



中华人民共和国国家标准

GB/T 14598.181—202X/IEC 60255-181: 2019

量度继电器和保护装置 第 181 部分：频率保护功能要求

Measuring relays and protection equipment—
Part 181: Functional requirements for frequency protection

(IEC 60255-181:2019, IDT)

(征求意见稿)

XXXX - XX - XX 发布

XXXX - 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

前言	IV
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	2
4 功能规范	5
4.1 概述	5
4.2 输入激励量/激励量	5
4.3 开关量输入	6
4.4 功能逻辑	6
4.4.1 动作特性	6
4.4.2 复归特性	8
4.5 其他影响功能/条件	9
4.5.1 概述	9
4.5.2 低频/过频保护的特定特性	9
4.5.3 频率变化率保护的特定特性	10
4.6 开关量输出	10
4.6.1 概述	10
4.6.2 启动信号	10
4.6.3 动作(跳闸)信号	10
4.6.4 其他开关量输出信号	10
5 性能规范	10
5.1 概述	10
5.2 有效范围和工作范围	10
5.3 与特性量相关的准确度	11
5.4 低频保护、过频保护的启动时间	12
5.5 频率变化率保护的启动时间	12
5.6 与动作时延定值相关的准确度	12
5.7 返回时间	12
5.8 复归回差和复归系数	12
5.9 与制动元件、闭锁元件相关的准确度	13
5.10 有谐波时的性能	13
5.11 电压突变(相位偏移和幅值变化)时的稳定性	13
5.12 电压输入要求	13
6 功能试验方法	13
6.1 概述	13
6.2 与特性量有关的稳态误差的测定	15
6.2.1 启动值的准确度	15

6.2.2	复回归差或复归系数的测定	20
6.3	启动时间的测定	27
6.3.1	概述	27
6.3.2	低频保护、过频保护	27
6.3.3	频率变化率保护	32
6.4	动作时延准确度的测定	34
6.4.1	概述	34
6.4.2	试验方法	34
6.4.3	动作时延准确度报告	36
6.5	返回时间测定	36
6.5.1	概述	36
6.5.2	低频保护、过频保护	36
6.5.3	频率变化率保护	38
6.6	有谐波时的性能	40
6.6.1	概述	40
6.6.2	有谐波时低频/过频保护启动值的准确度	40
6.6.3	有谐波时频率变化率保护启动值的准确度	44
6.7	电压突变时（相位偏移和幅值变化）的稳定性	45
6.7.1	概述	45
6.7.2	电压相位偏移和幅值变化时的性能	45
6.7.3	电压幅值下降和恢复时的性能	47
7	文档要求	49
7.1	型式试验报告	49
7.2	其他用户文档	50
附录 A（规范性附录）	频率变化率（ df/dt ）为恒定值的试验信号表达式	51
附录 B（规范性附录）	均值、中位数和众数计算	52
B.1	均值	52
B.2	中位数	52
B.3	众数	52
B.4	示例	52
附录 C（资料性附录）	频率测量和计算示例	53
C.1	定义	53
C.2	信号观测模型	53
C.3	频率测量的一般要求	54
C.3.1	频率测量的一般要求	54
C.3.2	周期算法	54
C.3.3	分析算法	55
C.3.4	误差最小化算法	56
C.3.5	离散傅里叶变换（DFT）	59
附录 D（资料性附录）	有间谐波时的性能	60
D.1	概述	60

D.2 推荐试验：低频/过频启动值的准确度	60
D.2.1 频率缓变过程的生成	60
D.2.2 保护功能定值	61
D.2.3 有间谐波时频率准确度试验点及频率准确度计算	61
D.2.4 有间谐波时的频率准确度报告	62
附录 E（资料性附录） 电压连续波形下频率突变的实现方法	63
参考文献	66

前 言

GB/T 14598《量度继电器和保护装置》分为以下若干部分：

- GB/T 14598.1 电气继电器 第23部分：触点性能；
- GB/T 14598.2 量度继电器和保护装置 第1部分：通用要求；
- GB/T 14598.3 电气继电器 第5部分：量度继电器和保护装置的绝缘配合要求和试验；
- GB/T 14598.6 电气继电器 第十八部分：有或无通用继电器的尺寸；
- GB/T 14598.8 电气继电器 第20部分：保护系统；
- GB/T 14598.23 电气继电器 第21部分：量度继电器和保护装置的振动、冲击、碰撞和地震试验 第3篇：地震试验
- GB/T 14598.24 量度继电器和保护装置 第24部分：电力系统暂态数据交换（COMTRADE）通用格式；
- GB/T 14598.26 量度继电器和保护装置 第26部分：电磁兼容要求；
- GB/T 14598.27 量度继电器和保护装置 第27部分：产品安全要求；
- GB/T 14598.121 量度继电器和保护装置 第121部分：距离保护功能要求；
- GB/T 14598.127 量度继电器和保护装置 第127部分：过/欠电压保护功能要求；
- GB/T 14598.149 量度继电器和保护装置 第149部分：电热继电器功能要求；
- GB/T 14598.151 量度继电器和保护装置 第151部分：过/欠电流保护功能要求；
- GB/T 14598.300 变压器保护装置通用技术要求；
- GB/T 14598.301 微机型发电机变压器故障录波装置技术要求；
- GB/T 14598.302 弧光保护装置技术要求；
- GB/T 14598.303 数字式电动机综合保护装置通用技术条件。

本文件为GB/T 14598的第181部分。

本文件按照GB/T 1.1—2020给出的规则起草。

本文件使用翻译法等同采用IEC 60255-181:2019 量度继电器和保护装置 第181部分：频率保护功能要求（英文版）。

本文件的插图采用IEC 60255-181:2019的原图，部分插图可能与我国的制图标准有差异，但并不影响理解。

与本文件中规范性引用的国际文件有一致性对应关系的我国文件如下：

- GB/T 14598.2—2011 量度继电器和保护装置 第1部分：通用要求（IEC 60255-1:2009，IDT）；
- GB/T 2900.92—2015 电工术语 数学 函数（IEC 60050-103:2009，IDT）；
- GB/T 2900.50—2008 电工术语 发电、输电及配电 通用术语（IEC 60050-601:1985，MOD）；
- DL/T 860（所有部分） 电力自动化通信网络和系统 [IEC 61850（所有部分）]；
- GB/T 20840（所有部分） 互感器 [IEC 61869（所有部分）]。

本文件由中国电器工业协会提出。

本文件由全国量度继电器和保护设备标准化技术委员会（SAC/TC154）归口。

本文件主要起草单位：***。

本文件主要起草人：**。

本文件首次发布。

量度继电器和保护装置 第181部分：频率保护功能要求

1 范围

GB/T 14598的本文件规定了频率保护功能和性能评价的最低要求。本文件还规定了记录和发布性能试验结果的方式。

本文件涵盖了基于频率测量或频率变化率测量的保护功能。本文件还涵盖使用附加闭锁元件的频率保护。

本文件规定了稳态条件下的准确度影响因素和动态条件下的性能特性。本文件包括用于检验性能特性和准确度的试验方法。

本文件涉及的频率保护功能如表1所示：

表1 频率保护名称

	IEEE/ANSI C37.2功能代码	IEC 61850-7-4逻辑节点
低频保护	81U	PTUF
过频保护	81O	PTOF
频率变化率保护	81R	PFRC

本文件适用于保护继电器内嵌的频率保护功能，也适用于其他设备（例如低压断路器的脱扣单元、光伏逆变器、储能系统逆变器）中的频率保护功能。

本文件不包括同步功能、同期检测功能。

本文件没有规定通常与频率保护功能有关的附加特性的功能说明，如低压闭锁、 df/dt 或 $\Delta f/\Delta t$ 监视、电流监视或功率监视（ f/P 功能）。本文件只涉及这些附加特性对频率保护功能的影响。

保护装置提供的频率测量输出、频率变化率测量输出超出本文件的范围。

此外，本文件未明确涵盖以电流作为输入激励量的频率继电器，但本文件所规定的原则可以扩展到这类应用以提供指导。

量度继电器和保护装置的通用要求见IEC 60255-1。

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。

IEC 60255-1 量度继电器和保护装置 第1部分：通用要求（Measuring relays and protection equipment – Part 1: Common requirements）

IEC 60050-103 国际电工术语 第103部分：数学 – 函数（International Electrotechnical Vocabulary – Part 103: Mathematics – Functions）

IEC 60050-447 国际电工术语 第447部分：量度继电器（International Electrotechnical Vocabulary – Part 447: Measuring relays）

IEC 60050-601 国际电工术语 第601部分：发电、输电及配电-通用术语 International Electrotechnical Vocabulary – Chapter 601: Generation, transmission and distribution of electricity – General

IEC 61850 (所有部分) 电力自动化通信网络和系统 (Communication networks and systems for power utility automation)

IEC 61869 (所有部分) 互感器 (Instrument transformers)

3 术语和定义

IEC 60050-103、IEC 60050-447、IEC 60050-601界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

ISO和IEC在以下网址维护标准化用术语数据库：

——IEC Electropedia: <http://www.electropedia.org/>

——ISO 在线浏览平台: <http://www.iso.org/obp>

3.1

输入激励量 input energizing quantity

本身构成特性量或有助于构成特性量的激励量。

注1：对于频率保护功能，输入激励量可以是电压¹⁾。

[来源：IEC 60050-447:2010, 447-03-02, 修改-条目注释已被新注释替换]

3.2

特性量 characteristic quantity

其名称表示量度继电器或保护装置的特性、其值有准确度要求的一种电气量或它的一个参数。

[IEC 60050-447:2010, 447-07-01]

注1：对于低频保护和过频保护，特性量为频率；对于频率变化率保护，特性量为频率变化率。

[来源：IEC 60050-447:2010, 447-07-01, 修改-示例已被新的条目注释取代]

3.3

特性曲线 characteristic curve

表示理论动作时间与特性量之间关系的曲线。

3.4

特性量定值 setting value of the characteristic quantity

G_s

用于定义特性曲线的特性量基准值。

3.5

启动值 start value

使得量度继电器或保护装置启动的特性量的值。

3.6

复归值 reset value

使得量度继电器或保护装置复归的特性量的值。

3.7

启动时间 start time

对处于初始状态或复归状态下的量度继电器或保护装置，从其输入激励量发生能够导致其启动的特定变化的时刻起，到其真正启动的时刻止的持续时间。

1) 采标注：“输入激励量”，原文误为“输入特性量”。

3.8

动作时间 operate time

对处于初始状态或复归状态下的量度继电器或保护装置，从其输入激励量发生能够导致其动作的特定变化的时刻起，到其真正动作的时刻止的持续时间。

注1：保护功能的动作时间等于启动时间加上动作时延定值。

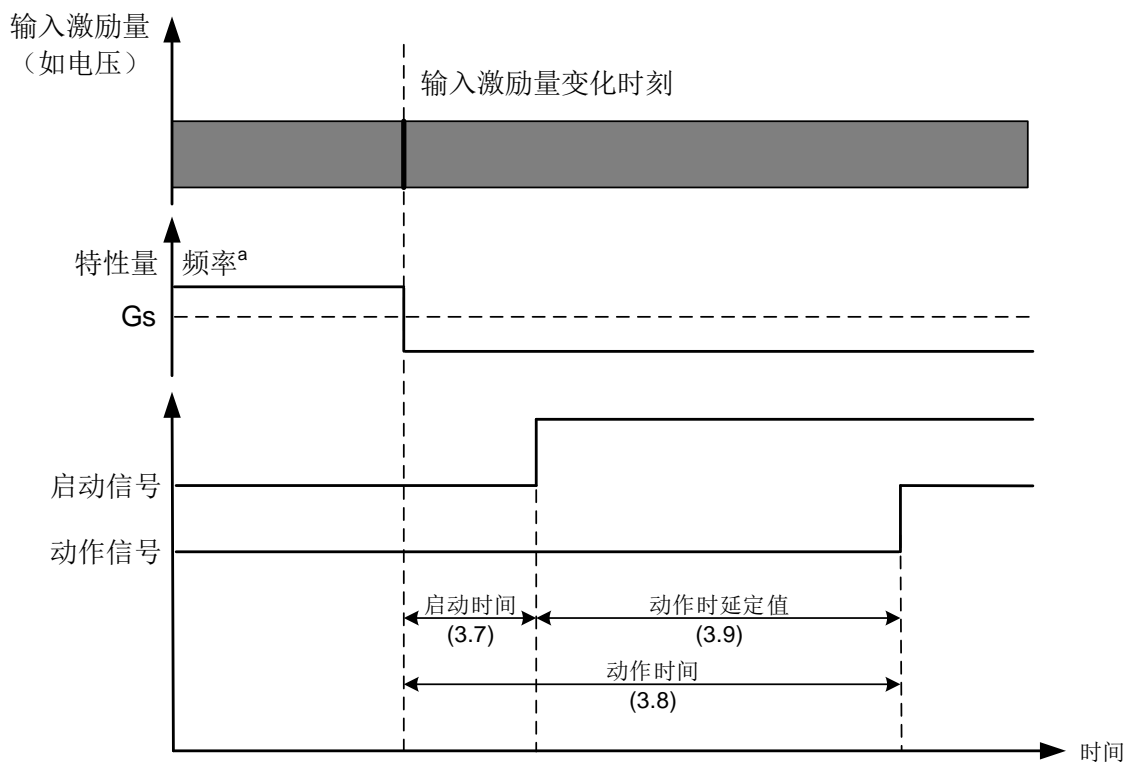
3.9

动作时延定值 operate time delay setting

由用户设置确定的人为时延，该时延由启动信号触发以激活动作信号。

注1：频率保护功能的动作时间等于启动时间加上动作时延定值。动作时间和动作时延定值之间的区别如图1所示。

图1 基于频率突变，只是为了明晰对启动时间触发时刻的定义。



^a 以低频保护为例。

图1 动作时间和动作时延定值

3.10

返回时间 disengaging time

对处于动作状态下的量度继电器或保护装置，从其输入激励量值发生能够导致其返回的特定变化的时刻起，至其真正返回的时刻止的持续时间。

3.11

复归时间 reset time

对量度继电器或保护装置，从其输入激励量发生能够导致其复归的特定变化的时刻起，到其真正复归的时刻止的持续时间。

[来源：IEC 60050-447:2010，447-05-06，有修改。见图6]

3.12

复回归差 reset hysteresis

保护功能复归值与启动值之差的绝对值。

3.13

复归系数 reset ratio

保护功能复归值与启动值之比。

注1: 复归系数适用于频率变化率保护, 见 4.4.2 和 5.8。

3.14

工作范围 operating range

在规定的条件下, 量度继电器依据规定的要求能够执行预定功能的范围。

注1: 对于有准确度要求的, 参阅“有效范围”(IEC 60050-447:2010, 447-07-08)。

注2: 为了能够正确测量频率, 输入激励量(如电压)应不低于规定的最低水平。

[来源: IEC 60050-447:2010, 447-03-16, 修改-添加条目注2]

3.15

有效范围 effective range

输入激励量或特性量的工作范围中满足准确度要求的部分。

[IEC 60050-447:2010, 447-07-08]

3.16

频率变化率保护 rate of change of frequency protection

ROCOF

当频率每单位时间内变化一定量时动作的保护功能。

3.17

周期 period

T

使周期量取值完全重复的两个独立变量的最小正差。

注1: 若 $f(t)$ 表示一个周期量, 那么 $f(t+T) = f(t)$ 。

注2: 术语“周期持续时间”有时用于时间的函数的情形。

注3: 周期符号 T 主要用于自变量是时间的情形。

[来源: IEC 60050-103:2009, 103-06-01]

3.18

频率 frequency

f

周期的倒数。

注1: 符号 f 主要用于自变量周期是时间的情形。符号 ν (nu) 主要用于光学中。

注2: 对于正弦波形, 频率是相位的一阶导数(见 IEC/IEEE 60255-118-1:2018)。详细说明见附录 D。

[来源: IEC 60050-103:2009²⁾, 103-06-02, 修改-条目注释2已被新注释取代]

3.19

工频 power frequency

供电系统中通常使用的频率值。

[来源: IEC 60050-601:1985, 601-01-05]

2) 采标注: IEC 60050-103:2009, 原文误为“IEC 60050-103:2017”。

4 功能规范

4.1 概述

保护功能及其输入、输出、测量元件、时延特性和功能逻辑的示例如图2所示。制造商应提供具体实施的功能框图。

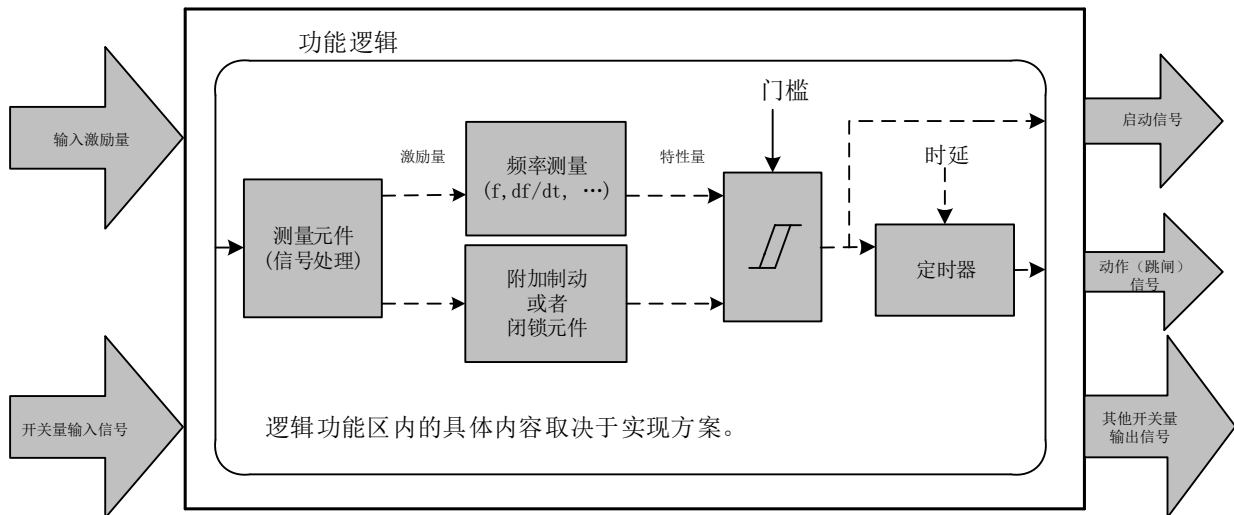


图2 保护功能的简化框图

4.2 输入激励量/激励量

输入激励量为测量信号，例如电压。对于模拟量输入，其额定值和相关标准由IEC 60255-1规定。输入激励量可通过直接连接一次导体（例如低压母线）获取、从仪用互感器（例如，电压互感器VT，参见IEC 61869（所有部分））获取，或采用适当的通信协议作为数据包从通信端口获取（例如IEC 61850-9-2，或者更具体地说，是IEC 61869-9）。

相关文件应说明保护功能所使用的输入激励量的类型。例如：

- 一组或多组相对地电压或相对中性点电压；
- 一组或多组相间电压；
- 多相（线路）电流。

制造商应详细说明用于频率保护工作的激励量。如图2所示，激励量可能与输入激励量不同，例如：

- 使用相对地电压或相间电压；
- 使用两组不同的电压源；
- 使用从多相激励量导出的信号，例如正序电压或计算得到的相间电压等；
- 使用电流，如相电流或正序电流等。

制造商应详细说明用于频率保护工作的特性量。例如：

- 频率测量值；
- 频率变化率（ df/dt ）测量值。

可以在不同的时间窗（例如，一个或多个工频周期）内测量频率和 df/dt 的值。此时间窗可以由用户设置为固定或可调。当此时间窗可调时，设定值会影响时间特性（例如，启动时间）。

当频率测量或频率变化率测量受到用户定值设置的影响（例如，可选择在若干个周期内取频率的平均值）时，制造商应予以明示。在这种情况下，制造商应申明这些设置对保护功能性能的影响，并为相关保护功能试验和应用提供定值的推荐值。

所有这些特性量都基于基本的频率测量。存在不同的算法，其选择见附录C。

当保护装置无电压输入端口、电压信号为零或在闭锁值以下时，可借助线路电流输入来测量频率。此类应用通常用于频率跟踪，不建议用于频率保护。制造商应申明是否将相电流用作其频率保护装置的输入激励量。第6章中定义的类型试验不能涵盖基于相电流输入的频率保护性能，但其试验原则可以扩展到此类应用以提供指导。

4.3 开关量输入

如果使用了开关量输入信号（由外部或内部驱动），应在功能逻辑图上清楚描述其对保护功能的影响。可以提供额外的文字描述以便进一步说明开关量输入信号的功能及其预期用途。

频率保护功能的开关量输入信号可能来自若干不同的源。例如：

- 通过传统接线连接到物理输入端口（通常带光电隔离）引入的信号；
- 通过通信端口接收到的来自外部设备的信号（例如，IEC 61850 GOOSE 信号）；
- 来自继电器内其他功能元件的内部逻辑信号，例如低压闭锁、 df/dt 或 $\Delta f/\Delta t$ 监视、电流监视和功率监视（ f/P 功能）；
- 来自频率保护功能元件自身的内部逻辑信号。

只要满足运行要求，接收信号的方式在很大程度上无关紧要。开关量输入信号的定义、额定值和标准见IEC 60255-1。

4.4 功能逻辑

4.4.1 动作特性

4.4.1.1 概述

动作时间与特性量的关系可用特性曲线表示。制造商应通过等式（首选）或图形方式说明该曲线的形状。

本文件规定了一个自定时间特性（即定时限）。

自定时间特性是由特性量定值 G_s 和动作时延定值 t_{delay} 来定义的。如果未设置额外的动作时延，则保护功能瞬时动作。

4.4.1.2 低频保护特性

对于低频保护，当 $G < G_s$ 时 $t(G) = t_{delay}$ 。其自定时间特性如图3所示。

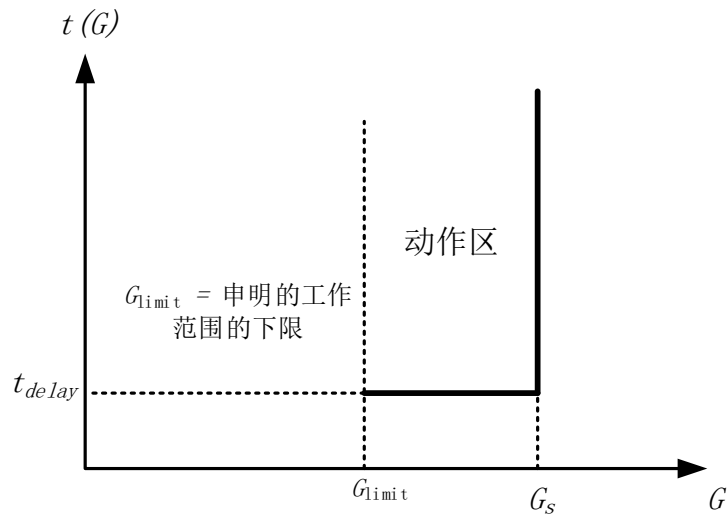


图3 低频保护自定时间特性

注：时间特性的准确度在有效范围内得到保证。但该保护功能可以在如5.2所述的工作范围内运行。

4.4.1.3 过频保护特性

对于过频保护，当 $G > G_s$ 时 $t(G) = t_{delay}$ 。其自定时间特性如图4所示。

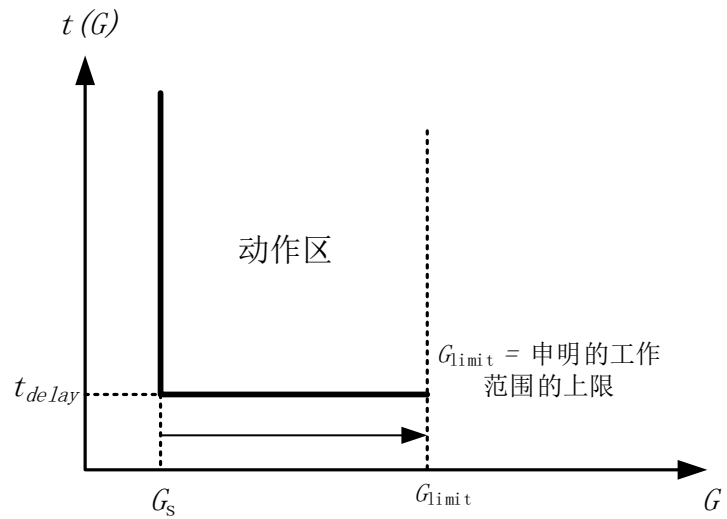


图4 过频保护自定时间特性

注：时间特性的准确度在有效范围内得到保证。但该保护功能可以在如5.2所述的工作范围内运行。

4.4.1.4 频率变化率保护特性

对于频率变化率保护，当 $|G| > |G_s|$ 时 $t(G) = t_{delay}$ 。其自定时间特性如图5所示。

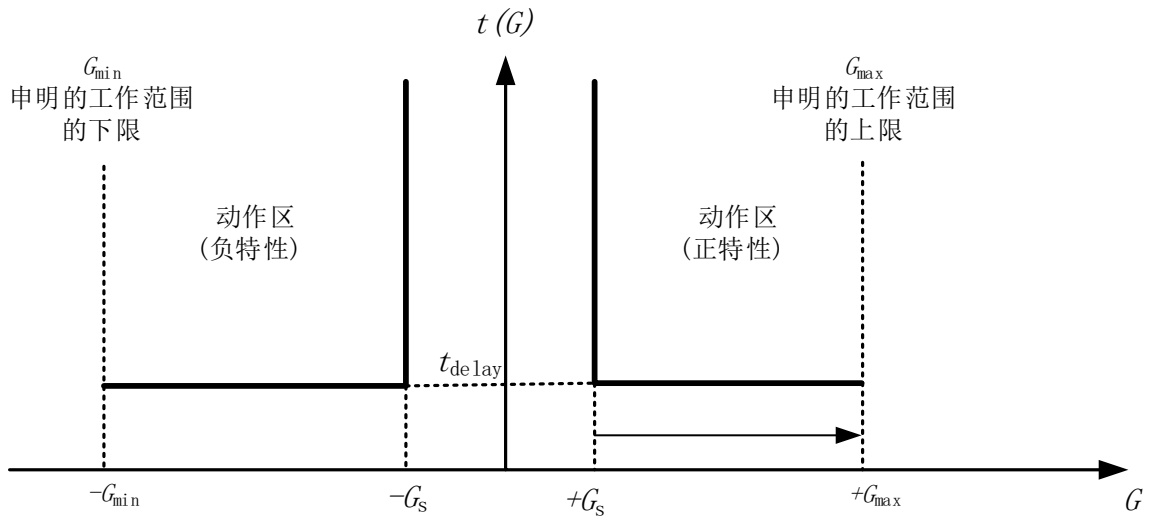


图5 频率变化率保护自定时间特性

注：时间特性的准确度在有效范围内得到保证。但该保护功能可以在如5.2所述的工作范围内运行。

根据用户设置，频率变化率保护的動作特性可以设定为正向变化、负向变化或正负双向变化。制造商应申明具体的動作特性。正向变化特性的门槛和负向变化特性的门槛可以不同，按两种不同的频率变化率保护元件进行处理。

4.4.2 复归特性

一般来说，复归不设置额外的时延。当出现以下情况时，保护功能应返回到其复归状态：

- 对低频保护，当 $G > G_s + \text{复归回差}$ ；
- 对过频保护，当 $G < G_s - \text{复归回差}$ ；
- 对于频率变化率保护，当 $|G| < (|G_s| \times \text{复归系数})$ 或者 $|G| < (|G_s| - \text{复归回差})$ 时；若 df/dt 带正负符号则选用适用的公式。

其中，

$$\text{复归回差} = |\text{复归值} - \text{动作值}|$$

$$\text{复归系数} = \frac{\text{复归值}}{\text{动作值}}$$

对于频率变化率保护，当门槛较低时，复归系数可以与最小复归回差混合使用。在这种情况下，复归值是申明的复归系数和复归回差中的较大者（例如：复归系数98%，复归回差40 mHz/s，以较大者为准）。

对频率保护，只需申明返回时间。频率保护通常不设置复归时间特性。返回时间和复归时间之间的区别见图6。

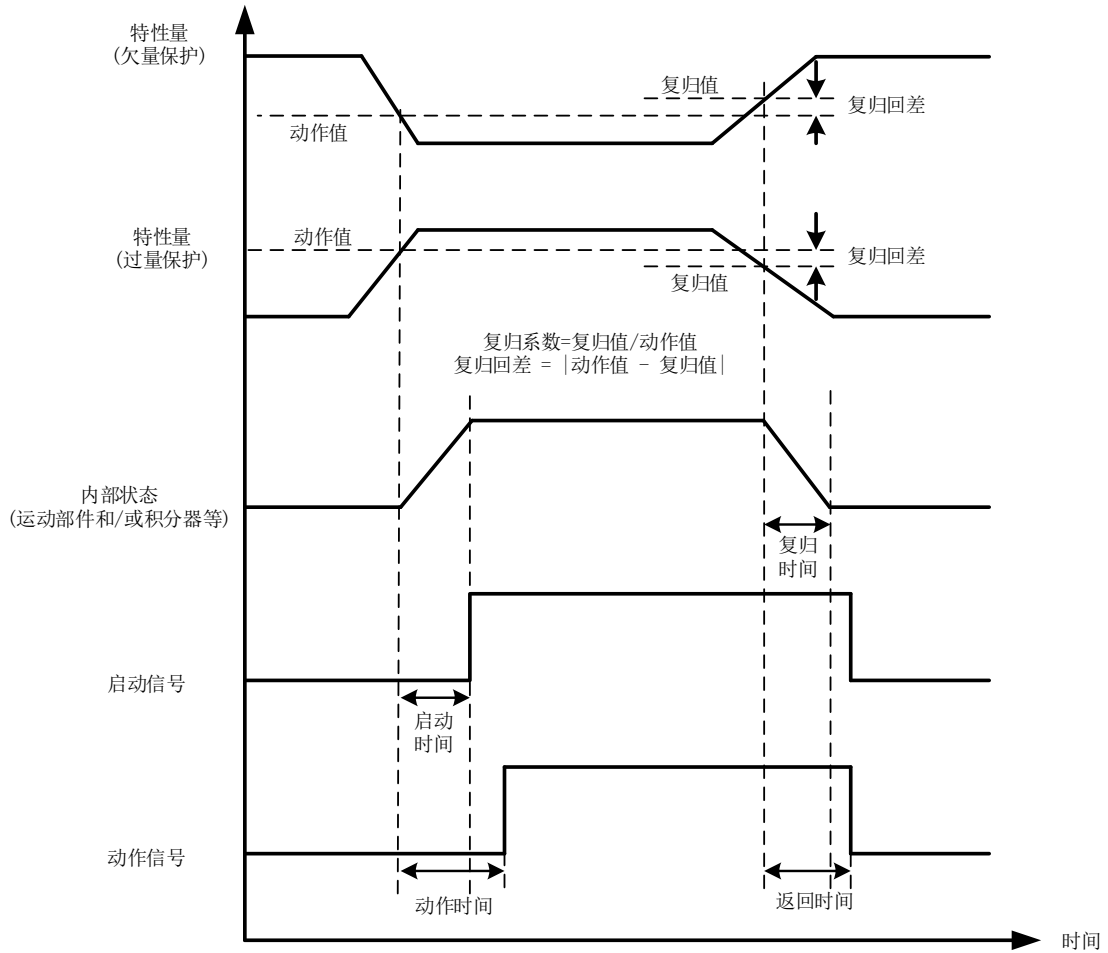


图6 启动、动作、返回和复归说明图

4.5 其他影响功能/条件

4.5.1 概述

以下条件可能会影响频率保护功能的动作行为。这些条件可由附加的功能元件检测到，这些功能元件通过预先定义的开关量输入作用于频率保护。例如，当电压幅值低于规定限值时闭锁频率保护。制造商应在文件中说明这些特定特性的性能。与这些特定特性相关的功能试验未在本文件中说明，但制造商应在型式试验报告中说明用于检验这些特性的试验方法。

4.5.2 低频/过频保护的特定特性

低频/过频保护特定特性的例子如下：

- 低压闭锁；
- 三相不平衡监视；
- df/dt 监视；
- 电流监视；
- 功率监视（ f/P 功能）。

4.5.3 频率变化率保护的特定特性

频率变化率保护特定特性的例子如下：

- 低压闭锁；
- 三相不平衡监视；
- 低频/过频监视；
- 电流监视。

4.6 开关量输出

4.6.1 概述

频率保护功能的开关量输出信号可以有多种不同的形式。例如：

- 通过传统接线引出的保护装置的触点信号；
- 通过通信端口传输到外部设备的信号；
- 连接至保护装置内其他功能元件的内部逻辑信号；
- 频率保护功能元件的内部逻辑信号。

只要满足运行要求，提供开关量输出信号的方式在很大程度上无关紧要。采用触点方式的开关量输出，其定义、额定值和标准在IEC 60255-1中规定。

4.6.2 启动信号

启动信号是测量和门槛比较元件的输出，无额外时延。

制造商应详细说明启动信号、启动/故障检测元件的特性和逻辑、所需定值参数、定值含义及其用法、该项功能所给出的输出信号等相关信息，以确保正确地应用和试验。

如果保护功能未能提供启动信号，制造商应提供第6章中规定的、与启动信号有关的试验的具体方法。

4.6.3 动作（跳闸）信号

动作信号是测量和门槛比较元件经过人为动作时延之后的输出。对于瞬时动作元件，该信号可能与启动信号（如果提供）同时出现。

4.6.4 其他开关量输出信号

如果有任何其他开关量输出信号，应在功能逻辑图上清楚地显示其动作逻辑。还可以提供其他文字描述，以进一步说明输出信号的功能及其预期用途。

5 性能规范

5.1 概述

由于本文件仅规定了频率保护的最低要求，这里仅考虑和提出满足这些最低要求的、适当的性能规范。本文件还规定了制造商应如何记录与这些最低要求相应的性能指标。

5.2 有效范围和工作范围

制造商应当参照表2和表3所示的例子给出低频保护、过频保护和频率变化率保护的有效范围和工作范围。表中所示数据只是为提供数据格式给出的例子，基于不同技术的频率保护其范围可以不同于表

中所示。制造商应申明继电器的有效范围和工作范围，数据格式应符合表2和表3的要求。若有效范围和工作范围基于额定电压或标称频率表示时，制造商应申明保护功能适用的额定电压或标称频率值。

表2 过频保护、低频保护的有效范围和工作范围示例

参量	有效范围	工作范围
电压	额定电压的 5 % ~ 150 %	额定电压的 2 % ~ 200 %
	2.9 V ~ 86.6 V (VT 二次值)	1.5 V ~ 115.5 V (VT 二次值)
频率	标称频率的 0.95 ~ 1.05 倍	标称频率的 0.9 ~ 1.1 倍
	47.5 Hz ~ 52.5 Hz	45 Hz ~ 55 Hz

注：电压范围可以用额定电压的百分比表示或用电压数值（VT二次电压）直接表示。用电压数值直接表示时，有效范围的上限高于适用的额定值（例如，额定电压为57.7 V，有效范围上限为86.6 V）。

表3 频率变化率保护的有效范围和工作范围示例

参量	有效范围	工作范围
电压	额定电压的 5 % ~ 150 %	额定电压的 2 % ~ 200 %
	2.9 V ~ 86.6 V (VT 二次值)	1.5 V ~ 115.5 V (VT 二次值)
频率 ^a	标称频率的 0.95 ~ 1.05 倍	标称频率的 0.9 ~ 1.1 倍
	47.5 Hz ~ 52.5 Hz	45 Hz ~ 55 Hz
频率变化率	-5 Hz/s ~ +5 Hz/s	-10 Hz/s ~ +10 Hz/s

注：电压范围可以用额定电压的百分比表示或用电压数值（VT二次电压）直接表示。用电压数值直接表示时，有效范围的上限高于适用的额定值（例如，额定电压为57.7 V，有效范围上限为86.6 V）。

^a 如果频率变化率的测量算法不受频率大小的影响，制造商应写上“不适用”。制造商应申明超出频率有效范围时频率变化率保护的動作行为。在任何情况下，该处频率范围应与第6章中所述功能试验中申明的启动时间和频率变化率保护可用定值范围所对应的频率范围相一致，其中试验频率初值等于标称值。

当电流用作频率保护的输入激励量时，制造商应说明电流的有效范围和工作范围。

当保护装置的电压输入受限于与磁通值（V/Hz）相关的耐受值时，制造商应申明电压输入可承受的最大磁通值（V/Hz）与输入时间之间的关系曲线。

5.3 与特性量相关的准确度

制造商应申明与特性量相关的准确度以及适用的定值范围。此外，制造商还应申明保护功能在其工作范围之外的動作行为。

对于低频保护和过频保护，准确度应使用频率的绝对误差（例如，±10 mHz）来表示。除绝对误差外，还可以用定值（ G_s ）的相对误差来表示。此时，准确度误差应为两者中的较大者（例如，“±0.01 %或±10 mHz，以较大者为准”）。

对于频率变化率保护，准确度应使用定值（ G_s ）的相对误差、 df/dt 的绝对误差或两个值的组合来表示（例如，“±5 %或±15 mHz/s，以较大者为准”）。在频率变化率保护的整个可用定值范围内，制造商可以分区间申明不同的准确度。

与特性量相关的准确度试验程序见6.2.1。

5.4 低频保护、过频保护的启动时间

低频保护、过频保护的启动时间取决于以下几个因素：

- 试验频率初值（一般接近标称频率）；
- 试验频率终值（在稳态试验条件下）；
- 从试验频率初值到试验频率终值的变化类型；
- 频率测量方法，例如，基于滑动时间窗内平均值的频率测量方法。

制造商应给出两种不同试验方法下的启动时间：

- 从试验频率初值突然变化到试验频率终值；
- 以不同的恒定斜率（ df/dt ）从试验频率初值变化到试验频率终值。

有关试验方法和规定试验点的更全面信息，见6.3.2。

对于每种试验方法，制造商应基于6.3.2中规定的全部试验点给出启动时间的最小值、平均值（均值）和最大值。此外，还应以图形方式提供全部试验结果。有关统计术语的解释见附录B。

当基于由用户定值确定的可调时间窗测量频率时，应使用可调时间窗的缺省定值来申明启动时间。

5.5 频率变化率保护的启动时间

与低频保护、过频保护相似，频率变化率保护的启动时间取决于多个因素。制造商应基于以不同的恒定斜率从试验频率初值变化到试验频率终值的条件下的试验结果来申明启动时间。

有关试验方法和规定试验点的更全面信息，见6.3.3。

制造商应基于6.3.3中规定的全部试验点给出启动时间的最小值、平均值（均值）和最大值。此外，还应以图形方式提供全部试验结果，并注明众数和中位数。有关统计术语的解释见附录B。

当基于由用户定值确定的可调时间窗测量频率时，应使用可调时间窗的缺省定值来申明启动时间。

5.6 与动作时延定值相关的准确度

动作时延是从启动信号动作时刻开始到动作信号动作时刻为止的时间间隔。该时延由3.9中定义的动作时延定值（ t_{delay} ）确定。

动作时延定值的最大允许误差应表示为以下之一：

- 时延定值的百分比，和固定的最大时间误差（可能超过百分比值），以较大者为准（例如， $\pm 5\%$ 或 $\pm 20\text{ ms}$ ，以较大者为准）；
- 固定的最大时间误差（例如， $\pm 20\text{ ms}$ ）。

制造商应申明与动作时延定值相关的最大误差限值，以及适用的时延定值范围。

有关动作时延定值的试验程序见6.4。

在某些应用中，内部测量时间可能包括在动作时延内，而不是叠加在上述时延定值之上。制造商应说明在频率保护功能中具体如何处理动作时间。

5.7 返回时间

在实际应用中，可能有必要考虑当频率恢复正常时频率保护的返回时间。这些信息对不同轮次保护之间的时间级差配合、电网保护与发电机保护的协调等等都有影响。

制造商应按照6.5中所述的试验程序申明返回时间。

对于设置了额外返回时间的频率保护，制造商应说明如何处理返回时间，相关试验程序应在型式试验报告中说明。

5.8 复回归差和复归系数

对于低频保护、过频保护，制造商应以mHz为单位申明复回归差（例如，复回归差5 mHz）。

对于频率变化率保护，制造商应申明复归值，该值可以用复归系数来表示（例如，复归系数98%），当阈值较低时也可混合使用复归系数和最小复回归差（例如，复归系数98%，最小复回归差40 mHz/s）。有关复回归差和复归系数的试验程序如6.2.2所述。

注：申明的特性量准确度（5.3）与申明的复回归差或复归系数之间没有直接关系。定义复回归差或复归系数是为了避免测量的不稳定性和启动信号的抖动。例如，复回归差可以低于或高于所申明的特性量准确度。测量不稳定性越高，复回归差越大。测量不稳定性与测量准确度没有直接关系。

5.9 与制动元件、闭锁元件相关的准确度

制造商应申明所使用的制动元件、闭锁元件。如4.5所述，当制动元件、闭锁元件基于特定阈值时，制造商应申明这些元件的准确度。

5.10 有谐波时的性能

非线性负载或附近的高压直流电网可能会产生谐波，叠加在频率保护测量用的电压（和电流）基波分量上。稳态负载中的谐波可以通过稳态信号注入来模拟，谐波的存在可能影响频率保护特性量准确度。应根据6.6中所述的试验程序，检验有谐波时频率测量或频率变化率测量的准确度。

5.11 电压突变（相位偏移和幅值变化）时的稳定性

对于低频保护、过频保护和频率变化率保护，制造商应申明，当频率不变、电压变化（相位偏移或幅值变化）时，启动信号是否稳定（无误动）。

应按照6.7中所述的试验程序检验电压相位偏移和幅值变化的影响。

这些试验基于两个典型场景：

- 6.7.2规定的试验，电压相位偏移和幅值变化，模拟故障发生、故障清除过程；
- 6.7.3规定的试验，电压幅值降至零随即恢复，模拟近区故障时的电压变化。

如果保护功能不能保持稳定（即输出了启动信号），制造商应申明能够确保动作信号不误动所需的最小时间定值。

5.12 电压输入要求

如果使用电压互感器，制造商应对照IEC 61869（所有部分）申明所要求的电压互感器类型，以确保频率保护的性能。

如果直接接入低电压信号，应根据5.2中规定的有效范围和工作范围来确定其额定电压。

6 功能试验方法

6.1 概述

第6章详细说明了为验证第5章所述频率保护功能准确度和性能规范所要进行的试验项目。这些试验项目不适用于保护继电器现场调试或例行试验，现场调试或例行试验应参照制造商的说明书进行，尽管本文件所述的几种试验方法和性能要求也适用于现场调试或者维护试验。

如第5章所述，这些试验项目是保护功能型式试验中的强制项目。制造商应在其文档中详细说明试验条件和试验结果发布方式。这将有助于将用户的技术要求与制造商文档中提供的保护功能规范相对照。

设置这些试验项目是为了检验频率保护功能硬件和软件（如适用）的所有方面。电压（或电流）信号应在保护装置接口处注入，可以从连接常规电压互感器的输入端子处注入，或以等效数字信号的形式、采用适当的通信协议从通信端口输入。同样，应尽可能地在输出触点上或适当接口处的等效数字信号上监视输出信号。

对于与时间性能相关的试验，制造商应申明通过监视哪一个输出来确定启动时间和动作时间，例如跳闸输出触点、固态输出或符合IEC 61850协议的GOOSE信息。如果保护装置能同时提供不同类型的输出介质，则制造商应说明输出类型给时间性能带来的影响。

对于以一次值表示部分定值或所有定值的保护装置，应选定电压互感器的一个变比进行试验（如适用）。

为了确定稳态条件下频率保护的准确度，应注入幅值为额定值、波形为正弦波的电压量，其频率应根据试验要求而变化。在状态转换过程中，除另有规定外，注入信号应是连续的，除频率外其相位或幅值不得有阶跃变化。允许调整电压幅值，使其保持在与额定磁通值（V/Hz）水平相对应的电压输入耐受要求范围内。如果频率保护基于相电流输入，则应遵循相同的试验方法，并且应在型式试验报告中充分描述试验条件。

第6章中，有几项功能试验是采用频率变化率为恒定值的波形信号。规范性附录A中规定了这些试验波形的表达式。当试验信号基于COMTRADE文件（或其他二进制格式的试验文件）并使用试验设备回放时，试验波形的采样频率至少应为4 800 Hz³⁾。根据试验信号的频率含量，采样频率应符合奈奎斯特标准。

选择采样频率4 800 Hz³⁾，是基于数字接口互感器（IEC 61869-9）的推荐采样频率。根据IEC 61869-9:2016中的表902，对原有旧设备，其采样频率仍可使用4 000 Hz³⁾。

在6.1到6.7中，要使用的试验定值表示为可用定值范围的百分比。

对于低频/过频保护，可用定值范围的下限、上限可能与标称值有显著差异。为了限制试验定值点的数量并集中于典型定值，应将试验的定值范围定义为从频率标称值到可用定值范围上限（带百分比正值）或可用定值范围下限（带百分比负值）。可使用以下公式计算实际使用的定值：

对于用百分比正值定义的试验定值点：

$$G_s = (f_{min} - f_R) \times X + f_R$$

对于用百分比负值定义的试验定值点：

$$G_s = (f_R - f_{min}) \times X + f_R$$

式中：

G_s ——定值，实际试验值可根据频率保护的定值步长四舍五入；

f_{max} ——最大可用定值；

f_{min} ——最小可用定值；

f_R ——标称频率（例如，50 Hz、60 Hz）；

X ——试验方法中规定的试验定值点百分数（参见表4、9、13、14、27）。

例如，根据表4中规定的频率定值点，假设可用定值范围为40 Hz至70 Hz（可用定值范围不依赖于标称频率 f_R ），实际使用的频率定值应为（可根据定值步长四舍五入）：

——标称频率 50 Hz 下：40 Hz、49 Hz、49.5 Hz、49.75 Hz、49.9 Hz、50 Hz、50.2 Hz、50.5 Hz、51 Hz、52 Hz、70 Hz；

——标称频率 60 Hz 下：40 Hz、58 Hz、59 Hz、59.5 Hz、59.8 Hz、60 Hz、60.1 Hz、60.25 Hz、60.5 Hz、61 Hz、70 Hz。

对于频率变化率保护，可用以下公式计算实际使用的定值：

$$G_s = (G_{s_{max}} - G_{s_{min}}) \times X + G_{s_{min}}$$

3) 采标注：对 50 Hz 系统，采样频率可选 4 000 Hz。

式中：

G_s ——定值，实际试验值可根据频率保护的定值步长进行四舍五入；

G_{s_max} ——最大可用定值；

G_{s_min} ——最小可用定值；

X ——试验方法中规定的试验定值点百分数（参见表7、11、16、24、28）。

例如，根据表7中规定的频率变化率保护定值点，假设可用定值范围为0.1 Hz/s至10 Hz/s，实际使用的频率变化率保护定值应为：0.1 Hz/s、0.595 Hz/s、1.09 Hz/s、3.07 Hz/s、6.04 Hz/s、10 Hz/s。可根据定值的设定步长四舍五入。

6.2 与特性量有关的稳态误差的测定

6.2.1 启动值的准确度

6.2.1.1 低频保护、过频保护

6.2.1.1.1 频率缓变过程的生成

试验方法应基于频率伪连续缓变。

频率缓变从试验频率初值 $f_{initial}$ 开始。对于低频保护/过频保护，试验频率初值应高于/低于预期启动值 G_s 申明频率准确度的5倍以上（例如，对于过频保护，申明的启动值准确度为±10 mHz，试验频率初值不超过 $G_s - 0.05$ Hz）。

启动信号动作后，频率缓变过程可以终止。启动信号的动作应为“可靠动作”，也就是说，在该频率信号的注入过程中，启动信号不会发生高-低-高多次转换的抖动。启动信号中唯一允许的抖动来自输出触点，其合理的抖动时间小于4 ms。如果启动信号抖动时间超过4 ms，则不认为是真正启动，应继续进行下一步频率缓变过程。对于其他输出介质，如IEC 61850 GOOSE信息或固态输出，在启动信号的转换过程中不出现任何抖动时，才被视为有效。

适用于过频保护的试验方法如图7所示。

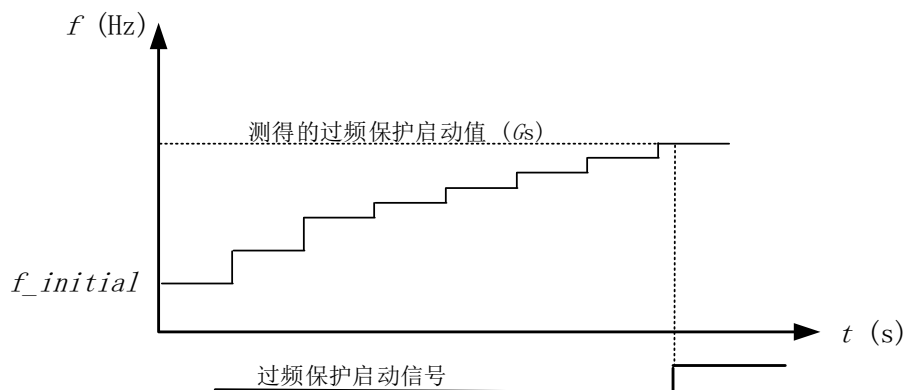


图7 过频保护试验方法示例

缓变过程每一步的持续时间：500 ms或者最大启动时间的5倍，取其中的较大者。

如果采用频率跟踪技术，在此时间内通常足以完成频率调整。

在频率按步长变化的转换过程中，注入信号应是连续的。除频率外，其相位或幅值不得有阶跃变化。

为了缩短试验时间，试验刚开始时频率的变化步长可以更大一些，规则如下：

——对于过频保护，大步长可以持续到 G_s 减去“申明的频率准确度”的3倍；

——对于低频保护，大步长可以持续到 G_s 加上“申明的频率准确度”的3倍。

“申明的频率准确度”基于5.3中规定的要求。

一旦达到上述值，频率的变化步长将小于或等于所申明频率准确度的10%，直到启动信号动作、频率缓变过程结束。

6.2.1.1.2 保护功能定值

启动频率定值应在表4所示的定值范围内改变。

如果某些保护功能设置了频率测量时间窗长度定值，则该定值应为默认值，除非制造商对频率测量时间窗长度定值与频率定值 (G_s) 的对应关系有特殊建议。在这种情况下，应遵从制造商的建议。

6.2.1.1.3 频率准确度试验点及频率准确度计算

即便可用定值范围独立于标称频率（通常为50 Hz或60 Hz），也应根据表4中定义的试验定值点和6.1中定义的规则，在保护功能的每个标称频率下对其进行试验。

测量以下试验点（见表4）的启动频率。每个试验点重复试验5次，试验结果按表4的格式报告。

所有试验均在额定电压下进行。此外，第一个试验定值点（-100%，最小定值）和最后一个试验定值点（+100%，最大定值）在电压有效范围的上限和下限下重复一次。电压有效范围的上限和下限下的试验结果必须同额定电压下其他试验点的试验结果一样记录在案。

对于每个试验点，测得的启动频率应在规定的准确度范围内。针对每个测量值，可接受的值按照下面描述的方式计算。

保护功能的启动应发生在预期启动值 (G_s) 附近的误差区间内。误差区间边界如下：

- 可接受的上限值 = (G_s +申明的频率准确度)；
- 可接受的下限值 = (G_s -申明的频率准确度)。

表4 低频/过频保护试验点

试验定值点 X^a	频率定值 (启动门槛, G_s) ^a (Hz)	电压幅值 ^c	第1次 试验结果 (Hz)	第2次 试验结果 (Hz)	第3次 试验结果 (Hz)	第4次 试验结果 (Hz)	第5次 试验结果 (Hz)	验收准则 (Hz)
-100 % (最小定值)		U_{Min}						$G_s \pm f_accuracy$
-100 %		U_{Max}						$G_s \pm f_accuracy^{4)}$
-100 %		U_n						$G_s \pm f_accuracy^{4)}$
-10 %		U_n						$G_s \pm f_accuracy$
-5 %		U_n						$G_s \pm f_accuracy$
-2.5 %		U_n						$G_s \pm f_accuracy$
-1 %		U_n						$G_s \pm f_accuracy$
0 % ($f_R=50$ Hz, 60 Hz) ^b		U_n						$G_s \pm f_accuracy$
+1 %		U_n						$G_s \pm f_accuracy$
+2.5 %		U_n						$G_s \pm f_accuracy$

4) 采标注：“ $G_s \pm f_accuracy$ ”，原文误为“ $G_s \pm f'_accuracy$ ”。

表4 低频/过频保护试验点（续）

试验定值点 X^a	频率定值 (启动门槛, G_s) ^a (Hz)	电压幅值 ^c	第1次 试验结果 (Hz)	第2次 试验结果 (Hz)	第3次 试验结果 (Hz)	第4次 试验结果 (Hz)	第5次 试验结果 (Hz)	验收准则 (Hz)
+5 %		U_n						$G_s \pm f_accuracy$
+10 %		U_n						$G_s \pm f_accuracy$
+100 %		U_n						$G_s \pm f_accuracy^{d1}$
+100 %		U_{Min}						$G_s \pm f_accuracy^{d1}$
+100 % (最大定值)		U_{Max}						$G_s \pm f_accuracy$

^a 根据 6.1 中规定的通用规则, 试验定值点用百分数 (%) 表示, 以计算频率定值 (门槛 G_s)。低频/过频保护的定值范围可以用低于或高于标称频率的数值来定义。定义的试验定值点涵盖所有可能的定值范围。

^b 如果等于标称频率的定值不可用, 则可以忽略该试验点。

^c U_n 是额定电压, U_{Min} 和 U_{Max} 是申明的电压有效范围的下限和上限。

6.2.1.1.4 频率准确度报告

频率准确度以测得的误差来表示, 如表5所示, 给出的值仅为示例。

表5 频率准确度报告

过频保护	
频率准确度	± 10.0 mHz

或者, 制造商可以选择使用两个值中的较大者来表示准确度, 如表6所示。

表6 频率准确度报告 (备选方案)

过频保护	
频率准确度	± 10.0 mHz 或 $\pm 0.01\%G_s$, 以较大者为准

6.2.1.2 频率变化率保护

6.2.1.2.1 频率缓变过程的生成

频率变化率保护定值 (G_s) 的准确度通过一系列频率缓变过程进行评估。根据频率变化的符号 (“+” 或 “-”), 频率从标称值开始升高或降低。试验方法如图8所示, 该图适用于正向频率变化率保护。

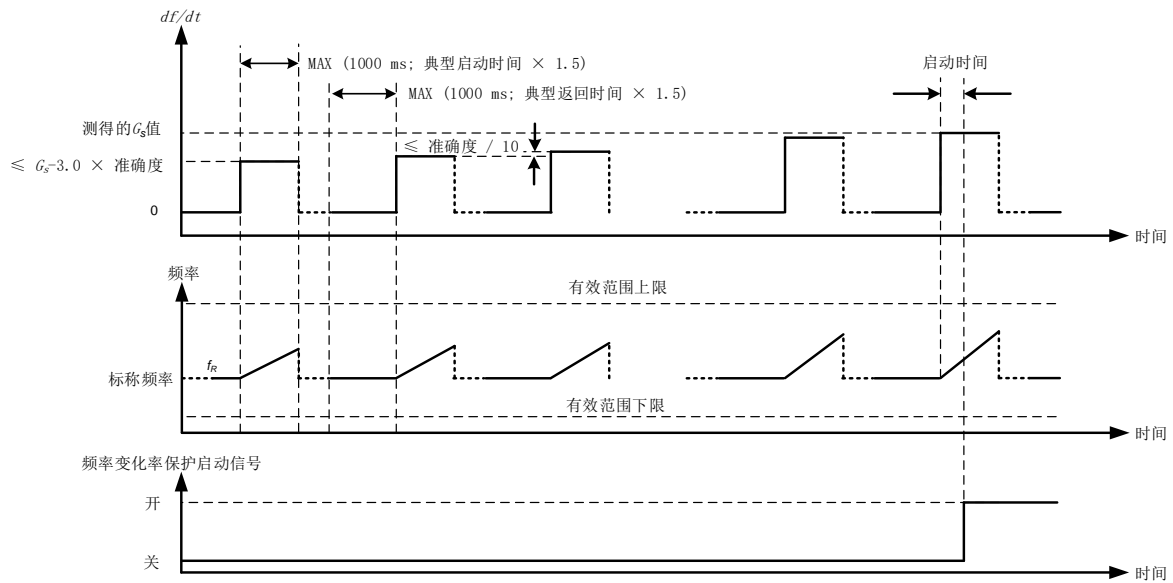


图8 正向频率变化率保护试验方法示例⁵⁾

频率缓变过程从标称频率 f_R 开始，并在保护功能启动信号动作后终止，或保护功能启动信号虽未动作而持续时间已到而终止。判断保护是否启动的注入信号频率缓变过程持续时间为：

$$\text{MAX} (1\ 000\ \text{ms}; \text{典型启动时间} \times 1.5)$$

如果针对频率变化率保护申明了频率有效范围，则注入信号的频率应始终保持在有效范围内。在这种情况下，可能需要限制频率缓变过程的持续时间。如果所要求的频率缓变过程持续时间短于频率变化率保护的最大启动时间，则无法在标准化试验条件下检验该启动定值。在这种情况下，制造商应申明此信息，并应申明用于检验这些启动定值准确度的适当的试验方法。

第一个频率缓变过程，频率变化率远低于保护定值 G_s 。

如果保护没有在上一阶段频率缓变过程持续时间内启动，下一阶段注入信号频率缓变过程将采用一个新的频率变化率，频率始终起始于标称频率。在每阶段频率缓变过程开始之前，频率应保持在标称值，持续时间至少为：

$$\text{MAX} (1\ 000\ \text{ms}; \text{典型返回时间} \times 1.5)$$

然后，频率以线性方式从其标称值开始变化。在该变化过程中，注入信号应是连续的，除了频率外，其相位或幅值不得有阶跃变化。

每阶段频率缓变过程结束时，频率恢复到其标称值，为下一阶段频率缓变过程做好准备。本文件未对转换期间的注入信号做出规定。在此期间，任何启动信号或动作信号都应被忽略。

下一阶段频率缓变过程，频率变化率的变化步长小于等于：

$$(\text{频率变化率准确度}/10)\ \text{Hz/s}$$

当保护功能启动信号动作时，可以终止信号注入，测得的频率变化率为最后一阶段频率缓变过程的频率变化率。

启动信号的动作应为“可靠动作”，也就是说，在注入信号频率缓变过程中，启动信号不会发生高-低-高多次转换的抖动。启动信号中唯一允许的抖动来自输出触点，其合理的抖动时间小于4 ms。如果启动信号抖动时间超过4 ms，则不认为是真正启动，应继续进行下一阶段频率缓变过程。对于其他输出

5) 采标注：图中，“典型返回时间”，原文误为“典型复归时间”；右上角“启动时间”，原文误为“动作时间”。

介质，如IEC 61850 GOOSE信息或固态输出，在启动信号的转换过程中不应出现任何抖动，才被视为有效。

规范性附录A规定了频率变化率为恒定值的试验信号的表达式。

为了缩短试验时间，试验刚开始时频率变化率的变化步长可以更大一些，规则如下⁶⁾：

——对于正向频率变化率保护，大步长可以持续到 G_s 减去“申明的频率变化率准确度”的3倍；

——对于负向频率变化率保护，大步长可以持续到 G_s 加上“申明的频率变化率准确度”的3倍。

“申明的频率变化率准确度”基于5.3中规定的要求。

一旦达到上述值，频率变化率的变化步长将小于或等于所申明频率变化率准确度的10%，直到启动信号动作、频率缓变过程结束。

6.2.1.2.2 保护功能定值

频率变化率保护启动定值应在表7所示的定值范围内改变。

如果某些保护功能设置了频率变化率测量时间窗长度定值，则该定值应为默认值，除非制造商对频率变化率测量时间窗长度定值与频率变化率定值(G_s)的对应关系有特殊建议。在这种情况下，应遵从制造商的建议。

6.2.1.2.3 频率变化率准确度试验点及频率变化率准确度计算

在保护功能的每个标称频率（通常为50 Hz或60 Hz）下对其进行试验。

测量以下试验点（见表7）的频率变化率准确度。每个试验点重复试验5次，试验结果按表7的格式报告。

所有试验均在额定电压下进行。此外，第一个试验定值点（0%，最小定值）和最后一个试验定值点（+100%，最大定值）在电压有效范围的上限和下限下重复一次。电压有效范围的上限和下限下的试验结果必须同额定电压下其他试验点的试验结果一样记录在案。

当保护功能是基于 df/dt 绝对值时，表7中规定的每一个试验点应分别在正的频率变化率和负的频率变化率下进行。

对于每个试验点，测得的频率变化率应在规定的准确度范围内。针对每个测量值，可接受的值按照下面描述的方式计算。

保护功能的启动应发生在预期启动值(G_s)附近的误差区间内。误差区间边界如下：

——可接受的上限值 = (G_s +申明的频率变化率准确度)；

——可接受的下限值 = (G_s -申明的频率变化率准确度)。

表7 频率变化率保护试验点

试验定值点 X^a	频率变化率定值 (启动门槛, G_s) ^a (Hz/s)	电压幅值 ^b	第1次 试验结果 (Hz/s)	第2次 试验结果 (Hz/s)	第3次 试验结果 (Hz/s)	第4次 试验结果 (Hz/s)	第5次 试验结果 (Hz/s)	验收准则 Hz/s
0 % (最小定值)		U_{Min}						$G_s \pm f'_{accuracy}$
0 %		U_{Max}						$G_s \pm f'_{accuracy}$
0 %		U_n						$G_s \pm f'_{accuracy}$
+5 %		U_n						$G_s \pm f'_{accuracy}$

6) 采标注：“正向频率变化率保护”，原文误为“过频保护”；“负向频率变化率保护”，原文误为“低频保护”；“频率变化率准确度”，原文误为“频率准确度”。

表 7 频率变化率保护试验点（续）

试验定值点 X^a	频率变化率定值 (启动门槛, G_s) ^a (Hz/s)	电压幅值 ^b	第 1 次 试验结果 (Hz/s)	第 2 次 试验结果 (Hz/s)	第 3 次 试验结果 (Hz/s)	第 4 次 试验结果 (Hz/s)	第 5 次 试验结果 (Hz/s)	验收准则 Hz/s
+10 %		U_n						$G_s \pm f'_{accuracy}$
+30 %		U_n						$G_s \pm f'_{accuracy}$
+60 %		U_n						$G_s \pm f'_{accuracy}$
+100 %		U_n						$G_s \pm f'_{accuracy}$
+100 %		U_{Min}						$G_s \pm f'_{accuracy}$
+100 % (最大定值)		U_{Max}						$G_s \pm f'_{accuracy}$

^a 根据 6.1 中规定的通用规则, 试验定值点用百分数 (%) 表示, 以计算频率变化率定值 (门槛 G_s)。
^b U_n 是额定电压, U_{Min} 和 U_{Max} 是申明的电压有效范围的下限和上限。

6.2.1.2.4 频率变化率准确度报告

频率变化率准确度以测得的误差来表示, 如表8所示, 给出的值仅为示例。

表8 频率变化率准确度报告

频率变化率保护	
频率变化率准确度	$\pm 5 \% G_s$ 或 $\pm 15 \text{ mHz/s}$, 以较大者为准。

6.2.2 复归回差或复归系数的测定

6.2.2.1 低频保护、过频保护

6.2.2.1.1 试验方法

低频/过频保护复归回差的评估试验基于两阶段伪连续频率缓变过程, 该过程由受到监视的保护功能启动信号状态来驱动。

第一阶段频率缓变过程 (对过频保护频率升高, 对低频保护频率降低) 将从标称频率值 (或保证保护可靠不启动的任何频率, 以减少试验时间) 开始; 监视保护功能的启动信号。当保护功能启动信号动作时:

- 当前注入信号的频率值记为“启动频率值”;
- 启动第二阶段频率缓变过程 (对过频保护频率降低, 对低频保护频率升高)。

第二阶段频率缓变过程从记录的“启动频率值”开始, 并在保护功能启动信号复位时停止。此时, 注入信号的频率值记为“复归频率值”。

启动信号的动作应为“可靠动作”, 也就是说, 在该频率信号的注入过程中, 启动信号不会发生高-低-高多次转换的抖动。启动信号中唯一允许的抖动来自输出触点, 其合理的抖动时间小于 4 ms。如果启动信号抖动时间超过 4 ms, 则不认为是真正启动, 应继续进行下一步频率缓变过程。对于其他输出介质, 如 IEC 61850 GOOSE 信息或固态输出, 在启动信号的转换过程中不应出现任何抖动, 才被视为有效。

对于启动信号从高-低的转换过程, 无论是哪种输出介质, 信号的高-低转换过程中都不应出现任何抖动, 才被视为有效。

复归回差通过“启动频率值”和“复归频率值”计算得出, 详见 6.2.2.1.1 后续段落。

关于确定复归回差的两阶段频率缓变过程的原理, 见图9和图10。

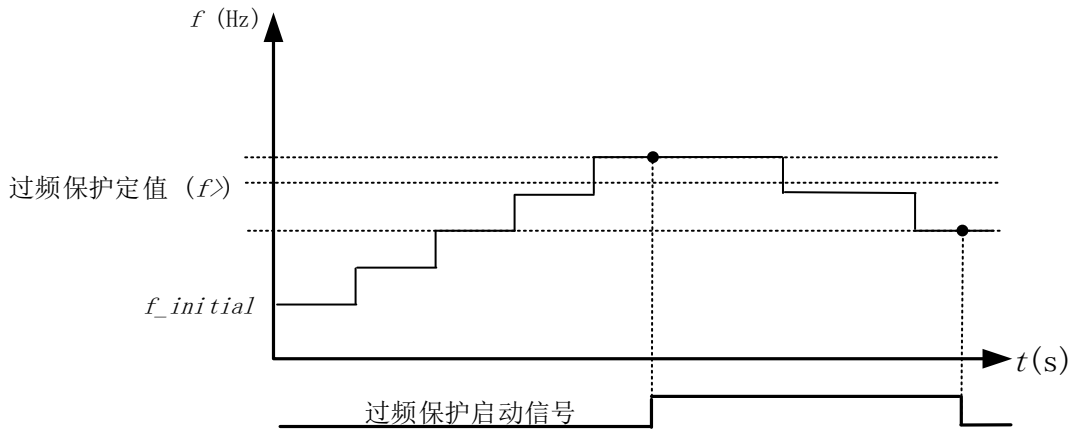


图9 评估过频保护复归回差的频率缓变过程

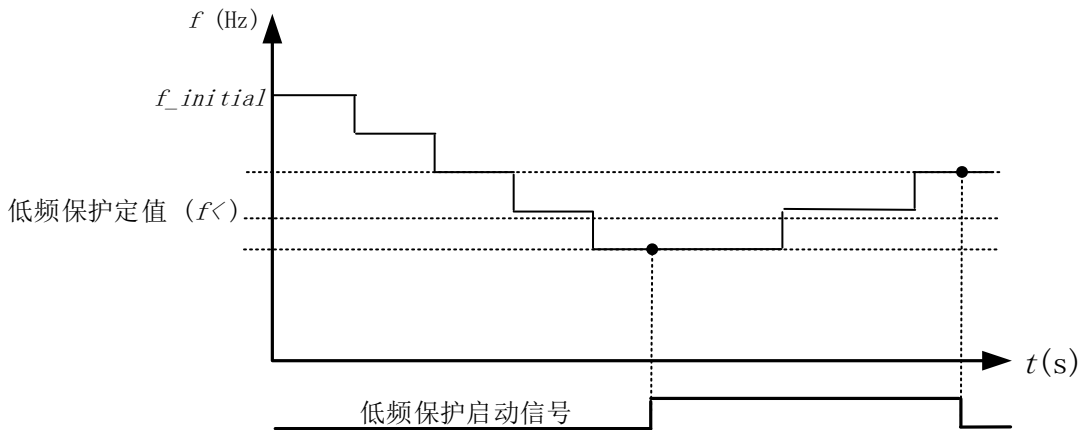


图10 评估低频保护复归回差的频率缓变过程

第一阶段频率缓变过程中, 每一步的持续时间: $\text{MAX}(500 \text{ ms}; \text{最大启动时间} \times 5)$ 。

如果采用频率跟踪技术, 则此时间通常足以完成频率调整。

在频率按步长变化的转换过程中, 注入信号应是连续的。除频率外, 其相位或幅值不得有阶跃变化。

为了缩短试验时间, 试验刚开始时频率的变化步长可以更大一些, 规则如下:

——对于过频保护, 大步长可以持续到 G_S 减去“声明的频率准确度”的3倍;

——对于低频保护, 大步长可以持续到 G_S 加上“声明的频率准确度”的3倍。

G_S 是试验时的频率定值, 在图9中标为“ $f >$ ”, 在图10中标为“ $f <$ ”。“声明的频率准确度”基于5.3中规定的要求。

一旦达到上述值, 频率的变化步长将小于或等于所声明频率准确度的10%, 直到启动信号动作从而得到“启动频率值”并启动第二阶段频率缓变过程。

第二阶段频率缓变过程中, 每一步的持续时间为:

$\text{MAX}(500 \text{ ms}; \text{预期返回时间} \times 5)$ 。

在相邻频率跃变之间的转换过程中, 注入信号应是连续的, 除了频率外, 其相位或幅值不得有阶跃变化。

第二阶段频率缓变过程中，频率的变化步长等于第一阶段频率缓变过程中最后一步的变化步长（紧接保护启动之前）。

继续进行第二阶段频率缓变过程，直到保护功能启动信号复位，记录“复归频率值”，并计算复归回差。

6.2.2.1.2 保护功能定值

启动频率定值应在表9所示的定值范围内改变。

如果某些保护功能设置了频率测量时间窗长度定值，则该定值应为默认值，除非制造商对频率测量时间窗长度定值与频率定值（ G_S ）的对应关系有特殊建议。在这种情况下，应遵从制造商的建议。

6.2.2.1.3 复归回差试验点及复归回差计算

按照表9规定的低频/过频保护试验点，测量频率复归回差。

所有试验均在额定电压下进行。此外，第一个试验定值点（-100%，最小定值）和最后一个试验定值点（+100%，最大定值）在电压有效范围的上限和下限下重复一次。电压有效范围的上限和下限下的试验结果必须同额定电压下其他试验点的试验结果一样记录在案。

每个试验点重复试验5次，试验结果按表9的格式报告。

测得的复归回差按以下方式计算：

- 对于过频保护，复归回差=启动频率值-复归频率值；
- 对于低频保护，复归回差=复归频率值-启动频率值。

对于所有试验，测得的复归回差应不高于申明的复归回差。

表9 低频/过频保护复归回差试验点

试验定值点 X^a	频率定值 (启动门槛, G_S) ^a (Hz)	电压幅值 ^c	第1次 试验结果 (Hz)	第2次 试验结果 (Hz)	第3次 试验结果 (Hz)	第4次 试验结果 (Hz)	第5次 试验结果 (Hz)	验收准则 (Hz)
-100 % (最小定值)		U_{Min}						≤复归回差
-100 %		U_{Max}						≤复归回差
-100 %		U_n						≤复归回差
-10 %		U_n						≤复归回差
-5 %		U_n						≤复归回差
-2.5 %		U_n						≤复归回差
-1 %		U_n						≤复归回差
0 % ($f_R=50$ Hz, 60 Hz) ^b		U_n						≤复归回差
+1 %		U_n						≤复归回差
+2.5 %		U_n						≤复归回差
+5 %		U_n						≤复归回差
+10 %		U_n						≤复归回差
+100 %		U_n						≤复归回差
+100 %		U_{Min}						≤复归回差
+100 % (最大定值)		U_{Max}						≤复归回差

^a 根据 6.1 中规定的通用规则，试验定值点用百分数 (%) 表示，以计算频率定值 (门槛 G_S)。

^b 如果等于标称频率的定值不可用，则可以忽略该试验点。

^c U_n 是额定电压， U_{Min} 和 U_{Max} 是申明的电压有效范围的下限和上限。

6.2.2.1.4 复回归差报告

过频/低频保护的复回归差以mHz为单位来表示，如表10所示，给出的值仅为示例。

表10 过频/低频保护复回归差报告

过频（低频）保护复回归差	
复回归差	5.0 mHz

6.2.2.2 频率变化率保护

6.2.2.2.1 试验方法

频率变化率保护的复归值基于一系列的频率缓变过程来进行评估，该过程由受到监视的保护功能启动信号状态来驱动。

试验按照以下程序进行。

- df/dt 的启动值（与保护功能定值 G_S 相关， G_S 也记为 $df/dt_setting$ ）通过一系列具有正的变化率（指对正向频率变化率保护而言，对负向频率变化率保护则为负的变化率）的频率缓变过程来测定。测得的启动值记为 df/dt_start 。参见图 11（a）中的过程 S_1, S_2, \dots, S_{m-1} 和 S_m ，在过程 S_m 检测到启动信号动作，显示为正误差。
- 输入频率变化率为 $1.2 \times df/dt_start$ 的信号，保证启动信号动作。
在该频率缓变过程终了时，降低频率变化率（ df/dt_1 ，如图 11（b）中过程 R1 所示）。在该过程中，保护功能可能会复归，也可能不会：
 - 如果保护功能未复归，则重新输入频率变化率为 $1.2 \times df/dt_start$ 的信号，随后进一步降低频率变化率（ df/dt_2 ，如图 11（b）中过程 R2 所示）；
 - 这一过程一直持续到保护功能复归，复归时的频率变化率记为 df/dt_reset 。参见图 11(b) 中的过程 R_1, R_2, \dots, R_{n-1} 和 R_n 。若复归值出现正误差时，可能会在过程 R_{n-1} 中检测到复归信号动作；若复归值出现负误差时，可能会在过程 R_n 中检测到复归信号动作。当监测到保护功能复归时，可计算复归系数。
- 复归系数根据 df/dt_start 和 df/dt_reset 计算。

注：根据声明的启动值准确度，如果 $1.2 \times df/dt_start$ 的频率变化率不足以保证可靠启动，则频率变化率可固定为 $(1 + 2 \times \varepsilon) \times df/dt_start$ ，其中 ε 为声明的启动值准确度。此特定试验条件可用于较低的门槛值，此时声明的启动值准确度可能接近或劣于20 %。

图11给出了频率变化率保护的试验方法。

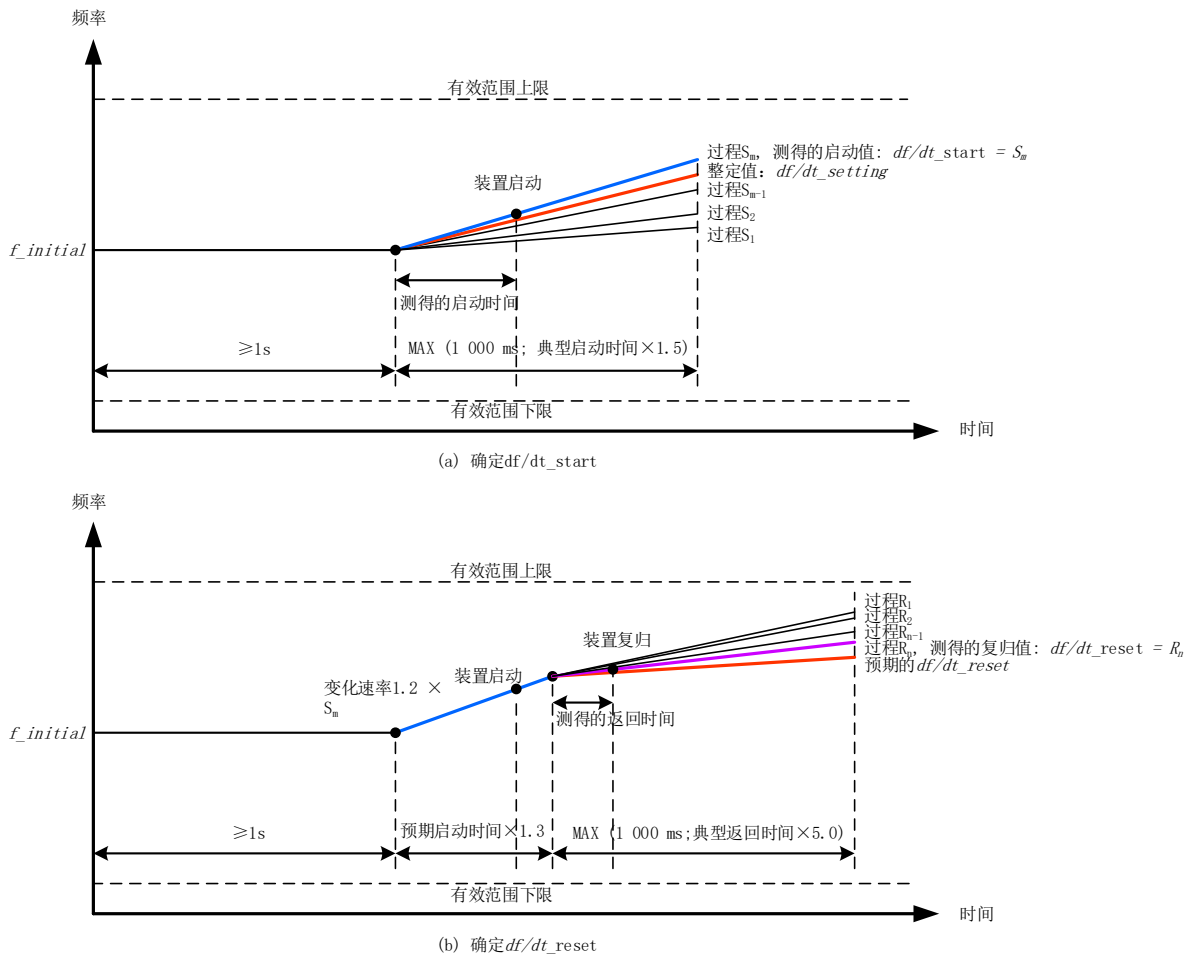


图11 频率变化率保护复归值的测定方法（以正向频率变化率保护为例）

确定 df/dt_{start} 的试验见图11（a）。

在保护功能的频率有效范围内，第一个频率缓变过程（对正向频率变化率保护采用正的变化率，对负向频率变化率保护采用负的变化率）从频率值 $f_{initial}$ 开始。

在每个频率缓变过程开始前，频率保持在 $f_{initial}$ 至少应持续1 s。如果1 s的持续时间不够，制造商应在型式试验报告中申明用于该试验的持续时间。

然后，频率离开初始值以线性方式改变。在该转换过程中，注入信号应是连续的，除了频率外，其相位或幅值不得有阶跃变化。

频率缓变过程的持续时间为：

$$\text{MAX} (1\ 000\ \text{ms}; \text{典型启动时间} \times 1.5)。$$

如果申明了频率变化率保护的频率有效范围，则注入信号的频率应始终保持在保护功能的有效范围内。在这种情况下，可能需要限制频率缓变过程持续时间。

试验频率初值 $f_{initial}$ 应等于标称频率。如果在试验期间，频率值有可能超过有效范围，则可以将试验频率初值 $f_{initial}$ 设定为申明的频率有效范围的下限或上限。应在型式试验报告中申明试验频率初值。

监视保护功能的启动信号，当启动信号动作时，相应的输入信号的频率变化率记为 df/dt_{start} 。

启动信号的动作应为“可靠动作”，也就是说，在注入信号频率缓变过程中，启动信号不会发生高-低-高多次转换的抖动。启动信号中唯一允许的抖动来自输出触点，其合理的抖动时间小于4 ms。如果启动信号抖动时间超过4 ms，则不认为是真正启动，应继续进行下一阶段频率缓变过程。对于其他输出介质，如IEC 61850 GOOSE信息或固态输出，在启动信号的转换过程中不应出现任何抖动，才被视为有效。

如果保护功能未启动，频率缓变过程将持续到其结束；然后，保持频率值在 $f_{initial}$ 至少持续1 s，按新的频率变化率重新开始一个新的过程。新的频率变化率增加值为：

(频率变化率准确度/10) Hz/s。

附录A定义了频率变化率为恒定值的试验信号的表达式。

为了缩短试验时间，试验刚开始时频率变化率的变化步长可以更大一些，规则如下⁷⁾：

——对于正向频率变化率保护，大步长可以持续到 G_5 减去“申明的频率变化率准确度”的3倍；

——对于负向频率变化率保护，大步长可以持续到 G_5 加上“申明的频率变化率准确度”的3倍。

“申明的频率变化率准确度”基于5.3中规定的要求。

一旦达到上述值，频率变化率的变化步长将小于或等于所申明频率变化率准确度的10%，直到启动信号动作、当前频率缓变过程结束。

此时，保护功能的启动值已确定并记为 df/dt_{start} ，即将启动确定复归值的频率缓变过程。

确定 df/dt_{reset} 的试验见图11 (b)。

频率缓变过程序列实际上由两个频率缓变过程组成：第一个频率缓变过程的变化率为 $1.2 \times df/dt_{start}$ ，第二个频率缓变过程的变化率为可变的。

第一个频率缓变过程，频率变化率为 $1.2 \times df/dt_{start}$ ，持续时间为：

预期启动时间 $\times 1.3$ 。

频率缓变过程从频率 $f_{initial}$ 开始，建议将该值设为频率有效范围的下限（对正向频率变化率保护）或者上限（对负向频率变化率保护）。

在每个频率缓变过程的开始前，频率保持在 $f_{initial}$ 至少应持续1 s。如果1 s的持续时间不够，制造商应在型式试验报告中申明用于该试验的持续时间。

然后，频率离开初始值以线性方式改变。在该转换过程中，注入信号应是连续的，除了频率外，其相位或幅值不得有阶跃变化。

当该频率缓变过程结束，新的频率缓变过程开始。第一个过程和第二个过程之间的转换应是“平滑的”。也就是说，注入信号应是连续的，除了频率外，其相位或幅值不得有阶跃变化。

第二个频率缓变过程的持续时间为：

MAX (1 000 ms; 预期返回时间 $\times 5$)。

频率变化率为：

$$df/dt = (df/dt_{previous}) - (\text{频率变化率准确度}/10)\text{Hz/s}$$

其中， $df/dt_{previous}$ 为：

—— df/dt_{start} ，如果该频率缓变过程是确定复归值 df/dt_{reset} 过程序列中的第一个（过程 R_1 ）；

——前一个频率缓变过程的频率变化率，如果该频率缓变过程不是确定复归值 df/dt_{reset} 过程序列中的第一个（过程 R_2, R_3, \dots ）。

如果在第二个频率缓变过程中，频率变化率保护未复归，则在本过程序列终了时启动新的过程序列。频率保持在 $f_{initial}$ 至少应持续1 s，然后是第一个频率缓变过程以保证保护功能启动，接着是采用新的变化率的第二个频率缓变过程。如果保护功能复归，则相应的频率变化率记为 df/dt_{reset} 。

7) 采标注：“正向频率变化率保护”，原文误为“过频保护”；“负向频率变化率保护”，原文误为“低频保护”；“频率变化率准确度”，原文误为“频率准确度”。

启动信号的输出介质无论是触点、IEC 61850 GOOSE信息还是固态输出，只有不出现任何抖动，才认为其可靠复归。

复归系数按以下公式计算：

$$\text{复归系数} = \frac{df/dt_{reset}}{df/dt_{start}} \times 100\%$$

如果申明了最小复归回差，则复归回差用以下公式计算：

$$\text{复归回差} = df/dt_{start} - df/dt_{reset}$$

6.2.2.2.2 保护功能定值

频率变化率保护启动定值应在表11所示的定值范围内改变。

如果某些保护功能设置了频率测量时间窗长度定值，则该定值应为默认值，除非制造商对频率测量时间窗长度定值与频率变化率定值(G_s)的对应关系有特殊建议。在这种情况下，应遵从制造商的建议。

6.2.2.2.3 复归值试验点及复归值验证

按照表11规定的试验点，测量复归值。

所有试验均在额定电压下进行。此外，第一个试验定值点（0 %，最小定值）和最后一个试验定值点（+100 %，最大定值）在电压有效范围的上限和下限下重复一次。电压有效范围的上限和下限下的试验结果必须同额定电压下其他试验点的试验结果一样记录在案。

每个试验点重复试验5次，5次试验的结果均应不高于申明的复归值。

表11 频率变化率保护复归值试验点

试验定值点 X^a	频率变化率定值 (启动门槛, G_s) ^a (Hz/s)	电压幅值 ^b	第1次 试验结果 (Hz/s)	第2次 试验结果 (Hz/s)	第3次 试验结果 (Hz/s)	第4次 试验结果 (Hz/s)	第5次 试验结果 (Hz/s)	验收准则
0 % (最小定值)		U_{Min}						≤复归系数 (或 复归回差)
0 %		U_{Max}						≤复归系数 (或 复归回差)
0 %		U_n						≤复归系数 (或 复归回差)
+5 %		U_n						≤复归系数 (或 复归回差)
+10 %		U_n						≤复归系数 (或 复归回差)
+30 %		U_n						≤复归系数 (或 复归回差)
+60 %		U_n						≤复归系数 (或 复归回差)
+100 %		U_n						≤复归系数 (或 复归回差)
+100 %		U_{Min}						≤复归系数 (或 复归回差)
+100 % (最大定值)		U_{Max}						≤复归系数 (或 复归回差)

^a 根据 6.1 中规定的通用规则，试验定值点用百分数 (%) 表示，以计算频率变化率定值 (门槛 G_s)。

^b U_n 是额定电压， U_{Min} 和 U_{Max} 是申明的电压有效范围的下限和上限。

6.2.2.2.4 复归值报告

频率变化率保护的复归值由制造商报告，复归系数以百分数形式表示，附或者不附最小复归回差，如表12所示，给出的值仅为示例。

表12 频率变化率保护复归值报告

频率变化率保护复归值	
复归系数	98%
(备选表达方式) 复归系数附最小复归回差	98%或者 40 mHz/s

当复归系数与最小复归回差同时出现时，复归值取两个值中的较大者。最小复归回差主要适用于门槛值较低の場合。

6.3 启动时间的测定

6.3.1 概述

以下试验给出了评估保护功能响应电力系统电压量频率变化的性能的方法。

启动时间通过保护功能的启动信号测定。如果没有提供启动信号的特定输出，则使用时延设置为零（瞬时跳闸）的动作信号进行试验。

对于过频/低频保护，该性能集中展示在保护功能的启动时间图中。其中启动时间表示为接近并穿越保护定值（ $G_s = f >$ 或 $G_s = f <$ ）时电力系统频率变化速度（电力系统频率变化率）的函数。

试验应在恒定的频率变化率下进行，从初始时的标称频率值直到高于/低于定值。频率按规定的不同变化率而变化。这些试验代表了具有机电惯性的电力系统以一定速度改变频率的典型情况。

一种极端情形是“频率跃变”，它可能发生在主要由静态逆变器进行发电的环境中。在这种情形下，电力系统频率可以从初始的标称值突然变化到最终值，该最终值高于（或低于）过频保护（或低频保护）的定值。

对于频率变化率保护，该性能集中展示在保护功能的典型启动时间中。典型启动时间的评估应采用基于不同恒定频率变化率的试验方法，频率变化率应落在频率变化率保护特性的动作区内。

对于特性准确度试验（6.2），每个试验点通常重复试验5次。对于与启动时间相关的型式试验，每个试验点重复试验10次，以获得更准确的时间分布以及最小值和最大值。

6.3.2 低频保护、过频保护

6.3.2.1 波形的生成

基于频率突变的试验方法如图12所示（适用于过频保护）。

在频率突变的转换过程中，除频率外，注入的电压信号波形应无中断。该频率变化过程如附录E所示。

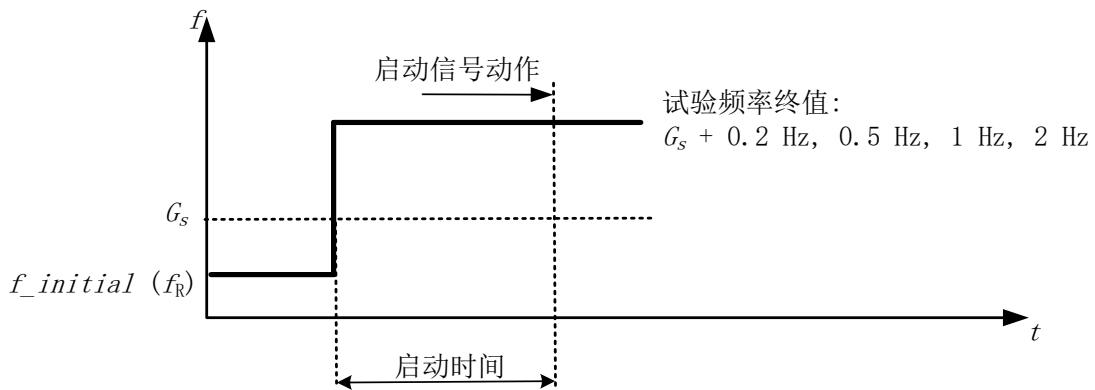


图12 频率突变时的过频保护启动时间测量

按照表13和表14中规定的试验点进行试验。这些试验点的频率变化率等于“无穷大”（突变）。

- 试验频率初值始终等于试验的标称频率；
- 试验频率终值等于定值 G_s 加上（对于过频保护）或减去（对于低频保护）不同的频率值（0.2 Hz, 0.5 Hz, 1 Hz 和 2 Hz），以测量在门槛值与频率值的不同比率之下的启动时间；
- 测得从频率变化时刻到启动信号动作时刻之间的时间为启动时间。

注入信号的频率应始终保持在保护功能的工作范围内。对于低频保护的较低定值或者过频保护的较高定值，试验频率终值可能超出工作范围。在这种情况下，不能用这种方法在该试验点下试验保护功能。制造商应在型式试验报告中申明此信息，并在申明的工作范围的上限/下限下进行试验。

基于恒定频率变化率的试验方法如图13所示（适用于过频保护）。

在频率变化的转换过程中，除频率外，注入的电压信号波形应无中断。该频率变化过程如附录E所示。

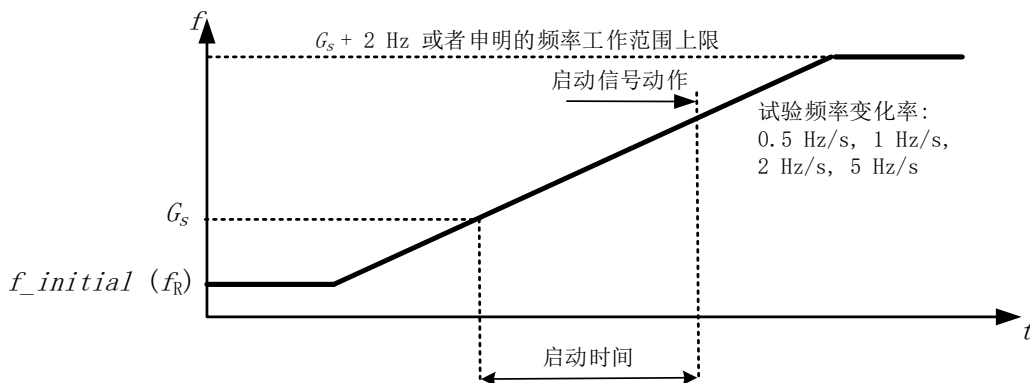


图13 频率按恒定变化率变化时的过频保护启动时间测量

按照表13和表14中规定的试验点进行试验。这些试验点的频率变化率为恒定值。

- 试验频率初值等于试验的标称频率。当可用定值范围较宽时，初始值可等于 $G_s + 0.5 \text{ Hz}$ 或 $G_s - 0.5 \text{ Hz}$ ，以加快低频/过频保护功能的试验。
- 频率按不同的变化率升高（对过频）或降低（对低频），以测量不同试验条件下的启动时间。
- 保护功能启动信号动作后，可以终止信号注入。在任何情况下，当频率高于 $G_s + 2 \text{ Hz}$ （对过频）或低于 $G_s - 2 \text{ Hz}$ （对低频）时，停止继续改变频率。
- 当注入试验信号的频率穿越启动定值（该点由附录 A 中分析公式给出的频率缓变过程精确定

义)时, 计时器启动开始测量启动时间, 当保护功能启动信号动作时计时器停止。

附录A定义了频率变化率为恒定值的试验信号的表达式。

如果申明了频率工作范围, 注入信号的频率应始终保持在保护功能的工作范围内。对于低频保护的较低定值或者过频保护的较高定值, 如果在启动信号动作前, 注入信号的频率已经超出规定的工作范围, 则无法根据标准化试验条件针对该定值进行功能试验。在这种情况下, 制造商应申明此信息, 并应申明用于测量这些定值下启动时间的适当的试验方法。

6.3.2.2 保护功能定值

启动频率定值应在表13和表14所示的定值范围内改变。

如果某些保护功能设置了频率测量时间窗长度定值, 则该定值应为默认值, 除非制造商对频率测量时间窗长度定值与频率定值 (G_S) 的对应关系有特殊建议。在这种情况下, 应遵从制造商的建议。

6.3.2.3 启动时间试验点及启动时间计算

应测量以下试验点 (见表13和表14) 下的启动时间。每个试验点应重复试验10次。

应针对保护功能的每个标称频率值 (通常为50 Hz和60 Hz) 进行试验。

表13 过频保护启动时间试验点

频率变化率	试验定值点 X^a	频率定值 (启动门槛, G_S) ^a (Hz)	试验频率初值	试验频率终值
无穷大 (突变)	1 %		申明的所有标称值 (f_R)	$G_S + 0.2$ Hz $G_S + 0.5$ Hz $G_S + 1$ Hz $G_S + 2$ Hz
	5 %			$G_S + 0.2$ Hz $G_S + 0.5$ Hz $G_S + 1$ Hz $G_S + 2$ Hz
	10 %			$G_S + 0.2$ Hz $G_S + 0.5$ Hz $G_S + 1$ Hz $G_S + 2$ Hz
	100 % (最大定值)			$G_S + 0.2$ Hz $G_S + 0.5$ Hz $G_S + 1$ Hz $G_S + 2$ Hz
0.5 Hz/s	1 %		申明的所有标称值 (f_R) 或者 $G_S - 0.5$ Hz	不适用 ($G_S + 2$ Hz可作为缓变过程频率终值)
	5 %			
	10 %			
	100 % (最大定值)			
1 Hz/s	1 %		申明的所有标称值 (f_R) 或者 $G_S - 0.5$ Hz	不适用 ($G_S + 2$ Hz可作为缓变过程终止频率值)
	5 %			
	10 %			
	100 % (最大定值)			
2 Hz/s	1 %		申明的所有标称值 (f_R) 或者 $G_S - 0.5$ Hz	不适用 ($G_S + 2$ Hz可作为缓变过程终止频率终值)
	5 %			
	10 %			
	100 % (最大定值)			

表 13 过频保护启动时间试验点（续）

频率变化率	试验定值点 X^a	频率定值 (启动门槛, G_S) ^a (Hz)	试验频率初值	试验频率终值
5 Hz/s	1 %		申明的所有标称值 (f_R) 或者 $G_S - 0.5$ Hz	不适用 ($G_S + 2$ Hz可作为缓变过程终止频率值)
	5 %			
	10 %			
	100 % (最大定值)			
^a 根据 6.1 中规定的通用规则, 试验定值点用百分数 (%) 表示, 以计算频率定值 (门槛 G_S)。				

表 14 低频保护启动时间试验点

频率变化率	试验定值点 X^a	频率定值 (启动门槛, G_S) ^a (Hz)	试验频率初值	试验频率终值
无穷大 (突变)	-1 %		申明的所有标称值 (f_R)	$G_S - 0.2$ Hz $G_S - 0.5$ Hz $G_S - 1$ Hz $G_S - 2$ Hz
	-5 %			$G_S - 0.2$ Hz $G_S - 0.5$ Hz $G_S - 1$ Hz $G_S - 2$ Hz
	-10 %			$G_S - 0.2$ Hz $G_S - 0.5$ Hz $G_S - 1$ Hz $G_S - 2$ Hz
	-100 % (最小定值)			$G_S - 0.2$ Hz $G_S - 0.5$ Hz $G_S - 1$ Hz $G_S - 2$ Hz
-0.5 Hz/s	-1 %		申明的所有标称值 (f_R) 或者 $G_S + 0.5$ Hz	不适用 ($G_S - 2$ Hz可作为缓变过程终止频率值)
	-5 %			
	-10 %			
	-100 % (最小定值)			
-1 Hz/s	-1 %		申明的所有标称值 (f_R) 或者 $G_S + 0.5$ Hz	不适用 ($G_S - 2$ Hz可作为缓变过程终止频率值)
	-5 %			
	-10 %			
	-100 % (最小定值)			
-2 Hz/s	-1 %		申明的所有标称值 (f_R) 或者 $G_S + 0.5$ Hz	不适用 ($G_S - 2$ Hz可作为缓变过程终止频率值)
	-5 %			
	-10 %			
	-100 % (最小定值)			
-5 Hz/s	-1 %		申明的所有标称值 (f_R) 或者 $G_S + 0.5$ Hz	不适用 ($G_S - 2$ Hz可作为缓变过程终止频率值)
	-5 %			
	-10 %			
	-100 % (最小定值)			
^a 根据 6.1 中规定的通用规则, 试验定值点用百分数 (%) 表示, 以计算频率定值 (门槛 G_S)。				

6.3.2.4 启动时间报告

试验结果以表格形式报告，如表15所示，其中计算出了最小值、平均值（均值）和最大值。此外，试验结果同时以图形形式报告，如图14所示。表15和图14所示的结果仅为示例。

表15 低频/过频保护功能启动时间报告

过频（或低频）保护启动时间				
标称频率 50 Hz				
频率变化率	频率跃变（突变）	最小启动时间	最大启动时间	平均启动时间
0.5 Hz/s	不适用	75 ms	85 ms	80 ms
1.0 Hz/s	不适用	70 ms	85 ms	81 ms
2.0 Hz/s	不适用	75 ms	90 ms	82 ms
5.0 Hz/s	不适用	78 ms	92 ms	85 ms
突变	0.2 Hz	180 ms	200 ms	190 ms
突变	0.5 Hz	170 ms	190 ms	180 ms
突变	1 Hz	150 ms	180 ms	170 ms
突变	2 Hz	140 ms	180 ms	165 ms

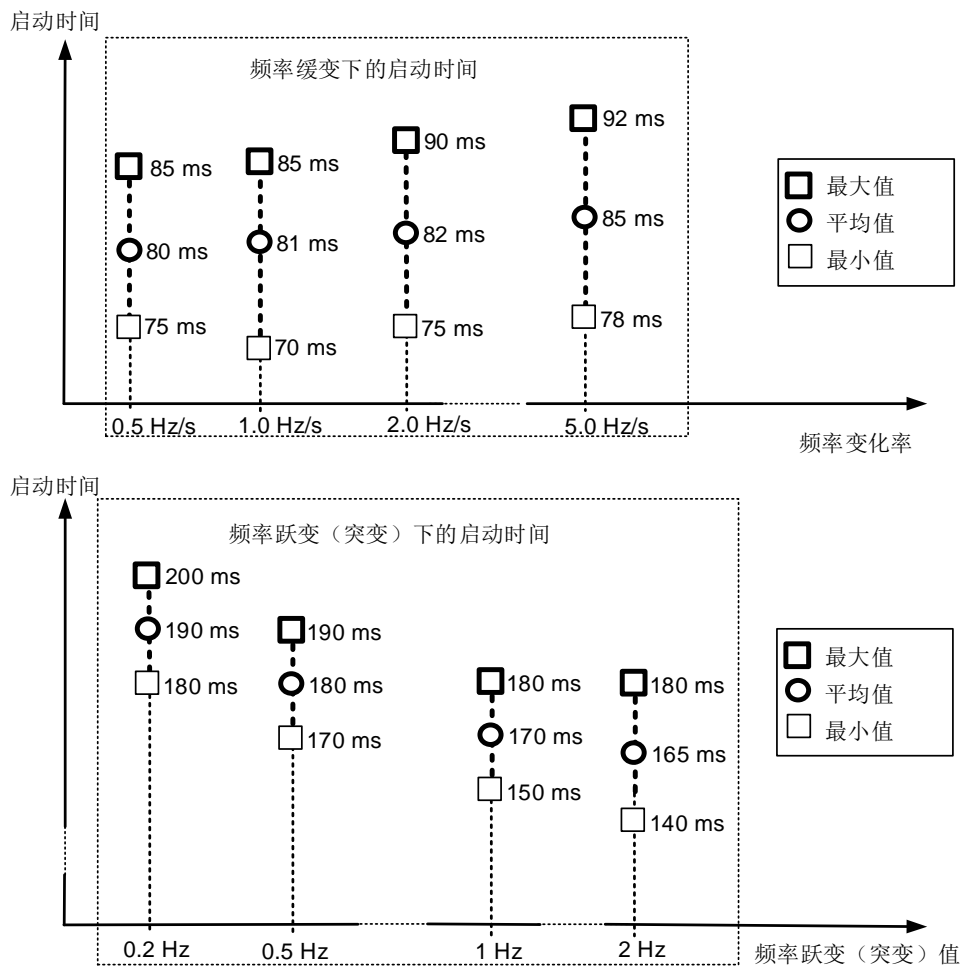


图14 低频/过频保护启动时间报告示例

6.3.3 频率变化率保护

6.3.3.1 波形的生成

使用基于恒定频率变化率的试验方法测量启动时间。该方法如图15所示（适用于正向频率变化率保护）。

在频率变化的转换过程中，除频率外，注入的电压信号波形应无中断。该频率变化过程如附录E所示。

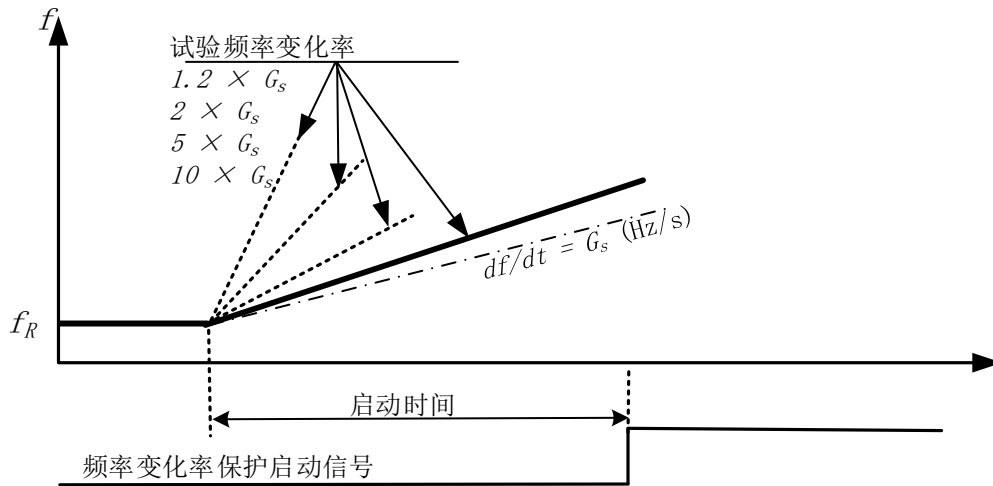


图15 正向频率变化率保护启动时间测定

每次试验由表16中规定的试验项目确定。

- 试验频率初值始终等于试验的标称频率；
- 频率按不同的变化率升高，以测量不同试验条件下的启动时间；
- 保护功能启动信号动作后，可以终止信号注入；
- 启动时间的计时从频率开始变化时算起，到保护功能启动信号动作时为止。

附录A规定了频率变化率为恒定值的试验信号的表达式。

如果申明了频率变化率保护的频率工作范围，则注入信号的频率应始终保持在保护功能的工作范围内。在这种情况下，可能需要限制频率缓变过程持续时间。对于较高的频率变化率定值，如果在启动信号动作前，注入信号的频率已经超出规定的工作范围，则无法根据标准化试验条件针对该定值进行功能试验。在这种情况下，制造商应申明此信息，并应申明用于测量这些定值下启动时间的适当试验方法。

6.3.3.2 保护功能定值

频率变化率保护启动定值应在表16所示的定值范围内改变。

如果某些保护功能设置了频率测量或者频率变化率测量时间窗长度定值，则该定值应为默认值，除非制造商对测量时间窗长度定值与频率变化率定值 (G_s) 的对应关系有特殊建议。在这种情况下，应遵从制造商的建议。

6.3.3.3 典型启动时间试验点及典型启动时间计算

计算表16所示试验点的启动时间。每个试验点应重复试验10次。

应针对保护功能的每个标称频率值（通常为50 Hz和60 Hz）进行试验。

表16 频率变化率保护启动时间试验点

试验定值点 X^a	频率变化率定值 (启动门槛, G_S) ^a (Hz/s)	频率变化率
0 % (最小定值)		$1.2 \times G_S$ (或者 $-1.2 \times G_S$) $2 \times G_S$ (或者 $-2 \times G_S$) $5 \times G_S$ (或者 $-5 \times G_S$) $10 \times G_S$ (或者 $-10 \times G_S$)
5 %		$1.2 \times G_S$ (或者 $-1.2 \times G_S$) $2 \times G_S$ (或者 $-2 \times G_S$) $5 \times G_S$ (或者 $-5 \times G_S$) $10 \times G_S$ (或者 $-10 \times G_S$)
10 %		$1.2 \times G_S$ (或者 $-1.2 \times G_S$) $2 \times G_S$ (或者 $-2 \times G_S$) $5 \times G_S$ (或者 $-5 \times G_S$)
30 %		$1.2 \times G_S$ (或者 $-1.2 \times G_S$) $2 \times G_S$ (或者 $-2 \times G_S$)
60 %		$1.2 \times G_S$ (或者 $-1.2 \times G_S$) $2 \times G_S$ (或者 $-2 \times G_S$)
100 % (最大定值)		$1.2 \times G_S$ (或者 $-1.2 \times G_S$) $2 \times G_S$ (或者 $-2 \times G_S$)

^a 根据 6.1 中规定的通用规则, 试验定值点用百分数 (%) 表示, 以计算频率变化率定值 (门槛 G_S)。

如果表16中某些试验点所要求的频率变化率超出制造商声明的工作范围 (见表3), 则应忽略这些特定的试验点, 其试验结果报告为“未试验-超出 df/dt 工作范围”, 并在声明的工作范围的上限/下限下进行试验。

6.3.3.4 典型启动时间报告

采用1 ms级 (分辨率) 的柱状图报告测得的170个启动时间。除柱状图之外, 还应以列表形式报告最小值、最大值和平均值 (均值), 如图16和表17所示。

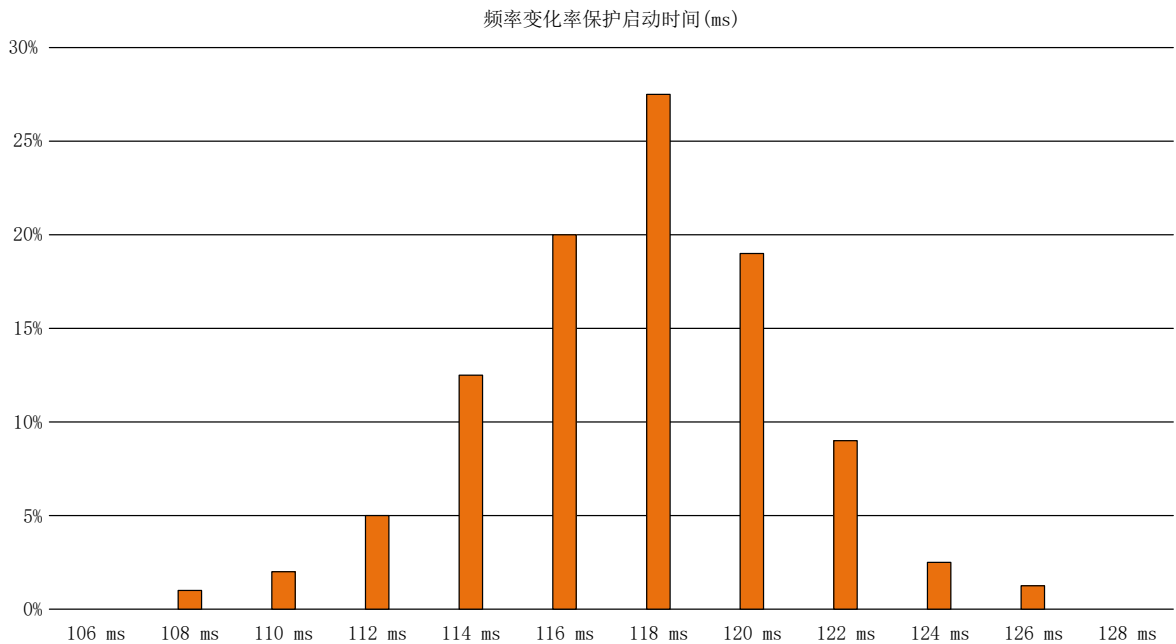


图16 频率变化率保护启动时间试验结果柱状图

表17 频率变化率保护典型启动时间报告

频率变化率保护典型启动时间	
最小值	108 ms
均值	118 ms
最大值	126 ms

6.4 动作时延准确度的测定

6.4.1 概述

动作时延定义为启动信号和动作（跳闸）信号的动作时间差。
此定义适用于低频/过频保护和频率变化率保护。

6.4.2 试验方法

试验方法应与启动时间测定试验相同：

- 对于低频/过频保护，采用频率突变的试验方法；
 - 对于频率变化率保护，采用频率按恒定变化率变化的试验方法。
- 这两种试验方法如图17所示（适用于过频保护和正向频率变化率保护）。

在频率变化的转换过程中，除频率外，注入的电压信号波形应无中断。该频率变化过程如附录E所示。

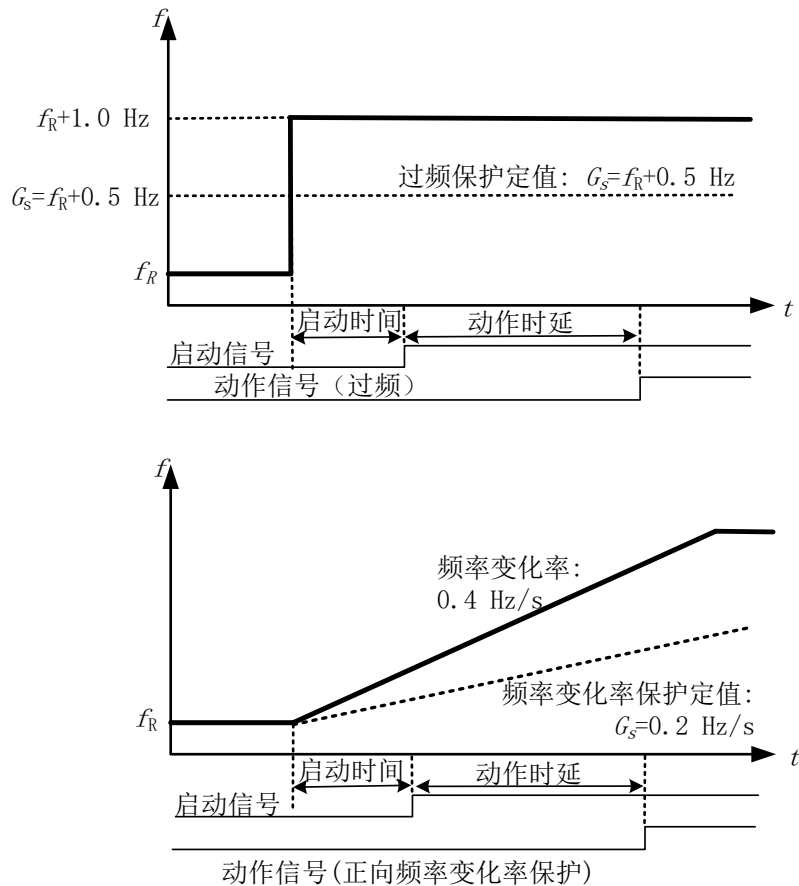


图17 过频保护和正向频率变化率保护功能动作时延测定

按照表18中规定的项目进行试验：

- 试验频率初值始终等于试验的标称频率；
- 对于过频保护，门槛值 G_S 设置为标称频率加 0.5 Hz，试验频率终值等于标称频率加 1 Hz；
- 对于低频保护，门槛值 G_S 设置为标称频率减 0.5 Hz，试验频率终值等于标称频率减 1 Hz；
- 对于频率变化率保护，门槛值 G_S 设置为 0.2 Hz/s（如果适用，分正门槛和负门槛），频率按 0.4 Hz/s⁸⁾的恒定变化率升高；
- 当频率保护功能动作时，可以停止试验。动作时延等于从启动信号动作时刻开始到动作信号动作时刻为止的时间。

在时延定值范围内，至少试验5个点（即10 %、20 %、30 %、50 %和100 %）。被测时延定值以最大时延定值的百分数来表示。

至少应测定表18中规定的试验点下的动作时延。

表18 动作时延试验点

频率保护功能	频率定值或 频率变化率定值 (启动门槛, G_S)	试验频率初值	试验频率终值
过频保护	$f_R + 0.5 \text{ Hz}$	f_R	$f_R + 1 \text{ Hz}$, 突变
低频保护	$f_R - 0.5 \text{ Hz}$	f_R	$f_R - 1 \text{ Hz}$, 突变
频率变化率保护	0.2 Hz/s (适用时, 带正负号)	f_R	0.4 Hz/s 依照被试门槛, 频率变 化率取正值或者负值

应针对保护功能的每个标称频率值（通常为50 Hz和60 Hz）进行试验。

每个试验点至少应重复试验5次，以保证试验结果的可重复性，试验结果按表19所示的方式报告。

在评估动作时延时，理论参考值应为以下之一：

- 时延定值，若时延是纯粹的附加计时器；
- 时延定值减去制造商定义的常数，若时延定值考虑了对保护功能启动时间和/或输出触点响应时间的补偿。

表19给出了针对每个频率保护功能应执行的试验。根据制造商声明的公差，每个功能应通过所有试验。

表19 动作时延准确度试验点

动作时延定值 (t_{delay})	第1次 试验结果 (ms)	第2次 试验结果 (ms)	第3次 试验结果 (ms)	第4次 试验结果 (ms)	第5次 试验结果 (ms)	验收准则 (ms)
10%						$t_{delay} \pm$ 声明的时延准确度
50%						$t_{delay} \pm$ 声明的时延准确度
100% (最大值)						$t_{delay} \pm$ 声明的时延准确度

如果不能同时监视启动信号和动作信号以测量时间差，则上述试验方法不适用（也不相关）。在这种情况下，制造商应申明不能根据本文件进行试验，并应申明用于检验动作时延准确度的适当试验方法。

8) 采标注：“Hz/s”，原文误为“Hz”。

6.4.3 动作时延准确度报告

制造商应按表20给出的格式报告动作时延准确度，包括绝对误差和相对误差。表格给出的数值仅为示例。

表20 低频/过频保护功能动作时延准确度报告

低频（或过频）保护功能动作时延准确度	
动作时延准确度	定值的±0.01%或者±2.5 ms，以较大者为准

测得从电力系统故障发生时刻到保护功能动作时刻的时间间隔为动作时间，评估动作时间时需要将启动时间的准确度和动作时延的准确度相加。因此，制造商应以与其选定的启动时间准确度表示方式相同的方式来表示动作时延准确度。

6.5 返回时间测定

6.5.1 概述

以下试验给出了返回时间的测定方法。返回时间测定应采用与启动时间测定相同的试验方法(6.3)，并减少试验点数。

对于低频/过频保护，该性能集中展示在保护功能的返回时间图中，返回时间表示为接近并穿越保护定值 ($G_s = f >$ 或 $G_s = f <$) 时电力系统频率变化速度（电力系统频率变化率）的函数。

试验应在恒定的频率变化率下进行，从能够导致保护启动（高于/低于定值）的初始异常频率值开始缓变到标称频率以确保保护返回。频率按规定的不同变化率而变化。这些试验代表了具有机电惯性的电力系统以一定速度改变频率的一种典型情况。

一个极端情形是“频率跃变”。在这种情形下，电力系统频率从一个“异常”初始值（高于过频保护定值，或低于低频保护定值）突然变化到标称值。

对于频率变化率保护，该性能集中展示在保护功能的典型返回时间中。典型返回时间的评估应采用基于不同恒定频率变化率的试验方法，频率变化率应落在频率变化率保护特性的动作区内。

对于特性准确度试验(6.2)，每个试验点通常重复试验5次。对于与返回时间相关的型式试验，每个试验点重复试验10次，以获得更准确的时间分布以及最小值和最大值。

6.5.2 低频保护、过频保护

6.5.2.1 波形的生成

基于频率突变的试验方法如图18所示（适用于过频保护）。

在频率突变的转换过程中，除频率外，注入的电压信号波形应无中断。该频率变化过程如附录E所示。

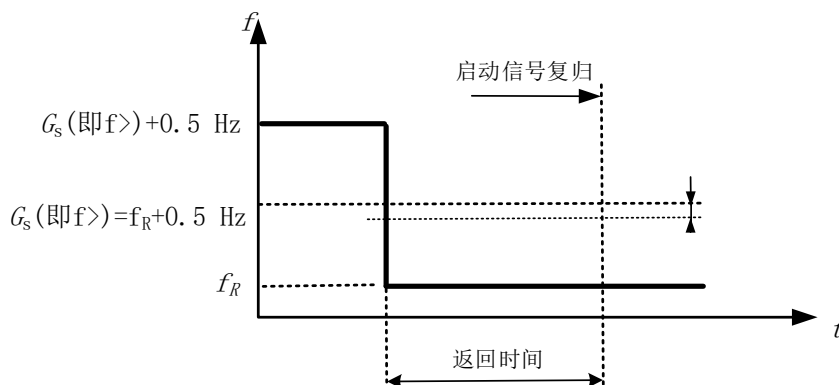


图18 频率突变时的过频保护返回时间测量

按照表21和表22中规定的试验点进行试验。这些试验点的频率变化率等于“无穷大”（突变）。
 ——试验频率初值等于定值 G_s 加上（对于过频保护）或减去（对于低频保护）0.5 Hz，持续时间至少为 MAX（1 000 ms；典型启动时间 × 2）。初始状态持续时间应确保启动信号动作，并在适用时保证频率跟踪功能稳定工作；
 ——试验频率终值始终等于试验的标称频率；
 ——测得从频率变化时刻起到启动信号复归时刻止的时间为返回时间。
 基于恒定频率变化率的试验方法如图19所示（适用于过频保护）。
 在频率变化的转换过程中，除频率外，注入的电压信号波形应无中断。该频率变化过程如附录E所示。

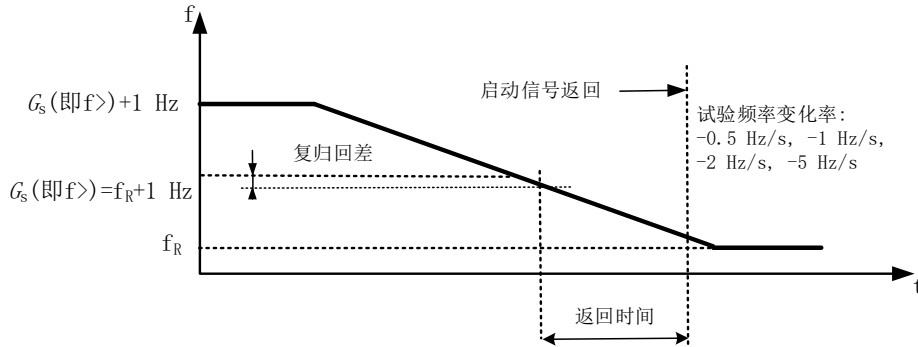


图19 频率按恒定变化率变化时的过频保护返回时间测量

按照表21和表22中规定的试验点进行试验。这些试验点的频率变化率为恒定值。
 ——试验频率初值等于定值 G_s 加上（对于过频保护）或减去（对于低频保护）1Hz，持续时间至少为 MAX（1 000 ms；典型启动时间 × 2）。初始状态持续时间应确保启动信号动作，并在适用时保证频率跟踪功能稳定工作；
 ——频率按不同的变化率降低（对过频）或升高（对低频），以测量不同试验条件下的返回时间；
 ——试验频率终值始终等于试验的标称频率；
 ——当注入试验信号的频率穿越返回值（该点由附录 A 中分析公式给出的频率缓变过程精确定义）时，计时器启动开始测量返回时间，当保护功能启动信号返回时计时器停止。
 附录A定义了频率变化率为恒定值的试验信号的表达式。

6.5.2.2 保护功能定值

启动频率定值应在表21和表22所示的定值范围内改变。
 如果某些保护功能设置了频率测量时间窗长度定值，则该定值应为默认值，除非制造商对频率测量时间窗长度定值与频率定值（ G_s ）的对应关系有特殊建议。在这种情况下，应遵从制造商的建议。

6.5.2.3 返回时间试验点及返回时间计算

应测量以下试验点（见表21和表22）下的返回时间。每个试验点应重复试验10次。
 应针对保护功能的每个标称频率值（通常为50 Hz和60 Hz）进行试验。

表21 过频保护返回时间试验点

频率变化率	频率定值 (启动门槛, G_s)	试验频率初值	试验频率终值
无穷大 (突变)	$f_R + 0.5 \text{ Hz}$	$f_R + 1 \text{ Hz}$	f_R
-0.5 Hz/s	$f_R + 1 \text{ Hz}$	$f_R + 2 \text{ Hz}$	f_R
-1 Hz/s			
-2 Hz/s			
-5 Hz/s			

表22 低频保护返回时间试验点

频率变化率	频率定值 (启动门槛, G_s)	试验频率初值	试验频率终值
无穷大 (突变)	$f_R - 0.5 \text{ Hz}$	$f_R - 1 \text{ Hz}$	f_R
0.5 Hz/s	$f_R - 1 \text{ Hz}$	$f_R - 2 \text{ Hz}$	f_R
1 Hz/s			
2 Hz/s			
5 Hz/s			

试验结果以表格形式记录，并计算最小值、平均值（均值）和最大值。

6.5.2.4 返回时间报告

返回时间按表23所示格式报告，表中所示的结果仅为示例。

表23 过频/低频保护返回时间报告

过频（或低频）保护返回时间 标称频率 50 Hz			
频率变化率	最小返回时间	最大返回时间	平均返回时间
0.5 Hz/s	72 ms	85 ms	80 ms
1.0 Hz/s	70 ms	85 ms	81 ms
2.0 Hz/s	75 ms	90 ms	82 ms
5.0 Hz/s	78 ms	92 ms	85 ms
突变 (无穷大)	110 ms	120 ms	116 ms

6.5.3 频率变化率保护

6.5.3.1 波形的生成

采用以下方法测量返回时间：先采用恒定频率变化率的试验方法使得保护功能启动，然后采用恒定频率 ($df/dt = 0$) 使得保护功能返回。该方法如图20所示（适用于正向频率变化率保护）。

在频率变化的转换过程中，除频率外，注入的电压信号波形应无中断。该频率变化过程如附录E所示。

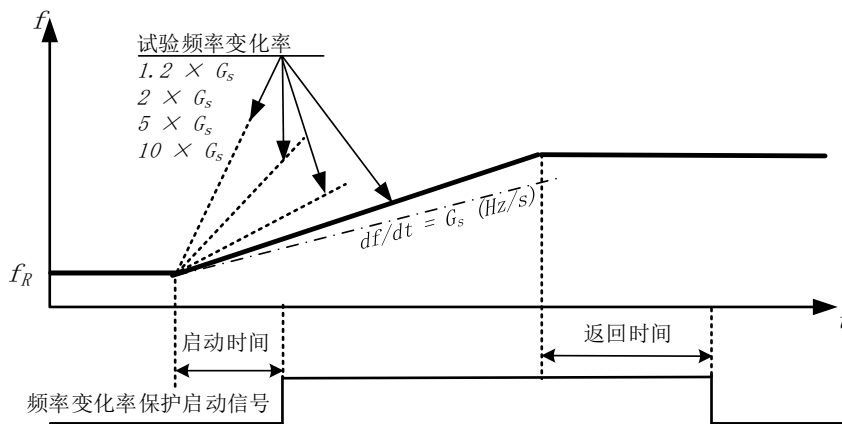


图20 频率变化率保护返回时间测量

每次试验由表24中规定的试验项目确定：

- 试验频率初值始终等于试验的标称频率；
 - 频率按不同的变化率升高，以在不同的试验条件下使得保护功能启动。该过程持续时间应等于或大于所声明的典型启动时间的2倍；
 - 然后，频率保持不变，直至启动信号返回；
 - 返回时间从频率不再变化时算起，到保护功能启动信号返回时为止。
- 附录A定义了频率变化率为恒定值的试验信号的表达式。

6.5.3.2 保护功能定值

频率变化率保护启动定值应在表24所示的定值范围内改变。

如果某些保护功能设置了频率测量或者频率变化率测量时间窗长度定值，则该定值应为默认值，除非制造商对测量时间窗长度定值与频率变化率定值（ G_S ）的对应关系有特殊建议。在这种情况下，应遵从制造商的建议。

6.5.3.3 典型返回时间试验点及典型返回时间计算

应计算表24所列试验点下的返回时间。每个试验点应重复试验10次。

应针对保护功能的每个标称频率值（通常为50 Hz和60 Hz）进行试验。

表24 频率变化率保护返回时间试验点

试验定值点 X^a	频率变化率定值 (启动门槛, G_S) ^a (Hz/s)	频率变化率
0 % (最小定值)		$1.2 \times G_S$ (或者 $-1.2 \times G_S$) $2 \times G_S$ (或者 $-2 \times G_S$) $5 \times G_S$ (或者 $-5 \times G_S$) $10 \times G_S$ (或者 $-10 \times G_S$)
50 %		$1.2 \times G_S$ (或者 $-1.2 \times G_S$) $2 \times G_S$ (或者 $-2 \times G_S$)
100 % (最大定值)		$1.2 \times G_S$ (或者 $-1.2 \times G_S$)
^a 根据 6.1 中规定的通用规则，试验定值点用百分数 (%) 表示，以计算频率变化率定值 (门槛 G_S)。		

如果表24中某些试验点所要求的频率变化率超出制造商声明的工作范围（见表3），则应忽略这些特定的试验点，其试验结果报告为“未试验-超出 df/dt 工作范围”，并在声明的工作范围的上限/下限下进行试验。

6.5.3.4 典型返回时间报告

采用1 ms级（分辨率）的柱状图报告测得的70个返回时间。除柱状图之外，还应以列表形式报告最小值、最大值和均值（平均值），如图21和表25所示。

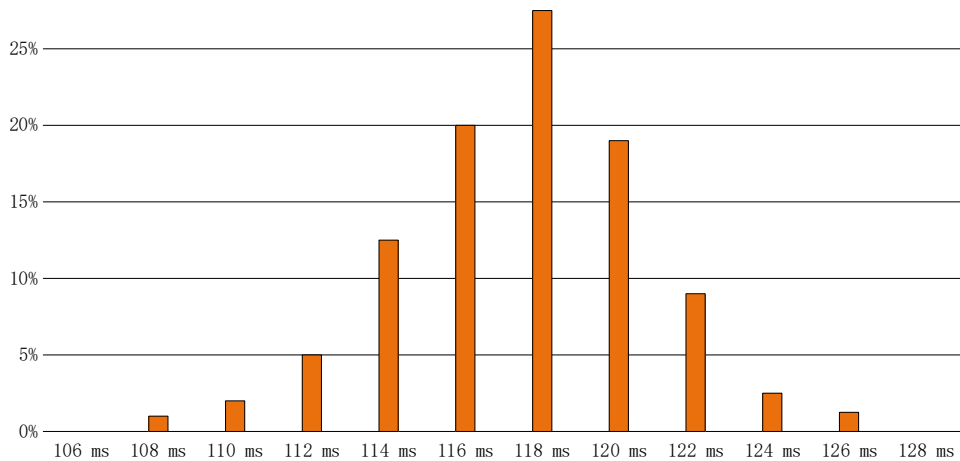


图21 频率变化率保护返回时间试验结果柱状图

表25 频率变化率保护典型返回时间

频率变化率保护典型返回时间	
最小值	108 ms
均值	118 ms
最大值	126 ms

6.6 有谐波时的性能

6.6.1 概述

以下试验给出了相关方法，以评估当电压信号上叠加有谐波时，低频保护、过频保护或频率变化率保护的基波频率稳态测量能力。

6.6.2 有谐波时低频/过频保护启动值的准确度

6.6.2.1 频率缓变过程的生成

所提出的试验方法和无谐波时基波频率启动值准确度评估方法相似，即利用频率伪连续缓变过程。频率缓变从试验频率初值 $f_{initial}$ 开始。试验频率初值远离保护功能的预期启动值 G_S 。

启动信号动作后，可以终止频率缓变过程。

适用于过频保护功能的试验方法如图22所示。

在频率按步长变化的转换过程中，注入信号应是连续的。除频率外，其相位或幅值不得有阶跃变化。

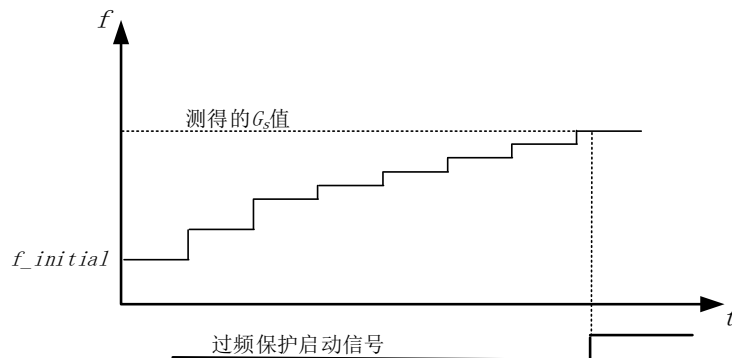


图22 过频保护正向伪连续缓变过程试验方法示例

频率缓变过程每一步的持续时间：MAX（500 ms，基波频率下最大启动时间 × 10）

为了缩短试验时间，试验刚开始时频率的变化步长可以更大一些，规则如下：

——对于过频保护，大步长可以持续到 G_s 减去“申明的频率准确度”的3倍；

——对于低频保护，大步长可以持续到 G_s 加上“申明的频率准确度”的3倍。

“申明的频率准确度”基于5.3中规定的要求。

一旦达到上述值，频率的变化步长将小于或等于基波频率下所申明频率准确度的10%，直到启动信号动作、频率缓变过程结束。

电压信号中应包含表26中规定的所有谐波。

表26 叠加的谐波

谐波次数	谐波含量百分比 H_k
2	3%
3	6%
4	1.5%
5	8%
6	1%
7	7%
8	1%
9	2.5%
10	1%
11	5%
12	1%
13	4.5%
14	1%
15	2%
16	1%
17	4%
18	1%
19	3.5%
20	1%
21	1.75%
22	1%
23	2.8%
24	1%
25	2.6%
26 to 40	1%

注1：表26中规定的谐波水平基于IEC 61000-2-4:2002中表2、3和4规定的3级值。但25次以上的奇次谐波除外，他们均定义为1%。

注2：当试验数字接口，且数字接口采样频率等于4 800 Hz（即IEC 61869-9中规定的推荐标准值）时，为满足奈奎斯特标准，将高次谐波阶限定在40次以内（ $4\ 800 / (2 \times 60) = 40$ ）⁹⁾。

9) 采标注：对 50 Hz 系统，采样频率可选 4 000 Hz。

对于所有谐波，谐波分量与基波分量之间的相位偏移设置为 $\phi_k = 180^\circ$ 。设置该相位偏移以干扰过零点。

试验信号由以下表达式确定。

$$V_L(t) = \sum_{k=1}^{40} \frac{H_k}{100\%} \times \sin(k \times (2 \times \pi \times f \times t + \phi_{phase}) + \phi_k)^{10)}$$

式中：

t ——时间；

f ——试验基波频率；

H_k ——基波分量 ($k = 1$) 和谐波分量的幅值；

ϕ_{phase} ——三相系统 (VL1、VL2、VL3) 的相位偏移；

ϕ_k ——谐波分量相对基波分量的相位偏移。

这个表达式意味着叠加谐波的频率是试验信号基波频率的倍数，而不是标称频率的固定倍数。

试验信号如图23所示。

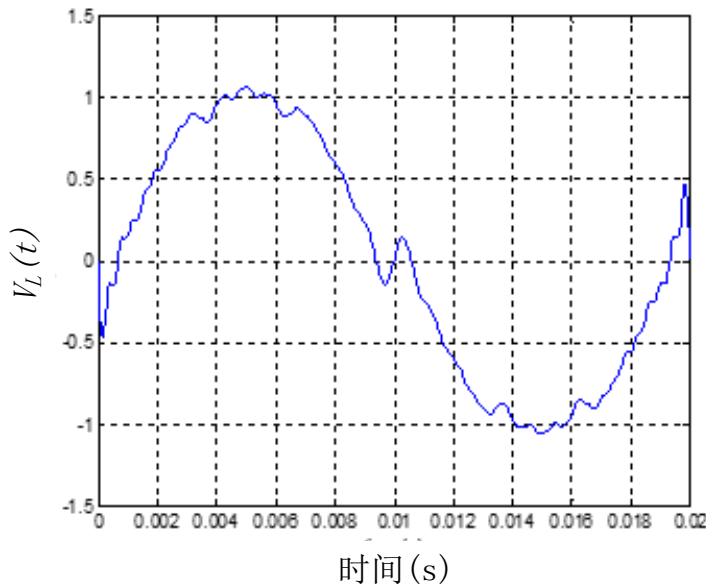


图23 叠加了谐波分量的电压波形

当输入激励量基于三相电压信号注入时，试验信号应按照以下表达式给出：

$$\begin{aligned} V_{L1}(t) &= H_1/100\% \times \sin(2 \times \pi \times f \times t) + \dots \\ &+ H_k/100\% \times \sin(k \times 2 \times \pi \times f \times t + \pi) + \dots \\ &+ H_{40}/100\% \times \sin(40 \times 2 \times \pi \times f \times t + \pi) \\ V_{L2}(t) &= H_1/100\% \times \sin(2 \times \pi \times f \times t - 2 \times \pi/3) + \dots \\ &+ H_k/100\% \times \sin(k \times (2 \times \pi \times f \times t - 2 \times \pi/3) + \pi) + \dots \\ &+ H_{40}/100\% \times \sin(40 \times (2 \times \pi \times f \times t - 2 \times \pi/3) + \pi) \\ V_{L3}(t) &= H_1/100\% \times \sin(2 \times \pi \times f \times t + 2 \times \pi/3) + \dots \\ &+ H_k/100\% \times \sin(k \times (2 \times \pi \times f \times t + 2 \times \pi/3) + \pi) + \dots \\ &+ H_{40}/100\% \times \sin(40 \times (2 \times \pi \times f \times t + 2 \times \pi/3) + \pi) \end{aligned}$$

10) 采标注：原文缺少右括号；“k=1”，原文误为“k=0”。

式中：

t ——时间；

f ——试验基波频率；

H_1 ——基波分量的幅值 ($H_1 = 100\%$)；

H_k —— k 次谐波分量的幅值 (见表26)。

当输入激励量基于单相信号注入时，应使用电压信号 V_{L1} 。

6.6.2.2 保护功能定值

启动频率定值应在表27所示的定值范围内改变。

如果某些保护功能设置了频率测量时间窗长度定值，则该定值应为默认值，除非制造商对频率测量时间窗长度定值与频率定值 (G_s) 的对应关系有特殊建议。在这种情况下，应遵从制造商的建议。

6.6.2.3 有谐波时频率准确度试验点及频率准确度计算

按照表27中列出的试验点和6.1中规定的规则，对保护功能的每个标称频率进行试验。

对所有试验定值点测量启动频率，测量误差按以下公式计算：

$$\text{误差} = (\text{测得的启动频率} - G_s) \text{ mHz}$$

每个试验点应重复试验5次，每次试验均报告测量误差，如表27所示。根据5次试验结果计算最大绝对误差值，同时列出标称频率下 (不含谐波) 的准确度误差 (即6.2.1.1的试验结果)，如表27所示。

表27 有谐波时低频/过频保护试验点

试验定值点 X^a	频率定值 (启动门槛, G_s) ^a (Hz)	第1次 误差 (mHz)	第2次 误差 (mHz)	第3次 误差 (mHz)	第4次 误差 (mHz)	第5次 误差 (mHz)	最大绝对 误差 (mHz)	标称频率下的 准确度 (不含谐波) (mHz)
-100 % (最小定值)								
-10 %								
-5 %								
-2.5 %								
-1 %								
0 % (f_R) ^b								
+1 %								
+2.5 %								
+5 %								
+10 %								
+100 % (最大定值)								

^a 根据 6.1 中规定的通用规则，试验定值点用百分数 (%) 表示，以计算频率定值 (门槛 G_s)。低频/过频保护的定值范围可以用低于或高于标称频率的数值来定义。定义的试验定值点涵盖所有可能的定值范围。

^b 如果等于标称频率的定值不可用，则可以忽略该试验点。

6.6.2.4 有谐波时的频率准确度报告

有谐波时的频率准确度报告见表27。此外，还报告了6.2.1.1中测得的标称频率下无谐波时的准确度值。

应针对保护功能的每个标称频率完成报告表（见表27）。

6.6.3 有谐波时频率变化率保护启动值的准确度

6.6.3.1 频率缓变过程的生成

应按照与6.2.1.2所述完全相同的程序，使用叠加了谐波的信号而不是纯正弦波信号进行试验，确定有谐波时频率变化率保护的稳态误差。应在试验信号中叠加由表26（适用于低频/过频保护功能）中规定的一组谐波，在此条件下重复6.2.1.2中规定的所有试验。

叠加谐波的相位偏移设置为180°。谐波的叠加从频率开始变化的时刻起。叠加谐波的频率随基波频率的变化而变化。

有谐波时频率变化率准确度试验的保护功能定值、试验点、准确度计算以及有谐波时的频率变化率准确度报告应与6.2.1.2所述无谐波时的试验相同。

6.6.3.2 保护功能定值

频率变化率保护启动定值应在表28所示的定值范围内改变。

如果某些保护功能设置了频率测量时间窗长度定值，则该定值应为默认值，除非制造商对频率测量时间窗长度定值与频率变化率定值(G_S)的对应关系有特殊建议。在这种情况下，应遵从制造商的建议。

6.6.3.3 有谐波时频率变化率准确度试验点及频率变化率准确度计算

按照表28中列出的试验点和6.1中规定的规则，对保护功能的每个标称频率进行试验。

当保护功能是基于 df/dt 绝对值时，针对表28中规定的每一个试验点应分别在正频率变化率和负频率变化率下进行试验。

每个试验点应重复试验5次，每次试验均报告测量误差，如表28所示。根据5次试验结果计算平均值，同时列出标称频率下（不含谐波）的准确度误差（即6.2.1.2的试验结果），如表28所示。

表28 有谐波时频率变化率保护试验点

试验定值点 X^a	频率变化率定值 (启动门槛, G_S) ^a (Hz/s)	第1次 误差 (mHz/s)	第2次 误差 (mHz/s)	第3次 误差 (mHz/s)	第4次 误差 (mHz/s)	第5次 误差 (mHz/s)	平均 误差 (mHz/s) ¹¹⁾	标称频率下的 准确度 (不含谐波) (mHz/s)
0 % (最小定值)								
+5 %								
+10 %								
+30 %								
+60 %								
+100 % (最大定值)								

^a 根据 6.1 中规定的通用规则，试验定值点用百分数 (%) 表示，以计算频率变化率定值¹²⁾ (门槛 G_S)。

11) 采标注：“mHz/s”，原文误为“mHz”。

12) 采标注：“频率变化率定值”，原文误为“频率定值”。

6.6.3.4 有谐波时的频率变化率准确度报告

有谐波时的频率变化率准确度报告见表28。此外，还报告了6.2.1.2中测得的标称频率下无谐波时的准确度。

应针对保护功能的每个标称频率完成报告表（见表28）。

6.7 电压突变时（相位偏移和幅值变化）的稳定性

6.7.1 概述

在电压相位偏移和幅值变化期间，有可能会检测到虚假的频率变化，因此可能会得到错误的频率变化率。尤其是，频率保护功能有可能将正/负相位偏移误认为是频率的瞬时上升/下降。

6.7.2和6.7.3中给出了两种不同的试验方法，以评估此时频率保护功能的稳定性：

——在6.7.2中，通过一个或两个电压相位偏移和幅值变化检验保护稳定性。第一个试验场景基于单次相位偏移和幅值变化，代表短路发生；第二个试验场景基于连续两个相位偏移和幅值变化，以模拟故障发生和清除；

——在6.7.3中，通过电压幅值下降到零然后恢复同时伴随频率变化，代表电压短时（0.5 s）崩溃，来检验保护稳定性。

在这些试验过程中，如果在电压变化或电压崩溃后误发启动信号，应确定能够确保保护不误动的最小动作时延。

在特性量准确度试验中（6.2），每个试验点通常重复试验5次。有关电压突变时稳定性的型式试验，每个试验点应重复试验20次，以检验试验结果的可重复性。

6.7.2 电压相位偏移和幅值变化时的性能

6.7.2.1 试验方法

低频/过频保护和频率变化率保护的试验方法应一致。

试验应按照以下程序进行。

——根据所需的激励量，向保护功能注入幅值为额定值、频率为标称值的单相或三相电压信号。

——注入额定电压信号至少1 s，然后同时引入相位偏移和幅值变化。三相注入时在三相上同时引入等量的电压相位偏移和等量的幅值变化。电压信号变化后，电压信号注入持续时间至少应为最大启动时间的两倍。

——第一个试验场景：

- 电压幅值应从额定值降低到额定值的0.5倍，相位应按两个不同的值偏移：
 - ◆ + 60°；
 - ◆ - 60°。
- 应相对于注入的相电压（或三相电压信号注入中的一相电压）波形，以两个不同的起始角引入相位偏移。一次在正弦电压波形过零点处（0°）引入相位偏移，另一次在正弦波顶部处（+90°）引入相位偏移。6.7.2.1结尾处给出了三相电压信号注入的表达式。

——第二个试验场景：

- 电压幅值应从额定值降低到额定值的0.5倍，同时施加+30°的相位偏移；
- 延时80 ms后，电压幅值升高到额定值，同时施加-50°的相位偏移；
- 相位偏移，应相对于输入的相电压（或三相信号输入中的一相电压）波形，以同一个起始角引入，即在正弦波形过零点处（0°）。

——针对频率保护功能的每个标称频率进行试验，试验定值点见6.7.2.2和6.7.2.3。

——每个试验点重复试验 20 次。应监视启动信号，该信号在连续 20 次试验期间不得动作。如果在连续 20 次试验期间启动信号有误动，则应监视动作信号，以确定能够确保连续 20 次试验期间动作信号不误动的最小时延。

制造商应申明启动信号是否稳定（无误动作），否则应说明确保电压相位偏移期间保护功能稳定所需的最小时延。如果在两个试验场景下所要求的时延不同，则应分别申明这两个值。

如果某些保护功能设置了频率测量或者频率变化率测量的时间窗长度定值，则该定值应为默认值，除非制造商对频率测量时间窗长度定值与频率定值或者频率变化率定值（ G_s ）的对应关系有特殊建议。在这种情况下，应遵从制造商的建议。

为了明确试验方法和电压变化的设置，对电压信号表达式解释如下。第二种试验场景应基于相同的原则。

下面给出了基于三相电压注入的输入激励量表达式。对于基于单相电压注入的频率保护功能，只使用信号 V_{L1} 。

在电压相位偏移和幅值变化之前，注入的电压信号（保持至少 1 s）基于以下表达式：

$$\begin{aligned} V_{L1}(t) &= V_R \times \sqrt{2} \times \sin(2 \times \pi \times f_R \times t) \\ V_{L2}(t) &= V_R \times \sqrt{2} \times \sin(2 \times \pi \times f_R \times t - 2 \times \pi/3) \\ V_{L3}(t) &= V_R \times \sqrt{2} \times \sin(2 \times \pi \times f_R \times t + 2 \times \pi/3)^{13)} \end{aligned}$$

式中：

t ——时间；

f_R ——标称频率；

V_R ——额定电压（有效值）。

注入至少 1 s 后，相位偏移为 $+60^\circ$ （ $+\pi/3$ ）的电压信号基于以下表达式：

$$\begin{aligned} V_{L1}(t) &= 0.5 \times V_R \times \sqrt{2} \times \sin(2 \times \pi \times f_R \times t + \pi/3) \\ V_{L2}(t) &= 0.5 \times V_R \times \sqrt{2} \times \sin(2 \times \pi \times f_R \times t - \pi/3) \\ V_{L3}(t) &= 0.5 \times V_R \times \sqrt{2} \times \sin(2 \times \pi \times f_R \times t + \pi) \end{aligned}$$

电压相位偏移和幅值变化以两个不同的起始角（相对于电压信号 V_{L1} ）引入：

——在过零点处，使电压信号在 $t = 1 \text{ s} + n \times T$ 处发生变化；

——在正弦波顶部，使电压信号在 $t = 1 \text{ s} + (n + 0.25) \times T$ 处发生变化，其中， T 是周期时间（ $T = 1/f_R$ ）， n 是整数（1、2、3 等）。

两个试验场景的试验顺序如图 24 所示。

13) 采标注：“ $+2 \times \pi/3$ ”，原文误为“ $\times 2 \times \pi/3$ ”。

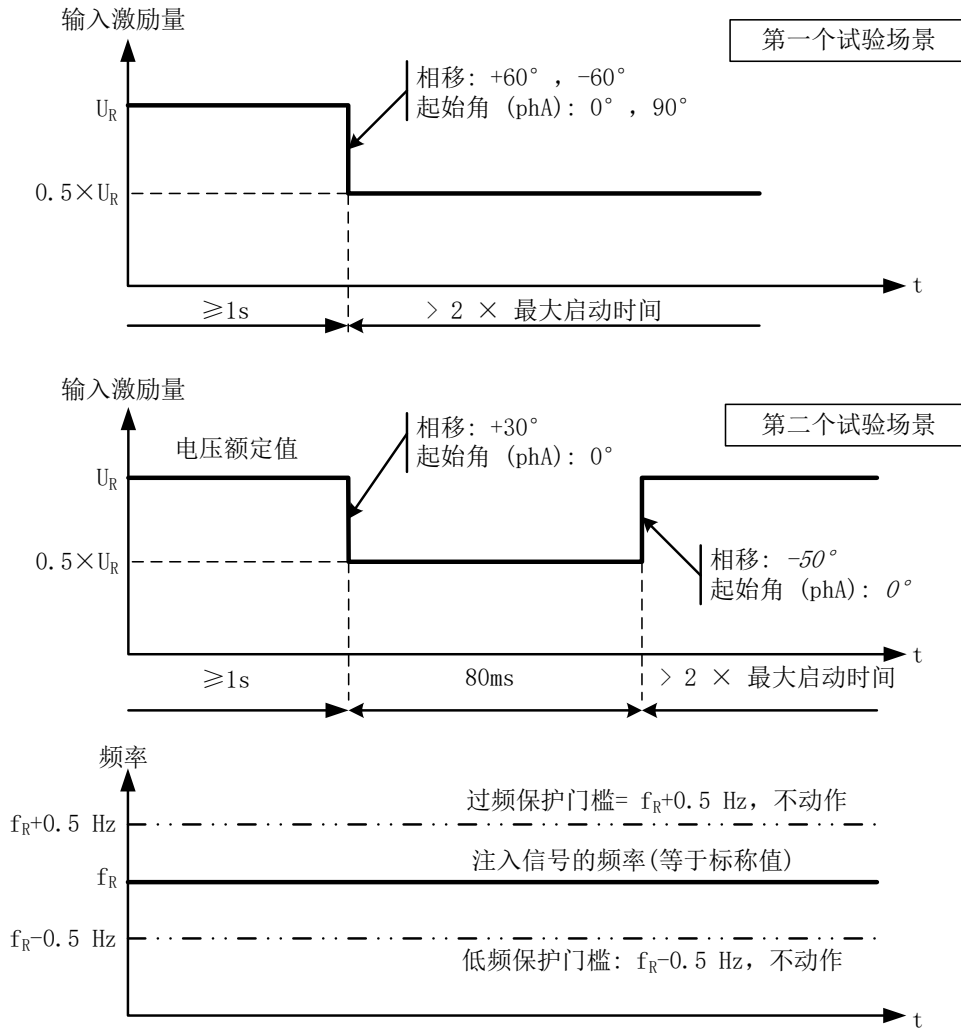


图24 输入激励量变化过程（电压为有效值）

6.7.2.2 低频/过频保护定值

低频保护定值设置为 $f_R - 0.5$ Hz（例如，49.5 Hz和59.5 Hz），过频保护功能定值设置为 $f_R + 0.5$ Hz（例如，50.5 Hz和60.5 Hz），应在此条件下进行试验。

6.7.2.3 频率变化率保护定值

定值等于定值范围内的最小绝对值，应在此条件下进行试验。

如果频率变化率保护的定值门槛带有正负符号，仅反应频率的正向变化或者负向变化，则应在以下两种条件下进行试验：

- 正门槛的最低值；
- 负门槛的最高值。

6.7.3 电压幅值下降和恢复时的性能

6.7.3.1 试验方法

低频/过频保护功能和频率变化率保护功能的试验方法应一致。

试验应按照以下程序进行。

——根据所需的激励量，向保护功能注入幅值为额定值、频率为标称值的单相或三相电压信号。如果是三相注入，应注入正序量。

——注入额定电压信号至少 1 s，然后电压幅值下降 100 %。三相注入时在三相上同时引入幅值变化。电压信号幅值下降（无电压信号注入）持续时间应为 500 ms。

- 在第一个试验场景中，电压幅值恢复到额定值，但频率等于标称值-0.4 Hz。
- 在第二个试验场景中，电压幅值恢复到额定值，但频率等于标称值+0.4 Hz。
- 此注入电压信号保持 1 s。1 s 后，可以终止信号注入，不再监视保护输出信号。
- 针对频率保护功能的每个标称频率进行试验，试验定值点见 6.7.3.2 和 6.7.3.3。
- 每个试验点重复试验 20 次。应监视启动信号，如果在连续 20 次试验期间启动信号有误动，应确定能够确保连续 20 次试验期间动作信号不误动的最小时延。

制造商应申明启动信号是否稳定（无误动作），否则应申明确保电压幅值下降和恢复期间保护功能稳定所需的最小时延。

试验程序如图25所示。

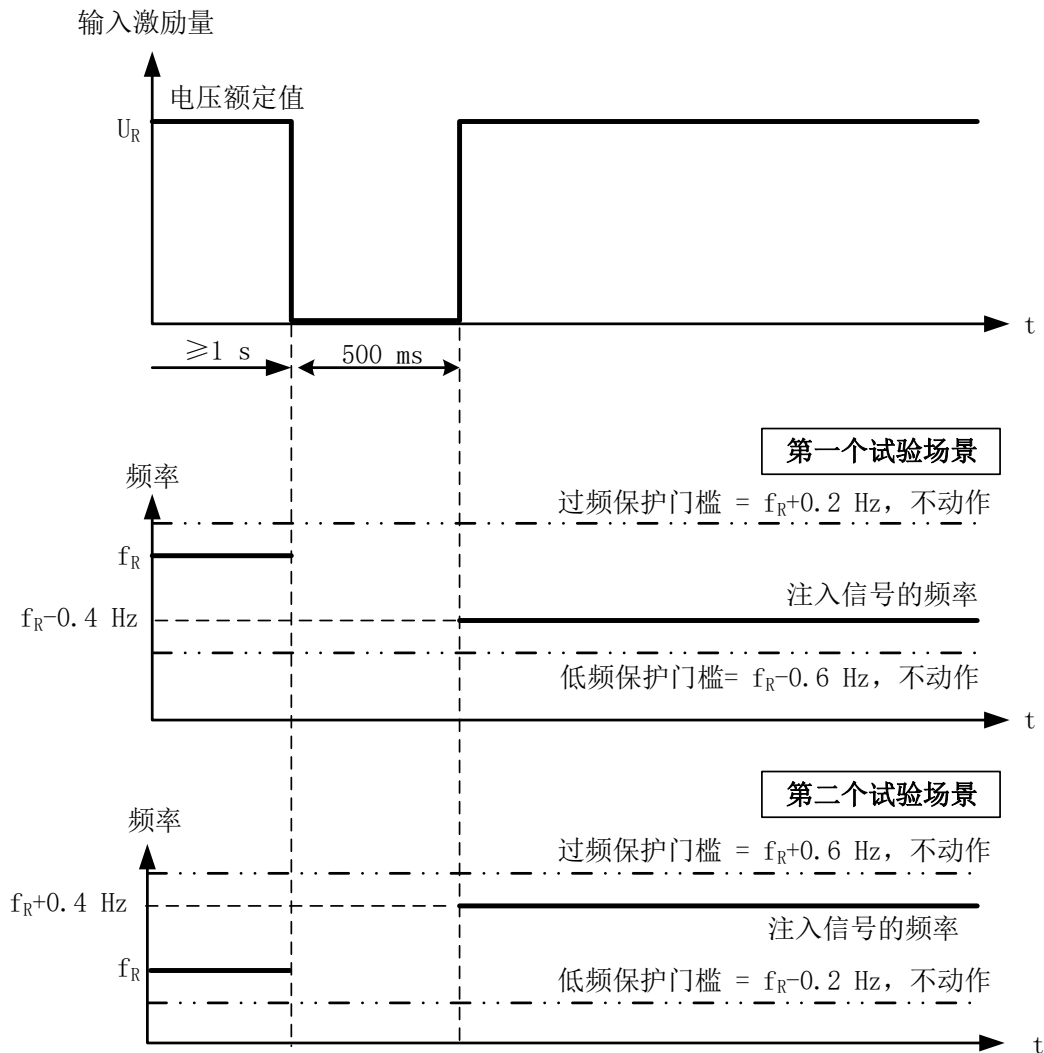


图25 伴随频率变化的输入激励量变化过程（电压为有效值）

6.7.3.2 低频/过频保护定值

应在低频保护功能和过频保护功能同时投入的情况下进行试验，定值见表29。

表29 用于电压幅值下降和恢复时稳定性试验的低频/过频保护定值

试验场景	低频保护定值	过频保护定值
电压恢复 频率等于 $f_R - 0.4$ Hz (第一个场景)	$f_R - 0.6$ Hz (例如, 对 50 Hz 和 60 Hz 系统, 分别为 49.4 Hz 和 59.4 Hz)	$f_R + 0.2$ Hz (例如, 对 50 Hz 和 60 Hz 系统, 分别为 50.2 Hz 和 60.2 Hz)
电压恢复 频率等于 $f_R + 0.4$ Hz (第二个场景)	$f_R - 0.2$ Hz (例如, 对 50 Hz 和 60 Hz 系统, 分别为 49.8 Hz 和 59.8 Hz)	$f_R + 0.6$ Hz (例如, 对 50 Hz 和 60 Hz 系统, 分别为 50.6 Hz 和 60.6 Hz)

如果不能同时投入低频保护功能和过频保护功能进行稳定性试验，则可以通过两个独立试验来实现。

6.7.3.3 频率变化率保护定值

定值等于定值范围内的最小绝对值，应在此条件下进行试验。

如果频率变化率保护的定值门槛带有正负符号，仅反应频率的正向变化或者负向变化，则应使用正门槛值或者负门槛值进行试验。

6.7.3.4 稳定性试验的预期结果

对于低频/过频保护：整个试验期间没有启动信号动作。

对于频率变化率保护：整个试验期间没有启动信号动作。

如果在电压幅值下降和恢复过程中启动信号动作，制造商应提供能够避免启动信号动作导致保护功能动作（跳闸）所需的最小时延定值。

7 文档要求

7.1 型式试验报告

本文件规定的功能元件的型式试验报告应符合 IEC 60255-1 的要求。至少应包括以下方面的记录：

- 被试设备：应包括被试设备/被试功能的细节，以及其他特定细节如型号和固件版本；
- 试验设备：设备名称、型号、校准信息；
- 说明元件概念性原理的功能框图，包括所有开关量输入、输出信号与功能元件的相互作用；
- 输入激励量的细节和功能元件所使用的测量量类型；
- 功能元件在动作和复归状态下可用的特性曲线/动作特性细节，最好以公式表达；
- 为提高功能元件对实际电力系统的适用性而实施的任何特定算法的细节及其性能。对于多个功能使用的通用算法，例如电压互感器监视，只需在用户文档中描述一次算法原理即可；但是，应描述其对使用该算法的所有功能动作的影响；
- 试验方法和定值：包括所使用的试验程序的细节，以及为便于试验而应用于被试设备的定值设置。可能包括被测功能以外的定值设置。这样，可以确保在相同条件下重复试验；
- 试验结果：针对试验方法和定值设置中规定的每个试验点，对应具体试验点应完整地记录结果。根据这些结果，来确定准确度；

- 试验结论：应根据所记录的试验结果，针对第 5 章要求的所有申明项，给出确定的试验结论。适当时，应将这些申明项与本文件规定的性能规范进行比较，以便针对单项试验给出合格/不合格结论，并针对整个功能给出总体合格/不合格结论。

7.2 其他用户文档

并非所有用户都要求查阅完整的型式试验报告文档，有些只需要其中的一部分信息。为此，在通常可见的用户文档中，至少应记录以下方面的信息，这些信息不一定记录在同一个文档中：

- 说明元件概念性原理的功能框图，包括所有开关量输入、输出信号与功能元件的相互作用；
- 输入激励量的细节和功能元件所使用的测量量类型；
- 功能元件在动作和复归状态下可用的特性曲线/动作特性细节，最好以公式表达；
- 为提高功能元件对实际电力系统的适用性而实施的任何特定算法的细节及其性能。对于多个功能使用的通用算法，例如电压互感器监视，只需在用户文档中描述一次算法原理即可；但是，应描述其对使用该算法的所有功能动作的影响；
- 应明确说明第 5 章要求的所有申明项。

附 录 A
(规范性附录)

频率变化率 (df/dt) 为恒定值的试验信号表达式

用于频率保护和频率变化率保护的试验信号，其频率变化率为恒定值时的表达式如下所示：

$$G(t) = Amp \times \sin(2\pi(f_0 + \frac{f_slope}{2}(t - t_0))(t - t_0) + \phi_0)$$

式中：

Amp ——单个或多个输入激励量的幅值（例如，相电压）；

f_0 ——试验频率初值（例如，频率变化前的标称频率）；

f_slope ——用于试验的频率变化率，单位为Hz/s；

ϕ_0 ——初始相位（适用于三相电压注入）；

t_0 ——频率变化开始时刻。

上述表达式是下列等式的推导结果。

在具有恒定变化率的频率变化期间， $f(t)$ 由以下公式定义（为简化起见，假设频率变化从 $t = 0$ 时的 f_0 开始）：

$$f(t) = \frac{\omega(t)}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{d\phi}{dt} = f_0 + f_slope \times t$$

频率变化率为恒定值的试验信号 $Amp \times \sin(\phi(t))$ ，其相位变化由以下等式确定：

$$\phi(t) = 2\pi \int (f_0 + f_slope \times t) dt = 2\pi(f_0 + \frac{f_slope}{2} \times t)t + \phi_0$$

附录 B
(规范性附录)
均值、中位数和众数计算

B.1 均值

均值是一组数据或者分布的算术平均值。均值通过将收集到的数据相加再除以数据个数来计算。

B.2 中位数

中位数是采样数据的中间数。一个有限数列的中位数，可以通过将所有数据从最低到最高排列并取中间位置的值得到。如果被观测数有偶数个，则取处于中间位置的两个值的平均值作为中位数。

B.3 众数

一个数据样本的众数是在集合中最经常出现的元素。如果其中有几个值出现的频次相同，则众数可以由一个以上的值来表示。

B.4 示例

测得频率保护功能的动作时间样本有10个：

74 ms、81 ms、85 ms、91 ms、83 ms、91 ms、88 ms、99 ms、98 ms、91 ms。

以毫秒为单位的均值计算如下：

$$\frac{74+81+85+91+83+91+88+99+98+91}{10} = 88.1(ms)$$

按升序排列数据来计算中位数，第5和第6个数据点的平均值为89.5 ms：

74 ms、81 ms、83 ms、85 ms、88 ms、91 ms、91 ms、91 ms、98 ms、99 ms。

众数为出现频次最高的数据点，在本例中是91 ms。

因此，该组频率保护功能动作时间的统计数据如下：

——动作时间均值：88.1 ms；

——动作时间中位数：89.5 ms；

——动作时间众数：91 ms。

附 录 C
(资料性附录)
频率测量和计算示例¹⁴⁾

C.1 定义

术语“周期”（IEC 60050-103:2009, 103-06-01）表示使周期量取值完全重复的两个独立变量的最小正差。如果 $x(t)$ 表示一个周期量，那么 $x(t+T) = x(t)$ 。术语“周期持续时间”有时用于时间的函数的情形。符号 T 主要用于独立变量为时间的情形。

“频率”（IEC 60050-103:2009¹⁵⁾, 103-06-02）是周期的倒数；符号 f 主要用于周期为时间的情形。

“基波频率”（IEC 60050-103:2009, 103-07-21）是周期量的基波分量的频率。

“工频”（IEC 60050-601:1985, 601-01-05）是供电系统中使用的频率值。对于正弦波形，频率和频率变化率分别是相位的一阶导数和二阶导数（IEC/IEEE 60255-118-1:2018）。

C.2 信号观测模型

信号观测模型是对物理信号的数学描述，在此基础上定义电力系统的频率，并建立其测量技术。理解电力系统频率定义的关键在于观测物理信号 $x(t)$ 的选择及其观测模型的建立。常用的信号观测模型和频率定义如下。

频率测量通常依靠电压信号输入。当保护继电器未配备电压互感器输入端口或者未连接到电压互感器、或当电压信号过低时，频率测量也可依靠电流信号输入。

a) 等幅纯正弦或余弦信号

$$x(t) = A_m \cdot \sin(2\pi f_0 t + \theta) \dots\dots\dots (C.1)$$

$$x(t) = A_m \cdot \sin(2\pi f_0 t + \phi(t)) \dots\dots\dots (C.2)$$

$$f(t) = f_0 + \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{d\phi(t)}{dt} \dots\dots\dots (C.3)$$

式中：

$x(t)$ —— 可以是相对地电压、相间电压、正序电压或单相电流等；

A_m —— 幅值；

f_0 —— 基波频率；

θ —— 相位；

$f(t)$ —— 时变频率；

$\phi(t)$ —— 时变相位。

b) 含谐波的正弦或余弦信号

$$x(t) = \sum_{l=1}^m A_l \cdot \sin(2\pi l f_0 t + \phi_l(t)) \dots\dots\dots (C.4)$$

$$f_1 = f_0 + \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{d\phi_1(t)}{dt} \dots\dots\dots (C.5)$$

14) 采标注：本附录中，原文多处用“ $\omega(t)$ ”表示时变相位，现统一改成“ $\varphi(t)$ ”，以符合标准和习惯、方便阅读。

15) 采标注：IEC 60050-103:2009，原文误为“IEC 60050-103:2017”。

c) 含谐波和衰减直流分量的正弦或余弦信号

$$x(t) = A_0 \cdot e^{-t/\tau} + \sum_{l=1}^m A_l \cdot \sin(2\pi f_0 t + \phi_l(t)) \dots\dots\dots (C.6)$$

基波频率的定义与方程式 (C.5) 相同。

d) 有噪声的正弦或余弦信号

$$x(t) = A_m \cdot \sin(2\pi f_0 t + \theta) + \alpha(t) \dots\dots\dots (C.7)$$

$$x(t) = A_m \cdot \sin(2\pi f_0 t + \phi(t)) + \alpha(t) \dots\dots\dots (C.8)$$

$$x(t) = A_0 \cdot e^{-t/\tau} + \sum_{l=1}^m A_l \cdot \sin(2\pi f_0 t + \phi_l(t)) + \alpha(t) \dots\dots\dots (C.9)$$

其中 $\alpha(t)$ 是噪声和其他成分。

频率的定义与方程式 (C.3) 和 (C.5) 中的定义相同。

e) 瞬时频率

$$\overrightarrow{V_1(t)} = \frac{1}{3} \cdot (\overrightarrow{U_A(t)} + e^{j\frac{2\pi}{3}} \cdot \overrightarrow{U_B(t)} + e^{-j\frac{2\pi}{3}} \cdot \overrightarrow{U_C(t)}) \dots\dots\dots (C.10)$$

$$f = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{d}{dt} \text{angle } \overrightarrow{V_1(t)} \dots\dots\dots (C.11)$$

其中, UA、UB、UC为相电压, V1为电压的正序分量。

实际动态电力系统的物理信号要复杂得多,特别是当故障发生时,断路器开合,控制装置动作,以及随后的过渡过程。实际信号比上述观测模型所能准确描述的要复杂得多。尽管受到对电力系统的理解、可用的分析工具、以及继电器的处理能力等方面的限制,频率定义对于保护控制仍是必不可少的。可以采取信号处理技术等措施,将真实信号转换成符合理想观测模型的形式,从而获得保护和控制要用的频率信息。

C.3 频率测量的一般要求

C.3.1 频率测量的一般要求

电力系统频率测量的本质是对信号观测模型进行动态参数识别,即通过信号处理和对实际系统物理输入信号的数值分析,对模型参数进行良好的估计。测量手段包括识别对象的数字信号处理、被测对象的灰箱辨识、数字算法(软件)及其在模拟和数字器件(硬件)中的应用。由于对频率的理解和实际应用要求的不同,上述各方面存在很大差异。

频率测量的一般要求如下:

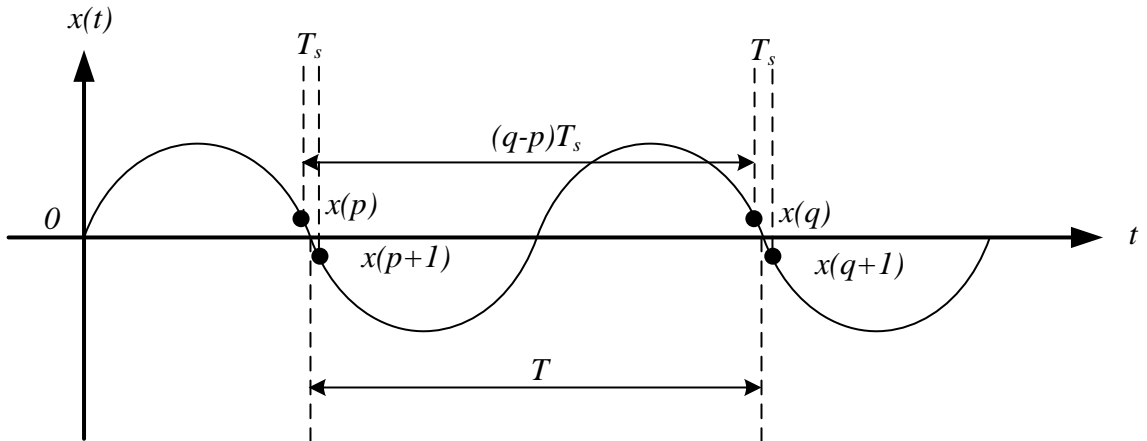
- 可信度: 测量值应反映电力系统的实际情况,并保证基于频率测量的控制的有效性;
- 准确度: 准确度要求通常规定为在有噪声、谐波和衰减直流分量的情况下执行功能的能力;
- 速度: 应用于保护时需要快速的动态跟踪能力和较小的测量延时;
- 鲁棒性: 测量功能应在正常状态、异常状态和电力系统故障期间正常工作;
- 低成本: 性能和成本应该很好地平衡。

一般来说,频率测量包括三个步骤: 信号预处理、频率测量和结果后处理。

C.3.2 周期算法

首先使用的基本方法之一是周期算法(过零算法),它通过测量连续过零时刻之间的时间差来计算频率。参见图C.1。

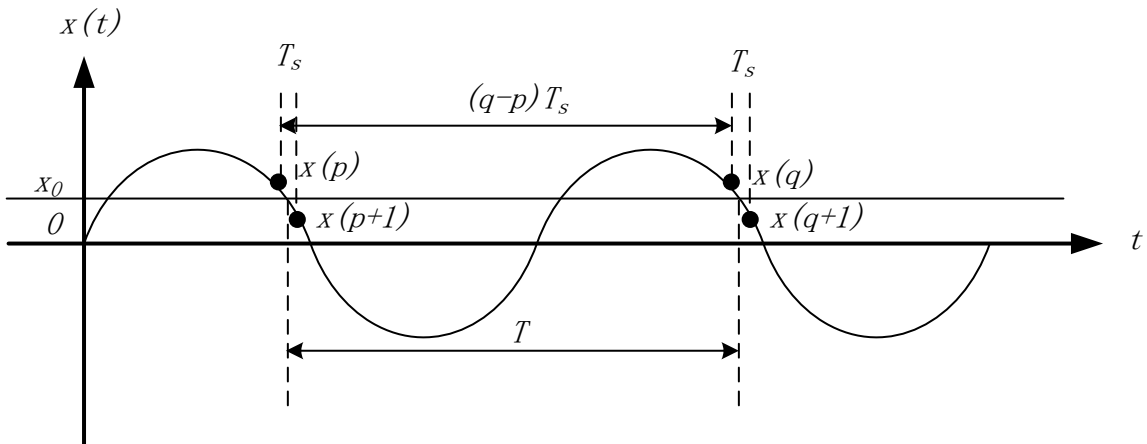
假设信号的采样周期为 T_s 。



图C.1 过零算法

$$\left\{ \begin{array}{l} f = \frac{1}{T} \\ T = T_s \cdot \left(q - p + \left| \frac{0 - x(q)}{x(q+1) - x(q)} \right| - \left| \frac{0 - x(p)}{x(p+1) - x(p)} \right| \right) \dots \dots \dots (C.12) \end{array} \right.$$

基于过零算法，引入非零阈值，形成水平交叉算法，如图C.2所示。



图C.2 水平交叉算法

$$\left\{ \begin{array}{l} f = \frac{1}{T} \\ T = T_s \cdot \left(q - p + \left| \frac{x_0 - x(q)}{x(q+1) - x(q)} \right| - \left| \frac{x_0 - x(p)}{x(p+1) - x(p)} \right| \right) \dots \dots \dots (C.13) \end{array} \right.$$

这里采用线性插值算法来获得交叉时刻。可以使用更复杂的非线性拟合来提高精度。此外，频率可以根据多个周期的数据计算。

C.3.3 分析算法

C.3.3.1 三点采样算法

假设信号的采样周期为 T_s 。

$$\begin{cases} x(k) = A_m \cdot \sin(2\pi f t + \theta) \\ x(k+1) = A_m \cdot \sin(2\pi f(t + T_s) + \theta) \dots\dots\dots (C.14) \\ x(k+2) = A_m \cdot \sin(2\pi f(t + 2 \cdot T_s) + \theta) \end{cases}$$

$$x(k) + x(k+2) = 2 \cdot A_m \cdot \sin(2\pi f(t + T_s) + \theta) \cdot \cos(2\pi f T_s) = 2 \cdot x(k+1) \cdot \cos(2\pi f T_s) \dots (C.15)$$

$$\cos(2\pi f T_s) = \frac{\sum_{k=1}^m |x(k)+x(k+2)|}{2 \cdot \sum_{k=1}^m |x(k+1)|} = y \dots\dots\dots (C.16)$$

$$\begin{cases} f = \frac{1}{2\pi T_s} \cdot \arccos(y) = f_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n!} f_0^{(n)} \cdot (y - y_0)^n \dots\dots\dots (C.17) \\ y_0 = \cos(2\pi f_0 T_s) \end{cases}$$

其中，

$$\begin{cases} f_0^{(1)} = -(1 - y_0)^{-\frac{1}{2}} \\ f_0^{(2)} = -y_0 \cdot (1 - y_0)^{-\frac{2}{3}} \dots\dots\dots (C.18) \\ f_0^{(3)} = - (2y_0^2 + 1) \cdot (1 - y_0^2)^{-\frac{5}{2}} \\ \dots\dots \end{cases}$$

根据频率范围的不同，方程式 (C.17) 中的泰勒级数可以简化为二项式、三项式或四项式。

C.3.3.2 数值积分算法

见方程式 (C.1)，令：

$$y(t) = \int x(t)dt = \frac{A_m}{2\pi f_0} \cdot \cos(2\pi f_0 t + \theta) = B_m \cdot \cos(2\pi f_0 t + \theta) \dots\dots\dots (C.19)$$

其中y (t) 是另一个正弦波形。峰值 A_m 和 B_m 可以通过各种算法获得。

则有：

$$f_0 = \frac{A_m}{2\pi B_m} \dots\dots\dots (C.20)$$

该算法通常用于黑启动柴油发电机和系统保护，在这些场合频率可能在很宽的范围内快速变化。

C.3.4 误差最小化算法

C.3.4.1 最小二乘算法 (LES)

$$x(t) = A_m \cdot \sin(2\pi f_0 t + \phi(t)) = [\cos(2\pi f_0 t) \quad \sin(2\pi f_0 t)] \cdot \begin{bmatrix} A_m \cdot \sin(\phi(t)) \\ A_m \cdot \cos(\phi(t)) \end{bmatrix} = [\cos(2\pi f_0 t) \quad \sin(2\pi f_0 t)] \cdot \begin{bmatrix} z_1(t) \\ z_2(t) \end{bmatrix} \dots\dots (C.21)$$

其中， z_1 和 z_2 分别是复幅值的实部和虚部。

$$\begin{cases} z_1(t) = A_m \cdot \sin(\omega(t)) \\ z_2(t) = A_m \cdot \cos(\omega(t)) \end{cases} \dots\dots\dots (C.22) \supset 16)$$

假设信号的采样周期为 T_s 。

$$x(k) = [\cos(2\pi f_0 \cdot kT_s) \quad \sin(2\pi f_0 \cdot kT_s)] \cdot \begin{bmatrix} z_1(k) \\ z_2(k) \end{bmatrix} = H(k) \cdot Z(k) \dots\dots\dots (C.23)$$

z_1 和 z_2 可以使用递归最小二乘算法计算。

$$\min(J) = \min((X - H \cdot Z)^T (X - H \cdot Z)) \dots\dots\dots (C.24)$$

16) 采标注：原文漏掉了“ A_m ”。

$$\begin{cases} Z(k+1) = Z(k) + k(k+1) \cdot [x(k+1) - H(k+1) \cdot Z(k)] \\ k(k+1) = P(k)H^T(k+1)[H(k+1) \cdot P(k) \cdot H^T(k+1) + I]^{-1} \\ P(k+1) = [I - k(k+1)H(k+1)]P(k) \\ Z(0) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \\ P(0) = 10^4 \cdot I \end{cases} \dots\dots\dots (C.25)$$

那么，

$$\phi(t) = \arctan \frac{z_1}{z_2} \dots\dots\dots (C.26)$$

$$f(t) = f_0 + \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{d\phi(t)}{dt} = f_0 + \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{\phi(t+T_0) - \phi(t)}{T_0} = f_0 \cdot (1 + \frac{1}{2\pi} \cdot (\phi(t+T_0) - \phi(t))) \dots\dots\dots (C.27)$$

C.3.4.2 最小绝对值近似算法 (LAV)

$$x(t) = A_m \cdot \sin(2\pi f t + \theta) = A_m \cdot \sin(2\pi(f_0 + \Delta f)t + \theta) = A_m \cdot \sin(2\pi(f_0 + \Delta f)t) \cdot \cos(\theta) + A_m \cdot \cos(2\pi(f_0 + \Delta f)t) \cdot \sin(\theta) \dots\dots\dots (C.28)$$

应用泰勒级数展开，使用前四个多项式，

$$x(t) = A_m \cdot \sin(2\pi f(t) \cdot t + \theta) = A_m \cdot \sin(2\pi(f_0 + df \cdot t) \cdot t + \theta) \dots\dots\dots (C.29)$$

$$x(t) = A_m \cdot \sin(2\pi f(t) \cdot t + \theta) = A_m \cdot \sin(2\pi(f_0 + df \cdot t) \cdot t + \theta) \dots\dots\dots (C.30)$$

$$Z = \begin{bmatrix} x(kT_s) \\ x((k+1)T_s) \\ x((k+2)T_s) \\ \dots \\ \dots \\ x((k+m-1)T_s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \beta_1(kT_s) & \beta_2(kT_s) & \beta_3(kT_s) & \dots & \dots & \beta_8(kT_s) \\ \beta_1((k+1)T_s) & \beta_2((k+1)T_s) & \beta_3((k+1)T_s) & \dots & \dots & \beta_8((k+1)T_s) \\ \beta_1((k+2)T_s) & \beta_2((k+2)T_s) & \beta_3((k+2)T_s) & \dots & \dots & \beta_8((k+2)T_s) \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \beta_1((k+m-1)T_s) & \beta_2((k+m-1)T_s) & \beta_3((k+m-1)T_s) & \dots & \dots & \beta_8((k+m-1)T_s) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \\ x_7 \\ x_8 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (C.31)^{17)}$$

其中m≥8，x₁至x₈可使用最小绝对值近似算法 (LAV) 计算。

$$\min(J) = \min(|Z - B \bullet X|) \dots\dots\dots (C.32)$$

$$\Delta f = \frac{x_2}{x_1} = -\frac{x_4}{x_3} = \frac{x_2^2 + x_4^2}{x_1^2 + x_3^2} \dots\dots\dots (C.33)$$

C.3.4.3 牛顿类算法

$$x(t) = A_m \cdot \sin(2\pi f(t) \cdot t + \theta) = A_m \cdot \sin(2\pi(f_0 + df \cdot t) \cdot t + \theta) \dots\dots\dots (C.34)$$

应用最大似然估计 (MLE)。

定义模糊函数：

$$H(f_0, df) = \left| \sum_{k=-N}^N x(k) \cdot e^{-j2^C(kf_0 + k^2 \cdot df)} \right| \dots\dots\dots (C.35)$$

参数f₀、df取值应使H最大。

牛顿型算法是：

$$\begin{bmatrix} f_0(p+1) \\ df(p+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_0(p) \\ df(p) \end{bmatrix} - [H^{(2)}(f_0(p), df(p))]^{-1} \bullet H^{(1)}(f_0(p), df(p)) \dots\dots\dots (C.36)$$

式中：

H⁽¹⁾ —— 梯度向量；

17) 采标注：“β₈((k+2)T_s)”，原文误为“β₈((k+3)T_s)”。

$H^{(2)}$ ——二阶导数的黑塞矩阵。

$$\left\{ \begin{array}{l} H^{(1)}(f_0, df) = \begin{bmatrix} \frac{\partial H}{\partial f_0} & \frac{\partial H}{\partial df} \end{bmatrix}^T \\ H^{(2)}(f_0, df) = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 H}{\partial (f_0)^2} & \frac{\partial^2 H}{\partial f_0 \cdot \partial df} \\ \frac{\partial^2 H}{\partial f_0 \cdot \partial df} & \frac{\partial^2 H}{\partial (df)^2} \end{bmatrix} \dots\dots\dots \end{array} \right. \quad (C. 37)$$

C.3.4.4 扩展卡尔曼滤波算法 (EKF)

如方程式 (C.7) 所示, 有噪声的正弦或余弦信号的采样值可以表示为:

$$\left\{ \begin{array}{l} x(k) = \hat{x}(k) + \alpha(k) \\ \hat{x}(k) = A_m \cdot \sin(2\pi f_0 \cdot kT_s + \theta) \dots\dots\dots \\ \alpha(k) \sim N(0, \sigma_\alpha^2) \end{array} \right. \quad (C. 38)$$

式中:

$x(k)$ ——信号的瞬时采样值;

$\hat{x}(k)$ ——信号的实际值;

$\alpha(k)$ ——白噪声信号, 均值为0, 方差为 σ_α^2 。

根据方程式 (C.15),

$$\hat{x}(k) + \hat{x}(k+2) = 2 \cdot \hat{x}(k+1) \cdot \cos(2\pi f T_s) \dots\dots\dots (C. 39)$$

令:

$$\hat{y}(k) = [2 \cdot \cos(2\pi f T_s) \quad \hat{x}(k-1) \quad \hat{x}(k-2)]^T \dots\dots\dots (C. 40)$$

$$\hat{y}(k+1) = f(\hat{y}(k)) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 2 \cdot \cos(2\pi f T_s) & -1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \bullet \hat{y}(k) \dots\dots\dots (C. 41)$$

那么,

$$x(k) = [0 \quad 2 \cdot \cos(2\pi f T_s) \quad -1] \bullet \hat{y}(k) + \alpha(k) = g(\hat{y}(k)) + \alpha(k) \dots\dots\dots (C. 42)$$

$g(\hat{y}(k))$ 是一个观察函数。

将上述系统线性化, 并应用EKF一阶递归理论:

$$\left\{ \begin{array}{l} \tilde{y}(k) = f(\hat{y}(k-1)) \\ \hat{y}(k) = \tilde{y}(k) + K(k)E(k) \\ K(k) = M(k)H(k)^T [H(k)M(k)H(k)^T + I]^{-1} \\ E(k) = x(k) - g(\tilde{y}(k)) \\ M(k) = F(k) \cdot P(k-1) \cdot F(k)^T \\ P(k) = M(k) - K(k)H(k)M(k) \\ F(k) = \frac{\partial f(\hat{y}(k-1))}{\partial \hat{y}(k-1)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ \hat{y}(k-1)(2) & \hat{y}(k-1)(1) & -1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \dots\dots\dots \\ H(k) = \frac{\partial g(\hat{y}(k))}{\partial \hat{y}(k)} = [\hat{y}(k)(2) \quad \hat{y}(k)(1) \quad -1] \end{array} \right. \quad (C. 43)$$

式中：

- $\tilde{y}(k)$ ——估计值；
- $\hat{y}(k)$ ——修正值；
- $K(k)$ ——卡尔曼增益；
- $M(k)$ ——估计误差协方差；
- $P(k)$ ——滤波误差协方差；
- $E(k)$ ——估计误差；
- $F(k), H(k)$ ——参数矩阵。

C.3.5 离散傅里叶变换 (DFT)

$$x(t) = A_m \cdot \sin(2\pi f_0 t + \phi(t)) \dots\dots\dots (C.44)$$

$$x(t) = A_m \cdot \sin(\varphi(t)) \cdot \cos(2\pi k / N) + A_m \cdot \cos(\varphi(t)) \cdot \sin(2\pi k / N) = x_{Re} \cdot \cos(2\pi k / N) + x_{Im} \cdot \sin(2\pi k / N) \dots\dots (C.45)$$

其中，

$$N = f_s / f_0 = T_0 / T_s \dots\dots\dots (C.46)$$

x_{Re}, x_{Im} 可以从快速傅里叶变换中获得。

$$\begin{cases} x_{Re} = \frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x(k) \cdot \cos(2\pi k / N) \\ x_{Im} = \frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x(k) \cdot \sin(2\pi k / N) \end{cases} \dots\dots\dots (C.47)$$

$$\phi(t) = \arctan \frac{x_{Re}}{x_{Im}} \dots\dots\dots (C.48)$$

$$f(t) = f_0 + \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{d\phi(t)}{dt} = f_0 \cdot \left(1 + \frac{\phi(t) - \phi(t-T_0)}{2\pi}\right) \dots\dots\dots (C.49)$$

附录 D
(资料性附录)
有间谐波时的性能

D.1 概述

间谐波会影响频率测量的算法。由于特定电网中存在的间谐波类型可能有很大差异，因此允许不进行相应的强制性的性能试验，而是给出一个典型的试验方法以指导用户。用户可根据特定电网中存在的典型间谐波情况，要求单独进行特定试验。典型的谐波频率可能有16.7 Hz（铁路）、25 Hz（铁路）、20 Hz到30 Hz（由100 %定子接地故障保护系统注入的信号）。在谐振接地电网，接地故障定位系统也可能注入具有间谐波频率的信号（ f_n 的11/12或 f_n 的13/12）。还可能存在音频纹波控制信号（160 Hz至180 Hz，或者210 Hz至220 Hz等）。

附录D推荐了一种试验方案，用于检验当电压信号上叠加间谐波时，过频和低频保护功能进行基波频率稳态测量的能力。

制造商无需申明在保护功能的有效范围内有间谐波时频率测量的准确度。本试验的目的是确定存在和不存在间谐波时测量准确度的差异。

D.2 推荐试验：低频/过频启动值的准确度

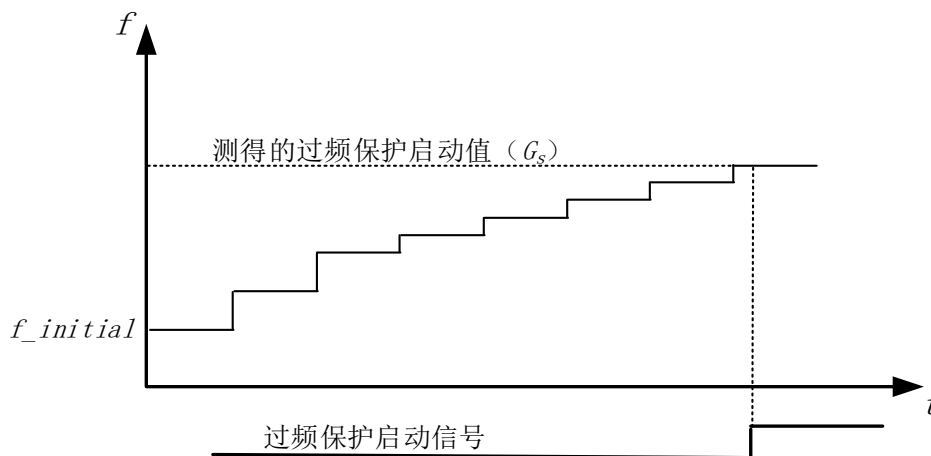
D.2.1 频率缓变过程的生成

推荐的试验方法使用伪连续频率缓变过程，与基波频率无间谐波时启动值准确度评估试验所用的过程类似。

频率缓变从试验频率初值 $f_{initial}$ 开始。试验频率初值远离保护功能的预期启动值 G_S 。

启动信号动作后，可以终止频率缓变过程。

用于过频保护功能的试验方法如图D.1所示。



图D.1 用于过频保护功能试验的正向伪连续缓变过程示例

缓变过程每一步的持续时间：MAX（500 ms，基波频率下最大启动时间 × 10）

在频率按步长变化的转换过程中,注入信号应是连续的。除频率外,其相位或幅值不得有阶跃变化。

为了缩短试验时间,试验刚开始时频率的变化步长可以更大一些,规则如下:

——对于过频保护,大步长可以持续到 G_s 减去“申明的频率准确度”的3倍;

——对于过频保护,大步长可以持续到 G_s 加上“申明的频率准确度”的3倍。

“申明的频率准确度”基于5.3中规定的要求。

一旦达到上述值,频率的变化步长将小于或等于基波频率下所申明频率准确度的10%,直到启动信号动作、频率缓变过程结束。

通过在标称频率上叠加表D.1中列出的其中一个谐波信号进行试验。应针对表D.1中规定的每个间谐波值或根据保护功能目标应用场景而确定的特定值进行试验。

表D.1 叠加的间谐波

间谐波频率	间谐波含量百分比
16.7 Hz	5 %
20 Hz	5 %
25 Hz	5 %
45 Hz	5 %
55 Hz	5 %
65 Hz	5 %
170 Hz	5 %
217 Hz	5 %

表D.1中定义的间谐波含量是试验的典型值。可根据目标应用场景,采用更低或更高的值。

间谐波的频率值与实际试验频率(试验中的标称值)无关。在整个试验过程中,间谐波频率保持不变。

D.2.2 保护功能定值

启动频率定值应在表D.2所示的定值范围内改变。

如果某些保护功能设置了频率测量时间窗长度定值,则该定值应为默认值,除非制造商对频率测量时间窗长度定值与频率定值(G_s)的对应关系有特殊建议。在这种情况下,应遵从制造商的建议。

D.2.3 有间谐波时频率准确度试验点及频率准确度计算

按照表D.2中列出的试验定值点和6.1中规定的规则,对保护功能的每个标称频率进行试验。

对所有试验定值点测量启动频率,测量误差按以下公式计算:

$$\text{误差} = (\text{测得的启动频率} - G_s) \text{ mHz}$$

每个试验点重复试验5次,每叠加一个间谐波频率均报告其中的最大测量误差,如表D.2所示。同时列出标称频率下(不含间谐波)的准确度误差(即6.2.1.1的试验结果),如表D.2所示。

表D.2 有间谐波时低频/过频保护试验点¹⁸⁾

频率定值点 (启动门槛, G_S) ^a	频率定值 (Hz)	有16.7 Hz 间谐波时 误差 (mHz)	有20 Hz间 谐波时误 差 (mHz)	有25 Hz间 谐波时误 差 (mHz)	有45 Hz间 谐波时误 差 (mHz)	有55 Hz间 谐波时误 差 (mHz)	有65 Hz间 谐波时误 差 (mHz)	有170 Hz 间谐波时 误差 (mHz)	标称频率下的 准确度(无间 谐波时)(mHz)
-100 % (最小定值)		5	4	5	5	8	5.4	5.4	3.0
-10 %		7	5	3	7	8	6.0	6.0	3.1
-5 %		8	5	8	10	9	8.0	8.0	3.2
-2.5 %		8	10	12	12	8	10.0	10.0	3.7
-1 %		8	10	12	12	8	10.0	10.0	3.5
0 % (f_R) ^b		8	10	12	12	8	10.0	10.0	3.0
+1 %		8	5	8	10	9	8.0	8.0	3.2
+2.5 %		8	5	8	10	9	8.0	8.0	3.6
+5 %		8	5	8	10	9	8.0	8.0	3.1
+10 %		7	5	3	7	8	6.0	6.0	3.2
+100 % (最大定值)		5	4	5	5	8	5.4	5.4	3.0

^a 根据 6.1 中规定的通用规则, 试验定值点用百分数 (%) 表示, 以计算频率定值 (门槛 G_S)。
^b 如果等于标称频率的定值不可用, 则可以忽略该试验点。

D.2.4 有间谐波时的频率准确度报告

有间谐波时的频率准确度报告见表D.2。还报告了6.2.1.1中测得的标称频率下无间谐波时的准确度值。

应针对保护功能的每个标称频率完成报告表(见表D.2)。

18) 采标注: 表D.2中少了217Hz间谐波数据。

附录 E

(资料性附录)

电压连续波形下频率突变的实现方法

当利用频率突变检验保护功能时，注入的电压信号除频率变化外，其波形应是连续的。附录E说明了保证三相电压注入信号连续的方法。同样的方法也适用于单相信号注入的情形。

在下面的表达式中，频率突变发生在“ t_0 ”时刻。

——试验频率初值为 f_1 。

——试验频率终值为 f_2 。

——在“ t_0 ”时刻到来之前，注入的信号基于以下表达式：

- $V_{L1}(t) = amp \times \sin(2 \times \pi \times f_1 \times t)$;
- $V_{L2}(t) = amp \times \sin(2 \times \pi \times f_1 \times t - 2 \times \pi/3)$;
- $V_{L3}(t) = amp \times \sin(2 \times \pi \times f_1 \times t + 2 \times \pi/3)$ 。

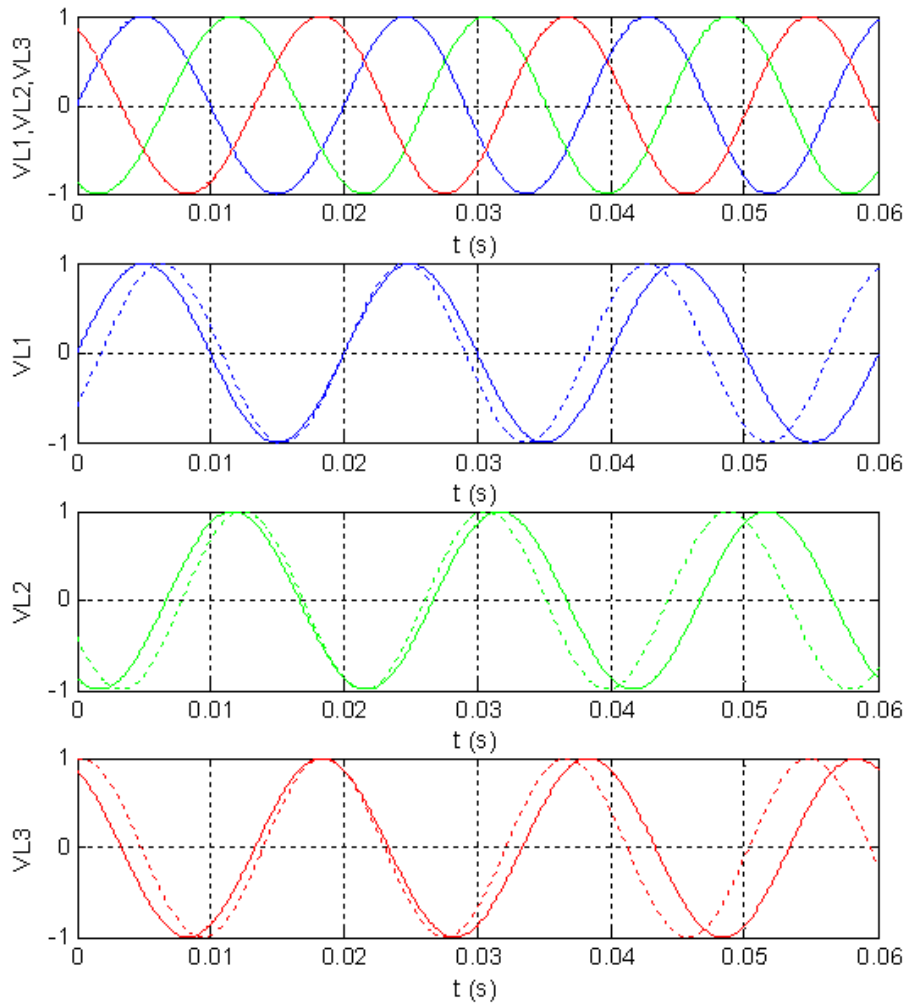
——在“ t_0 ”时刻（频率突变时刻）之后，注入的信号基于以下表达式：

- $V_{L1}(t) = amp \times \sin(2 \times \pi \times f_2 \times t + \phi)$;
- $V_{L2}(t) = amp \times \sin(2 \times \pi \times f_2 \times t - 2 \times \pi/3 + \phi)$;
- $V_{L3}(t) = amp \times \sin(2 \times \pi \times f_2 \times t + 2 \times \pi/3 + \phi)$ 。

其中， ϕ 通过计算得到以确保电压波形连续。这是由 $\phi = 2 \times \pi \times t_0 \times (f_1 - f_2)$ 来保证的。

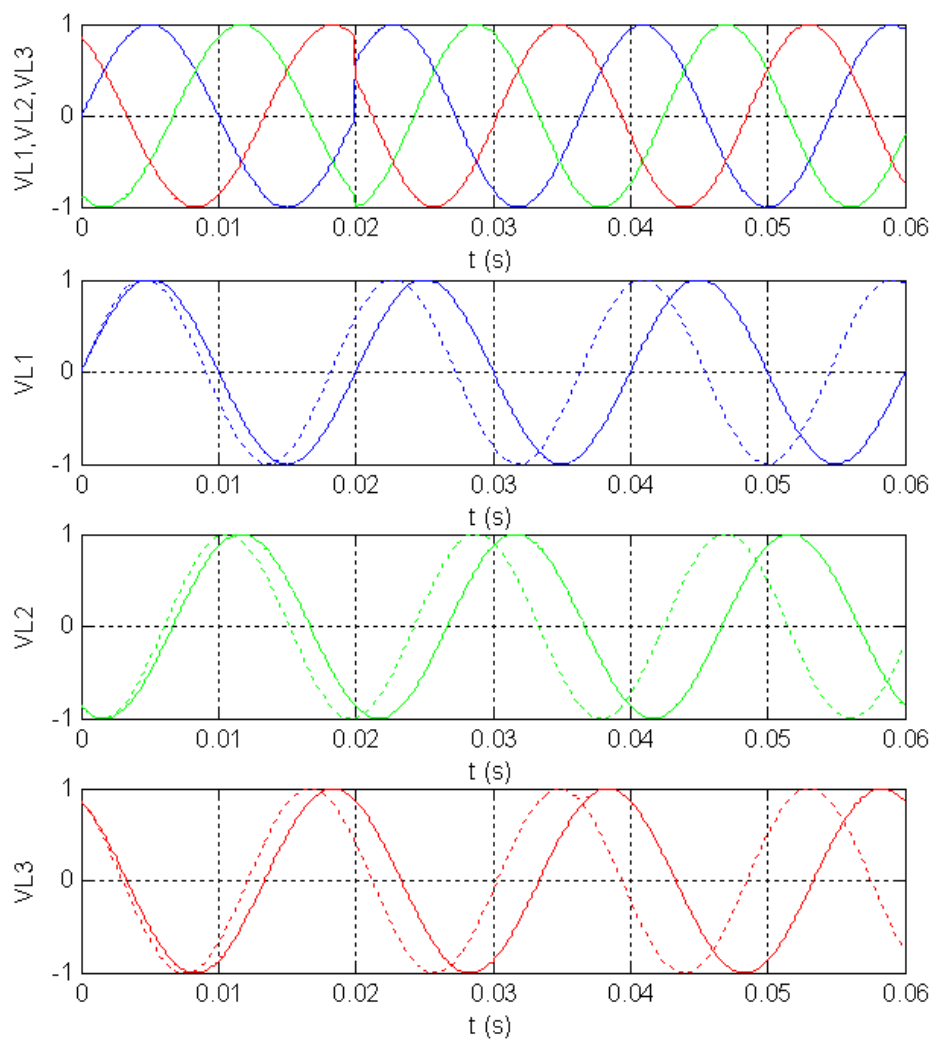
生成的注入信号如图E. 1所示。

第一张图显示在 $t_0 = 0.02$ s时频率从50 Hz突然变化到55 Hz的三相电压波形。其他图显示两个工频下的相电压波形（其中实线为50 Hz，虚线为55 Hz）。



图E.1 $t_0 = 0.02\text{ s}$ 时频率突变前后的电压连续波形示例

同样的例子如图E.2所示，在 $t_0 = 0.02\text{ s}$ 频率突变时电压波形不连续。在图E.2中，频率为 f_2 （55 Hz）的信号按 $\phi = 0$ 计算。



图E.2 $t_0 = 0.02$ s时频率突变前后的电压不连续波形示例

参 考 文 献

- [1] IEC 60050 (all parts), International Electrotechnical Vocabulary (available at www.electropedia.org)
- [2] IEC 60050-103, International Electrotechnical Vocabulary – Part 103: Mathematics – Functions (available at www.electropedia.org)
- [3] IEC 60050-447, International Electrotechnical Vocabulary – Part 447: Measuring relays (available at www.electropedia.org)
- [4] IEC 60050-601, International Electrotechnical Vocabulary – Chapter 601: Generation, transmission and distribution of electricity – General (available at www.electropedia.org)
- [5] IEC 60255-24, Measuring relays and protection equipment – Part 24: Common format for transient data exchange (COMTRADE) for power systems
- [6] IEC 61000-2-4:2002, Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 2-4: Environment – Compatibility levels in industrial plants for low-frequency conducted disturbances
- [7] IEC 61850-7-4, Communication networks and systems for power utility automation – Part 7-4: Basic communication structure – Compatible logical node classes and data classes
- [8] IEC 61850-9-2, Communication networks and systems for power utility automation – Part 9-2: Specific communication service mapping (SCSM) – Sampled values over ISO/IEC 8802-3
- [9] IEC 61869-9:2016, Instrument transformers – Part 9: Digital interface for instrument transformers
- [10] IEEE Std C37.2-2008, IEEE Standard Electrical Power System Device Function Numbers, Acronyms, and Contact Designations
- [11] IEC/IEEE 60255-118-1, Measuring relays and protection equipment – Part 118-1: Synchrophasor Measurements for Power Systems – Measurements
-