



团体标准

T/CES XXX-XXXX

新能源变流器控制参数黑盒辨识技术规范

Technical Specification for Black-box Identification of Control Parameters of
Renewable Energy Converters

(征求意见稿)

XXXX-XX-XX 发布

XXXX-XX-XX 实施

中国电工技术学会 发布

目 次

目 次 I

前 言 II

引 言 III

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 符号、代号和缩略语 1

5 数据采集与处理 2

 5.1 数据来源 2

 5.2 数据预处理 2

6 辨识方法与模型构建 3

 6.1 模型结构选择 3

 6.2 辨识算法 3

7 辨识工况与数据获取要求 3

 7.1 被动扰动工况数据获取 3

 7.2 主动扰动试验数据获取 3

8 模型验证与评价 4

 8.1 验证数据集 4

 8.2 评价指标 4

 8.3 评价判据 5

附 录 A （资料性） 新能源变流器控制参数黑盒辨识流程 6

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》给出的规则起草。

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这些专利的责任。

本文件由中国电工技术学会提出。

本文件由中国电工技术学会标准工作委员会储能技术工作组归口。

本文件起草单位：国网江苏省电力有限公司电力科学研究院、国网江苏省电力有限公司、中国计量大学、中国能源建设集团江苏省电力设计院有限公司、国电南京自动化股份有限公司。

本文件主要起草人：王明深、陈哲、代克民、王颖、郑迪、齐文瑾、陆冉、缪惠宇、袁晓冬、潘益、王萧博、周晓薇、仇知、赵天辉、郑华明洲、孙靖鸿、夏文杰。

本文件为首次发布。

引 言

随着“双碳”目标推进，以风电、光伏为代表的新能源装机占比持续攀升，电力系统呈现高比例可再生能源和高比例电力电子设备的“双高”特征。新能源机组的快速控制响应特性直接决定了电网的暂态稳定水平，然而在工程实践中，受限于知识产权保护，设备制造商常以结构封闭的“黑盒”形式交付变流器控制模型。现有的建模与参数实测标准通常基于已知传递函数或物理结构的“白盒”方法，重点关注单一工况下的拟合程度，面对内部结构未知、非线性强且参数不透明的黑盒模型，难以通过常规手段获取精确的控制参数，导致仿真模型在复杂工况下失真，影响电网安全稳定极限评估的准确性。

因此，有必要建立统一的新能源变流器控制参数黑盒辨识技术要求，利用现场量测、数值仿真或硬件在环测试等数据，在不要求获取厂家专有内部控制逻辑和真实内部参数的条件下，估计可辨识的等效控制参数或构建等效行为模型，为电网仿真分析和模型验证提供技术依据。

本文件通过提供新能源变流器控制参数黑盒辨识的技术规范，有利于：

- 明确辨识需具备的数据基础，规范数据采集源、采样频率及预处理流程，为黑盒辨识提供高质量的数据输入；
- 规范辨识方法与模型构建要求，明确基于优化的时域/频域拟合和数据驱动辨识流程，为不同辨识对象选择适用方法提供依据；
- 适配不同类型的建模场景，涵盖基于物理结构的等效参数辨识与等效行为模型构建，为差异化的工程应用提供技术依据；
- 确定结果验证与评价要求，建立独立验证数据集和量化评价指标，用于评价辨识参数或等效行为模型在声明工况范围内的泛化能力和可靠性。

新能源变流器控制参数黑盒辨识技术规范

1 范围

本文件规定了新能源发电机组变流器在控制器内部结构未知或部分未知条件下,开展控制参数黑盒辨识及等效行为模型构建的数据来源、数据处理、辨识方法、工况与数据获取、模型验证和评价要求。

本文件适用于现场实际新能源机组,以及实验室中的新能源变流器黑盒仿真模型(包括纯数字仿真模型和硬件在环模型)的控制参数还原或等效模型构建;不适用于发电机、机械传动系统、空气动力学系统等非变流器控制部分的参数辨识。

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(包括所有的修改单)适用于本文件。

GB/T 32826 光伏发电系统建模导则
GB/T 32892 光伏发电系统模型及参数测试规程
GB/T 36994 风力发电机组 电网适应性测试规程
GB/T 36237 风能发电系统通用电气仿真模型
GB/T 42599 风能发电系统 电气仿真模型验证
GB/T 44650 光伏电站逆变器并网性能硬件在环测试规程
T/CES 303 风电机组变流器涉网性能硬件在环检测规范
T/CES 304 光伏发电逆变器涉网性能硬件在环检测规范

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

黑盒辨识 Black-box Identification

在缺乏辨识对象内部控制逻辑、控制框图和传递函数等完整信息的条件下,仅依据端口输入、输出及可获取状态量数据,推演其控制参数或构建等效行为模型的过程。

3.2

泛化能力 Generalization Ability

辨识所得模型或参数在独立验证数据集和未参与辨识的工况下,保持满足精度要求的输出预测能力。

3.3

数据驱动辨识 Data-driven Identification

利用机器学习、神经网络或统计学方法,从实测或仿真数据中提取动态特征,建立输入输出关系、估计等效模型参数或估计控制参数的方法。

3.4

被动扰动工况 Passive disturbance operating condition

不向辨识对象额外施加试验激励,利用设备运行过程中自然发生的扰动获取辨识数据的运行工况。

3.5

主动扰动试验 Active disturbance test

在满足设备安全和并网运行约束的前提下,向辨识对象施加预设可控激励以获取辨识数据的试验活动。

4 符号、代号和缩略语

下列符号、代号和缩略语适用于本文件。

PMU：相量测量单元（Phasor Measurement Unit）

WAMS：广域测量系统（Wide Area Measurement System）

HIL：硬件在环（Hardware-in-the-Loop）

PI：比例-积分（Proportional-Integral）

5 数据采集与处理

5.1 数据来源

辨识对象可为现场实际新能源机组，也可为实验室中的黑盒仿真模型（包括纯数字仿真模型和硬件在环模型）。应根据辨识对象、可接入测量点、可施加激励条件和辨识目标选择数据来源。现场实际机组宜优先采用运行量测、故障录波和现场试验数据；实验室黑盒仿真模型宜采用数值仿真或硬件在环测试数据。辨识所需数据来源包括但不限于：

——相量测量单元（PMU）/广域测量系统（WAMS）运行量测数据：适用于现场实际新能源机组稳态特性、低频振荡及外环机电暂态响应辨识。PMU 数据输出率宜不低于 50 帧/s；辨识较快的机电暂态或外环响应时，宜采用 100 帧/s 及以上数据。PMU 数据不宜用于变流器快速内环或高频阻抗特性辨识。

——波形记录仪/故障录波器数据：适用于现场实际新能源机组发生电网故障、电压跌落、频率扰动等暂态事件时的变流器快速响应和控制参数辨识；也可用于现场主动扰动试验的数据记录，采样频率应高于拟辨识最高频率的 2 倍，并应留有抗混叠和相位精度裕度；当最高分析频率为 500 Hz 时，采样频率宜不低于 5 kHz。

——硬件在环（HIL）测试数据：适用于实验室条件下接入实际变流器控制器、控制器代码或厂家提供的黑盒控制模型，通过电网模拟器或实时仿真平台施加电压、频率、功率指令等可控扰动获得的测试数据。对于风电机组变流器，试验平台、试验准备、激励设置和数据记录应符合 T/CES 303 中适用的规定；对于光伏逆变器，应符合 GB/T 44650 或 T/CES 304 中适用的规定。

——数值仿真数据：适用于厂家提供的纯数字黑盒模型或经封装的新能源机组/变流器模型，在仿真平台中通过设定运行工况和激励信号产生数据该类数据可用于辨识算法训练、参数初值确定及与现场或 HIL 数据的交叉核验。

5.2 数据预处理

采集数据应同时表征辨识对象的激励和响应。基础数据宜包括并网点三相电压、三相电流、有功功率、无功功率、频率、相角和事件时间标记；具备条件时，宜同步记录控制设定值、运行状态量、直流侧电压以及限幅、保护和故障穿越状态。无法获取相关辅助量时，应说明其对可辨识参数和模型适用范围的影响。

辨识前应对原始数据进行完整性、一致性和有效性检查，并按以下要求进行处理：

a) 重采样与对齐：确保输入量、输出量和状态量的时间轴严格同步，重采样频率应满足拟辨识动态过程的带宽要求。

b) 坏数据剔除：剔除通信中断、传感器故障或仿真异常导致的数据畸变片段，不应删除能够反映有效暂态响应的数据段。

c) 工况筛选：选取在拟辨识目标频带内具有足够激励、信噪比满足要求且未发生数据饱和或异常丢失的数据段作为有效样本。样本宜覆盖声明适用范围内的稳态、小扰动和暂态过程；扰动幅值应根据辨识目标、测量精度和设备安全边界确定，不设置统一的 5% 筛选阈值。

d) 数据归一化：将电压、电流、功率等物理量转化为标么值，统一基准容量、基准电压和基准电流；用于数据驱动方法时，可进一步归一化至[0, 1]或[-1, 1]区间，以适配辨识算法的输入要求。

e) 滤波与去噪：可采用低通、带通或小波等方法抑制测量噪声，但不应削弱拟辨识动态过程的幅值、相位和持续时间特征。

f) 数据集划分：用于辨识、训练、调参和验证的数据应相互独立；同一扰动事件不宜同时用于辨识数据集和验证数据集。

g) 测量通道校核与时延补偿：应核对传感器变比、量测方向、坐标系、相角参考、时间戳和通道固定时延；用于频域或快速动态辨识时，应进行抗混叠和相位响应校核，并记录补偿方法。

6 辨识方法与模型构建

6.1 模型结构选择

针对辨识对象，宜根据先验信息、辨识目标和数据条件选择以下两类模型结构之一，也可在工程需要时组合使用：

a) 物理等效模型：采用 GB/T 32826 或 GB/T 36237 中的通用模型结构，辨识目标为模型中各控制环节的 PI 参数、时间常数、限幅值、滤波参数等具有明确物理意义的参数。该类模型适用于已知部分控制结构、可等效为通用模型或需要与电力系统仿真模型参数兼容的场景。

b) 行为代理模型：采用神经网络、状态空间模型或其他数据驱动模型构建输入输出映射关系，作为仿真调用的等效黑盒模块。该类模型适用于内部结构高度复杂、非线性强、控制参数无法唯一辨识或无法用传统物理模型精确描述的场景。

在具备先验控制结构或标准通用模型可用时，宜优先选择物理等效模型；当参数不可唯一辨识或模型结构不确定性较大时，可选择行为代理模型，并应明确模型适用工况范围和输入输出接口。

6.2 辨识算法

宜采用以下方法，也可采用经验证满足精度要求的其他辨识方法：

a) 基于优化的频域/时域拟合：利用遗传算法、粒子群算法、最小二乘、贝叶斯优化等方法对通用模型参数进行寻优，使模型输出与实测或测试曲线残差最小。该方法适用于物理结构已知或可等效为通用模型等物理意义明确的场景。

b) 数据驱动辨识：利用仿真、HIL 或现场运行数据训练数据驱动模型，建立可测输入与输出响应之间的映射关系。利用带可追溯参数标签的数字或 HIL 样本时，可开展等效控制参数估计；缺少可信参数标签的现场数据宜用于等效行为模型、传递特性或可辨识等效参数估计。

辨识完成后，应给出辨识参数、模型结构、适用工况范围、输入输出量定义、采样时间或仿真步长，以及无法辨识或不可唯一确定的参数说明。

辨识过程应记录数据集标识、模型版本、输入输出定义、参数边界、目标函数及权重、初值、算法配置、停止准则和随机性控制方式。采用随机算法时，宜进行不少于 3 次独立运行并报告结果离散性；具备条件时，应给出参数置信区间、敏感性或不不确定性。

7 辨识工况与数据获取要求

下列工况或试验项目仅在辨识对象具备并投入相应控制功能时适用。辨识前应核对控制模式、功能投入状态及限幅、保护定值的有效性。

7.1 被动扰动工况数据获取

被动扰动工况数据获取适用于现场实际新能源机组以及不具备主动扰动条件的黑盒模型。可采用的辨识工况包括但不限于：

a) 电网故障、保护动作或并网点扰动引起的电压跌落、暂升、相角跳变及恢复过程，用于暂态电流支撑、锁相环、低电压/高电压穿越和限流环节等动态特性辨识；

b) 系统频率偏差、相角扰动或低频振荡引起的频率、相角及功率振荡过程，用于有功-频率控制、锁相环及阻尼特性辨识；

c) 风速、辐照度或并网点电压自然波动引起的有功功率、无功功率及电流变化过程，用于外环控制、无功/电压控制和稳态运行特性辨识。

被动扰动工况数据应至少记录辨识对象并网点三相电压、三相电流、有功功率、无功功率、频率、相角以及可获得的运行状态量、控制设定值、保护或限流动作标志和事件时间标记。数据记录时段宜覆盖扰动前稳态、扰动过程和扰动后恢复过程。

7.2 主动扰动试验数据获取

主动扰动试验数据获取适用于具备主动激励条件的现场实际新能源机组、硬件在环模型或纯数字黑盒模型。现场实际机组开展主动扰动试验应取得调度或运行许可，并满足并网测试安全要求；实验室黑盒模型可按辨识目标扩展运行工况和激励范围。主动扰动试验项目可参照 GB/T 36994 或 GB/T 32892 的相关测试流程，包括但不限于：

a) 有功、无功或电压设定值阶跃：分别改变有功功率、无功功率或电压控制指令，用于相应外环和限幅环节辨识。有功功率变化量以额定有功功率为基准，无功功率变化量以额定容量或约定无功基准为基准，电压指令变化量以额定电压为基准；功率因数应按绝对变化量记录。阶跃幅值应兼顾信噪比和局部线性要求，并不得触发非目标限幅或保护；

b) 并网点电压扰动：通过电网模拟器、实时仿真平台或经批准的现场试验条件改变并网点电压，用于辨识电压控制、故障穿越及相关限幅环节。电压扰动应以残余电压、暂升电压、持续时间及恢复过程描述。现场试验的电压水平、持续时间和停试条件应符合适用并网测试规程、调度许可及设备安全边界；实验室试验应记录全部扰动参数；

c) 频率或相角扰动：施加频率阶跃、频率斜坡或相角跳变，用于锁相环、有功-频率控制、惯量响应和阻尼控制特性辨识；

d) 伪随机序列、扫频或小信号注入：在可访问的外部设定值接口或并网点施加伪随机序列、扫频信号或正弦小信号；仅在厂家开放相应接口时，方可在控制参考点注入。注入幅值应使目标频带内信噪比满足要求，同时保持对象处于局部线性工作区且不触发非目标限幅或保护。

主动扰动试验数据应同步记录激励信号或指令量、并网点三相电压、三相电流、有功功率、无功功率、频率、相角、可获取的直流侧电压、控制设定值以及限幅、保护和故障穿越状态。用于频域辨识时，应记录注入点、注入幅值、频率范围和每个频点或序列持续时间；用于时域辨识时，应记录扰动开始时间、幅值、持续时间和恢复时间。

8 模型验证与评价

8.1 验证数据集

验证所用数据应独立于辨识或训练数据，并应覆盖辨识模型声明的适用工况范围。

验证工况应覆盖模型声明适用范围内具有代表性的有功功率、无功功率、并网点电压和控制模式，并至少包括稳态运行、小扰动响应和适用的暂态扰动过程。现场机组、HIL 模型和纯数字黑盒模型均应执行上述要求。应记录各工况的初始状态、控制模式、限幅和保护状态及边界条件。

进行验证时，应向辨识模型施加与验证数据一致的输入量或边界条件，并比较模型输出与辨识对象实测或测试输出。

8.2 评价指标

8.2.1 时域评价指标

依据 GB/T 42599，采用以下指标评估黑盒辨识模型在并网点电气量上的时域响应准确性：

a) 最大误差：待评价变量的模型仿真数据与实测数据在暂态过程中的最大差值，计算公式为：

$$x_{ME} = \max |x_S(i) - x_M(i)| \times 100\% \quad (1)$$

式中，

x_{ME} ——待评价变量的最大绝对误差，待评价变量宜包括并网点电流、有功功率、无功功率，必要时包括电压、频率或直流侧电压；

$\max(\cdot)$ ——表示最大值运算；

$|\cdot|$ ——表示绝对值运算；

$x_S(i)$ ——表示待评价变量的模型仿真数据标么值， $i = 1, 2, \dots, N$ 为采集的数据点编号；

$x_M(i)$ ——表示待评价变量的实测数据标么值。

b) 平均绝对误差：待评价变量的模型仿真数据与实测数据在稳态或暂态过程中误差的平均绝对值，计算公式为：

$$x_{AE} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |x_S(i) - x_M(i)| \times 100\% \quad (2)$$

式中，

x_{AE} ——待评价变量的平均误差；

N ——采集的数据点数量。

8.2.2 频域评价指标

适用于具备扫频、小信号注入或阻抗测量条件的现场实际机组、HIL 模型或纯数字黑盒模型。频域评价应在激励能量、采样频率和测量信噪比均满足要求的声明频率集合 F 内进行；不具备可靠频域数据的频段不作评价。序阻抗应按正序、负序及适用的耦合项分别评价；同步旋转坐标阻抗应对 Z_{dd} 、 Z_{dq} 、 Z_{qd} 和 Z_{qq} 分别评价，除非另行规定并说明所采用的矩阵指标。采用以下指标评估黑盒辨识模型的频域响应准确性：

a) 阻抗幅值最大误差：在声明频率集合 F 内，黑盒辨识模型与辨识对象阻抗幅值相对误差的最大值，计算公式为：

$$M_{\text{MRE}} = \max_{f \in F} \frac{\left| |Z_s(f)| - |Z_M(f)| \right|}{|Z_M(f)|} \times 100\% \quad (3)$$

式中，

M_{MRE} ——黑盒辨识模型与辨识对象阻抗的最大相对误差，阻抗可以是序阻抗或同步旋转坐标下的阻抗；

f ——频率，单位为赫兹（Hz）；

F ——声明且经数据有效性验证的频率集合；

$|Z_s|$ ——黑盒辨识模型的阻抗幅值；

$|Z_M|$ ——辨识对象的阻抗幅值。

b) 阻抗相位最大误差：在声明频率集合 F 内，黑盒辨识模型与辨识对象阻抗相位包角差绝对值的最大值，计算公式为：

$$A_{\text{WAE}} = \max_{f \in F} \left| \text{wrap}(\angle Z_s(f) - \angle Z_M(f)) \right| \quad (4)$$

式中，

A_{WAE} ——黑盒辨识模型与辨识对象阻抗相位包角差绝对值的最大值；

$\text{wrap}()$ ——将相位差折算至 $[-180^\circ, 180^\circ)$ 区间的运算；

$\angle Z_s$ ——黑盒辨识模型的阻抗相位；

$\angle Z_M$ ——辨识对象的阻抗相位。

8.3 评价判据

时域评价指标中，在验证工况范围内，黑盒辨识模型与辨识对象的最大误差应小于 20%，稳态期间和暂态期间的平均误差应分别小于 10%和 15%；工程应用或相关测试规程有更严格要求时，应按较严要求执行。

频域评价指标中，在声明频率范围内，黑盒辨识模型与辨识对象的阻抗幅值最大误差应小于 10%，相位最大误差应小于 10° ；对宽频振荡或稳定性分析有特殊要求时，应给出适用频段和误差限值。

除另有规定外，每个待评价变量在每个必需验证工况下均满足相应限值时，方可判定模型通过验证。

附 录 A
(资料性)
新能源变流器控制参数黑盒辨识流程

新能源变流器控制参数黑盒辨识主要包含数据准备、模型结构确定、参数辨识或等效模型训练及模型验证四个阶段，如图 A.1 所示。具体流程如下：

- a) 数据准备：根据辨识对象选择现场运行、故障录波、现场试验、HIL 或数值仿真数据，完成重采样、对齐、坏数据剔除、工况筛选、归一化和数据集划分。
- b) 结构选择：根据先验信息、辨识目标和数据条件，选择物理等效模型、行为代理模型或二者组合。
- c) 参数辨识或模型训练：利用优化算法或数据驱动方法，基于辨识数据集估计模型等效参数、估计控制参数或训练等效行为模型。
- d) 模型验证：利用独立验证数据集进行时域或频域误差评估，若满足评价判据则输出参数辨识结果或等效模型；否则应调整数据集、模型结构或辨识算法后重新辨识。

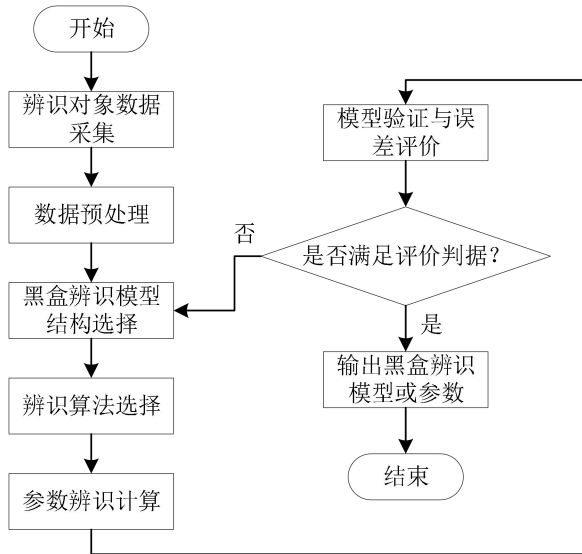


图 A.1 新能源变流器控制参数黑盒辨识流程图