

本文全文线上首发由
上海电机系统节能工程技术
研究中心有限公司
支持

胡璟.
变压器与柴油发电机混合供电系统阻抗
建模分析.
电机与控制应用, 2022, 49(3): 93.



SEARI
上電科

NCMS
上科电机

www.nems.com.cn

掌握电机行业制造核心技术，
辐射智能制造产业发展



· 业务范围 ·



异步电机装配线



永磁电机装配线



悬挂链电机喷漆线

上海电机系统节能工程技术研究中心有限公司 www.nems.com.cn

地址：上海市武宁路505号 手机：18918357509 电话：021-62574990-436

传真：021-62163904 邮箱：wangcj@seari.com.cn

变压器与柴油发电机混合供电系统阻抗建模分析

胡 璟

(中铁第一勘察设计院集团有限公司, 陕西 西安 710043)

摘 要: 现有阻抗建模分析结果与实际曲线之间的拟合度较低, 难以满足混合供电系统工作需求, 因此提出变压器与柴油发电机混合供电系统阻抗建模分析。分析变压器与柴油发电机等主要发电设备工作特点和混合供电系统的工作原理; 考虑到坐标旋转变换过程、端口阻抗以及恒功率负载多种影响因素, 建立稳定性较高的变压器与柴油发电机混合供电系统阻抗模型; 通过在线测量电网阻抗值, 动态调整锁相环(PLL)的控制参数, 在奈奎斯特曲线图的作用下, 输出变压器与柴油发电机混合供电系统阻抗特性分析结果。实例测试结果表明, 正序阻抗分析结果下, 所提出方法得出的阻抗特性拟合度分别提升了 20%、30%, 负序阻抗分析结果的拟合度分别提升了 11%、13%。

关键词: 混合供电系统; 柴油发电机; 变压器; 阻抗; 控制参数

中图分类号: TM74 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2022)03-0093-06

doi: 10.12177/emca.2021.180

Impedance Modeling and Analysis of Hybrid Power Supply System with Transformer and Diesel Generator

HU Jing

(China Railway First Survey and Design Institute Group Co., Ltd., Xi'an 710043, China)

Abstract: The fitting between the existing impedance modeling analysis results and the actual curve is difficult to meet the working needs of the hybrid power supply system. Therefore, the impedance modeling analysis of the hybrid power supply system of transformer and diesel generator is proposed. The working characteristics of major power generation equipment such as transformer and diesel generator are analyzed and the working principle of the hybrid power supply system is discussed. In consideration of the process of coordinate rotation transformation, port impedance and constant power load, the impedance model of the hybrid power supply system of transformer and diesel generator is established. The power system impedance is measured online, the control parameters of phase locked loop (PLL) are adjusted, and the impedance of the model under the Nyquist curve is output. The test results of the model show that using the proposed method, the degree of fitting of the impedance properties are increased by 20% and 30%, respectively, for the positive order impedance, and increased by 11% and 13%, respectively, for the negative order impedance.

Key words: hybrid power supply system; diesel generator; transformer; impedance; control parameter

0 引 言

在混合供电系统中, 变压器与柴油发电机具有适应性强、控制灵活等多种优势, 其应用范围也越来越广泛^[1-2]。办公楼和酒店的来往人员密

集, 为了保证混合供电系统满足用电需求, 混合供电系统作为应急电源可以稳定运行, 亟需了解系统阻抗特性。

文献[3]根据滤波器寄生参数, 分析了系统电路结构, 生成闭环输入阻抗模型。在阻抗模型

收稿日期: 2021-10-15; 收到修改稿日期: 2022-01-05

作者简介: 胡 璟(1989—), 男, 工程师, 研究方向为电力与电气。

的作用下,得出功率、运行条件等多种因素对阻抗特性所产生的影响,综合考虑各项因素生成阻抗分析结果。但是在测试中该方法因推导复杂而拟合误差较大。文献[4]以动态相量为依据,在旋转坐标系下建立阻抗模型。通过拉普拉斯变换的方式,将原始动态相量以平面的形式呈现出来,结合环流动态特点,建立具备闭环控制动态性能的频域模型,并利用传递函数矩阵获取系统阻抗分析结果。通过研究可知,该方法在1~3 000 Hz条件内获取的阻抗分析结果较为准确,若超出该范围,该方法获取的分析结果与实际数据相比存在较大误差。文献[5]依托于多谐波线性化方法进行建模分析。在分析系统中双闭环电压控制特点后,完成小信号阻抗模型的设计,并通过电流环分析系统阻抗,但该方法分析结果准确率不足。文献[6]提出了并网变流器频率耦合阻抗模型,同时考虑互补频率耦合效应和外环控制,构建并网系统的整体阻抗模型,从而分析出变流器并网系统阻抗特性。该方法的分析结果与实际结果差距较大,拟合度较低。

鉴于以往研究成果拟合度不足,为进一步提高阻抗特性拟合度,本文提出变压器与柴油发电机混合供电系统阻抗建模分析。在分析变压器与柴油发电机混合供电系统工作原理基础上,考虑坐标旋转变换过程、端口阻抗以及恒功率负载多种影响因素,构建稳定性较高的变压器与柴油发电机混合供电系统阻抗模型;通过动态调整锁相环(PLL)的控制参数,在奈奎斯特曲线图的作用下,输出混合供电系统的阻抗特性分析结果。试验结果证明本文的分析结果拟合度较高。

1 建模分析方法与设计

1.1 分析混合供电系统工作原理

混合供电系统的阻抗特性分析,需要考虑系统变压器与柴油发电机结合工作的原理,变压器与柴油发电机结合的混合配电系统如图1所示。

根据图1可知,以柴油发电机和变压器为主构建的供电系统,同用一组配电屏幕。混合供电系统在中压计量配电操作后,通过两路10 kV电缆进行供电。通过母线槽将变压器 T_1 、 T_2 与供电屏相连。两段低压母线受到 QF_1 和 QF_2 断路器控制,与 QF_3 进行交互。供电系统工作过程中,经

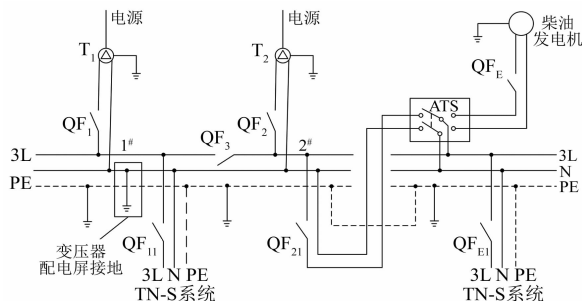


图1 变压器与柴油发电机结合的混合配电系统

由断路器 QF_{21} 引出柴油发电机的电源转换开关,根据实际环境将电源送达应急母排,通过断路器 QF_E 将应急母排与消防泵控制箱相连,实现电力资源输送控制。为了保证混合供电系统的稳定运行,当内部线路1#母线出现故障时,应急负荷通过 QF_2 、 QF_{21} 、ATS与 QF_{E1} 进行供电。与之相对的,当2#母线出现问题时,则电源1供电通过 QF_1 、 QF_{11} 线路供电,实现混合供电系统的良好供电。

1.2 建立混合供电系统阻抗模型

混合供电系统由供电网络和受电系统共同组成,并将变压器与柴油发电机通过VSC互联接口相连接,所以在构建混合阻抗模型时,需要考虑到坐标旋转变换环节、端口阻抗特点和恒功率负载等主要影响因素。将阻抗模型看作一种线性化模型,在坐标旋转变换过程中,通过小信号线性化形式呈现出混合供电系统的矢量控制、直流状态变量^[7]。结合电压相角,将三相静止坐标系同步旋转,以此来检测供电系统的阻抗特性。受到电网阻抗的影响,供电系统电压相角的偏离稳态值随着电压产生波动,将电压相角偏差结果以系统旋转坐标系、控制器旋转坐标系两种形式表示,为了区分坐标系中变量信息,分别将输出结果表示为 s 、 c ,其中电压相角波动影响如图2所示。

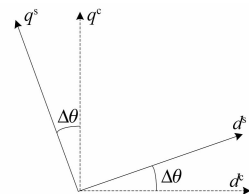


图2 电压相角波动影响

图2中, d 、 q 表示同步旋转坐标系的两个坐

标轴, $\Delta\theta$ 表示相角的波动。综合分析公共耦合电压、线路电流与系统输出占空比, 生成旋转变换矩阵^[8]。以图 1 为依据, 应用旋转变换矩阵, 表示电压相角波动情况, 通常情况下, 电压相角的波动较小, 可以将旋转变换矩阵表示为

$$T = \begin{bmatrix} \cos\Delta\theta & \sin\Delta\theta \\ -\sin\Delta\theta & \cos\Delta\theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \Delta\theta \\ -\Delta\theta & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中, 相角波动的大小受到 q 轴分量的影响, 可以将输出相角的公式表示为

$$\Delta\theta = H_{\text{PLL}} \Delta u_q^c \frac{1}{s} = \frac{H_{\text{PLL}}}{s + U_d H_{\text{PLL}}} \Delta u_q^s = G_{\text{PLL}} \Delta u_q^s \quad (2)$$

式中: H_{PLL} 为 PLL 的控制传递函数; G_{PLL} 为 PLL 的闭环传递函数; u 为比例系数; U 为电压; s 为系统旋转坐标系变量。

通过上述计算, 明确混合供电系统和控制器旋转坐标系之间的联系, 从而建立符合需求的坐标系模型。

在完成旋转坐标系建模后, 为了更好地实现母线电压控制, 在分析混合供电系统主电路工作原理后, 构建端口阻抗模型 Z :

$$Z = 1/Y \quad (3)$$

$$Y = sC + Y_{\text{VSC}} \quad (4)$$

式中: C 为供电系统的母线电容; Y 为端口的导纳; Y_{VSC} 为 VSC 直流端口输出导纳。

根据式(3)、式(4)获取端口阻抗模型, 将其与旋转坐标系模型相连, 提升建模分析结果的准确性^[9]。

除了上述因素外, 系统的恒功率负载也会使系统阻抗产生较大变化, 因此在混合供电系统阻抗模型建立时, 需要考虑另一个主要因素, 即负载^[10]。采用定功率、定负载等方式控制供电系统的负载变换, 避免系统供电过程中出现负载功率波动问题。从电压与电流之间的关系入手, 发现恒功率负载模型 CPL 具有负阻尼特性, 可以将该条件下的 CPL 阻抗模型 Z_{CPL} 表示为

$$Z_{\text{CPL}} = -U^2/P \quad (5)$$

式中: P 为负载额定功率。

按照恒功率负载的负阻尼特性, 设置端口阻抗, 达到控制带宽的目的。混合供电系统带宽控制过程会引起阻抗特性的变化。因此, 结合理想恒功率特性下的恒功率负载模型, 确保所设计的

阻抗模型分析结果更加符合实际系统阻抗数据。

混合供电系统阻抗模型为变压器与柴油发电机并联模型, 为了确保负荷的正常运行, 需要对柴油发电机的同步阻抗模型进行相应的研究。

同步发电机的励磁电压可等效为控制变压器的三相调制波信号, 而由原动机输出机械功率控制的转子转速可以看作是变压器 d, q 坐标系下公共旋转坐标系的旋转角频率。参照变压器主电路引入相角波动后的坐标系模型可得出 d, q 坐标系下同步柴油发电机的等效电路图, 如图 3 所示。

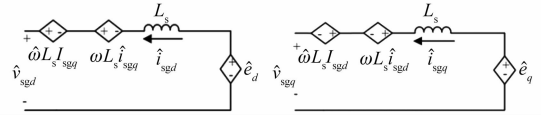


图3 同步柴油发电机的等效电路图

根据图 3 可得同步柴油发电机的等效电路模型:

$$\begin{bmatrix} \hat{e}_d \\ \hat{e}_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & -\omega L_s \\ \omega L_s & L_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{i}_{sgd} \\ \hat{i}_{sgq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -L_s I_{sgq} \\ L_s I_{sgd} \end{bmatrix} \hat{\omega} + \begin{bmatrix} \hat{v}_{sgd} \\ \hat{v}_{sgq} \end{bmatrix} \quad (6)$$

同步发电机与变压器闭环传递系统不同, 存在运动方程, 同步发电机的运动方程为

$$\frac{\omega}{d} = T_c - T_m - \omega \quad (7)$$

式中: T_c 为开环分析时间; T_m 为运动初始时间; d 为运动距离。

假设感应电动势为常数 E , 可得柴油同步发电机 d, q 坐标系下的阻抗模型:

$$Z_{\text{cy}} = (G_L + G_{\text{wsg}})^{-1} \quad (8)$$

$$\text{其中: } G_L = \begin{bmatrix} L_s & -\omega L_s \\ \omega L_s & EL_s \end{bmatrix},$$

$$G_{\text{wsg}} = \begin{bmatrix} 0 & -dL_s I_{sgq} \\ 0 & \omega EL_s I_{sgd} \end{bmatrix} \circ$$

联立式(8)和式(4)、式(5)可得混合供电系统阻抗模型:

$$\begin{cases} Z = \frac{1}{sC + Y_{\text{VSC}}} \\ Z_{\text{CPL}} = -U^2/P \\ Z_{\text{cy}} = (G_L + G_{\text{wsg}})^{-1} \end{cases} \quad (9)$$

1.3 调整 PLL 控制参数

混合供电系统阻抗模型在实际应用中,会对电网阻抗进行实时监测。为了提升建模分析方法的拓展性,基于检测阻抗值调整 PLL 控制参数,阻抗模型分析中,PLL 的传递函数表示为

$$T_{\text{PLL}}(s) = \frac{Ks + K}{s^2 + Ks + K} = \frac{2\delta\omega s + \omega^2}{s^2 + 2\delta\omega s + \omega^2} \quad (10)$$

式中: ω 表示自然角频率; δ 表示阻尼系数; K 表示积分系数。

由于 PLL 是一个二阶系统,按照最优原则将阻尼系数设置为 0.85,将 PLL 的带宽表示为 f ,则 PLL 的带宽计算式为

$$T(f) = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(\omega \sqrt{1 + 2\delta^2} + \sqrt{2 + 4\delta^2 + 4\delta^4} \right) \quad (11)$$

通过式(11)得出供电系统的 PLL 带宽,从而对参数与带宽进行控制,二者之间的关系 K_{PLL} 表示为

$$K_{\text{PLL}} = \frac{2\delta\omega}{V_1} \quad (12)$$

式中: V_1 表示电压峰值。

自然角频率计算式为

$$\omega = \frac{2f}{\sqrt{1 + 2\delta^2} + \sqrt{2 + 4\delta^2 + 4\delta^4}} \quad (13)$$

电源系统的正序阻抗幅值会随着 PLL 带宽的扩展而减小,危险区域内相应的频率范围随之缩减,但危险区域向高频段发展。综上所述,在混合电源系统的应用中,PLL 带宽的增加会降低系统的稳定性,更容易与系统阻抗特性相互作用,获得阻抗特性。

在此基础上对 PLL 参数进行优化,即可实现 PLL 的自适应控制,即通过注入电流扰动,得到电网阻抗值,进行阻抗建模和 PLL 控制参数调整,调整与分析过程如下。

(1) 在戴维南定理的作用下,简化混合供电系统中的电源变换器,将输出阻抗模型以前级变换器的形式表示。在将电压源与等效阻抗串联后,利用诺顿定理生成输入阻抗模型,根据供电系统的输出、输入阻抗之间联系,获取判断系统阻抗特性的阻抗比,并在奈奎斯特图的作用下完成阻抗分析。

(2) 将 Buck 变换器表示为奈奎斯特图中幅值高的曲线,而幅值低的曲线则表示直流变压器输出的阻抗分析结果。通过奈奎斯特图可知,在整个频域范围内,供电系统输入阻抗呈现出的幅值,总是高于输出阻抗,即该条件下输出阻抗模型不存在不稳定工作点,即根据式(10)通过扩展正序阻抗幅值,降低闭环带宽,可增加系统的稳定性,结合阻抗比稳定性判断结果,得出整体混合供电系统的阻抗特性。

(3) 根据奈奎斯特曲线分布特点,分析系统稳定性。倘若曲线并未围绕某一点分布,则说明系统的稳定性较差。

依托于奈奎斯特曲线图和输出曲线图,得出变压器和 Buck 电路之间的阻抗状态,获取最终阻抗结果,完成变压器与柴油发电机混合供电系统的各个器件的参数设置,保证变压器与柴油发电机混合供电系统良好运行。

2 实例测试与分析

为了验证文中设计的阻抗建模分析方法是否可以在实际中应用,进而获得准确的混合供电系统阻抗分析结论,利用变压器、柴油发电机等主要设备,在测试室搭建与混合供电工作原理相同的样机,展开阻抗分析。

2.1 实例测试环境

文中所需的测试工具除了两种主要供电设备外,还包括频率响应分析仪等辅助测试设备,实物图如图 4 所示。

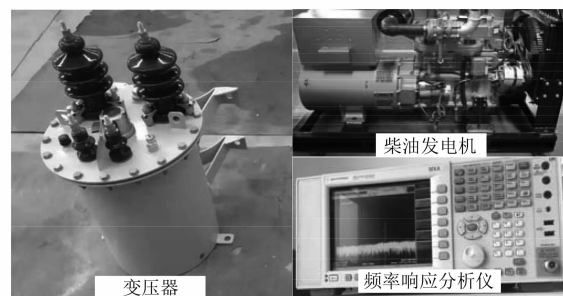


图 4 测试主要工具实物图

按照供电原理连接图 4 所述设备,进行阻抗扫描。通过互联接口连接变压器和柴油发电机,满足多种供电电压变换需求,其中,测试过程中,为了缓解复杂参数获取困难的问题,添加机组控

制器;混合供电系统中,由于母线电压受到额定电压的影响,变压器设备只在一定功率条件下发挥工作职能;针对变压器和柴油发电机所在的公共母线,通过建模分析,获取阻抗特性分析结果。混合供电系统包含多种机器设备,除了起到主要设备连接作用的 VSC 互联接口外,还包括其他直流负载、交流负载供电的变换器。

2.2 供电系统阻抗特性分析

将文中设计的阻抗模型应用于混合供电系统阻抗特性分析过程中,展开时域分析与阻抗扫描,其混合供电系统参数如表 1 所示。

表 1 混合供电系统参数

参数名称	参数值
额定容量 S/MW	2
母线电容 C_{dc}/mF	40.5
基频 f_i/Hz	70
转子频率 f_r/Hz	14
滤波电容 C/Mf	2.6
极对数 p	20
调制增益 K_m	1.3

根据表 1 设置的混合供电系统模型参数,按照文中提出方法,建立相应的阻抗分析模型,汇总测试数据,形成如图 5 所示的时域电流 FFT 结果。

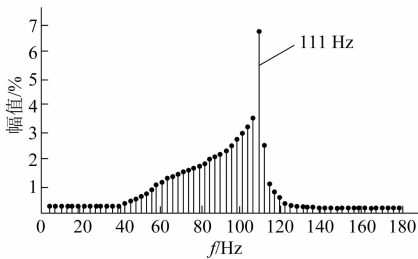


图 5 时域电流 FFT 结果

通过图 5 所示的电流 FFT 结果可知,混合供电系统工作过程中,总谐波失真分量达到了 6.85%,而振荡频率为 111 Hz。

为了更加直观地呈现出系统阻抗建模分析结果,从阻抗特性的主要影响因素入手,分析变压器与电网间的交互作用影响。在分析供电系统的阻抗特性时,获取不同条件下系统展现出的阻抗特点,采用阻抗比的形式表示混合供电系统最终的阻抗特性。依据阻抗分析法的应用原理,将供电

系统的阻抗特性表示为阻抗比 N ,并生成奈奎斯特曲线。阻抗比计算式表示为

$$N = Z_{\text{dc}}/Z_{\text{CPL}} \tag{14}$$

式中: Z_{dc} 表示母线阻抗; Z_{CPL} 表示 CPL 阻抗。

根据上述计算结果,分析变压器与柴油发电机混合供电系统的阻抗特性,在不同电网阻抗、系统延时条件下,应用文中提出方法得出图 6 所示的阻抗比奈奎斯特曲线。

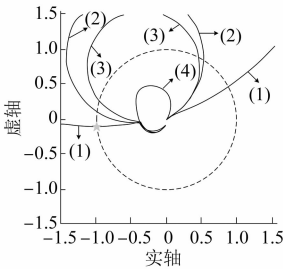


图 6 混合供电系统阻抗比奈奎斯特曲线

在图 6 所示的奈奎斯特曲线图中,为了更好地描述系统阻抗特性,将阻抗比奈奎斯特曲线的单位圆表示为虚线,图中星号表示 111 Hz 振荡频率。1 号线的测试环境为 $T_d = 200 \mu\text{s}$, $L_g = 9 \text{ mH}$, 2 号线表示的系统工作条件为 $T_d = 100 \mu\text{s}$, $L_g = 9 \text{ mH}$, 3 号线和 4 号线所表示的供电系统工作条件分别为 $T_d = 200 \mu\text{s}$, $L_g = 4.5 \text{ mH}$ 和 $T_d = 200 \mu\text{s}$, $L_g = 9 \text{ mH}$ 。根据不同条件下的阻抗比计算结果,得出混合供电系统的阻抗曲线,并在有源阻尼重塑的作用下,得出最终的系统阻抗特性。

2.3 建模分析结果对比

基于文中提出方法,获取变压器与柴油发电机混合供电系统的正序、负序阻抗特性,并将其与实际数据相对比,判断分析结果的准确性。为了增强测试结果的说服力,在同样测试环境中,采用文献[3-4]所提出的建模分析方法获取系统阻抗特性,三种方法得出的阻抗建模分析结果如图 7、图 8 所示。

根据图 7 所示的正序阻抗对比结果来看,文中提出方法得出的阻抗曲线与实际阻抗曲线基本一致,拟合度达到 98% 以上。由图 8 显示的负序阻抗对比结果来看,三种建模分析方法得出的阻抗曲线与实际曲线相比,拟合度分别为 98%、87% 和 85%。文中提出方法得出的阻抗分析结果拟合度最高。这是因为本文根据变压器与柴油发电

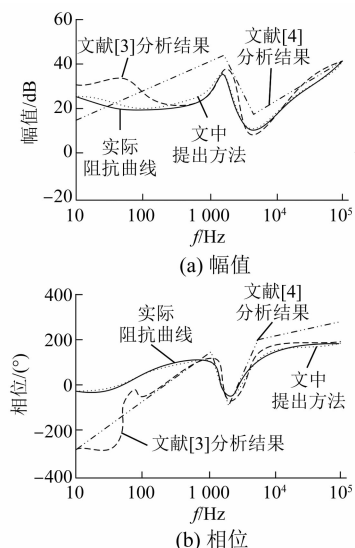


图7 正序阻抗对比分析结果

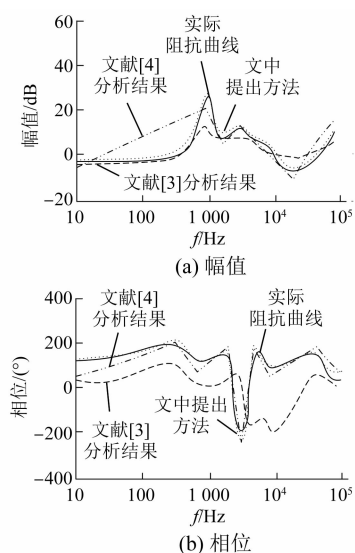


图8 负序阻抗对比分析结果

机的工作原理,充分考虑了坐标旋转变换过程、端口阻抗以及恒功率负载多种影响因素,建立的阻抗模型与实际阻抗情况十分接近,且能动态调整控制参数,因此获得了拟合度较高的阻抗特性分析结果。

综上所述,在实际应用中,文中提出方法可以更加真实地反映出系统阻抗特性,为混合供电系统的稳定运行提供数据支撑。

3 结 语

本文根据变压器与柴油发电机混合供电系统的工作原理,考虑到对阻抗影响较大的元件,建模分析了变压器与柴油发电机混合供电系统阻抗特性,自适应调整 PLL 控制参数,保证阻抗模型的工作正常,得到高精度的阻抗分析结果,与实际阻抗曲线的拟合度较高,为混合供电系统整定提供了更准确的数据。

【参考文献】

- [1] 赵志刚,温涛. 变压器杂散损耗计算中的局部表面阻抗建模方法[J]. 电工技术学报, 2020, 35(22): 4699.
- [2] 周利军,黄林,王路伽,等. 110 kV 输电杆塔的多波阻抗建模与雷击暂态响应分析[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(10): 158.
- [3] 高娟,秦岭. 虚拟同步发电机的输入阻抗建模及稳定性分析[J]. 电网技术, 2021, 45(2): 578.
- [4] 朱蜀,刘开培,李彧野,等. 基于动态相量及传递函数矩阵的模块化多电平换流器交直流侧阻抗建模方法[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(15): 4791.
- [5] 年珩,朱茂玮,徐韵扬,等. 双闭环定交流电压控制下 MMC 换流站阻抗建模及稳定性分析[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(4): 81.
- [6] 刘威,谢小荣,黄金魁,等. 并网变流器的频率耦合阻抗模型及其稳定性分析[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(3): 138.
- [7] 陈秀秀,杨兴武,王楠楠,等. 多端柔性直流输电系统的阻抗建模及稳定性分析[J]. 水电能源科学, 2019, 37(7): 162.
- [8] 李奕欣,赵书强,马燕峰,等. 三相 LCL 型并网逆变器的阻抗建模及特性分析[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(7): 107.
- [9] 李辉,王坤,胡玉,等. 双馈风电系统虚拟同步控制的阻抗建模及稳定性分析[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(12): 3434.
- [10] 陈杰,闫震宇,赵冰,等. 下垂控制三相逆变器阻抗建模与并网特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(16): 4846.