

ICS 29.200
CCS M 41

团 体 标 准

T/CPSS 1008—2022

信息系统电源设备阻抗特性测试规范

Test specification for impedance characteristics of power
supply equipment in information system



2022-09-06 发布

2022-09-07 实施

中国电源学会 发布

目 次

前言	II
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	2
5 信息系统电源设备阻抗特性测试要求	2
5.1 测试条件说明要求	2
5.2 测试环境要求	3
5.3 小信号扰动要求	3
5.4 信号采样分析要求	3
5.5 测试平台要求	4
6 信息系统电源设备阻抗特性测试方法	6
6.1 测试拓扑结构	6
6.2 输入阻抗特性测试方法	6
6.3 输出阻抗特性测试方法	9
7 信息系统电源设备阻抗特性测试步骤	9
7.1 实物测试步骤	9
7.2 半实物仿真测试步骤	10
8 信息系统电源设备阻抗特性测试结果	10
8.1 数据记录	10
8.2 图形呈现	10
8.3 测试报告	11
9 信息系统电源设备阻抗特性判定	11
附录 A（资料性） 电源设备阻抗特性测试报告模板	12
参考文献	15

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。

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。

本文件由中国电源学会提出并归口。

本文件起草单位：上海科梁信息科技股份有限公司、科华数据股份有限公司、上海千黎电气科技有限公司、浙江大学、台达电子企业管理（上海）有限公司、京东云计算有限公司、厦门大学、北方工业大学、华侨大学、国网思极紫光（青岛）云数科技有限公司、厦门市爱维达电子有限公司、阿里巴巴（中国）有限公司。

本文件主要起草人：郜登科、易龙强、董慨、陈一逢、陈敏、李升、王琳、郑飞、陈四雄、曾奕彰、韩金刚、周京华、郭新华、林燎源、练恒、肖昌允、苏坚坚、孟超、彭广香、陈国峰、文芳志。

本文件为首次发布。



信息系统电源设备阻抗特性测试规范

1 范围

本文件规定了数据中心信息系统电源设备阻抗特性的测试要求、测试方法、测试步骤和测试结果。

本文件适用于数据中心信息系统电源设备的输入/输出端口阻抗特性测试，电源设备采用交流1000V/直流1500V及以下的电压进行供电，端口包含且不限于三相四线制、三相三线制、单相交流、直流等。

对于其他信息系统的电源设备阻抗特性测试，可参照执行。

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 50052 供配电系统设计规范
- GB 50174 数据中心设计规范
- GB/T 14549—1993 电能质量 公用电网谐波
- GB/T 14715—2017 信息技术设备用不间断电源通用规范
- GB/T 15543—2008 电能质量 三相电压不平衡
- GB/T 38833—2020 信息通信用240V/336V直流供电系统技术要求和试验方法
- DL/T 1796—2017 低压有源电力滤波器技术规范
- NB/T 42057—2015 低压静止无功发生器
- YD/T 1095—2018 通信用交流不间断电源（UPS）

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

信息系统 **information system**

由服务器、交换机、存储等信息设备组成，实现信息输入、存储、处理、输出和控制的系统。

3.2

电源设备输入阻抗 **input impedance of power supply equipment**

在被测电源设备输入端口注入交流小信号扰动电压，待被测电源设备进入稳态测试工况后，测量输入端口对应扰动频率的电压和电流，该电压和电流的比值为电源设备在这个扰动频率下的输入阻抗。

3.3

电源设备输出阻抗 **output impedance of power supply equipment**

在被测电源设备输出端口注入交流小信号扰动电流，待被测电源设备进入稳态测试工况后，测量输出端口对应扰动频率的电压和电流，该电压和电流的比值为电源设备在这个扰动频率下的输出阻抗。

3.4

阻抗幅频特性 impedance amplitude frequency characteristic

在规定频率范围内电源设备阻抗幅值与扰动频率之间的关系。

3.5

阻抗相频特性 impedance phase frequency characteristic

在规定频率范围内电源设备阻抗相角与扰动频率之间的关系。

3.6

小信号扰动 small signal perturbation

与电源设备对应的工作电压/电流信号相比幅值不大于10%的扰动信号。

3.7

电源设备控制器 controller of power supply equipment

电源设备实际使用的用于对应功率拓扑电路进行电能变换控制的装置。

3.8

半实物仿真测试平台 semi-physical simulation test platform

将电源设备控制器与运行电源设备功率拓扑电路仿真模型的实时仿真机通过信号线联接在一起进行电源设备阻抗特性测试的平台。

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。

APF: 有源电力滤波器 (Active Power Filter)

CHIL: 控制器硬件在环 (Controller Hardware in the Loop)

PSU: 电源供应器 (Power Supply Unit)

SVG: 静止无功发生器 (Static Var Generator)

THD: 总谐波畸变率 (Total Harmonic Distortion)

UPS: 不间断电源 (Uninterruptible Power Supply)

5 信息系统电源设备阻抗特性测试要求

5.1 测试条件说明要求

电源设备阻抗特性测试应说明以下测试条件:

- a) 测试日期, 例如: 某年某月某日;
- b) 测试平台, 例如: 实物测试平台、半实物仿真测试平台;
- c) 测试人员;
- d) 被测电源设备的类型、厂家、型号和出厂编号;
- e) 被测电源设备测试端口, 例如: 输入端口、输出端口;

- f) 被测电源设备测试端口的供电方式，例如：三相四线制、三相三线制、单相交流、直流等；
- g) 被测电源设备运行模式和运行功率；
- h) 被测电源设备测试端口基波/直流电流幅值和基波频率。

5.2 测试环境要求

测试环境应满足以下要求：

- a) 环境温度：-10℃~+45℃；
- b) 相对湿度：5%~95%；
- c) 大气压力：80kPa~110kPa。

5.3 小信号扰动要求

小信号扰动应满足以下要求：

- a) 扰动信号形式：幅值和频率可调的正弦波，THD 不大于 3%；
- b) 扰动信号幅值：输入阻抗特性测试时，扰动信号幅值应不大于被测电源设备输入端口基波相电压或者直流电压幅值的 10%。输出阻抗特性测试时，扰动信号幅值应不大于被测电源设备交流负荷基波电流或者直流负荷电流幅值的 10%，扰动信号幅值在高频处可相应降低；
- c) 扰动频率范围：扰动频率范围一般为 1Hz-10kHz，信息系统用户有特殊需求时，可特别确定扰动频率范围；
- d) 扰动频率数量：扰动频率根据其数值选择不同的等距间隔方式，扰动频率数量设置如表 1 所示。

表1 扰动频率数量设置

扰动频率数值 Hz	$1 \leq f_p \leq 10$	$10 < f_p \leq 100$	$100 < f_p \leq 1000$	$1000 < f_p \leq 10000$
等距间隔方式	线性等距间隔	对数等距间隔	对数等距间隔	对数等距间隔
扰动频率数量 个	$N_f \geq 10$	$N_f \geq 20$	$N_f \geq 20$	$N_f \geq 20$
注： f_p 为扰动频率数值，10Hz及以下四舍五入并保留一位小数，10Hz以上四舍五入并保留整数； N_f 为扰动频率数量。				

5.4 信号采样分析要求

信号采样分析应满足以下要求：

- a) 信号采样：电源设备测试端口的电压电流信号采样精度不低于1%，采样频率不低于1MHz；
- b) 信号处理：可对采样得到的电压电流信号进行傅里叶分析；
- c) 阻抗计算：可由公式（1）计算出被测电源设备的阻抗幅值和相角：

$$\begin{cases} |Z(f_p)| = \frac{|V(f_p)|}{|I(f_p)|} \\ \angle Z(f_p) = \angle V(f_p) - \angle I(f_p) \end{cases} \dots\dots\dots (1)$$

式中：

$|Z(f_p)|$ ——对应扰动频率 f_p 的阻抗幅值，阻抗幅值单位宜采用dB，由 $20\log_{10}|Z(f_p)|$ 计算得到；

$|V(f_p)|$ ——对应扰动频率 f_p 的电压幅值；

$|I(f_p)|$ ——对应扰动频率 f_p 的电流幅值；

$\angle Z(f_p)$ ——对应扰动频率 f_p 的阻抗相角；

$\angle V(f_p)$ ——对应扰动频率 f_p 的电压相位；

$\angle I(f_p)$ ——对应扰动频率 f_p 的电流相位。

d) 结果输出：可将计算结果输出到上位机或者测试仪表。

5.5 测试平台要求

5.5.1 测试平台选择

电源设备阻抗特性测试主要采用实物测试和半实物仿真测试两种平台。在测试时优先采用实物测试平台，当实物测试平台在实现上存在困难时可采用半实物仿真测试平台。

5.5.2 实物测试平台

5.5.2.1 基于扰动注入装置的输入阻抗特性测试平台

对电源设备进行输入阻抗特性测试时，可由供电电源实现供电，由电压型扰动注入装置提供小信号扰动电压。当被测电源设备采用交流供电方式时，供电电源可为市电。电压型扰动注入装置的扰动注入功能示意图如图1所示，信号发生单元为功率放大单元提供扰动注入参考信号，功率放大单元经过隔离单元之后实现扰动注入。



图1 扰动注入功能示意图

供电电源应满足以下要求：

- 电压变化范围：应不大于 $\pm 3\%$ 额定电压；
- 频率变化范围：如存在频率变化，应不大于 ± 0.2 Hz；
- 电压THD：应不大于5%；
- 额定功率：依据参考文献[1]和[2]，由于供电电源的输出阻抗会在低频段影响到被测电源设备的输入阻抗，为了降低该影响，供电电源的额定功率应不小于被测电源设备额定功率的10倍。

电压型扰动注入装置应满足以下要求：

- 输出电压：应符合5.3技术要求；
- 额定功率：应不小于被测电源设备额定功率的10%。

5.5.2.2 基于专用测试电源的输入阻抗特性测试平台

对电源设备进行输入阻抗特性测试时，可由专用测试电源为被测电源设备供电并提供小信号扰动电压。

专用测试电源应满足以下要求：

- 输出电压：可输出将被测电源设备输入端口额定电压和小信号扰动电压叠加之后的电压，其中额定电压应符合5.5.2.1的供电电源技术要求a)～c)，小信号扰动电压应符合5.3技术要求；
- 额定功率：参照5.5.2.1的供电电源技术要求d)。

5.5.2.3 基于线性负载的输出阻抗特性测试平台

对电源设备进行输出阻抗特性测试时，可由线性负载作为负荷，由电流型扰动注入装置提供小信号扰动电流。

线性负载应满足以下要求：

- a) 额定电压：应不小于被测电源设备输出端口额定电压；
- b) 额定功率：应不小于被测电源设备额定功率；
- c) 负载大小：可进行调节。

电流型扰动注入装置应满足以下要求：

- a) 输出电流：应符合5.3技术要求；
- b) 额定功率：应不小于被测电源设备额定功率的10%。

5.5.2.4 基于电子负载的输出阻抗特性测试平台

对电源设备进行输出阻抗特性测试时，可由电子负载作为被测电源设备负荷并提供小信号扰动电流。

电子负载应满足以下要求：

- a) 输出电流：可输出将被测电源设备线性负载电流和小信号扰动电流叠加之后的电流，其中线性负载额定电流应不小于被测电源设备输出端口额定电流，小信号扰动电流应符合5.3技术要求；
- b) 额定电压：应不小于被测电源设备输出端口额定电压；
- c) 额定功率：应不小于被测电源设备额定功率的110%。

5.5.3 半实物仿真测试平台

基于CHIL的半实物仿真测试平台示意图如图2所示，上位机和实时仿真机组成实时仿真系统，电源设备控制器与实时仿真机进行信号通信。

基于CHIL的半实物仿真测试平台应满足以下要求：

- a) 上位机：可运行实时仿真软件和电源设备功率拓扑电路的仿真模型，与实时仿真机进行信号通信，可设置小信号扰动参数，实现信号采样数据的记录和存储，符合5.4技术要求b) -d)；
- b) 实时仿真机：可支持电源设备功率拓扑电路最小仿真步长不大于 $1\mu\text{s}$ 的实时仿真，与电源设备控制器的通信延时不大于 $5\mu\text{s}$ ，符合5.3和5.4 a) 的技术要求。

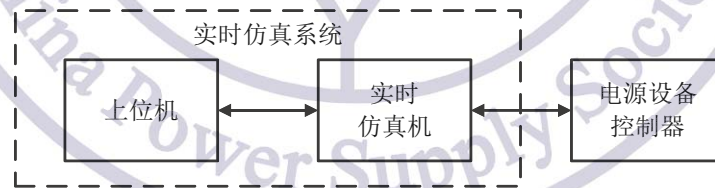


图2 基于CHIL的半实物仿真测试平台示意图

需要获取以下信息：

- a) 电源设备测试端口的额定电压和额定功率；
- b) 电源设备功率拓扑电路和所有电气参数，并且在拓扑电路中清楚标注电源设备控制器所需电气量的测点和测量变比；
- c) 电源设备控制器的通信协议和接口表。

6 信息系统电源设备阻抗特性测试方法

6.1 测试拓扑结构

6.1.1 输入阻抗特性测试拓扑结构

电源设备输入阻抗特性测试拓扑结构如图3所示，不同频率的交流小信号扰动电压以串联方式依次注入到被测电源设备输入端口，对输入端口电压和电流信号进行采样分析，从而得到被测电源设备输入阻抗特性。

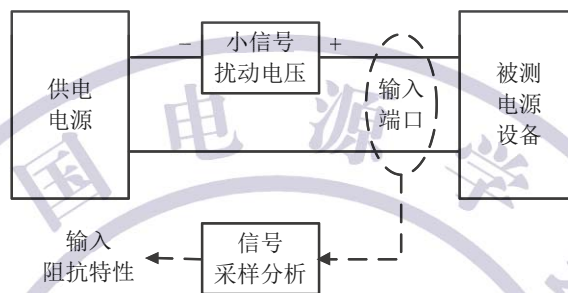


图3 电源设备输入阻抗特性测试拓扑结构图

6.1.2 输出阻抗特性测试拓扑结构

电源设备输出阻抗特性测试拓扑结构如图4所示，不同频率的交流小信号扰动电流以并联方式依次注入到被测电源设备输出端口，对输出端口电压和电流信号进行采样分析，从而得到被测电源设备输出阻抗特性。

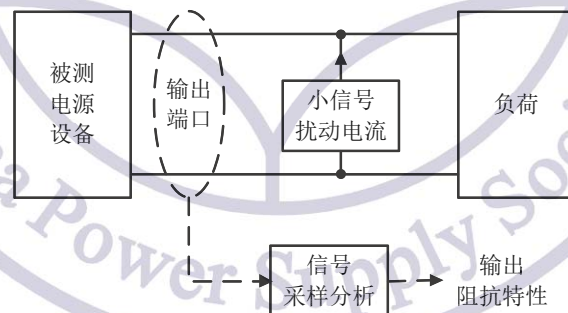


图4 电源设备输出阻抗特性测试拓扑结构图

6.2 输入阻抗特性测试方法

6.2.1 输入端口采用三相四线制

被测电源设备输入端口采用三相四线制的示意图如图5所示，需要在被测电源设备稳态工作时测试其正序、负序和零序输入阻抗特性。

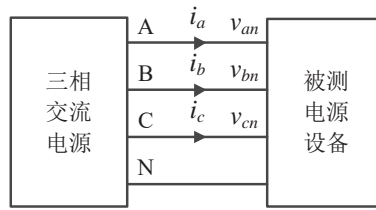


图5 输入端口采用三相四线制示意图

注：图中 v_{an} 、 v_{bn} 和 v_{cn} 分别为被测电源设备输入端口的A相、B相和C相的相电压， i_a 、 i_b 和 i_c 分别为被测电源设备输入端口的A相、B相和C相电流，N为中性线。

向 v_{an} 、 v_{bn} 和 v_{cn} 注入正序扰动电压信号 $v_{a+}(t)$ 、 $v_{b+}(t)$ 和 $v_{c+}(t)$ ：

$$\begin{cases} v_{a+}(t) = V_+ \sin(2\pi f_p t + \varphi_{v+}) \\ v_{b+}(t) = V_+ \sin(2\pi f_p t + \varphi_{v+} - 2\pi/3) \\ v_{c+}(t) = V_+ \sin(2\pi f_p t + \varphi_{v+} + 2\pi/3) \end{cases} \quad (2)$$

式中：

V_+ ——正序扰动电压幅值；

φ_{v+} ——正序扰动电压初相角。

对采样得到的 v_{an} 、 v_{bn} 和 v_{cn} 进行正序分量提取，得到与扰动频率 f_p 对应的正序输入电压 $\mathbf{V}_+(f_p)$ 。

对采样得到的 i_a 、 i_b 和 i_c 进行正序分量提取，得到与扰动频率 f_p 对应的正序输入电流 $\mathbf{I}_+(f_p)$ 。

正序输入阻抗幅值和相角由公式（3）计算：

$$\begin{cases} |\mathbf{Z}_+(f_p)| = \frac{|\mathbf{V}_+(f_p)|}{|\mathbf{I}_+(f_p)|} \\ \angle \mathbf{Z}_+(f_p) = \angle \mathbf{V}_+(f_p) - \angle \mathbf{I}_+(f_p) \end{cases} \quad (3)$$

式中：

$|\mathbf{Z}_+(f_p)|$ ——对应扰动频率 f_p 的正序输入阻抗幅值；

$|\mathbf{V}_+(f_p)|$ ——对应扰动频率 f_p 的正序输入电压幅值；

$|\mathbf{I}_+(f_p)|$ ——对应扰动频率 f_p 的正序输入电流幅值；

$\angle \mathbf{Z}_+(f_p)$ ——对应扰动频率 f_p 的正序输入阻抗相角；

$\angle \mathbf{V}_+(f_p)$ ——对应扰动频率 f_p 的正序输入电压相位；

$\angle \mathbf{I}_+(f_p)$ ——对应扰动频率 f_p 的正序输入电流相位。

向 v_{an} 、 v_{bn} 和 v_{cn} 注入负序扰动电压信号 $v_{a-}(t)$ 、 $v_{b-}(t)$ 和 $v_{c-}(t)$ ：

$$\begin{cases} v_{a-}(t) = V_- \sin(2\pi f_p t + \varphi_{v-}) \\ v_{b-}(t) = V_- \sin(2\pi f_p t + \varphi_{v-} + 2\pi/3) \\ v_{c-}(t) = V_- \sin(2\pi f_p t + \varphi_{v-} - 2\pi/3) \end{cases} \quad (4)$$

式中：

V_- ——负序扰动电压幅值；

φ_{v-} ——负序扰动电压初相角。

对采样得到的 v_{an} 、 v_{bn} 和 v_{cn} 进行负序分量提取，得到与扰动频率 f_p 对应的负序输入电压 $\mathbf{V}_-(f_p)$ 。

对采样得到的 i_a 、 i_b 和 i_c 进行负序分量提取，得到与扰动频率 f_p 对应的负序输入电流 $\mathbf{I}_-(f_p)$ 。

负序输入阻抗幅值和相角由公式（5）计算：

$$\begin{cases} |Z_{-}(f_p)| = \frac{|V_{-}(f_p)|}{|I_{-}(f_p)|} \\ \angle Z_{-}(f_p) = \angle V_{-}(f_p) - \angle I_{-}(f_p) \end{cases} \dots\dots\dots (5)$$

式中：

$|Z_{-}(f_p)|$ ——对应扰动频率 f_p 的负序输入阻抗幅值；

$|V_{-}(f_p)|$ ——对应扰动频率 f_p 的负序输入电压幅值；

$|I_{-}(f_p)|$ ——对应扰动频率 f_p 的负序输入电流幅值；

$\angle Z_{-}(f_p)$ ——对应扰动频率 f_p 的负序输入阻抗相角；

$\angle V_{-}(f_p)$ ——对应扰动频率 f_p 的负序输入电压相位；

$\angle I_{-}(f_p)$ ——对应扰动频率 f_p 的负序输入电流相位。

向 v_{an} 、 v_{bn} 和 v_{cn} 注入零序扰动电压信号 $v_{a0}(t)$ 、 $v_{b0}(t)$ 和 $v_{c0}(t)$ ：

$$v_{a0}(t) = v_{b0}(t) = v_{c0}(t) = V_0 \sin(2\pi f_p t + \varphi_{v0}) \dots\dots\dots (6)$$

式中：

V_0 ——零序扰动电压幅值；

φ_{v0} ——零序扰动电压初相角。

对采样得到的 v_{an} 、 v_{bn} 和 v_{cn} 进行零序分量提取，得到与扰动频率 f_p 对应的零序输入电压 $V_0(f_p)$ 。

对采样得到的 i_a 、 i_b 和 i_c 进行零序分量提取，得到与扰动频率 f_p 对应的零序输入电流 $I_0(f_p)$ 。

零序输入阻抗幅值和相角由公式（7）计算：

$$\begin{cases} |Z_0(f_p)| = \frac{|V_0(f_p)|}{|I_0(f_p)|} \\ \angle Z_0(f_p) = \angle V_0(f_p) - \angle I_0(f_p) \end{cases} \dots\dots\dots (7)$$

式中：

$|Z_0(f_p)|$ ——对应扰动频率 f_p 的零序输入阻抗幅值；

$|V_0(f_p)|$ ——对应扰动频率 f_p 的零序输入电压幅值；

$|I_0(f_p)|$ ——对应扰动频率 f_p 的零序输入电流幅值；

$\angle Z_0(f_p)$ ——对应扰动频率 f_p 的零序输入阻抗相角；

$\angle V_0(f_p)$ ——对应扰动频率 f_p 的零序输入电压相位；

$\angle I_0(f_p)$ ——对应扰动频率 f_p 的零序输入电流相位。

6.2.2 输入端口采用三相三线制

被测电源设备输入端口采用三相三线制需要在其稳态工作时测试正序和负序输入阻抗特性，相应的测试方法可参照6.2.1，其中输入端口相电压可由测量获取的线电压计算得到。

6.2.3 输入端口采用单相交流

被测电源设备输入端口采用单相交流的示意图如图6所示，需要在被测电源设备稳态工作时测试其单相输入阻抗特性。

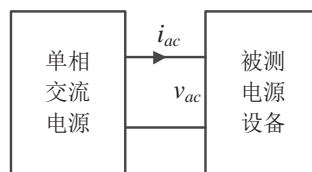


图6 输入端口采用单相交流示意图

注：图中 v_{ac} 和 i_{ac} 分别为被测电源设备输入端口的单相电压和电流。

向 v_{ac} 注入扰动电压信号 $v_{acp}(t)$ ，对采样得到的 v_{ac} 和 i_{ac} 进行分量提取，得到与扰动频率 f_p 对应的单相输入电压 $V_{ac}(f_p)$ 和单相输入电流 $I_{ac}(f_p)$ 。

单相输入阻抗幅值和相角由公式（8）计算：

$$\begin{cases} |Z_{ac}(f_p)| = \frac{|V_{ac}(f_p)|}{|I_{ac}(f_p)|} \\ \angle Z_{ac}(f_p) = \angle V_{ac}(f_p) - \angle I_{ac}(f_p) \end{cases} \dots\dots\dots (8)$$

式中：

$|Z_{ac}(f_p)|$ ——对应扰动频率 f_p 的单相输入阻抗幅值；

$|V_{ac}(f_p)|$ ——对应扰动频率 f_p 的单相输入电压幅值；

$|I_{ac}(f_p)|$ ——对应扰动频率 f_p 的单相输入电流幅值；

$\angle Z_{ac}(f_p)$ ——对应扰动频率 f_p 的单相输入阻抗相角；

$\angle V_{ac}(f_p)$ ——对应扰动频率 f_p 的单相输入电压相位；

$\angle I_{ac}(f_p)$ ——对应扰动频率 f_p 的单相输入电流相位。

6.2.4 输入端口采用直流

被测电源设备输入端口采用直流需要在其稳态工作时测试直流输入阻抗特性，相应的测试方法可参照6.2.3，其中被测电源设备输入端口接入直流电源。

6.3 输出阻抗特性测试方法

6.3.1 输出端口采用三相四线制

被测电源设备输出端口采用三相四线制需要在其稳态工作时测试正序、负序和零序输出阻抗特性，相应的测试方法可参照图4和6.2.1，注入的是电流扰动信号。

6.3.2 输出端口采用三相三线制

被测电源设备输出端口采用三相三线制需要在其稳态工作时测试正序和负序输出阻抗特性，相应的测试方法可参照图4和6.2.2，注入的是电流扰动信号。

6.3.3 输出端口采用单相交流

被测电源设备输出端口采用单相交流需要在其稳态工作时测试单相输出阻抗特性，相应的测试方法可参照图4和6.2.3，注入的是电流扰动信号。

6.3.4 输出端口采用直流

被测电源设备输出端口采用直流需要在其稳态工作时测试直流输出阻抗特性，相应的测试方法可参照图4和6.2.4，注入的是电流扰动信号。

7 信息系统电源设备阻抗特性测试步骤

7.1 实物测试步骤

被测电源设备阻抗特性采用实物测试的步骤如下：

a) 参照5.5.2确定具体的实物测试平台，搭建实物测试平台；

- b) 根据被测电源设备工作特点选择典型运行模式和功率；
- c) 在扰动未注入的情况下，被测电源设备实现正常运行；
- d) 参照第6章对被测电源设备测试端口进行采用最小扰动频率的小信号扰动注入；
- e) 在被测电源设备达到稳态运行后，获取测试端口电压电流信号；
- f) 参照第6章计算得到与该扰动频率对应的阻抗幅值和相角，并输出相应的计算结果数据；
- g) 从小到大更新扰动频率，重复上述步骤e) -f)，直至达到最大扰动频率为止；
- h) 由所有扰动频率下的阻抗幅值和相角绘制阻抗幅频特性和相频特性的波特图；
- i) 判断电源设备阻抗特性是否满足要求。

7.2 半实物仿真测试步骤

被测电源设备阻抗特性采用半实物仿真测试的步骤如下：

- a) 参照6.1搭建电源设备功率拓扑电路的实时仿真模型，并参照5.5.2设置仿真模型的相应参数，在实时仿真模型中搭建通信协议接口；
- b) 参照5.5.3搭建半实物仿真测试平台，进行实时仿真机和电源设备控制器之间的通信协议调试；
- c) 根据被测电源设备工作特点选择典型运行模式和功率；
- d) 仿真模型实时运行，在扰动未注入的情况下，电源设备控制器实现运行控制效果；
- e) 参照第6章在仿真模型中对被测电源设备测试端口进行采用最小扰动频率的小信号扰动注入；
- f) 在被测电源设备达到稳态运行后通过仿真测量获取测试端口电压电流信号；
- g) 重复7.1步骤f) ~h)；
- h) 判断电源设备阻抗特性是否满足要求。

8 信息系统电源设备阻抗特性测试结果

8.1 数据记录

电源设备阻抗特性测试结果采用数据方式进行记录应满足以下要求：

- a) 文件存储：宜采用“xls”、“csv”等格式；
- b) 形式：宜采用表格分列；
- c) 第1列记录数据序号；
- d) 从第2列开始记录测试结果，包括以下内容：
 - 1) 第2列记录扰动频率，包括扰动频率范围内所有选择的扰动频率数值，依照扰动频率数值从小到大顺序进行排列，单位为“Hz”；
 - 2) 第3列、第4列分别记录阻抗幅值和相角，其中阻抗幅值四舍五入并保留一位小数，单位为“dB”，阻抗相角四舍五入并保留一位小数，单位为“°”，范围为-180°~180°。

8.2 图形呈现

电源设备阻抗特性测试结果采用图形方式进行呈现应满足以下要求：

- a) 文件存储：宜采用“bmp”、“jpg”、“png”、“tif”等格式；
- b) 形式：可采用上下2个波特图排列，需说明波特图对应的阻抗，例如：单相输入阻抗、正序输出阻抗等；
- c) 内容：
 - 1) 2个波特图的频率范围与扰动频率范围一致；
 - 2) 第1个波特图呈现阻抗幅频特性，横坐标变量为频率，单位为“Hz”，纵坐标变量为阻抗幅值，单位为“dB”；

- 3) 第2个波特图呈现阻抗相频特性，横坐标变量为频率，单位为“Hz”，纵坐标变量为阻抗相角，单位为“°”，范围为 $-180^{\circ}\sim 180^{\circ}$ 。

8.3 测试报告

测试报告模板见附录 A，包括了数据记录和图形呈现的示例。

9 信息系统电源设备阻抗特性判定

由电源设备阻抗幅值和阻抗相角余弦值的乘积可得到电源设备阻抗的等效电阻分量，当阻抗相角超出 $[-90^{\circ}, 90^{\circ}]$ 范围时，等效电阻分量为负数，可能导致信息系统供配电出现振荡问题，因此电源设备阻抗相角宜在 $[-90^{\circ}, 90^{\circ}]$ 范围内。

如果电源设备阻抗相角超出该范围，应使用相对应的输出阻抗和输入阻抗的比值是否满足奈奎斯特稳定判据来判断系统稳定性。端口采用三相四线制时，正序输出阻抗和输入阻抗的比值、负序输出阻抗和输入阻抗的比值以及零序输出阻抗和输入阻抗的比值应分别满足奈奎斯特稳定判据。端口采用三相三线制时，正序输出阻抗和输入阻抗的比值以及负序输出阻抗和输入阻抗的比值应分别满足奈奎斯特稳定判据。端口采用单相交流时，单相输出阻抗和输入阻抗的比值应满足奈奎斯特稳定判据。端口采用直流时，直流输出阻抗和输入阻抗的比值应满足奈奎斯特稳定判据。



附 录 A
(资料性)
电源设备阻抗特性测试报告模板

电源设备阻抗特性测试报告模板见表A.1。

表A.1 电源设备阻抗特性测试报告模板

一、测试信息			
测试日期		测试平台	
测试人员		环境温度/°C	
相对湿度/%		大气压力/kPa	
二、被测电源设备信息			
类型		厂家	
型号		出厂编号	
测试端口		供电方式	
运行模式		运行功率/kW	
电流幅值/A		基波频率/Hz	
三、数据记录			
数据序号	扰动频率/Hz	阻抗幅值/dB	阻抗相角/°
1	1.0	29.5	0.4
2	2.0	29.4	0.8
3	3.0	29.4	1.1
4	4.0	29.4	1.6
5	5.0	29.3	2.1
6	6.0	29.3	2.7
7	7.0	29.2	3.4
8	8.0	29.1	4.2
9	9.0	29.0	5.1
10	10.0	29.0	6.1
11	11	28.9	7.2
12	13	28.7	9.8
13	14	28.7	11.2
14	16	28.6	14.4
15	18	28.5	18.1
16	20	28.5	22.3
17	22	28.5	26.8
18	25	28.7	34.5
19	28	29.1	43.4
20	32	29.9	57.8

表 A.1 电源设备阻抗特性测试报告模板（续）

测试序号	扰动频率/Hz	阻抗幅值/dB	阻抗相角/°
21	35	30.8	71.8
22	40	33.7	111.4
23	45	47.3	-157.8
24	51	64.5	-129.1
25	56	39.4	179.5
26	63	29.9	-103.7
27	71	27.5	-68.4
28	79	26.7	-44.6
29	89	27.2	-22.4
30	100	29.4	-11.4
31	112	30.9	-21.6
32	126	28.8	-24.8
33	141	28.5	-11.5
34	158	30.3	-11.0
35	178	28.9	-17.1
36	200	29.5	-6.9
37	224	29.3	-15.2
38	251	29.5	-6.8
39	282	28.9	-11.7
40	316	29.6	-11.4
41	355	29.5	-7.8
42	398	29.1	-7.4
43	447	28.9	-7.7
44	501	29.0	-8.0
45	562	29.0	-9.9
46	631	28.4	-10.5
47	708	28.6	-9.2
48	794	28.1	-8.6
49	891	27.8	-8.5
50	1000	27.6	-7.6
51	1122	27.3	-8.1
52	1259	27.0	-5.8
53	1413	26.7	-4.0
54	1585	26.2	-1.6
55	1778	25.9	1.5
56	1995	25.6	6.0
57	2239	25.3	10.4
58	2512	25.3	15.3

表 A.1 电源设备阻抗特性测试报告模板（续）

测试序号	扰动频率/Hz	阻抗幅值/dB	阻抗相角/°
59	2818	25.3	21.1
60	3162	25.4	27.2
61	3548	25.7	33.7
62	3981	26.1	39.7
63	4467	26.8	46.3
64	5012	27.4	50.8
65	5623	28.2	55.2
66	6310	29.1	59.3
67	7079	29.9	62.8
68	7943	30.8	66.6
69	8913	31.7	70.0
70	10000	32.6	73.2

四、图形呈现

单相输入阻抗

阻抗幅值/dB

阻抗相角/°

频率/Hz

五、结果判定

结论		
审核	签字	日期

参 考 文 献

- [1] Jian Sun, Mingchun Xu, Mauricio Cespedes, et al. Low-Frequency Input Impedance Modeling of Single-Phase PFC Converters for Data Center Power System Stability Studies. 2019 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), pp. 97-106, 2019.
- [2] Jian Sun, Mingchun Xu, Mauricio Cespedes, et al. Modeling and Analysis of Data Center Power System Stability by Impedance Methods. 2019 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), pp. 107-116, 2019.

