

ICS 19.020
CCS K 85

团 体 标 准

T/CSEE 0276—2021

直流输电换流站交流侧电网 谐波分析技术规范

Specification for harmonic analysis on the AC-side
of HVDC converter station



2021-09-17 发布

2021-12-01 实施

中国电机工程学会 发布

团 体 标 准
直流输电换流站交流侧电网
谐波分析技术规范

T/CSEE 0276—2021

*

中国电力出版社出版、印刷、发行

(北京市东城区北京站西街19号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

*

2022年6月第一版 2022年6月北京第一次印刷
880毫米×1230毫米 16开本 0.75印张 24千字

*

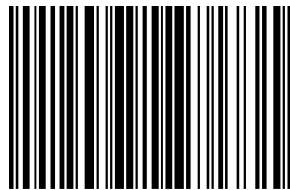
统一书号 155198·4171 定价 19.00元

版 权 专 有 侵 权 必 究

本书如有印装质量问题，我社营销中心负责退换



中国电机工程学会官方微信



155198.4171

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 谐波潮流分析模型	2
5.1 输电线路	2
5.2 同步发电机	2
5.3 变压器	3
5.4 滤波器和并联电容器	3
5.5 换流站交流侧谐波潮流分析的换流器模型	3
5.6 电力电子并网装备	3
5.7 负荷	3
6 谐波阻抗扫描	3
6.1 谐波阻抗扫描计算方法	3
6.2 导纳矩阵法	4
6.3 谐波注入法	4
6.4 计算步长及偏差控制	4
6.5 运行方式要求	4
6.6 统计包络图	4
7 谐波潮流分析	5
7.1 谐波潮流适用场景及分类	5
7.2 谐波潮流的分析方法	5
7.3 谐波潮流分析的时域仿真方法	5
8 电网谐波同步测量	6
8.1 谐波同步测量适用场景	6
8.2 谐波同步测量	6
附录 A (资料性) 谐波阻抗扫描模型	7

前 言

本文件按照《中国电机工程学会标准管理办法（暂行）》的要求，依据 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。

本文件由中国电机工程学会提出。

本文件由中国电机工程学会直流输电与电力电子业委员会技术归口并解释。

本文件起草单位：南方电网科学研究院有限责任公司、中国南方电网有限责任公司电力调度控制中心、中国电力科学研究院有限公司、四川大学、中国电力工程顾问集团西南电力设计院有限公司、西安交通大学。

本文件主要起草人：洪潮、吴为、周挺辉、周保荣、张野、赵睿、付超、梅勇、刘洪涛、项祖涛、刘天琪、武文城、杨帆、陈磊、焦在滨。

本文件为首次发布。

本文件在执行过程中的意见或建议反馈至中国电机工程学会标准执行办公室（地址：北京市西城区白广路二条一号，100761，网址：<http://www.csee.org.cn>，邮箱：cseebz@csee.org.cn）。

直流输电换流站交流侧电网谐波分析技术规范

1 范围

本文件规定了直流输电换流站交流侧电网谐波分析的分析模型、阻抗扫描、潮流分析及测量。
本文件适用于接入 110 kV 及以上电压等级输电网的直流输电换流站交流侧电网谐波分析。

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 14549—1993 电能质量 公用电网谐波
GB/T 32507—2016 电能质量 术语

3 术语和定义

GB/T 14549—1993 和 GB/T 32507—2016 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

谐波源 **harmonic source**

向公用电网注入谐波电流或在公用电网中产生谐波电压的电气设备。

[来源：GB/T 14549—1993, 3.9]

3.2

谐波（分量） **harmonic (component)**

对非正弦周期量进行傅里叶级数分解，得到的频率为基波频率整数倍的正弦分量。

[来源：GB/T 32507—2016, 2.6.7]

3.3

谐波阻抗 **harmonic impedance**

电气元件、电气设备或电路与系统在某一谐波频率下呈现的阻抗。

[来源：GB/T 32507—2016, 2.6.12]

3.4

系统谐波阻抗 **harmonic impedance of a network/system**

以系统的某一点为观测点，系统侧呈现的谐波阻抗。

[来源：GB/T 32507—2016, 2.6.13]

3.5

谐波潮流 **harmonic power flow**

电网稳态运行时的谐波电压、谐波电流。

3.6

换流器 **converter**

变流器

能实现完整换流功能的电气装置。

[来源：GB/T 32507—2016, 5.5]

3.7

谐波测量点 **harmonic measurement points**

对电网和用户的谐波进行测量的位置。

[来源: GB/T 32507—2016, 2.6.6]

3.8

谐波测量装置 **harmonic measurement unit**

用于电网中谐波同步测量和输出以及进行谐波记录、分析的装置, 包括谐波数据采集、集中、分析及上送等功能。

3.9

谐波测量子站 **harmonic measurement substation**

安装在同一发电厂、变电站或换流站的谐波测量装置的集合。子站可以是单台谐波测量装置, 也可以由多台谐波测量装置构成。

3.10

谐波测量主站 **harmonic measurement main station**

安装在控制中心, 用于接收、管理、存储、分析、告警、决策和转发谐波数据的计算机系统。

3.11

谐波测量系统 **harmonic measurement system**

以谐波测量技术为基础, 以谐波监测、分析为目标的实时监测系统。谐波测量系统包括主站部分和子站部分。

4 符号、代号和缩略语

下列缩略语适用于本文件。

FACTS: 柔性交流输电系统 (flexible AC transmission systems)。

IGBT: 绝缘栅双极型晶体管 (insulated gate bipolar transistor)。

PID: 比例、积分、微分 (proportional integral differential)。

SVC: 静止无功补偿器 (static var compensator)。

STATCOM: 静止同步补偿器 (static synchronous compensator)。

TCSC: 晶闸管投切串联电容器 (thyristor controlled series capacitor)。

UPFC: 统一潮流控制器 (unified power flow controller)。

5 谐波潮流分析模型

5.1 输电线路

5.1.1 交流输电线路模型宜采用集中参数的 π 型等值电路模型或分布参数线路模型, 主要参数包括输电线路的正序和零序电阻、电抗、电纳等。

5.1.2 直流输电线路模型应考虑在不同频率下大地及架空导线对线路电阻、电感和电容的影响, 宜采用频变模型。

5.1.3 当谐波频率较高时, 如谐波频率高于 1 kHz, 输电线路模型宜计及集肤效应的影响, 从而对线路电阻值和电感值进行修正。

5.2 同步发电机

5.2.1 在谐波潮流计算时, 同步发电机宜采用序阻抗模型近似表征。

5.2.2 在谐波分析的电磁暂态时域仿真中, 同步发电机采用六绕组详细模型及其参数, 并计及励磁系统等环节。

5.2.3 电磁暂态时域仿真中，同步发电机励磁系统模型宜采用符合实际情况的励磁系统模型，包括励磁功率部分、励磁控制部分、发电机电压测量和无功电流补偿部分以及电力系统稳定器部分。励磁控制部分由 PID 或反馈校正环节、功率控制环节、补偿励磁机时间常数的反馈环节、过励限制环节和欠励限制环节等组成。

5.3 变压器

5.3.1 变压器模型采用集中参数串联阻抗支路表示，主要参数包括变压器短路电抗、短路损耗等。

5.3.2 变压器模型应考虑铁芯饱和特性。

5.4 滤波器和并联电容器

5.4.1 交、直流滤波器以及并联电容器应采用具有详细拓扑结构和元件参数的模型。

5.4.2 交、直流滤波器以及并联电容器内部元件包括电阻、电感和电容等。

5.5 换流站交流侧谐波潮流分析的换流器模型

5.5.1 在谐波潮流计算时，常规直流输电系统的交流侧可等值为谐波电流源，直流侧可等值为谐波电压源。

5.5.2 柔性直流输电系统的谐波分析模型宜等值为谐波阻抗模型，且该阻抗模型应计及柔性直流输电控制系统的作用。

5.5.3 柔性直流输电控制系统宜包含电流控制、直流电压控制、交流电压控制、锁相控制、环流抑制控制、功率控制等环节。

5.5.4 在谐波分析的电磁暂态时域仿真中，直流输电系统的一次系统部分（包括换流变压器、换流阀、直流线路、平波电抗、交直流滤波器等）应根据实际系统的设备参数和接线方式进行建模；直流输电系统的控制部分宜采用厂家提供的可与实时仿真器接口的实际控制系统物理装置，或基于实际控制系统建立的电磁暂态仿真模型。

5.6 电力电子并网装备

5.6.1 电力电子并网装备主要包括新能源并网发电装备，以及 SVC、STATCOM、TCSC 和 UPFC 等 FACTS 装备。

5.6.2 新能源并网发电装备（如风力发电机组和光伏发电系统）的谐波分析模型宜采用谐波阻抗模型建模，且建模中应考虑拓扑结构和并网控制策略。对于新能源场站可采用全部发电机组单元与场站集电系统详细模型，或采用场站等值简化模型。

5.6.3 基于晶闸管器件并网的 FACTS 装备的谐波分析模型宜采用谐波源模型建模，且建模中应考虑器件特性、触发方式和拓扑结构。

5.6.4 基于 IGBT 器件并网的 FACTS 装备的谐波分析模型宜采用谐波阻抗模型建模，且建模中应考虑拓扑结构和控制方式。

5.7 负荷

5.7.1 电力系统谐波分析中，负荷宜采用综合负荷的谐波分析模型表征。

5.7.2 综合负荷的谐波分析模型可采用串联阻抗模型、并联导纳模型和包含感应电动机支路的模型。

5.7.3 当可以获得准确的等值谐波阻抗实测数据时，优先采用实测阻抗模型。

6 谐波阻抗扫描

6.1 谐波阻抗扫描计算方法

进行谐波阻抗扫描计算时，宜采用导纳矩阵法或谐波注入法。

6.2 导纳矩阵法

6.2.1 采用导纳矩阵法时，应以关注频段内各元件谐波模型为基础，建立各频率点的系统导纳矩阵，求取从特定母线观测系统的等值谐波阻抗。

6.2.2 对于发电机、变压器、负荷、电动机等元件，可采用集中参数模型。

6.2.3 对于长线路，宜采用具有频变特性的分布参数模型。

6.2.4 谐波阻抗扫描模型参见附录 A。

6.3 谐波注入法

6.3.1 采用谐波注入法时，应首先建立系统的电磁暂态模型，并仿真进入稳态运行点。

6.3.2 采用在测量点注入谐波电流及谐波电压，测量系统的响应（谐波电压或谐波电流），并利用欧姆定律 $Z = \dot{U} / \dot{I}$ 求取系统的等值谐波阻抗。

6.3.3 注入谐波激励幅值应保持系统当前线性水平，使系统仍处于正常运行状态，同时确保其响应明显能从背景噪声中分离，谐波激励幅值宜取基波幅值的 1%~10%。

6.4 计算步长及偏差控制

6.4.1 导纳矩阵法或谐波注入法的计算步长一般采用 1 Hz~5 Hz 的步长，也可视具体分析需求采用更小计算步长。

6.4.2 各次谐波频率范围在计算中应考虑一定的偏差范围，对 10 次及以下次数谐波，可考虑 5 Hz~10 Hz 的偏差。对 10 次以上次数谐波，可考虑 10 Hz~15 Hz 的偏差。

6.5 运行方式要求

在进行换流站交流侧电网谐波阻抗扫描计算时，应考虑换流站近区电厂不同开机方式、电网设备检修方式的组合，以及系统负荷水平。

6.6 统计包络图

6.6.1 宜采用包络图的形式对谐波阻抗扫描结果进行估计，即包络图中的任意一点均为系统谐波阻抗的可能数值。

6.6.2 包络图可采用扇形、圆形或多边形的形式，见图 1（ R 表示电阻， X 表示电抗）。

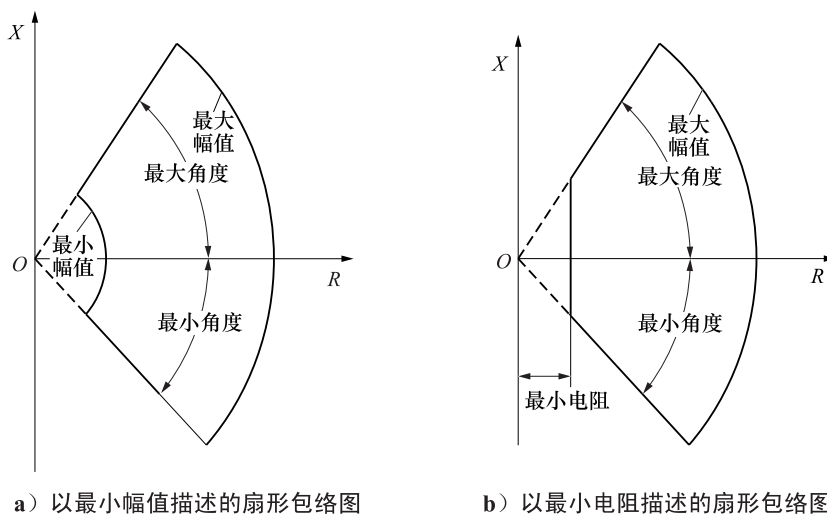


图 1 扇形、圆形、多边形包络图

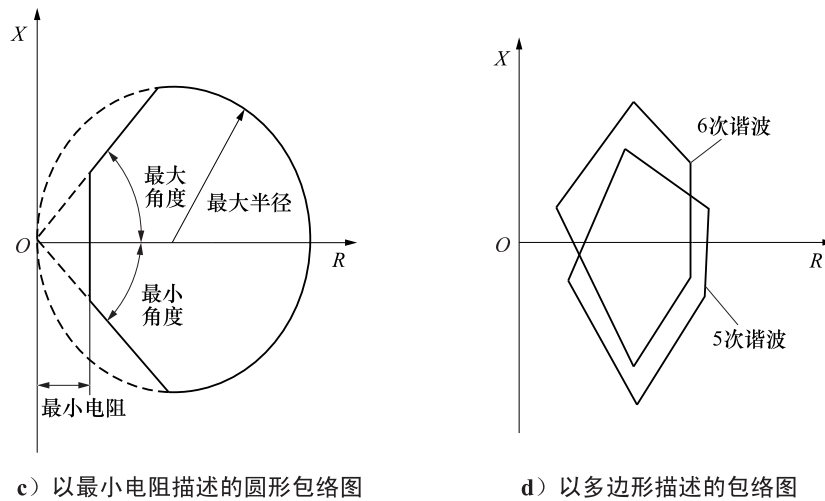


图1 扇形、圆形、多边形包络图（续）

7 谐波潮流分析

7.1 谐波潮流适用场景及分类

7.1.1 在进行换流站交流侧电网谐波分布分析、谐波谐振事件分析、系统谐波阻抗计算时，可进行谐波潮流分析。

7.1.2 谐波潮流计算可采用经典谐波潮流分析法，或谐波潮流交直流统一迭代分析法。

7.2 谐波潮流的分析方法

7.2.1 经典谐波潮流分析法

- 经典方法分析和计算其交流侧所产生的谐波电流和直流侧所产生的谐波电压。
- 交流侧所产生的谐波电流和直流侧所产生的谐波电压分别等效为交流侧谐波电流源和直流侧谐波电压源，从而分别计算交流系统和直流系统中的谐波电压和电流分布。

7.2.2 谐波潮流交直流统一迭代分析法

- 交直流统一迭代分析法模拟了换流装置的非线性特性，考虑了交、直流系统谐波电压和谐波电流通过交、直流网络而形成的相互影响，采用迭代求解的方法进行计算。
- 交直流统一迭代分析法可按照换流站交流侧变量迭代收敛或直流侧变量迭代收敛。在进行谐波潮流计算之前，宜进行一次常规的交流直流系统基波潮流计算，以提高统一迭代的收敛性。

7.3 谐波潮流分析的时域仿真方法

7.3.1 时域仿真工具

谐波分析的时域仿真宜采用电磁暂态类仿真程序或实时仿真工具。

7.3.2 时域仿真步长

在应用电磁暂态仿真工具进行谐波潮流分析时，仿真步长取值宜小于等于 $50 \mu\text{s}$ ，以精确模拟直流换流站电力电子器件的开断过程影响。

7.3.3 时域仿真考虑的元件模型

输电线路、同步发电机、变压器及电力电子并网设备等模型参照 5.1~5.7 中的对应内容。

8 电网谐波同步测量

8.1 谐波同步测量适用场景

8.1.1 在进行换流站交流侧电网谐波分布分析、评估谐波源和谐波吸收点、系统等值时，宜进行谐波同步测量。

8.1.2 在进行谐波电压、谐波电流相角测量时，必须进行谐波同步测量。

8.2 谐波同步测量

8.2.1 电网谐波同步测量主要针对准稳态谐波，应避免暂态谐波的影响。

8.2.2 不同量测点的谐波测量严格在同步时间下进行，所有谐波测量结果均需标注同步时标。

8.2.3 根据谐波源特点，谐波同步测量时宜采用调整谐波次数测量范围的方法，以提高测量精度和计算速度。

8.2.4 电网谐波同步量测装置需具备北斗授时/守时单元，或 GPS 授时/守时单元。

附录 A
(资料性)
谐波阻抗扫描模型

A.1 发电机

发电机可视为一个等值阻抗后的电压源，发电机的谐波阻抗模型为：

$$\begin{cases} R_a(n_f) = R_a(f_0)(a_1 + b_1 n_f + c_1 n_f^2 + d_1 n_f^3 + e_1 n_f^4) \\ X_d''(n_f) = X_d''(f_0)(a_2 + b_2 n_f + c_2 n_f^2 + d_2 n_f^3 + e_2 n_f^4) \end{cases} \quad (\text{A.1})$$

式中：

- f_0 ——基频频率；
 n_f ——谐波次数；
 $R_a(n_f)$ ——发电机 n_f 次谐波电阻；
 $R_a(f_0)$ ——发电机基频电阻；
 $X_d''(n_f)$ ——发电机 n_f 次谐波暂态电抗；
 $X_d''(f_0)$ ——发电机基频次暂态电抗；
 a_1 、 b_1 、 c_1 、 d_1 、 e_1 、 a_2 、 b_2 、 c_2 、 d_2 、 e_2 ——用户自定义参数。

具体可采用以下发电机谐波阻抗模型（即选取 $a_1=1$ ， $b_1=c_1=d_1=e_1=0$ ， $b_2=0$ ， $a_2=c_2=d_2=e_2=0$ ）：

$$\begin{cases} R_a(n_f) = R_a(f_0) \\ X_d''(n_f) = X_d''(f_0)n_f \end{cases} \quad (\text{A.2})$$

A.2 变压器

变压器谐波阻抗模型为：

$$\begin{cases} R_T(n_f) = R_T(f_0)(a + b n_f^{k_1} + c n_f^{k_2}) \\ X_T(n_f) = X_T(f_0)n_f \end{cases} \quad (\text{A.3})$$

式中：

- $R_T(n_f)$ ——变压器 n_f 次谐波电阻；
 $R_T(f_0)$ ——变压器基频电阻；
 $X_T(n_f)$ ——变压器 n_f 次谐波电抗；
 $X_T(f_0)$ ——变压器基频电抗；
 a 、 b 、 c 、 k_1 、 k_2 ——用户自定义参数。

具体可采用以下变压器谐波阻抗模型（即选取 $a=1$ ， $b=c=k_1=k_2=0$ ）：

$$\begin{cases} R_T(n_f) = R_T(f_0) \\ X_T(n_f) = X_T(f_0)n_f \end{cases} \quad (\text{A.4})$$

A.3 负荷

负荷的谐波模型为：

$$\begin{cases} g(n_f) = \frac{P_0}{U^2}(a_1 + b_1 n_f + c_1 n_f^2) \\ b(n_f) = \frac{Q_0}{U^2}(a_2 + b_2 n_f + c_2 n_f^2) \end{cases} \quad (\text{A.5})$$

式中：

- $g(n_f)$ —— 负荷 n_f 次谐波电导；
- $b(n_f)$ —— 负荷 n_f 次谐波电纳；
- P_0 —— 有功负荷；
- Q_0 —— 无功负荷；
- U —— 节点电压；
- $a_1、b_1、c_1、a_2、b_2、c_2$ —— 用户自定义参数。

具体可采用以下负荷谐波阻抗模型（即选取 $a_1 = a_2 = 1, b_1 = c_1 = b_2 = c_2 = 0$ ）：

$$\begin{cases} g(n_f) = \frac{P_0}{U^2} \\ b(n_f) = \frac{Q_0}{U^2} \end{cases} \dots\dots\dots (A.6)$$

A.4 并联电容、电抗器

并联电容、电抗器可视为理想的电气元件，按以下模型考虑：

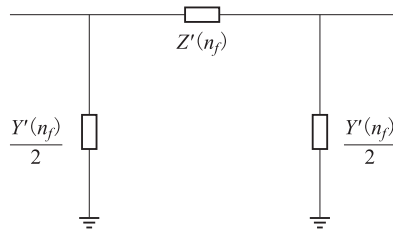
$$X_T(n_f) = X_T(f_0)n_f \dots\dots\dots (A.7)$$

式中：

- $X_T(n_f)$ —— 电容、电抗器 n_f 次谐波电抗；
- $X_T(f_0)$ —— 电容、电抗器基频电抗。

A.5 线路

线路的分布参数模型如图 A.1 所示。



注：图 A.1 中， $Z'(n_f) = \frac{Z(n_f) \sinh \sqrt{Y(n_f)Z(n_f)}}{\sqrt{Y(n_f)Z(n_f)}}$ ， $\frac{Y'(n_f)}{2} = Y(n_f) \frac{\tanh \frac{\sqrt{Y(n_f)Z(n_f)}}{2}}{\sqrt{Y(n_f)Z(n_f)}}$ 。其中， $Z'(n_f)$ 和 $\frac{Y'(n_f)}{2}$ 分别为分布参数模型下 n_f 次谐波的 PI 型等值电路参数。 $Z(n_f)$ 和 $Y(n_f)$ 分别为集中模型参数下 n_f 次谐波的 PI 型等值电路参数。

图 A.1 线路的分布参数模型