

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.201176

# 基于测试信号法的 HVDC 谐波阻抗扫描方法研究

李清<sup>1</sup>, 周强<sup>2</sup>, 张东辉<sup>2</sup>, 毛炽祖<sup>1</sup>

(1. 中国南方电网有限责任公司超高压输电公司检修试验中心, 广东 广州 510670;

2. 清华四川能源互联网研究院, 四川 成都 610200)

**摘要:** 谐波阻抗扫描是高压直流输电(HVDC)中谐波谐振分析、交流或直流滤波器设计等工作的重要手段。采用电路叠加定理说明了适用于 HVDC 谐波阻抗扫描的测试信号法。基于测试信号法基本原理及其在 HVDC 应用研究中的进展, 提出测试信号法应用于 HVDC 谐波阻抗扫描的谐波源幅值选择方法和用于减小谐波源初相位影响的改进扫描方法。最后, 以 CIGRE First Benchmark 模型为例, 在 PSCAD/EMTDC 仿真平台上定量分析了谐波源幅值、谐波源初相位对谐波阻抗扫描的影响, 以验证所提出的方法可用于进一步提高 HVDC 谐波阻抗扫描结果的可靠性, 为实际直流输电工程设计提供参考。

**关键词:** 高压直流输电; 谐波阻抗扫描; 测试信号法; 谐波源幅值; 谐波源初相位

## An harmonic impedance scanning method of HVDC based on a test signal method

LI Qing<sup>1</sup>, ZHOU Qiang<sup>2</sup>, ZHANG Donghui<sup>2</sup>, MAO Chizu<sup>1</sup>

(1. EHV Maintenance & Test Center, China Southern Power Grid Company Limited, Guangzhou 510670, China;

2. Sichuan Energy Internet Research Institute, Tsinghua University, Chengdu 610200, China)

**Abstract:** Harmonic impedance scanning is an important means of harmonic resonance analysis and AC or DC filter design in HVDC. In this paper, the circuit superposition theorem is used to explain the test signal method which is suitable for HVDC harmonic impedance scanning. Based on the basic principle of the test signal method and how it has progressed in HVDC application research, a method of selecting harmonic source amplitude and an improved scanning method for reducing the influence of the initial phase of the harmonic source are proposed. Finally, taking the CIGRE first benchmark model as an example, the influence of harmonic source amplitude and initial phase on harmonic impedance scanning is quantitatively and qualitatively analyzed on a PSCAD/EMTDC simulation platform to verify that the proposed method can be used to further improve the reliability of harmonic impedance scanning results of HVDC, and provide a reference for actual HVDC project design.

This work is supported by the Science and Technology Project of China Southern Power Grid (No. CGYKJXM20180485) and Sichuan Science and Technology Plan (No. 2019YJ0631).

**Key words:** high voltage direct current; harmonic impedance scanning; test signal method; amplitude of harmonic source; initial phase of harmonic source

## 0 引言

高压直流输电因其远距离、大容量、低损耗输电优势, 是我国西电东送大容量输电的重要手段<sup>[1]</sup>。现有在运的超高压和特高压直流输电主要还是采用传统直流技术, 其换流器会有大量特征谐波, 需要

配置一定数量的滤波器用于抑制谐波, 但不当的滤波器设计或直流系统运行方式可能会引发直流系统谐振, 甚至引发交直流系统谐波不稳定<sup>[2-3]</sup>。另外, 随着大规模新能源经柔性直流接入电网, 可能会引发交直流系统新的谐波谐振问题, 使得谐波谐振问题的研究越来越迫切<sup>[4-6]</sup>。对于交直流系统谐波谐振问题, HVDC 系统的谐波阻抗特性研究, 特别是在研究直流换流器交流侧或直流侧系统的频率阻抗特性时, 如何计及换流器的影响是研究的重点<sup>[7-12]</sup>。

基金项目: 南方电网公司科技项目资助 (CGYKJXM20180485); 四川省科技计划项目资助 (2019YJ0631)

目前,用于确定 HVDC 系统谐波阻抗特性的方法主要有等值阻抗模型法和测试信号法(又称小信号测试法,或频率扫描法),等值阻抗模型又分为 HVDC 等值阻抗模型和换流器等值阻抗模型<sup>[13-14]</sup>。HVDC 等值阻抗模型法基于准稳态的假设,方便从理论上对交流与直流间的相互作用进行研究,适用于小扰动稳定性理论分析<sup>[13]</sup>。换流器等值阻抗模型的推导基于换相过程理想、仅考虑主导谐波传递过程、忽略直流控制影响等前提,使得理论结果与实测结果偏差较大<sup>[15-20]</sup>。基于时域仿真的测试信号法计及了直流输电系统控制、交直流交互影响等各种非线性因素的作用,将换流器在交、直流侧分别等效为一二端含源、非线性阻抗网络<sup>[20-21]</sup>,物理意义鲜明,较符合实测出的换流器特性。因此,测试信号法是目前应用于电力电子设备谐波阻抗扫描的通用工程方法,也作为各类设备等值阻抗模型的一种验证或辅助生成手段<sup>[20, 22-26]</sup>。但是,测试信号法实施过程中存在诸多不稳定因素,主要表现在采用不同的谐波源参数或扫描方法可能得出差别较大的阻抗值<sup>[20-21, 27-28]</sup>。

本文采用电路叠加定理说明了适用于 HVDC 谐波阻抗扫描的测试信号法;基于测试信号法基本原理及其在 HVDC 应用研究中的进展,提出测试信号法应用于 HVDC 谐波阻抗扫描的谐波源幅值选择方法和用于减小谐波源初相位影响的改进扫描方法;最后,以 CIGRE First Benchmark 模型为例,在 PSCAD/EMTDC 仿真平台上定量或定性分析了谐波源幅值、谐波源初相位对谐波阻抗扫描的影响,以验证所提出的方法可用于进一步提高 HVDC 谐波阻抗扫描结果的可靠性,为实际直流输电工程设计和谐波谐振分析提供参考。

## 1 基于测试信号法的 HVDC 阻抗扫描原理

### 1.1 HVDC 系统相关等值阻抗的提出

直流换流器交、直流等值阻抗示意图如图 1 所示,图中  $U_s$  为交流电压源,  $Z_s$  为交流系统阻抗,  $Z_f$  为交流滤波器阻抗,  $Z_{ac}$  为从换流变网侧看向交流系统的等值阻抗,为交流系统阻抗和交流滤波器阻抗的综合。采用测试信号法可仿真扫描出 HVDC 系统的相关等值阻抗,包括如下四种阻抗<sup>[21, 26]</sup>。

(1) 换流器交流等值阻抗  $Z_{conac}$ : 从换流变阀侧看入的换流器阻抗值。在实际应用中,常把换流变压器与换流器看成一个整体,求取换流站的交流等值阻抗作为换流器交流等值阻抗,如图 1 所示。

(2) 换流器直流等值阻抗  $Z_{condc}$ : 从平波电抗器阀侧看入的换流器阻抗值。

(3) 直流系统阻抗  $Z_{dc}$ : 从平波电抗器阀侧看向直流网络的等值阻抗。

(4) 直流回路阻抗  $Z_d$ : 直流回路的串联阻抗,即等于  $Z_{condc} + Z_{dc}$ 。

获取  $Z_{conac}$  和  $Z_{ac}$  是进行交直流系统谐波谐振分析、交流滤波器设计等工作的基础。同样,获取  $Z_{condc}$ 、 $Z_{dc}$  是进行直流回路谐波谐振分析、直流滤波器设计等工作的基础。

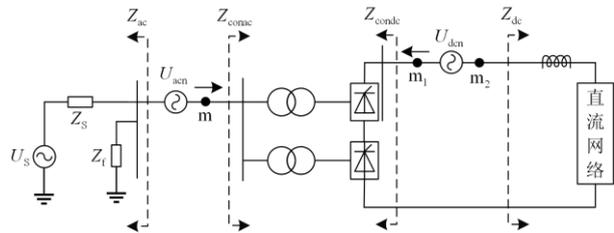


图 1 直流换流器交、直流等值阻抗示意图

Fig. 1 AC and DC equivalent impedance diagram of DC converter

### 1.2 基于测试信号法的 HVDC 谐波阻抗扫描流程

测试信号法的原理和实施步骤都相对简单,是较为通用的方法,可以应对各类复杂系统的谐波阻抗扫描。测试信号法采用向系统注入谐波源并测量其响应的方法进行谐波阻抗扫描,选择串联注入谐波电压源或并联注入谐波电流源均可,本文选择谐波电压源进行相关仿真扫描研究。具体的测试信号法实施步骤如下所述。

(1) 基于电磁暂态仿真平台,搭建如图 1 所示交直流互联系统。

(2) 启动直流输电系统运行至稳态时,开始注入谐波电压源:如图 1 所示,当求取换流器交流等值正序(或负序)阻抗时,注入三相正序(或负序)谐波电压源  $U_{acn}$ ;当求取换流器直流侧相关等值阻抗时,注入单相谐波电压源  $U_{dcn}$ 。谐波电压源频率为待扫描谐波阻抗频率,在满足阻抗测量可靠性和准确度的前提下,谐波源幅值应尽可能小。

(3) 等待直流输电系统过渡到稳态时:对于交流(或直流)侧等值阻抗扫描,采集交流侧 m 点(或直流侧  $m_1$  点和  $m_2$  点)电压电流采样值,图中箭头代表了电流的参考方向;然后利用离散傅里叶变换(DFT)和序分量相量算法计算对应谐波源频率下的换流器交流(或直流)等值阻抗,计算公式为式(1)。

(4) 重复执行步骤(2)–(3),可得到不同频率下的谐波阻抗值。

$$\begin{aligned}
 \dot{Z}_{\text{conac}} &= \frac{\dot{U}_{\text{ms}}}{\dot{I}_{\text{ms}}} \\
 \dot{Z}_{\text{condc}} &= \frac{\dot{U}_{\text{m1}}}{\dot{I}_{\text{m21}}} \\
 \dot{Z}_{\text{dc}} &= -\frac{\dot{U}_{\text{m2}}}{\dot{I}_{\text{m21}}} \\
 \dot{Z}_{\text{d}} &= -\frac{\dot{U}_{\text{dcn}}}{\dot{I}_{\text{m21}}} = \frac{\dot{U}_{\text{m1}} - \dot{U}_{\text{m2}}}{\dot{I}_{\text{m21}}} = \dot{Z}_{\text{condc}} + \dot{Z}_{\text{dc}}
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

式中： $\dot{U}_{\text{ms}}$ 、 $\dot{I}_{\text{ms}}$  分别为  $m$  点正序(或负序)谐波电压和电流； $\dot{U}_{\text{m1}}$ 、 $\dot{U}_{\text{m2}}$  分别为  $m_1$  点和  $m_2$  点谐波电压； $\dot{I}_{\text{m21}}$  为  $m_2$  点流向  $m_1$  点谐波电流。

### 1.3 近似满足电路叠加定理的测试信号法

测试信号法的基本原理是针对非线性系统而提出的，其实质是采用时域仿真方法来研究非线性系统在特定工作点上线性化后的性态<sup>[22, 27-28]</sup>，当注入谐波幅值够小时，可近似认为被测系统运行点保持不变，此时可将非线性系统等效为线性系统来处理，即图 1 所示直流换流器在交、直流侧可分别等效为一二端含源、线性阻抗网络，直流换流器交流侧系统(含换流器交流等值网络)、直流侧系统(含换流器直流等值网络)可等效为如图 2(a)和图 3(a)所示等效电路。

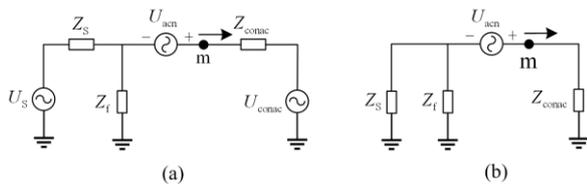


图 2 换流器交流侧系统等效电路

Fig. 2 Equivalent circuit of converter AC side system

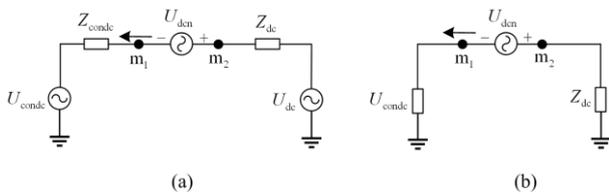


图 3 换流器直流侧系统等效电路

Fig. 3 Equivalent circuit of converter DC side system

如图 2(a)和图 3(a)，在直流输电系统正常稳态运行情况下，直流换流器两侧含有特征谐波和非特征谐波，即等效电路中  $U_{\text{conac}}$ 、 $U_{\text{condc}}$ 、 $U_{\text{dc}}$  中对应注入谐波源频率的分量值不为 0。当考虑交流系统含谐波源时，甚至  $U_s$  中也含谐波分量，基于电路叠加定理，可得出注入谐波源单独作用时的增量响应等

效电路，如图 2(b)和图 3(b)所示。因此，采用注入谐波源单独作用时的增量电压电流谐波相量计算换流器等值谐波阻抗，就可以消除换流器自身谐波的影响，从而更加符合测试信号法线性化处理的基本原理。

因此，本文将在这种近似满足电路叠加定理的测试信号法的基础上，进行 HVDC 谐波阻抗扫描研究。

## 2 测试信号法应用于 HVDC 谐波阻抗扫描的问题和改进措施

### 2.1 测试信号法应用于 HVDC 谐波阻抗扫描的问题

测试信号法应用于 HVDC 谐波阻抗扫描时，其实施过程中存在诸多不稳定因素，主要表现在：(1) 采用不同的谐波源参数或谐波注入方法，其阻抗扫描结果可能存在较大差别，对分析实际问题造成干扰；(2) 由于采用注入小信号谐波源，谐波阻抗扫描过程可能受注入谐波源引起的系统运行点变化或电磁暂态数值仿真误差的影响较大，即抗干扰能力较差<sup>[29]</sup>。

目前，测试信号法在 HVDC 谐波阻抗扫描的应用中：(1) 对于谐波源幅值选择，一般限定在额定值的 0.1%~1.0%以内，文献[22, 28]取 0.1%，文献[27]取 0.1%~0.5%，文献[21]取 0.5%~1.0%，现有研究并未给出较为确定的一致性意见或谐波源幅值选择方法。另外，文献[21]和本文实测结果一致表明，采用不同的谐波源幅值，扫描出来的换流器瞬时等值谐波阻抗值的波动幅度不同，即阻抗扫描结果的稳定性不同，从而对谐波阻抗值选择造成较大干扰。(2) 对于谐波源注入方法，文献[20-21, 28]提出可采用单次注入多个频率谐波源的方法，各频率谐波源初相位应依次错开，以减小谐波源投切对系统造成的冲击。

为提升 HVDC 谐波阻抗扫描的可靠性和准确度，本文从注入谐波源参数对阻抗扫描的影响入手，提出测试信号法应用于 HVDC 谐波阻抗扫描的谐波源幅值选择方法和用于减小谐波源初相位影响的改进扫描方法。

### 2.2 测试信号法中谐波源幅值选择方法

依据 1.3 节测试信号法原理，对于某一 HVDC 系统，在测试信号法实施过程中，我们希望被测量系统在运行点偏移小的同时，可以得出稳定性好的阻抗扫描结果，因此注入谐波源幅值成为关键影响因素。

首先，本文确定用以表征 HVDC 系统运行点偏移和阻抗扫描结果稳定性的两个特征量：① 以换流

器触发角(或关断角)表征 HVDC 系统稳态运行点, 在注入谐波源情况下, 以换流器触发角偏移量  $\Delta\alpha$  表征直流输电系统运行点偏移情况, 其中  $\Delta\alpha = \alpha - \alpha_0$ ,  $\alpha_0$  和  $\alpha$  分别为无注入谐波源和有注入谐波源时的换流器触发角; ② 利用测试信号法持续扫描系统运行至稳态后一段时间内的换流器瞬时等值谐波阻抗, 并计算这段时间内瞬时阻抗的标准差  $S_z$ , 用以表征阻抗扫描结果的稳定性。

其次, 为了达到兼顾系统运行点偏移小和阻抗测量稳定性好的目的, 即  $|\Delta\alpha|$  和  $S_z$  两者越小越好, 定义线性规划如式(2)。

$$\min_{A_m} y = \lambda_1 |\Delta\alpha| + \lambda_2 S_z \quad (2)$$

式中:  $A_m$  为谐波源幅值;  $f_m$  为谐波源频率;  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  为非负常数, 且  $\lambda_1 + \lambda_2 = 1$ ;  $|\Delta\alpha|$  和  $S_z$  为谐波源幅值和频率的函数, 即  $|\Delta\alpha| = f(A_m, f_m)$  和  $S_z = g(A_m, f_m)$ 。

为了计算出  $|\Delta\alpha|$  和  $S_z$ , 以及求解关系式(2), 可采用如下方法:

(1) 采用批量仿真扫描、单次仿真注入单一频率谐波源的方法, 分别注入标幺幅值为 0.1%~1.1% 的各频率谐波源, 利用 1.3 节所述测试信号法进行谐波阻抗扫描, 并计算不同谐波源幅值、频率下的  $|\Delta\alpha|$  和  $S_z$ , 谐波源频率范围可根据所研究频段确定。

(2) 由于式(2)目标函数中的决策变量为谐波源幅值  $A_m$ , 因此, 应将谐波源频率  $f_m$  消去: 将同一谐波源幅值、不同谐波源频率下的各  $|\Delta\alpha|$  值和  $S_z$  值累加, 从而得到综合换流器触发角偏移  $\sum |\Delta\alpha| = f'(A_m)$  和综合换流器瞬时等值阻抗标准差  $\sum S_z = g'(A_m)$ ,  $\sum |\Delta\alpha|$  和  $\sum S_z$  均为谐波源幅值的函数。

(3) 考虑到  $|\Delta\alpha|$  和  $S_z$  之间的关系不清晰, 可先将  $\sum |\Delta\alpha|$  和  $\sum S_z$  随谐波幅值的变化曲线归一化到 [0,1] 范围内, 然后再将两条曲线的数值在相同的谐波源幅值处直接累加 ( $\lambda_1 = \lambda_2$ ) 或加权累加 ( $\lambda_1 \neq \lambda_2$ ), 从而汇总为一条随谐波源幅值的变化曲线, 即特征曲线。可选定特征曲线上的最小值所对应的谐波源幅值, 即式(2)求解结果, 作为测试信号法应用于当前 HVDC 系统谐波阻抗扫描的谐波源幅值选择。

### 2.3 减小谐波源初相位影响的改进扫描方法

在谐波源幅值一定的情况下, 谐波源初相位就成为关键影响因素:

(1) 从 HVDC 系统原理上来说, 谐波源通过影

响换流器交流侧线电压瞬时值, 从而影响换流阀导通或关断时刻<sup>[1]</sup>, 使 HVDC 系统运行点发生偏移, 谐波源初相位的变化可能使换流阀超前或延迟导通, 从而对谐波阻抗扫描结果造成正误差或负误差。

(2) 从测试信号法原理来说, 当在非线性系统中注入谐波干扰时, 相较于近似认为系统运行点保持不变, 近似认为系统在运行点附近线性变化实则更加保守和可靠。

综合考虑(1)、(2), 当初相位作为谐波源的唯一变量时, 谐波源对系统运行点的影响规律将有着与谐波源相位相似的周期性。如图 4 所示, 非线性系统初始运行点为 b, 当系统受到一正向干扰时, 运行点转为 c; 反之, 当系统受到一反向干扰时, 运行点转为 a。因此, 如果取系统在点 a 和点 c 的阻抗扫描结果的平均值作为阻抗扫描结果, 可以较大地提高阻抗扫描结果的准确度和可靠性, 这类类似于时域仿真中广泛应用的梯形积分法的原理, 可以保证具有良好的精度和数值稳定性<sup>[30]</sup>。

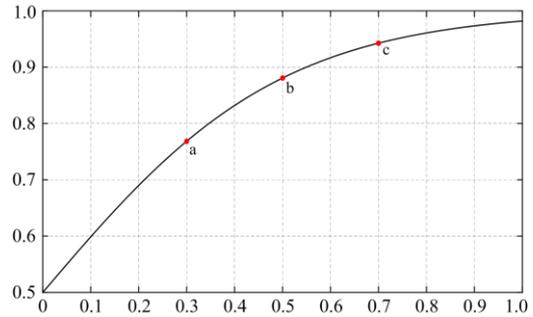


图 4 谐波源对非线性系统运行点的影响示意图

Fig. 4 Schematic diagram of influence of harmonic source on operation point of nonlinear system

因此, 本文提出采用分别注入两种“互补”状态下的谐波干扰进行谐波阻抗扫描, 从而使两种状态下的阻抗扫描结果呈现为互补状态, 即两种阻抗扫描结果分别具有正误差和负误差, 然后取两种阻抗扫描结果的平均值作为阻抗测量结果, 从而提高阻抗扫描结果的准确度和可靠性。实际应用中实施测试信号法时, 为了减小谐波源初相位对谐波阻抗扫描的影响, 可分别注入初相相差 180° 的谐波源进行谐波阻抗扫描, 然后取两种阻抗扫描结果的平均值作为阻抗测量结果。

### 3 谐波源幅值影响分析

本文基于 EMTDC/PSCAD 电磁暂态仿真平台, 以国际大电网会议(CIGRE)发布的单极两端直流输电系统—CIGRE First Benchmark 模型作为仿真模

型, 以扫描逆变站换流器交流等值正序阻抗为例, 采用了批量仿真扫描、单次仿真注入单一频率谐波源的方法。利用本文所述测试信号方法进行谐波阻抗扫描, 并验证本文所提出的谐波源幅值选择方法和用于减小谐波源初相位影响的改进扫描方法的适用性。

### 3.1 谐波源幅值选择方法验证

分别注入初相位相同, 标幺幅值为 0.1%、0.3%、0.5%、0.7%、0.9%、1.1% 的各频率谐波电压源(5~800 Hz), 利用测试信号法持续扫描系统运行至稳态后数秒时间内的换流器瞬时等值谐波阻抗, 计算这段时间内瞬时阻抗的标准差  $S_z$  和换流器触发角偏移  $\Delta\alpha$ , 并将同一注入谐波幅值、不同注入谐波频率下的各  $|\Delta\alpha|$  值和  $S_z$  值累加, 得到综合换流器触发角偏移  $\sum|\Delta\alpha|$  和综合换流器瞬时等值阻抗标准差  $\sum S_z$ 。

如图 5 所示, 换流器触发角偏移  $\Delta\alpha$  与谐波源幅值近似成正比, 因此, 当谐波源幅值取较小值时(0.1%~1.1%), 直流输电系统运行点偏移与谐波源幅值近似成正比。

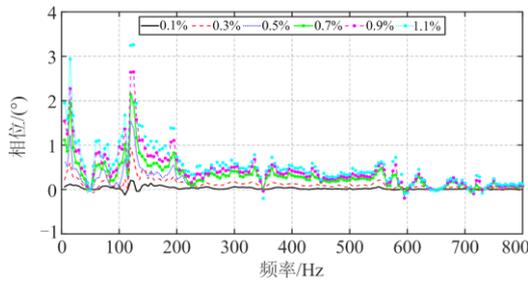


图 5 换流器触发角偏移随谐波源幅值、频率的变化

Fig. 5 Change of firing angle offset of converter with amplitude and frequency of harmonic source

如图 6 所示, 谐波源幅值越大,  $\sum|\Delta\alpha|$  越大, 即直流输电系统运行点偏移越大, 而  $\sum S_z$  越小, 即换流器等值阻抗测量结果稳定性越好, 抗干扰能力越强。将  $\sum|\Delta\alpha|$  和  $\sum S_z$  随谐波源幅值的变化曲线直接累加, 在谐波源幅值为 0.5% 时,  $\sum|\Delta\alpha| + \sum S_z$  随谐波幅值的变化曲线出现拐点并达到最小值。

另外, 实际仿真结果显示, 当谐波源幅值取太小时(例如 0.1%), 在某些频率点(例如 195 Hz、575 Hz 等)由于扫描出的换流器瞬时等值阻抗值波动太大, 导致无法确定有效的谐波阻抗值, 如图 7、图 8 所示。

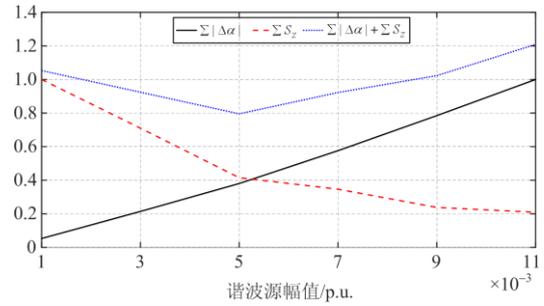


图 6 用于选定谐波源幅值的特征曲线

Fig. 6 Characteristic curve for selecting amplitude of harmonic source

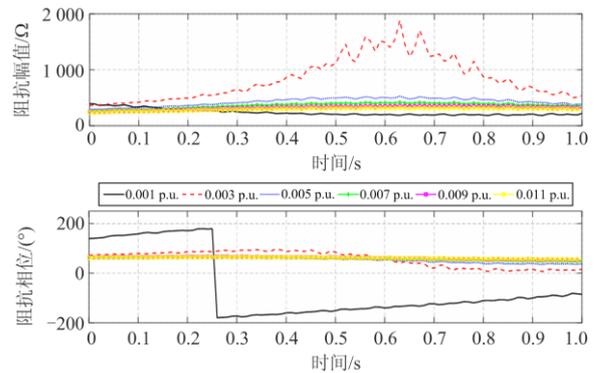


图 7 换流器 195 Hz 谐波阻抗

Fig. 7 Harmonic impedance of converter at 195 Hz

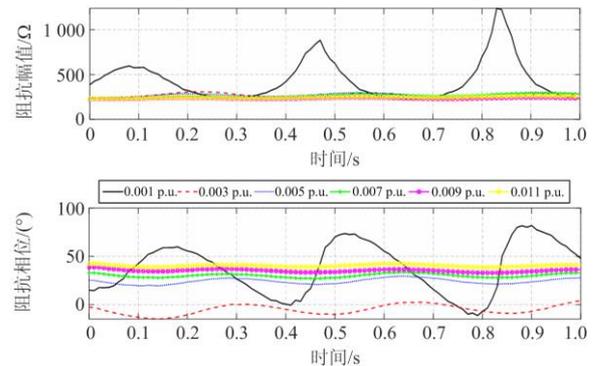


图 8 换流器 575 Hz 谐波阻抗

Fig. 8 Harmonic impedance of converter at 575 Hz

因此, 针对当前 HVDC 系统谐波阻抗扫描, 谐波源幅值取 0.5% 左右较为合理。本文所提出的谐波源幅值选择方法较为有效, 在应用于测试信号法时可以达到兼顾系统运行点偏移小和阻抗测量抗干扰能力强的目的。

### 3.2 减小谐波源初相位影响的改进扫描方法验证

采用上节所选择出的谐波源幅值参数, 分别注入初相位为  $0^\circ$ 、 $180^\circ$  的各频率谐波电压源(5~800 Hz), 利用测试信号法持续扫描运行至稳态后 5 s 时间内

的换流器瞬时等值阻抗。

仿真结果显示:

(1) 在某些频率点, 例如 150 Hz、250 Hz 处, 谐波源初相位对谐波阻抗扫描结果的影响较大, 如图 9、图 10 所示;

(2) 分别采用注入谐波初相位相差 180° 的谐波源进行谐波阻抗扫描时, 两种情况下的瞬时阻抗扫描结果呈现为一定的互补状态, 如图 9—图 12 所示。

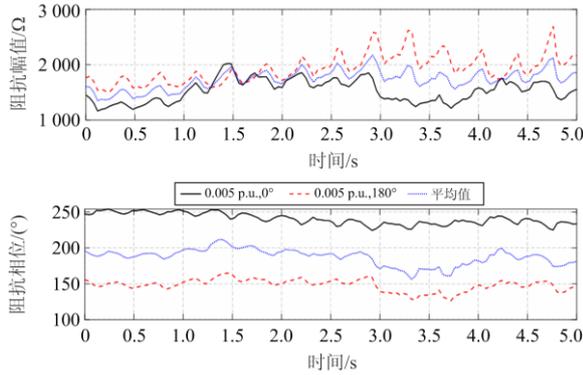


图 9 换流器 150 Hz 谐波阻抗

Fig. 9 Harmonic impedance of converter at 150 Hz

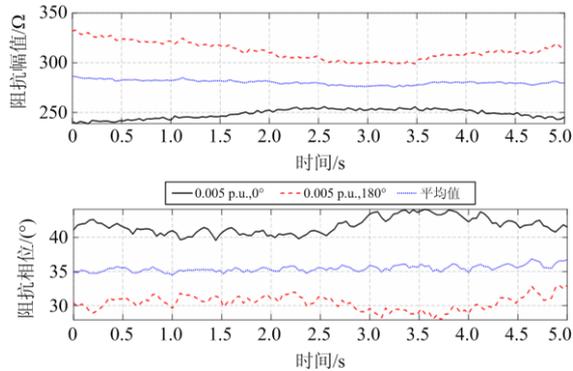


图 10 换流器 250 Hz 谐波阻抗

Fig. 10 Harmonic impedance of converter at 250 Hz

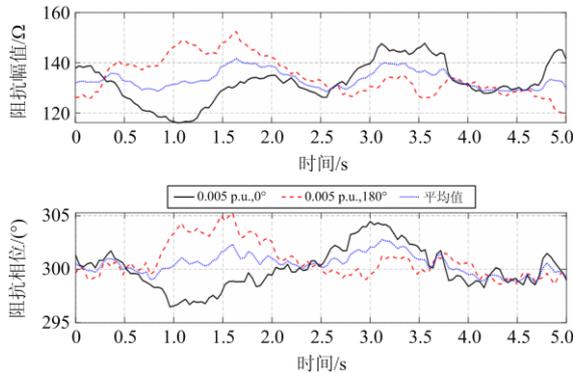


图 11 换流器 55 Hz 谐波阻抗

Fig. 11 Harmonic impedance of converter at 55 Hz

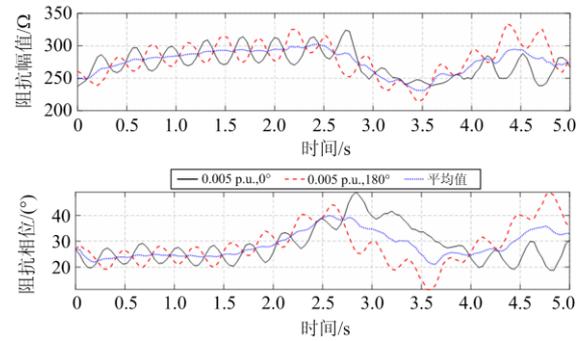


图 12 换流器 575 Hz 谐波阻抗

Fig. 12 Harmonic impedance of converter at 575 Hz

因此, 分别采用注入谐波初相位相差 180° 的谐波源进行谐波阻抗扫描, 并采用两种阻抗扫描结果的平均值作为谐波阻抗测量结果, 可以大大提高谐波阻抗扫描的可靠性和准确度, 本文所提出的改进扫描方法较为有效。采用本文所述改进扫描方法, 换流器等值谐波阻抗扫描结果如图 13 所示。

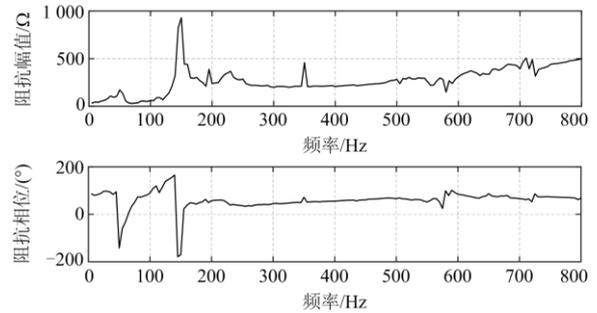


图 13 换流器等值谐波阻抗扫描结果

Fig. 13 Equivalent harmonic impedance scanning results of converter

## 4 结论

本文基于测试信号法基本原理及其在 HVDC 应用研究中的进展, 提出了测试信号法应用于 HVDC 谐波阻抗扫描的谐波源幅值选择方法和用于减小谐波源初相位影响的改进扫描方法。以 CIGRE First Benchmark 模型为例, 在 PSCAD/EMTDC 仿真平台上定量或定性分析谐波源幅值、谐波源初相位对谐波阻抗扫描的影响, 结果表明:

(1) 本文提出的谐波源幅值选择方法较为有效, 利用所选择的谐波源幅值参数进行谐波阻抗扫描, 可以达到兼顾系统运行点偏移小和阻抗测量抗干扰能力强的目的;

(2) 本文提出的改进扫描方法可用于减小谐波源初相位对谐波阻抗扫描的影响, 大大提高谐波阻

抗扫描的可靠性和准确度。

本文所提方法可用于进一步提高 HVDC 谐波阻抗扫描结果的可靠性, 可为实际直流输电工程设计和谐波谐振分析提供参考, 后续还将在实际直流工程模型上展开进一步的研究工作。

### 参考文献

- [1] 赵畹君, 谢国恩, 曾南超, 等. 高压直流输电工程技术 [M]. 2 版. 北京: 中国电力出版社, 2011.
- [2] 赵勇, 洪潮, 张勇, 等. 楚穗直流孤岛运行的谐波谐振研究[J]. 南方电网技术, 2014, 8(6): 12-17.  
ZHAO Yong, HONG Chao, ZHANG Yong, et al. Study on harmonic resonance of Chuxiong-Suidong UHVDC transmission system in islanding operation[J]. Southern Power System Technology, 2014, 8(6): 12-17.
- [3] 常鹏飞, 刘天琪, 陈相, 等. 交直流系统互补谐振谐波不稳定的抑制措施[J]. 电测与仪表, 2020, 57(8): 108-114.  
CHANG Pengfei, LIU Tianqi, CHEN Xiang, et al. Suppression measures of harmonic instability for complementary resonance in AC/DC system[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(8): 108-114.
- [4] 杜平, 万玉良, 项颂, 等. VSC 变流器与弱电网交互作用的次同步振荡关键参数研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(14): 44-49.  
DU Ping, WAN Yuliang, XIANG Song, et al. Study on key parameters of subsynchronous oscillation between VSC converter and weak power grid[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(14): 44-49.
- [5] 刘建锋, 李美玉, 余光正, 等. 考虑 VSC 系统谐波稳定条件下的 LCL 滤波器参数优化设计方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(13): 80-90.  
LIU Jianfeng, LI Meiyu, YU Guangzheng, et al. Optimization design method of LCL filter parameters considering harmonic stability of VSC system[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(13): 80-90.
- [6] YAO Zhiqing, ZHANG Qun, CHEN Peng, et al. Research on fault diagnosis for MMC-HVDC Systems[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 71-77. DOI: 10.1186/s41601-016-0022-0.
- [7] 穆子龙, 李兴源. 交、直流输电系统相互影响引起的谐波不稳定问题[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(2): 96-100.  
MU Zilong, LI Xingyuan. Harmonic instability caused by interactions between AC and DC transmission systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(2): 96-100.
- [8] CHEN S, WOOD A R, ARRILAGA J. HVDC converter transformer core saturation instability: a frequency domain analysis[J]. IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, 1996, 143(1): 75-81.
- [9] 魏玥, 刘天琪, 晏小彬, 等. 高压直流输电系统直流偏磁下的谐波不稳定判据研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(17): 139-144.  
WEI Yue, LIU Tianqi, YAN Xiaobin, et al. Study of harmonic instability criterion under DC magnetic bias in HVDC system[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(17): 139-144.
- [10] 余瑜, 刘开培, 陈俊, 等. 基于调制理论的高压直流输电系统混合谐振型谐波不稳定判据[J]. 高电压技术, 2014, 40(5): 1582-1589.  
YU Yu, LIU Kaipei, CHEN Jun, et al. Modulation theory based criterion on composite resonant harmonic instability in HVDC transmission system[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(5): 1582-1589.
- [11] 樊丽娟, 穆子龙, 金小明, 等. 高压直流输电系统送端谐波不稳定问题的判据[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(4): 62-68.  
FAN Lijuan, MU Zilong, JIN Xiaoming, et al. Criterion of harmonic instability at the sending end of HVDC power transmission system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(4): 62-68.
- [12] 陈宝亮, 李兴源, 穆子龙, 等. 高压直流输电中混合谐振型谐波不稳定分析[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(14): 81-85.  
CHEN Baoliang, LI Xingyuan, MU Zilong, et al. Analysis on composite resonant instability for HVDC power transmission systems[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(14): 81-85.
- [13] 贺杨焯, 郑晓冬, 邵能灵, 等. 交直流混联电网 LCC-HVDC 换流器建模方法综述[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(11): 3119-3130.  
HE Yangyang, ZHENG Xiaodong, TAI Nengling, et al. A review of modeling methods for LCC-HVDC converter in AC/DC hybrid power grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(11): 3119-3130.
- [14] 徐政. 含多个直流换流站的电力系统中交直流相互作用特性综述[J]. 电网技术, 1998, 22(2): 18-21.  
XU Zheng. AC/DC and DC/AC interactions of multiple HVDC links terminating in the same AC system[J]. Power System Technology, 1998, 22(2): 18-21.
- [15] 余超耘, 杨汾艳, 盛超, 等. 高压直流输电线路入口端谐波阻抗特性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(15): 93-100.  
YU Chaoyun, YANG Fenyan, SHENG Chao, et al. Research on the characteristics of harmonic impedance at

- the inlet of HVDC transmission line[J]. *Power System Protection and Control*, 2018, 46(15): 93-100.
- [16] 王钢, 李志铿, 李海锋, 等. HVDC 换流器等值谐波阻抗的计算方法[J]. *中国电机工程学报*, 2010, 30(19): 64-68.  
WANG Gang, LI Zhikeng, LI Haifeng, et al. Calculation method of harmonic equivalent impedances of HVDC converter[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2010, 30(19): 64-68.
- [17] 任成林, 宋志顺, 周竞宇, 等. 模块化多电平换流器功率模块电容对换流器调制制度的影响[J]. *高压电器*, 2019, 55(3): 239-244, 252.  
REN Chenglin, SONG Zhishun, ZHOU Jingyu, et al. Influence of power submodule capacitance of modular multilevel converter on modulation index[J]. *High Voltage Apparatus*, 2019, 55(3): 239-244, 252.
- [18] 陈佳浩, 王琦, 朱鑫要, 等. 谐波电压造成直流输电换相失败风险评估[J]. *高压电器*, 2020, 56(5): 196-202.  
CHEN Jiahao, WANG Qi, ZHU Xinyao, et al. Risk assessment of commutation failure for HVDC transmission due to harmonic voltage[J]. *High Voltage Apparatus*, 2020, 56(5): 196-202.
- [19] 马玉龙. 高压直流输电系统的稳定性分析[D]. 北京: 华北电力大学, 2006.  
MA Yulong. Stability analysis of HVDC transmission system[J]. Beijing: North China Electric Power University, 2006.
- [20] 孔维波, 文俊, 王玲, 等. HVDC 换流器交流等值谐波阻抗研究[J]. *华北电力大学学报: 自然科学版*, 2017, 44(4): 37-43.  
KONG Weibo, WEN Jun, WANG Ling, et al. Study on AC-side equivalent harmonic impedances of HVDC converter[J]. *Journal of North China Electric Power University: Natural Science Edition*, 2017, 44(4): 37-43.
- [21] 崔康生, 文俊, 赵晓斌, 等. 一种适用于 MTDC 输电的直流系统阻抗扫描方法[J]. *电力建设*, 2017, 38(8): 17-23.  
CUI Kangsheng, WEN Jun, ZHAO Xiaobin, et al. DC system impedance scanning for MTDC[J]. *Electric Power Construction*, 2017, 38(8): 17-23.
- [22] 徐政, 肖晃庆, 张哲任, 等. 柔性直流输电系统[M]. 2 版. 北京: 机械工业出版社, 2016.
- [23] 蔡明, 陈涛, 张松光, 等. 多端柔性直流输电系统的功率协调控制策略[J]. *广东电力*, 2019, 32(6): 101-107.  
CAI Ming, CHEN Tao, ZHANG Songguang, et al. Power coordinated control strategy for multi-terminal VSC-HVDC transmission system[J]. *Guangdong Electric Power*, 2019, 32(6): 101-107.
- [24] 锁军, 袁丽丽, 彭书涛, 等. 基于阻抗测量的风电场谐振特性分析[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(24): 161-168.  
SUO Jun, YUAN Lili, PENG Shutao, et al. Analysis of resonant characteristics of wind farm based on impedance measurement[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(24): 161-168.
- [25] 陈斐泓, 杨健维, 廖凯, 等. 基于频率扫描的双馈风电机组次同步控制相互作用分析[J]. *电力系统保护与控制*, 2017, 45(24): 84-91.  
CHEN Feihong, YANG Jianwei, LIAO Kai, et al. Sub-synchronous control interaction analysis in doubly-fed induction generator based on frequency scanning[J]. *Power System Protection and Control*, 2017, 45(24): 84-91.
- [26] 徐政, 裘鹏, 黄莹, 等. 采用时域仿真的高压直流输电直流回路谐振特性分析[J]. *高电压技术*, 2010, 36(1): 44-53.  
XU Zheng, QIU Peng, HUANG Ying, et al. HVDC system DC loop resonance analysis using time domain simulation[J]. *High Voltage Engineering*, 2010, 36(1): 44-53.
- [27] CIGRE Working Group B4.41. Systems with multiple DC infeed[R]. Paris: CIGRE (364), 2008.
- [28] XIAO Jiang, GOLE A M. A frequency scanning method for the identification of harmonic instabilities in HVDC systems[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1995, 10(4): 1875-1881.
- [29] RSCAD Manual[Z]. RTDS Technologies Inc.
- [30] 倪以信, 陈寿孙, 张宝霖. 动态电力系统的理论和分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.

收稿日期: 2020-09-24; 修回日期: 2020-11-20

作者简介:

李 清(1989—), 男, 高级工程师, 主要从事交直流交互影响、直流输电控制与保护方面的研究工作; E-mail: liqing6291@163.com

周 强(1993—), 男, 助理工程师, 主要从事电力系统分析与仿真方面的研究工作; E-mail: xioozhoo@foxmail.com

张东辉(1984—), 男, 通信作者, 高级工程师, 主要从事电力系统分析、混合仿真技术研究与应用方面的研究工作。E-mail: zhangdh\_energy@163.com

(编辑 魏小丽)