 14 7.2 戴维南/诺顿等效电路 15 7.3 等效谐波电压/电流源 15 7.4 风力发电机组类型 17 8 验证 21 8.1 总则 21 8.1 总则 21 8.3 模型验证 21 8.4 虚拟电网 22 9 局限性 22 参考文献 24	5.6 结构
6.1 GB/T 20320—2022,附录 D-谐波评估 13 6.2 GB/T 20320—2022,附录 E-风力发电机组和风力发电场电能质量评估 14 7 谐波模型 14 7.1 概述 14 7.2 戴维南/诺顿等效电路 15 7.3 等效谐波电压/电流源 15 7.4 风力发电机组类型 17 8 验证 21 8.1 总则 21 8.1 总则 21 8.3 模型验证 21 8.4 虚拟电网 22 9 局限性 22 参考文献 24	6 与其他标准文件的接口
6.2 GB/T 20320—2022,附录 E-风力发电机组和风力发电场电能质量评估	6.1 GB/T 20320—2022, 附录 D-谐波评估13
7 谐波模型 14 7.1 概述 14 7.2 戴维南/诺顿等效电路 15 7.3 等效谐波电压/电流源 15 7.4 风力发电机组类型 17 8 验证 21 8.1 总则 21 8.2 概述 21 8.3 模型验证 21 8.4 虚拟电网 22 9 局限性 22 参考文献 24	6.2 GB/T 20320-2022, 附录 E-风力发电机组和风力发电场电能质量评估 14
7.1 概述 14 7.2 戴维南/诺顿等效电路 15 7.3 等效谐波电压/电流源 15 7.4风力发电机组类型 17 8 验证 21 8.1 总则 21 8.2 概述 21 8.3 模型验证 21 8.4 虚拟电网 22 9 局限性 22 参考文献 24	7 谐波模型14
7.2 戴维南/诺顿等效电路 15 7.3 等效谐波电压/电流源 15 7.4风力发电机组类型 17 8 验证 21 8.1 总则 21 8.2 概述 21 8.3 模型验证 21 8.4 虚拟电网 22 9 局限性 22 参考文献 24	7.1 概述14
7.3 等效谐波电压/电流源 15 7.4风力发电机组类型 17 8 验证 21 8.1 总则 21 8.2 概述 21 8.3 模型验证 21 8.4 虚拟电网 22 9 局限性 22 参考文献 24	7.2 戴维南/诺顿等效电路15
7.4风力发电机组类型	7.3 等效谐波电压/电流源15
8 验证 21 8.1 总则 21 8.2 概述 21 8.3 模型验证 21 8.4 虚拟电网 22 9 局限性 22 参考文献 24	7.4 风力发电机组类型17
8.1 总则 21 8.2 概述 21 8.3 模型验证 21 8.4 虚拟电网 22 9 局限性 22 参考文献 24	8 验证
8.2 概述 21 8.3 模型验证 21 8.4 虚拟电网 22 9 局限性 22 参考文献 24	8.1 总则
8.3 模型验证	8.2 概述
8.4 虚拟电网	8.3 模型验证
9 局限性	8.4 虚拟电网
参考文献	9 局限性
	参考文献

前 言

本文件按照 GB/T 1.1-2020《标准化工作导则 第1部分:标准化文件的结构和起草规则》的规定 起草。

本文件等同采用 IEC TR 61400-21-3:2019《风能发电系统-第 21-3 部分: 电气特性测量和评估 风 力发电机组谐波模型及应用》。

本文件做了下列最小限度的编辑性改动:

——将"IEC TR 61400-21-3:2019"改为"本文件";

——将文件名称改为: "风能发电系统 电气特性测量和评估 风力发电机组谐波模型及应用"; 请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国机械工业联合会提出。

本文件由全国风力发电标准化技术委员会(SAC/TC 50)归口。

本文件起草单位: xxx、xxx。

本文件主要起草人: xxx、xxx。

引 言

本文件提供一种方法,以保证并网型风力发电机组谐波模型的应用、结构和验证的一致性和准确 性。

风电行业的各主体,如:电网公司、风力发电场业主、风力发电机组整机制造商、风力发电机组 部件供应商、学术单位、研究院所、认证机构和标准化团体(如 TC88 MT21),都有对标准化的风力 发电机组谐波模型的需求。

标准化谐波模型将广泛应用于陆上和海上风力发电场电气基础设施的设计、分析和优化相关的电 气工程领域。包括对风力发电机组谐波性能的评估、系统谐波的研究、电气基础设施的设计和谐波抑 制措施的建议。

标准化风力发电机组谐波模型作为一种性能指标,在大型海上风力发电场等涉及多方利益的工程 中将发挥重要作用。电网公司、风力发电场业主以及风力发电机组制造商应对风力发电机组的谐波建 模和风力发电场的谐波研究达成共识。

风能发电系统 电气特性测量和评估

风力发电机组谐波模型及应用

1 范围

本文件为风力发电机组谐波模型的应用、结构和推荐要求提供指导原则。本文件中的谐波模型是指不同类型风力发电机组与所接入电网相互作用下产生谐波的模型。

本文件为风力发电机组谐波模型提供技术指南,详细规定了谐波模型的应用、结构和验证等内容。 本文件引入了对风力发电机组谐波特性的一致性理解,旨在使谐波模型总体概念更易于得到行业认可 (例如供应商、开发人员、系统运营商、学术界等)。

本文件提出了一种风力发电机组谐波模型标准化的表示方法,该谐波模型将广泛应用于陆上风电和海上风电的电气基础设施设计、分析和优化等电气工程领域。

本文件的谐波模型结构将适用于:

一在电气基础设施设计和并网研究期间,用于评估风力发电机组的谐波性能。

一由多台装有变流器的风力发电机组构成的现代电气系统中,用于谐波研究/分析。

一为了优化电气基础设施(如谐振特性设计)及满足各种电网导则要求,用于有源或无源谐波滤 波器设计。

一用于计算风力发电场电气基础设施的电气特性参数(例如谐波损耗、静态无功功率补偿、噪声 辐射、谐波兼容水平等)。

一用于评估电网背景电压畸变对风力发电机组谐波的影响。

一用于相关人员(如电网企业、发电企业、开发人员等)在标准化通信接口进行风力发电机组谐 波数据交互。

一用于工程软件开发人员在通用接口进行谐波研究。

一可作为风力发电机组应用于学术研究和工业生产中的一种测试基准。

对于连接有不同类型风力发电机组的大型电力系统,如连接到同一海上或陆上升压站的、由不同 机型组成的多集群风力发电系统,利用谐波模型对风力发电机组进行标准化谐波性能评估的优势越来 越显著。

风力发电机组谐波模型可以覆盖到40、50或100次谐波范围,且可以根据应用需要扩展到更高的谐 波次数,也可以覆盖间谐波分量。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中,注日期的引用文

件, 仅该日期对应的版本适用于本文件; 不注日期的引用文件, 其最新版本(包括所有修改单)适用 于本文件。

GB/T 2900.53—2001 电工术语 风力发电机组(IEC 60050-415:1999, IDT)

GB/T 17626.7—2017 电磁兼容 试验和测量技术 供电系统及所连设备谐波、间谐波的测量和测量仪器导则(IEC 61000-4-7:2009, IDT)

GB/T 20320—2022 风能发电系统 风力发电机组电气特性测量和评估方法(IEC 61400-21-1:2019)

IEC TR 61000-3-6:2008 电磁兼容性(EMC) 第3-6部分: 限值-接入中压、高压以及特高压电力系 统的畸变装置输出限值的评估 (Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 3-6: Limits – Assessment of emission limits for the connection of distorting installations to MV, HV and EHV power systems)

3 术语、定义和缩略语

3.1 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

以下地址为 ISO 和 IEC 标准化术语维护资料库:

• IEC 世界电工词汇在线: http://www.electropedia.org/

• ISO 在线浏览平台: http://www.iso.org/obp

3.1.1

兼容性水平 compatibility levels

特定环境中特定扰动的参考水平,用于协调供电系统内部或用电设备的电磁放射和电磁耐受,以 确保整个系统(包括系统和连接设备)的电磁兼容性。

注1: 兼容性水平通常表示整个系统时间和空间上扰动变化统计分布的95%百分位数。

注2:考虑到系统运营人员或所有者可能无法始终控制整个系统,因此,宜评估整个系统兼容水平,而不对特定位置进行评估。

3.1.2

系数 K factor K

变压器对于非正弦电流的负载能力。

注1: 非正弦负载电流下,变压器等效额定功率等于非正弦电流功率有效值乘以系数K。

[来源: EN 50464-3:2007,有修改,增加说明、创建条目并删除公式]

3.1.3

谐波相位或相角 harmonic phase or angle

频谱分量yh的相位(角)αh,是指谐波电流分量或谐波电压分量与基波电压分量之间的相位,

如图1和下式所示。

$$y_{\rm h} = c_{\rm h} \sin(h\omega_{\rm l}t + \alpha_{\rm h})$$

ch 是指频谱分量幅值



图 1 谐波电流分量、谐波电压分量与基波电压分量之间的相角示例

注1: 电压和电流的符号定义引用GB/T 20320-2022, 附录C中发电机的定义。

注2: 详细内容可参考GB/T 20320-2022, 附录D。

3.1.4

谐波畸变 harmonic distortion

波形曲线与正弦波的周期性偏离。

注1: 可在基波中加入一个或多个谐波来描述。

3.1.5

谐波模型 harmonic model

表示一台并网型风力发电机组谐波输出的模型。 注1:可通过更改模型参数来表示不同风力发电机组类型。

3.1.6

谐波模型端口 harmonic model terminals

谐波模型接入电力系统的参考点。

3.1.7

三相电压(或电流)负序分量 nagetive-sequence component of 3-phase voltages (or current)

应用Fortescue变换矩阵导出的对称矢量系统,其中,旋转方向与工频电压(或电流)相反的分量。

[来源: IEC TR 61000-3-13:2008, 3.26.4, 有修改-删除公式]

3.1.8

运行模式 operational mode

根据控制设置运行模式,例如电压控制模式、频率控制模式、有功功率控制模式、无功功率控制 模式等。

[来源: GB/T 20320-2022, 3.9]

3.1.9

百分位数 percentile

一组数据中,小于观察值的占比表示百分位,该观察值为此百分位对应的百分位数。

3.1.10

规划水平 planning level

在特定环境下对特定干扰设置不同的等级,以此作为特定系统中装置输出设定限值的参考,旨在 使该系列限值和计划接入供电系统的设备及装置采用的所有限值相互匹配。

注1: 规划水平被认为是内部质量目标,由负责相关区域规划和运营供电系统的机构在当地指定。 [来源: IEC TR 61000-3-6:2008, 3.16]

3.1.11

连接点 point of connection

风力发电场与电力系统的并网参考点。

[来源: GB/T 2900.87-2011, 617-04-01, 有修改-"风力发电场"替代"用户的电力设备"]

3.1.12

三相电压(或电流)正序分量 positive-sequence component of 3-phase voltages (or current)

应用Fortescue变换矩阵导出的对称矢量系统,其中,旋转方向与工频电压(或电流)相同的分量。

[来源: IEC TR 61000-3-13:2008, 3.26.3, 有修改-删除公式]

3.1.13

功率区间 power bin

对风力发电机组输出端测得的有功功率划分区间,要求各区间连续且不重合。

注 1: 这些相等的区间应相邻且分别为额定功率的 0%、10%、20%, …, 100%。其中 0%、10%、20%, …, 100%额定功率分别为各区间中点。

[来源: GB/T 20320-2022, 3.62, 有修改-术语删除"有功"; 注中, 增加"应相邻"且文

字表述有少量修改]

3.1.14

主导相位角 prevailing angle

频谱分量的主导相位角(相位)由下式表示:

$$\alpha_{\mathbf{h}, \stackrel{\text{sp}}{=} \pm j} = \arctan\left(\frac{\sum_{i=1}^{n} \operatorname{Im}(\underline{C}_{\mathbf{h},i})}{\sum_{i=1}^{n} \operatorname{Re}(\underline{C}_{\mathbf{h},i})}\right), \quad \stackrel{\text{\tiny def}}{=} \sum_{i=1}^{n} \operatorname{Re}(\underline{C}_{\mathbf{h},i}) \ge 0$$
$$\alpha_{\mathbf{h}, \stackrel{\text{\tiny sp}}{=} \pm j} = \pi + \arctan\left(\frac{\sum_{i=1}^{n} \operatorname{Im}(\underline{C}_{\mathbf{h},i})}{\sum_{i=1}^{n} \operatorname{Re}(\underline{C}_{\mathbf{h},i})}\right), \quad \stackrel{\text{\tiny def}}{=} \sum_{i=1}^{n} \operatorname{Re}(\underline{C}_{\mathbf{h},i}) < 0$$

式中

n — DFT窗口的数量

<u>Ch,i</u>—第*i*个10周期或12周期窗频谱中h次谐波的复数值

C_h —h次谐波分量幅值。

注1: 矩形窗的定义见GB/T 17626.7-2008。

3.1.15

主导相位角比值 prevailing angle ratio

主导相位角的随机性可根据主导相位角比值来估计,主导角比值表示为

$$PAR = \frac{\left|\sum_{i=1}^{n} \underline{C}_{h,i}\right|}{\sum_{i=1}^{n} |\underline{C}_{h,i}|} = \frac{\left|\sum_{i=1}^{n} (a_{h,i} + jb_{h,i})\right|}{\sum_{i=1}^{n} |a_{h,i} + jb_{h,i}|}$$

式中

<u>Ch,i</u>—DFT的复数频谱分量

ah,i—第i个窗口的复数频谱分量的实部

b_{h,i}—第*i*个窗口的复数频谱分量的虚部

3.1.16

短路容量 short circuit power

系统某一点短路电流Ik与额定电压Un(通常为工作电压)的乘积。

$$S_{\rm k} = \sqrt{3}I_{\rm k}U_{\rm n}$$

注1: 若使用线电流(A)和额定线电压(V),结果宜乘以√3。

[来源: GB/T2900.50-2008, 601-01-14, 有修改-"额定"代替"常规"]

3.1.17

短路比 short circuit ratio

连接点处的短路容量 S_k 与风力发电场或风力发电机组额定容量 S_n 的比值

 $SCR = S_k / S_n$

[来源: GB/T 36237-2018, 3.1.18, 有修改-删除"有功", 增加公式]

3.1.18

系统运营商或责任主体 system operator or responsible

与输配电系统相连的负荷用户或发电企业签订并网协议的责任主体。 [来源: IEC TR 61000-3-6:2008, 3.23, 有修改-"责任主体"替代"所有者"]

3.1.19

总谐波畸变率 total harmonic distortion

所有谐波分量有效值与基波分量有效值比值的方和根

$$\text{THD} = \sqrt{\sum_{h=2}^{H} \left(\frac{Q_h}{Q_1}\right)^2}$$

式中

- Q —电流或电压
- Q1 —基波分量有效值
- h —谐波阶次
- Q_h —h次谐波分量有效值
- H 一应用时一般取40、50或100

[来源: IEC TR 61000-3-6:2008, 3.26.7, 有修改-"H"定义不同]

3.1.20

风力发电场 wind power plant

由一台或多台风力发电机组、辅助设备和场控系统组成的电站。 [来源: GB/T 36237-2018, 3.1.25]

[/</h

3. 1. 21

风力发电机组 wind tubine

将风的动能转换为电能的旋转机械装置。

[来源: GB/T 2900.53-2001, 415-01-01]

3.1.22

风力发电机组输出端 wind turbine terminals

风力发电机组与电力汇集系统的连接点,该点为风力发电机组的一部分并由机组制造商标记。

注 1: 与 IEC 61400-21 中试验测量点的定义相同。

3.2 缩略语

下列缩略语适用于本文件。

AUX	辅助设备
СВ	断路器
DC	直流
DCL	直流母线
DFAG	双馈异步发电机
DFT	离散傅里叶变换
GSC	机侧变流器
HD	谐波畸变
HIL	硬件在环
НМТ	谐波模型端口
HV	高电压
HVAC	高压交流
HVDC	高压直流
LSC	网侧变流器
LV	低电压
MV	中电压
PA	主导相位角
PAR	主导相位角比值
POC	连接点
PWM	脉冲宽度调制
RMS	均方根/有效值
SCR	短路比
SIL	软件在环

STATCOM	靜止尤切补偿益
TR	变压器
THD	总谐波畸变率
VSC	电压源变流器
WPP	风力发电场
WT	风力发电机组
WTT	风力发电机组输出端

4 概述

4.1 引言

谐波是电力系统研究中重点关注问题。早期电力系统主要由工作范围相对线性的无源元件和同步 发电机组成。

随着风力发电等可再生能源接入电网占比不断升高,电力电子设备成为现代电力系统主要的附加 谐波源。同时,并网型电压源变流器(VSCs)可通过采用先进、快速的控制技术,有效控制谐波,改 善电能质量。

对此,考虑当前电力变流器的复杂程度,有必要对风力发电机组开展详细的电能质量评估,包括 机组谐波的测量、数据处理、数据分析和建模。

测量是风力发电场和风力发电机组评估过程中的重要环节,用于验证理论分析和数值仿真。应在 风力发电机组分析和评估中选择合适的测量及数据处理技术。图2表明了风力发电场主要部件影响谐 波性能的过程示意图。风力发电机组谐波模型是整个系统建模和性能评估的重要组成部分。



图 2 风力发电场谐波研究和影响谐波性能的典型部件示例

4.2 背景

目前,大型海上风力发电场(由风力发电机组、集电电缆系统、高压直/交流海上/陆地传

输系统等组成)结构愈加复杂(见图3和图4),难以预测并削弱谐波的产生和传播^[7]。因此, 宜在设计阶段采用谐波建模、运行阶段采用谐波评估方式,系统分析和处理风力发电机组和风力发电 场的谐波问题。

IEC 61400-21^[5]规定,谐波的测量程序和评估是基于依赖本地电网条件的谐波电流评估。 此外,特地电网谐波的测量结果不适用于其他电网,否则将造成无源滤波器设计和规格上出现 问题。这主要因为现有标准只提供风力发电机组的电流频谱,因此,可将风力发电机组看作理 想谐波电流源,忽视了机组内部阻抗。这种方法也忽略了电网阻抗对谐波电流的影响。更准确 的评估方法详见GB/T 20320—2022 附录D。



图 3 风力发电场复杂结构示例

风力发电机组产生的谐波电流很大程度上取决于风力发电机组的内部阻抗和外部电网中与频率相关的短路阻抗。为了使评估程序更加准确,GB/T 20320—2022 附录D建议除了谐波电流外,还应采用谐波电压测量程序,包括相位信息和聚合方法^[8],此外,还提供了在测量过程中排除外部电网影响的一系列建议和指导。此外,这类扩展测量数据不仅可用于风力发电机组谐波模型验证,也可应用于模型开发与优化,详见文献[9]。



图4 风力发电场复杂电气基础设施示例

此外,本文件规定了测量和数据分析的不确定性评估方法。IEC 61400-21-1 附录D详细描述了如何检测哪些谐波电流受背景谐波畸变影响。

IEC 61400-21-1^[5]规定了如何考虑电网对谐波评估的影响,现行方法是在测试报告中提供基于电流的电能质量特性,例如谐波电流。这是基于电流谐波输出独立于电网电压的假设,即可将风力发电机组看作为具有特定单元类型特征的电流源,但这种假设不适用于由多台风力发电机组构成的具有各种谐振现象的复杂风电系统(见图 3,图 4 和图 5)。

目前尚无从谐波性能的角度系统地表示风力发电机组的方法,造成风力发电机组谐波性能 评估、并网风力发电机组背景谐波畸变计算、风力发电场谐波分析等结果的不一致性。



图 5 在图 4 规定的连接点处谐波阻抗的估算值

风力发电机组谐波模型的标准化定义有助于风电行业各方之间达成一致理解和有效交流。 风力发电机组谐波模型可用于:

一提供更加全面的风力发电机组谐波性能特征。

一补充IEC 61400-21-1 的谐波测量报告内容。

一提供用于风力发电场谐波分析的标准化方法。

一评估外部电网对连接点谐波畸变的影响。

一为不同谐波分析工具提供通用接口。

一定义制造商、开发人员、系统运营商或所有者沟通交流的共同基础。

一为学术界和工业界提供基准。

风力发电机组谐波模型应具备如下特性:

一可评估被测风力发电机组接入对电网的影响。

一准确表示风力发电机组对接入电网中背景谐波电压的响应。

一提供风力发电机组谐波性能的通用测量方法

一可应用于包含多种电网条件的谐波评估研究,例如紧急场景或故障条件,其中单一场景下的谐波电流测量无法用于谐波评估研究。

一表示所有可能影响谐波性能的风力发电机组运行模式。

一形成标准化、共识性的工程结构,并可广泛用于系统级谐波分析/研究中。

5 最低要求建议

5.1 概述

为了在工业中得到广泛应用,风力发电机组谐波模型应具备标准的、通用的结构,以便风力发 电机组制造商、电网公司、风力发电场开发商、高校和其他潜在的利益相关者达成共识,并且更 有利于相互交流。因此,应定义最低的要求。包括:

一应用

- 一输入参数
- 一谐波模型端口
- 一输出变量

一结构

5.2 应用

风力发电机组基础谐波模型可用于风力发电场的谐波分析,包括谐波输出研究以及谐波传播/谐振研究。风力发电场的谐波分析主要应用于以下几个方面:

—电网导则要求

一谐波滤波器设计

一风力发电场零部件选型(如规划水平、兼容性级别和系数K等)

一整体电气基础设施优化。

因此,风力发电机组谐波模型宜能反映包括谐波输出和阻抗特性在内的机组电气性能。

通常大型风力发电场的电气基础设施依据设计导则和相关标准进行设计和开发^[10]。在考虑 所有谐波源的情况下,应根据规划水平来确定谐波畸变限值。在特定环境下对特定的干扰设置不 同的等级,以此作为特定系统中装置谐波输出设定限值的参考,旨在使这些限值和计划接入供电系统 的设备和装置采用的所有限值相互匹配。规划水平被认为是内部质量目标,由相关区域负责规划和运 营供电系统的机构在当地指定。

5.3 输入参数

进行模型开发时,应考虑可表征风力发电机组谐波特性的输入参数。这些参数取决于应用 类型(即简化模型用于基础研究,而详细模型用于风力发电机组谐波特性的精细化评估)。根 据应用的需要,模型开发人员应确定和定义这些参数(例如有功和无功功率设定值,发电机转速, 变流器调制比,基波频率相位等)是否影响模型的谐波性能。任何限制条件和不确定性都应予以说 明。

IEC 61400-21-1 规定风力发电机谐波性能的评估取决于有功功率区间。谐波模型开发过程中,有功功率是推荐的输入参数之一。为了简单起见,可选取最恶劣情况下,所有功率区间中各谐波分量的最大幅值,但这将导致过于保守的结果。若使用只反映最恶劣情况下幅值的谐波模型,也能够满足电力系统运营商要求或设计可行的滤波器,则这种简化是合理的。否则,建议在有功功率区间的基础上详细分析,确定何种情形下会超出限值或导致滤波器尺寸过大。更加完善且精确的谐波模型更适用于风力发电场业主/运营商或公用事业单位。

5.4 谐波模型端口

风力发电机组作为现代电力系统(如风力发电场)的组成部分,谐波模型应能反映整个风 力发电机组的谐波特性。因此,需定义能够反映风力发电机组部件特性的谐波模型,且能评估 风力发电机组输出端(即风力发电机组变压器的低压侧或高压侧)的谐波畸变水平。

若在电力系统分析中表示风力发电机组的模型,谐波模型端口宜被定义为风力发电机组输 出端。因此,在模型开发过程中,宜考虑风力发电机组内部主回路的所有相关元件(如滤波器 或辅助电路)。为了满足精度要求,模型开发者负责决定应将哪些组件特性(如与频率相关的 电感损耗)考虑在内。

5.5 输出变量

在频域/谐波域内进行典型的谐波分析和风力发电机组谐波性能评估时,应将风力发电机组 表示为一个谐波源,且该谐波源应能涵盖所有相关谐波分量(通常要达到 40 次,50 次)^[10]以 及与频率相关的阻抗,包括风力发电机组有源(如变流器控制器等)和无源(如滤波器、电抗 器等)器件。谐波模型用于估算模型端口处的谐波畸变水平(如谐波幅值和相位)、频率相关 的阻抗。应根据实际的研究内容和电网导则要求对谐波范围进行相应调整。

随着海上风力发电场规模的不断扩大,对其谐波畸变水平的评估越来越重要。过去通常基

于正序仿真模型开展所有的一致性和设计研究。但长距离高压电缆的使用(如在风力发电场中) 引发了对更精细建模的需求。经证实,在非对称电缆系统中,采用解耦的相序模型(即非耦合 的序阻抗矩阵或者简单的正序描述)可能会低估系统谐波畸变[11]。

对于阻抗分布极其不均衡的系统(如长埋扁平HVAC电缆),表示谐波分量的相序以及三 相风力发电机组谐波模型变得重要。宜根据建模的详细程度以及所研究系统的电气基础设施来 设计或者建立模型的结构。在传统电力系统的谐波分析中,通过相序分解通常可以发现谐波大 体上遵循其自然相序。然而,由于风力发电机组系统的复杂性,在装有并网型变流器的风力发 电机组中,可以产生任意相序的谐波。此外,在非对称系统中谐振点附近,谐波将包含另外两 个序列分量的某些成分。

5.6 结构

常用诺顿/戴维南等效电路表示风力发电机组的谐波模型。因此,通过仿真,可利用谐波模型估算风力发电机组向其所接入电力系统产生的谐波。风力发电机组作为风力发电场系统的一部分,可视为谐波源,也可看作通过有源和无源方式滤波的谐波抑制装置。谐波模型结构应能表现出风力发电机组这两方面的特性。



图 6 诺顿/戴维南等效电路表示的通用谐波模型结构

以诺顿/戴维南等效电路表示的通用谐波模型结构如图 6 所示。诺顿/戴维南等效电路用等 效理想电流/电压源和等效阻抗来表示每个目标阶次的谐波/频率。因此,合适的谐波模型可应 用于谐波域/频域研究。第7节对谐波模型结构做了进一步的阐述(附示例)。

6 与其他标准文件的接口

6.1 GB/T 20320-2022, 附录 D-谐波评估

风力发电机组的谐波电流可受以下几个因素的影响:

一外部电网背景谐波畸变;

一与电网频率有关的短路阻抗中的谐振;

一并网点处的短路容量。

附录D为了精确地评估风力发电机组产生的谐波,已排除上述影响因素。此外,还可能需要确定并排除其他因素对风力发电机组谐波输出的影响。

上述影响取决于风力发电机组型号、测试地点电网配置和工况以及测试期间电网背景谐波 电压的实际畸变。因此,目前无法规定用于识别及排除上述影响的特定程序。

风力发电机组谐波模型适用于风力发电机组谐波评估。可根据测量数据和高级仿真工具开 发谐波模型,该模型在理论上对风力发电机组的谐波特性进行描述,排除电网畸变对风力发电 机组的影响。

如附录D中所描述,该模型可用于评估背景谐波畸变对测量过程的影响。

6.2 GB/T 20320—2022, 附录 E-风力发电机组和风力发电场电能质量评估

随着风力发电场装机容量逐渐增加,复杂电力系统(如图4所示)的谐波分析面临新的挑战。为减小风力发电机组谐波对电网的影响,应在并网点进行谐波评估,并通过有源或无源滤波方式制定谐波抑制方案。

基于上述考虑,需要开发并验证合适的谐波分析模型,用于评估风力发电机组对特定位置 谐波的影响,包括评估风力发电机组之间谐波的叠加与抵消。

目前暂无对风力发电场谐波分析的标准化方法。针对评估风力发电场的谐波输出水平,GB/T 20320—2022 附录E 在IEC TR 61000-3-6 基础上提供了建议和指导^[6],包括对风力发电场的谐 波电流进行评估。该建议和指南也可适用于风力发电机组谐波模型的结构及其应用方面。

7 谐波模型

7.1 概述

由于风力发电机组制造商采用不同的电气技术路线,因此,采用等效电路表示风力发电机 组谐波是常用的简便方法,如:采用理想电压源(表 1)构成的等效戴维南等效电路或采用理 想电流源(表 2)的诺顿等效电路以及等效阻抗(表 3)。这类等效电路适用于模型内的每个 谐波分量。

因此,使用常用工具进行的仿真时,可利用风力发电机组谐波模型(如诺顿或戴维南等效 电路)来评估其对所接入系统的谐波影响。风力发电机组作为风力发电场系统的一部分,可被 看作谐波源,或者使用有源和无源滤波的谐波抑制器。因此,谐波模型宜具备如下特性,例如, 可通过设置有源滤波器的软件参数调整谐波源和等效阻抗;对于风力发电机组的无源谐波滤波 器,则应能调整等效阻抗。谐波模型宜反映风力发电机组不受电网扰动影响的谐波特性。

基于IEC 61400-21-1 采集及处理得到的测量数据,可用于风力发电机组谐波模型的开发和/ 或验证(请参见IEC 61400-21-1)^[9]。在谐波模型的开发中也可要求采用谐波电压和电流的幅值和

相位信息。因此,IEC 61400-21-1 描述的标准程序(即附录D中规定的谐波电压和相位测量)也 应进行扩展。该模型排除风力发电机组所连接电网畸变的影响,在理论上描述风力发电机组的 谐波特性。

风力发电机组谐波模型应能反映风力发电机组谐波特性。和其他模型相同,谐波模型也是 一种对真实系统的仿真。因此,在模型开发过程中任何可能造成不确定性的因素,如元件公差、 非线性、聚合或平均等,都宜考虑在内。不确定性信息对于谐波模型在多机系统谐波分析/研究 中的应用是非常关键的。

主导相位角比值(PAR)有助于评估不确定性。若PAR接近于 1,则表明所分析区间内的 谐波相位没有显著变化。考虑到风力发电机组之间的谐波相位特性会因系统拓扑、风力发电机 组功率输出等差异而变化。因此,PAR不能用于定义连接点处风力发电机组之间的谐波相位角 偏移(谐波抵消)。若PAR值远小于 1,则表明谐波相位变化可能是由不确定性、分析系统的 显著变化或者缺乏相对于基频的谐波锁相分析引起的。若PAR和谐波幅度都较低,则估计的谐 波分量可能会受到测量或数据处理中的不确定性的显著影响。PAR是补充指标之一,无法对系 统不确定性提供决定性指南和建议。

7.2 戴维南/诺顿等效电路

根据戴维南(或诺顿)定理,任何含有电压源和电流源且仅有阻抗的线性电网都可以在端口处用 由等效电压源VTh和等效阻抗ZTh串联的电路(或是等效电流源I^{No}和等效阻抗Z^{No}并联的电路,且 ZTh=Z^{No})代替。戴维南与诺顿定理互为对偶关系,广泛应用于简化电路分析及电路初始状态与稳态 响应研究中。

7.3 等效谐波电压/电流源

7.3.1 概述

无论风力发电机组谐波特性是基于仿真或者测量研究,都应将时域稳态响应转换为频域/谐波域分析。由于频谱分量的幅值和相位在离散傅里叶变换(DFT)窗口之间变化很大,因此经常需要聚合。

IEC 61400-21-2 通过计算输入值的均方根(即RMS)实现幅值聚合,并根据IEC 61000-4-7 将频谱 分量进行分组。幅值的其他数据统计形式也可用来表示风力发电机组的谐波特性变化,如根据IEC TR 61000-3-6 定义的 95%分位数或者一般可表示最恶劣情况的最大值。电网公司、风力发电场业主及其他 模型用户可根据不同需要选择合适的数值进行谐波仿真研究。

可以将相位确定为主导角,并且通过主导相位角比值(PAR)估算主导相位角(PA)的随机性。 若PAR接近于1,则表明所分析区间内的谐波相位没有显著变化。若PAR值远小于1,则表明谐 波相位变化可能是由不确定性、分析系统的显著变化或者缺乏相对于基频的谐波锁相分析引起 的。注意到,难以将分组的幅值与未分组值的相位角组合在一起,使用分组值无法进行相角聚合。主 导相位角应直接通过离散傅里叶变换得到而无需进行分组及平滑处理。

任何有关电能质量的标准中都没有规定谐波相位聚合方法。因此,有时也可见到其他聚合方法, 例如,可将幅值和相位看作复数从而将谐波幅值和相位一起聚合,复数单位相量的谐波相位直接由离

散傅里叶变换得到,其中谐波相位是单独聚合的或从相位分布生成(例如,最高概率点)。本文件推荐 采用主导相位角法,也可采用其他适用的方法。采用的相位聚合方法应明确说明。

谐波次数	频率	谐波电压	
[-]	(Hz)	幅值 (RMS) ()	相位 (°)
2	100		
3	150		
4	200		

表 1 谐波电压源的示例表示/模板

表 2 谐波电流源的示例表示/模板

谐波次数	频率	谐波目	 电流
[-]	(Hz)	幅值 (RMS) (A)	相位 (°)
2	100		
3	150		
4	200		

通过查表(如表1和表2所示)的示例谐波模型反映特定的风力发电机组运行模式。因此,谐波 模型开发者或风力发电机组制造商宜对所有相互关联的、可改变模型谐波分布的输入参数进行定义。 此外,若存在与反映风力发电机组整体谐波特性相关的间谐波分量,也可予以考虑。对于表1和表2 中规定的谐波分量,可用第3条定义的正序或负序的表示法代替相位表示法。

正序谐波模型适用于简化研究。对于需要详细研究的系统,则应采用扩展形式的风力发电机组谐 波模型,通过表格给出对应不同风力发电机组谐波特性的特定运行模式。此外,通用谐波源表或通用 电流源表包括不同工作点但不包括相位列。通用源表(以及等效谐波阻抗表)用于简化和保守的研究。 若简单模型给出的结果过于保守,宜建立更加复杂的模型,来更精确地估计谐波畸变水平,以避免系 统的过度设计。

7.3.2 谐波等效阻抗

为了准确预测风力发电机组或风力发电场对外部电网中谐波源产生背景谐波电压畸变的响应,应 定义风力发电机组的谐波阻抗。根据风电机组的类型和技术,其阻抗应包括主电源电路中的多种无源 组件(如串联电抗器、并联谐波滤波器、发电机绕组、变压器等)以及动态反馈控制系统的等效阻抗。

随着电力电子装置和反馈控制器在风力发电场的广泛应用,戴维南阻抗不仅包括风力发电机组的 无源组件,还包括由运行模式决定的网侧变流器(LSC)内部阻抗。阻抗中最主要的部分本应来自于 无源元件,但在低频段内,特别是变流器的控制带宽内,变流器的频率响应将对其阻抗产生影响,例 如,变流器为了达到零稳态误差,希望理想化地拥有无穷大阻抗,这将导致在控制器的控制/调制频率 下具有容性阻抗特性。网侧变流器的正序阻抗和负序阻抗不一定相同,应由模型开发者或者风力发电

机组制造商决定是否区分不同相序的阻抗。典型的特征谐波在电力系统中最为突出,即正序(如7次、 13次等)和负序(如5次、11次等)。当风力发电机组(或者网侧变流器控制器)在负序工况下表现 出不同的运行特性(与同频率下正序特性相比)时,宜用两个模型来准确反映正序和负序运行特性。

谐波阶次	频率	谐波阻抗	
[-]	(Hz)	电阻, R (Ω)	电抗, X (Ω)
2	100		
3	150		
4	200		

表3 谐波等效阻抗的示例表示/模板

受风力发电机组控制策略的影响,部分谐波等效阻抗也会随着运行模式的变化而变化。通常,风 力发电机组的网侧变流器阻抗是系统的小信号表现形式,因此,需要由制造商定义其所对应的运行模 式。

7.4 风力发电机组类型

7.4.1 概述

介绍了通用的谐波模型如何反映不同类型风力发电机组的特性,并基于所提供的参考文献描述了 谐波模型的示例性应用。本部分详细介绍了风力发电机组中的谐波以及谐波建模过程。

7.4.2 第1类和第2类

第1类风力发电机组采用异步发电机直接接入电网,即不使用变流器。大多数第1类风力发电机 组都有软启动器,但仅在启机期间有效。第2类风力发电机组与第1类在很多方面相似,但第2类风 力发电机组具有可变转子电阻,因此采用可变转子电阻异步发电机^[6]。

据文献[4]所述,未曾以谐波的角度对第1类和第2类风力发电机组进行评估,所以无需为第1类 和第2类风力发电机组提供/开发谐波模型。根据文献[4],几乎不存在有感应发电机但无变流器的风力 发电机组产生谐波的情况,因此可直接在发电机测量谐波。此外,还未出现由于此类风力发电机组产 生的谐波而造成客户不满或损坏设备的情况。如今,第1类和第2类风力发电机组在现代电力系统中 逐渐减少,并且也不再出现在新建风电场中,因此本标准将不再详细介绍这类风力发电机组。

7.4.3 第3类

第3类风力发电机组采用双馈异步发电机(DFAG),其定子直接与电网相连,转子通过背靠背的变流器连接到电网。图7为第3类风力发电机组的主要机械和电气组件。变流器系统由发电机侧变流器(GSC)、LSC和直流母线环节(DCL)及其电容器(C)的直流母线组成。第3类风力发电机组可配备足够容量的GSC和斩波器(CH)用于低电压穿越而无需旁路或者断开变流器。其他的第3类风力发电机组包括 撬棒装置(CRB),该装置会在电磁暂态期间将转子短路,并在此期间将风力发电机组的发电机转换成感应电机运行。



图 7 第 3 类风力发电机组主要机械和电气部件

装有DFAG的风力发电机组是一个变速系统,其变流器分别与转子和电网侧相连。风力发电机组 内部的变流器通常受到精确控制,使得电能质量很高,以满足运行要求。为实现上述目的,风力发电 机组内部电气装置中包括一个谐波滤波器,用以吸收大部分由变流器/发电机系统产生的畸变能量(即 谐波)。

电压源变流器(VSC)中存在的电力电子并网接口可能会导致谐波和间谐波的产生^[12]。根据文献 [13], DFAG中的谐波主要通过以下方式产生:

一网侧变流器 (LSC): 变流器快速开关会产生由调制技术引起的高频谐波和间谐波 (此特性在第 4 类风力发电机组中同样存在)。

一机侧变流器 (GSC): 低阶和高阶转子谐波分量传播到电网。

一双馈异步发电机(DFAG)绕组:气隙磁通中存在高频谐波,以及与转差直接相关的空间谐波。

双馈异步发电机(DFAG)中使用的电压源变流器(VSC)可能具有非常小的谐波阻抗,由于其 频率相关性,无法用恒流源精确表示。考虑到等效并联(或串联)阻抗的频率相关性可被诺顿或戴维 南模型准确模拟,因此推荐这种方式等效^[14]。此外,考虑到双馈异步发电机(DFAG)中高频谐波滤 波器对谐振的影响,为简化考虑,也宜将其加入到统一的诺顿(戴维南)阻抗中。图8为双馈异步发 电机(DFAG)谐波模型示例^[13]。第3类和第4类风力发电机组网侧变流器(LSC)产生谐波的机理 类似。



图 8 双馈异步发电机(DFAG)谐波模型结构示例

7.4.4 第4类

第4类风力发电机组通过全功率变流器并入电网。图9为第4类风力发电机组主要的电气和机械 组件。第4类风力发电机组使用同步电机(SG)或者异步电机(AG)。部分第4类风力发电机组使用 直驱同步发电机,因此没有齿轮箱^[8]。



图 9 第 4 类风力发电机组主要电气和机械部件

根据文献[9],第4类风力发电机组中的电压源变流器(VSC)有可能出现以下不同的谐波源:

一位于开关频率整数倍边带处,与脉宽调制(PWM)相关的谐波,可根据调制深度和直流母线电压进行计算。

一与变流器控制相关的谐波,可由电流和电压反馈以及电流控制器(即内环控制)和电压控制器 (即外环控制)的开环传递函数确定。

一非特征变流器谐波,受电力电子硬件的影响,如半导体中不同的压降特性、PWM指令边缘分辨率、栅极驱动器动态特性以及热效应、均流等。

基于现场测量结果,可用含谐波源和等效阻抗的诺顿/戴维南电路表示第4类风力发电机组谐波输 出源。制造商应提供获得谐波源所需的风力发电机组阻抗信息。网侧变流器(LSC)控制策略和滤波 器拓扑等因素决定了等效的风力发电机组/变流器阻抗。这种方法可排除所连电网的影响,以表明的风 力发电机组的谐波特性^[15]。

参考文献[16],给出了戴维南等效变流器谐波模型的结构示例。示例中,谐波的无源滤波通过一 组变流器电抗器和一个PWM并联滤波器(作为风力发电机组电路的一部分)实现。谐波的无源滤波也 可以通过其他配置实现,如将LCL滤波器作为变流器模型一部分。此外,还可选用等效诺顿电路来表 示变流器控制和滤波器拓扑的影响。变流器谐波模型的内部表示由风力发电机组制造商定义。变流器 谐波模型对电网侧阻抗和(背景)谐波电压源的准确响应非常重要。

基于文献[9]的变流器谐波模型的示例结构:

——变流器产生的谐波以多个戴维南等效电路表示,每个等效电路表示特定谐波(如果适用,也可 为间谐波)频率下的谐波输出及其控制器与背景谐波的相互作用。

—模型中的等效阻抗(Z_c)同时表示变流器电抗器以及表示变流器与背景谐波干扰相互作用的变流器控制频率响应。

—模型中的等效电压源(V_h)表示由PWM开关、变流器硬件(如桥臂等)和控制的非理想特性引起的扰动。

图 10 表示戴维南等效电路。



图 10 以戴维南等效电路和风力发电机组功率电路表示的变流器谐波模型示例(来自文献[9])

风力发电机组的谐波电流受到与频率相关的电网阻抗和谐波背景畸变水平的显著影响。谐 波建模可以将从电网和风力发电机组测量结果中的谐波分量解耦。因此,所建立的模型可以很 好地衡量风力发电机组的谐波性能。

图 11 (a) 表示在风力发电机组变压器低压侧测得的谐波电压。这些测量结果受到风力发电 机组自身以及所并入电网的影响。从图 11 (b)中可以看到,在排除谐波背景畸变影响的情况 下,相同风力发电机组端口处的电压如何由开路戴维南等效模型表示。在图 11 中,谐波以箱形 图表示,涵盖所有可能的有功功率段。对于每个"箱子",中心标记是中位数*Q*₂,箱子的边缘是 第 25 百分位数和第 75 百分位数 (下四分位数*Q*₁和上四分位数*Q*₃),虚线延伸到最极端的数据 点,其中不考虑异常值,且不绘制异常值。



图 11 各功率区间的谐波电压比较

8 验证

8.1 总则

风力发电机组模型应采用谐波测量结果或者已验证过的基准系统仿真结果来验证。宜统一 所有类型风力发电机组谐波模型的验证过程,并与风力发电机组技术无关。目前,验证程序指 南为谐波模型开发人员执行验证程序提供了一定的灵活性。但宜在谐波模型文档中对模型验证过 程进行详细描述。

8.2 概述

验证是用于检查模型是否满足需求及实现预期目的的过程,是谐波模型开发和进一步应用 的关键环节,并用于衡量模型的准确程度和可信赖程度。在验证过程中,测得的模型与实际之 间可能存在的差异构成了估计不确定度和风险评估的基础。

每台现代风力发电机组都具备独有技术解决方案,并受专利保护。因此,应由风力发电机 组制造商决定谐波模型的架构和开发过程。然而,谐波模型验证过程的结果仍有助于行业和学 术界在风力发电机组谐波性能上达成共识。

不确定度评估在模型验证过程中非常关键。不确定度评估(特别是在谐波模型开发或验证 测量中)宜采用谐波相位评估的方法。在测量时,直接由离散傅里叶变换得到的谐波相位分布 可初步表明测量系统的精度。对于较小的谐波幅值(如接近预期的测量系统精度)预期概率密 度函数将趋向统一^[17]。这点可以通过研究直方图或者平均值、最小值、最大值、中位数、偏度、峰 度等统计数据来评估。此外,这些统计数据可反映有关时变谐波相位的有效信息。

8.3 模型验证

模型验证的三个等级可根据所推荐的范围来确定。谐波模型不确定度的概述可用于对风险的评估和偶发事件的评价。

第一级: 根据风力发电机组设计的仿真/计算

谐波模型的开发应基于仿真/计算或基于考虑精确的产品规格,结合风力发电机组实际设计的软件在环(SIL)研究,例如基于风力发电机组设计文件和详细模型(如基于 EMTP、来自于 控制软件的 C 代码等)开发谐波模型。

第二级:实验室验证

在受控的实验室环境中,基于控制硬件在环(CHIL)或功率硬件在环(PHIL)研究进行谐波模型 开发。该测试将纳入实际的风电机组部件,如控制系统或变流器系统。

第三级:现场测量验证

通过现场测量验证谐波模型,模型输出由风电机组的测量验证。测量可在试验装置/平台或在现场 进行,例如:通过对风电机组样机或者在试验台上进行测量,以验证谐波模型。

目前,对于谐波模型验证并没有明确定义的步骤,因此,对模型验证过程宜详细描述并纳入谐波 模型文档中。在此文件的未来版本中,将针对标准化的模型验证过程开展更多工作。

无论接入电网的强度如何,为了确保模型对不同背景谐波都有准确的响应,理想的完整验证过 程应在两个具有不同背景谐波和电网特性(如谐振频率、短路比等)的独立测试环境中进行。

8.4 虚拟电网

当风力发电机组谐波模型开发完成后,可考虑如何比较通过不同技术与数据获得的谐波模型,以及在同一个谐波模型下不同风力发电机组型号/模型的表现。为此,可假定参考/虚拟电网,以评估风力发电机组谐波模型的输出电流。该电网可适用于每一个风力发电机组谐波模型,用于比较各谐波模型的输出电流。

根据文献[9],虚拟电网示例包括风力发电机组谐波模型所接入电网的阻抗和风力发电场变 压器阻抗。宜选用大短路比电网(短路比为 50:1)用于比较连接到强电网下的谐波电流。

外部电网表示为简单的串联阻抗,由在风力发电场变压器高压侧并网端口测得的短路比和 X/R比值确定。文献[9]提出的短路比为 50, X/R比为 5。风力发电场变压器用简单的串联阻抗 表示,不具有频率相关的特性。文献[9]中使用的变压器额定参数表示为风力发电机组的额定功 率除以 0.9, *u*_k=10%, *u*_{kr}=1%。

此处考虑的虚拟电网是一个感性串联阻抗,因此没有任何谐振点。真实风力发电场中,电 网阻抗具有非常复杂的频率相关特性(请参见图 5)。虚拟电网方法适用于比较几种风力发电 机组模型/类型。但是在实际中,由于谐振等原因,即使没有背景谐波,风电机组在实际情况下 (即连接到实际电网)的谐波输出也大多会有所不同。

9 局限性

上述从谐波角度表示风力发电机组的简化方法也带来了一些局限性,应注意:

一许多电路仅在一定范围内是线性的,戴维南等效只在该线性范围内有效。不同的输入参数或运行模式会影响风力发电机组谐波性能,因此,应由模型开发人员或风力发电机组制造商确定有功功率和无功功率设定点、发电机转速、变频器调制度、基频相位、短路比等参数是否 会显著影响模型的谐波特性。

—模型分量值与变流器控制参数和特性紧密相关,特别是在变流器控制带宽内。因此,当 变流器软件/特性有更新时,在特定控制器软件下得出的研究结果需要重新确认。应由模型开发 人员或者风力发电机组制造商来判断并且告知,在将要进行的变流器软件更新中,是否需要重 新进行此类检查。在由第三方(例如认证机构)验证的模型中,软件变化的相关细节应提交给第 三方以评估其潜在影响。GB/T 20320—2022 的标准附录F中给出了同一产品平台不同风力发电机 组测试结果引用指南。

—仅从负载/电网的角度来看,戴维南等效电路具有相同的I-V特性,无法将风力发电机组 内部结构的谐波特性研究纳入到戴维南诺顿等效。因此,宜由风力发电机组制造商定义谐波模 型组成部分,以便开展更为详细的研究。

—戴维南/诺顿等效电路的功率消耗不一定与实际系统的功率消耗相同,例如,风力发电机 组内部组件如滤波器、电抗器聚合成一个等效电路的情况。但无论内部电路如何,两个输出端 口之间的外部系统消耗的功率是相同的。

—受适用于不同国家的监测系统和电能质量监测标准可能不包括建议/要求中的谐波相位 所限,无法将谐波相位纳入测量内容。

—风力发电机组谐波模型中小的不确定度因谐振而在风力发电场中被放大到显著水平。在这种情况下,由于无阻尼并联谐振,即使很小的谐波电流注入,也会造成较大的局部谐波电压 畸变。因此,对结果进行说明时,应慎重作出判断。

一影响谐波模型的另一个重要因素是风力发电机组辅助系统,该系统可由多个小的单相和 三相负载组成,均是会对谐波模型产生潜在影响的谐波畸变源。

参考文献

- [1] IEC 60050-601:1985, International Electrotechnical Vocabulary Chapter 601:Generation, transmission and distribution of electricity – General
- [2]IEC 60050-617:2009, International Electrotechnical Vocabulary Part 617:Organization/Market of electricity
- [3] IEC TR 61000-3-13:2008, Electromagnetic compatibility (EMC) Part 3-13: Limits –Assessment of emission limits for the connection of unbalanced installations to MV, HVand EHV power systems
- [4] IEC 61400-21:2001, "Wind turbine generator systems Part 21: Measurement and assessment of power quality characteristics of grid connected wind turbines"
- [5] IEC 61400-21:2008, Wind turbines Part 21: Measurement and assessment of power quality characteristics of grid connected wind turbines
- [6] IEC 61400-27-1, Wind turbines Part 27-1: Electrical simulation models Wind turbines
- [7] KOCEWIAK Ł. H., HJERRILD J. and BAK C. L., "Wind Turbine Converter Control Interaction with Complex Wind Farm Systems," IET Renewable Power Generation, pp. 1-10, 2013
- [8] ANDRESEN B., SØRENSEN P. E., SANTJER F. and NIIRANEN J., "Overview, status and outline of the new revision for the IEC 61400-21 – Measurement and assessment of power quality characteristics of grid connected wind turbines," in 12th International Workshop on Large-Scale Integration of Wind Power into Power Systems as well as on Transmission Networks for Offshore Wind Power Plants, London, 2013
- [9] BROGAN P. and GOLDENBAUM N., "Harmonic Model of the Network Bridge Power Converter for Wind Turbine Harmonic Studies," in The 11th International Workshop on Large-Scale Integration of Wind Power into Power Systems as well as on Transmission Networks for Offshore Wind Power Plants, Lisbon, 2012
- [10] Engineering Recommendation G5/4-1, "Planning Levels for harmonic Voltage Distortion and the Connection of Non-Linear Equipment to Transmission Systems and Distribution Networks in the United Kingdom," 2005
- [11] JENSEN C. F., KOCEWIAK Ł. H. and EMIN Z., "Amplification of Harmonic Background Distortion in Wind Power Plants with Long Cable Connections," in CIGRÉ Biennial Session, SC C4-112, Paris, France, 21-26 August 2016

- [12] LUI S. Y., PIMENTA C. M., PEREIRA H. A., MENDES V. F. and MENDONCA G. A., "Aggregated DIFG wind farm harmonic propagation analysis," in Brazilian Conference on Automation, Paraíba, 2-6 September 2012
- [13] BRADT M., BADRZADEH B., CAMM E., MUELLER D., SCHOENE J., SIEBERT T., SMITH T., STARKE M. and WALLING R., "Harmonics and resonance issues in wind power plants," in IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition, Orlando, 7-10 May 2012
- [14] LAROSE C., GAGNON R., PRUD'HOMME P., FECTEAU M. and ASMINE M., "Type-III Wind Power Plant Harmonic Emissions – Field measurements and aggregation guidelines for adequate representation of harmonics," in International Workshop on Large-Scale Integration of Wind Power into Power Systems as well as on Transmission Networks for Offshore Wind Power Plants, Lisbon, 2012
- [15] ANDRESEN B., BROGAN P. B. and GOLDENBAUM N. M., "Decomposition and mitigation of a disturbance being present at an electric connection between an electric power generating system and a power grid". Europe Patent EP2630510 A1, 26 April 2012
- [16] KOCEWIAK Ł., KRAMER B. L. Ø., HOLMSTRØM O., JENSEN K. H. and SHUAI L., "Resonance Damping in Array Cable Systems by Wind Turbine Active Filtering in Large Offshore Wind Power Plants," IET Renewable Power Generation, vol. 11, no. 7, pp. 1069 - 1077, 26 June 2017
- [17] KOCEWIAK Ł. H. and GOLDENBAUM N., "Harmonic Analysis of Wind Turbines Including Measurements, Data Analysis and Modelling," in The 11th International Workshop on Large-Scale Integration of Wind Power into Power Systems as well as Transmission Networks for Offshore Wind Farms, Lisbon, 2012
- [18] EN 50464-3:2007, Three-phase oil-immersed distribution transformers 50 hz, from 50 kva to 2500 kva with highest voltage for equipment not exceeding 36 kv – Part 3:Determination of the power rating of a transformer loaded with non-sinusoidal currents