

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.211063

新能源接入背景下的谐波源建模方法综述

陈思源¹, 景巍巍², 史明明³, 付慧², 缪惠宇³, 雷张平¹, 王少荣¹

(1. 华中科技大学电气与电子工程学院, 湖北 武汉 430074; 2. 国网江苏省电力有限公司, 江苏 南京 210024;
3. 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103)

摘要: 大量接入可再生能源和逐步采用交直流混合网络已经成为现代电力系统的两大特征, 随之而来的电网谐波问题日益突出。在此背景下, 谐波源建模方法、谐波溯源方法以及谐波治理方法这三个难点问题越来越受到学术界和工业界的高度关注。综述了目前常见的谐波源建模方法, 为电网谐波领域的理论研究和实践提供参考。从谐波源的机理性建模和数据驱动建模两个角度, 对目前常见的谐波源时域建模方法和频域建模方法进行了梳理、分析和比较, 归纳了各种建模方法的优势和不足, 论述了各类谐波源建模方法的适用场景。其中, 重点阐述了机理性建模方法和数据驱动建模方法存在的问题, 并针对每个问题提出了对应的解决思路。最后, 对常见谐波源建模方法的特点进行了归纳总结, 对新能源接入背景下谐波源建模技术的发展方向进行了展望。

关键词: 新能源接入; 建模方法; 谐波源; 机理性建模; 数据驱动建模

Review of harmonic source modeling methods with the background of renewable energy access

CHEN Siyuan¹, JING Weiwei², SHI Mingming³, FU Hui², MIAO Huiyu³, LEI Zhangping¹, WANG Shaorong¹

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;
2. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210024, China; 3. Electric Power Research Institute of
State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 211103, China)

Abstract: The large number of renewable energy sources and the gradual adoption of AC and DC hybrid networks have become two major characteristics of modern power systems. Along with this, the problem of harmonics in the power grid has become increasingly prominent. In this case, three difficult problems of harmonic source modeling, traceability and control methods have attracted increasing attention from both academia and industry. This paper reviews the current common harmonic source modeling methods, and uses them to provide references for theoretical research and practice in the field of power grid harmonics. From the perspectives of mechanism modeling and data-driven modeling of harmonic sources, the current common harmonic source time-domain modeling methods and frequency-domain modeling methods are described, analyzed and compared, and various modeling methods are summarized. The advantages and disadvantages of the method, as well as the applicable scenarios of various harmonic source modeling methods are discussed. It focuses on the problems of mechanism modeling and data-driven modeling methods, and proposes corresponding solutions for each problem. Finally, the characteristics of common harmonic source modeling methods are summarized, and the development direction of harmonic source modeling technology in the context of renewable energy access is prospected.

This work is supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2017YFB0902800).

Key words: renewable energy access; modeling methods; harmonic source; mechanism modeling; data-driven modeling

0 引言

随着化石能源日益枯竭, 温室效应愈加严峻,

以传统化石能源为主的能源结构逐步向以风能、太阳能、潮汐能等可再生能源为主的能源结构进行转型^[1]。在能源转型的大背景下, 大量可再生能源接入电网, 为进一步提高电力系统能源利用率、增强电网安全稳定性, 推进电网的智能化转型建设是电力行业发展的必然趋势^[2-8]。随着能源结构的转型和

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFB0902800); 国网江苏省电力公司科技项目(5700-202018485A-0-0-00)

电网智能化的不断推进, 大量电力电子装备的接入增强了电力系统的非线性特性, 而可再生能源发电系统的接入给电力系统带来了间歇性和随机性^[9-10]。这些因素导致了电网谐波含量不断增大, 尤其是高频次谐波含量占比也逐步增加, 使得电网谐波治理问题愈加棘手^[11-12]。

现今的电网谐波问题不同于过去仅局限于负荷侧的局部化, 或局限于特定电路拓扑的单一化, 而呈现出系统层面的相互耦合与互相叠加, 容易引起电力电子设备之间的谐波振荡、保护设备的误动作、电流波形的畸变和电能质量的下降等多种问题^[13-17]。为了更好地治理谐波问题, 进一步提高电能质量水平, 谐波源建模研究十分必要, 具有工程应用价值。

谐波源建模在谐波的成分分析、交互影响分析和责任划分等方面均具有重要作用, 一个恰当精准的谐波源模型能够简化分析的复杂程度, 减小分析误差。但是, 迄今尚未出现一个通用的谐波源建模方法, 不同种类的建模方法在不同应用场景中, 表现各有差异^[18]。目前, 按照建模思路划分, 谐波源建模方法可分为两大类: 机理性建模方法和数据驱动建模方法, 而每大类下又可分为时域建模方法和频域建模方法两个子类。据此分类, 谐波源模型共有五种类型, 如图 1 所示。

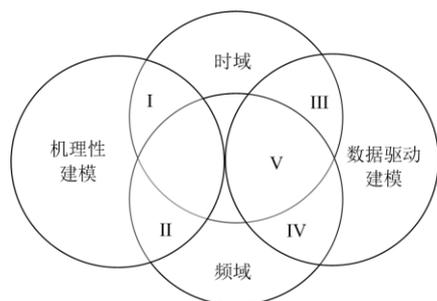


图 1 谐波源建模方法种类划分

Fig. 1 Classification of harmonic source modeling methods

本文按机理性建模和数据驱动建模两大类, 综合覆盖时域和频域模型, 对谐波源建模方法的国内外研究进展进行综述, 理清各类模型发展脉络, 并进行纵向与横向对比, 总结其优势与不足。最后, 在高比例新能源大规模接入电网的背景下, 分析目前谐波建模方面存在的问题, 对日后如何治理谐波问题提出了设想和展望, 为后续谐波源建模工作提供参考。

1 谐波源机理性建模

机理性建模方法是从具体电路拓扑结构出发, 依据基本电路原理, 综合使用小波分析、时序分析

等方法, 获得输入输出(通常为 $U-I$ 关系)之间的解析表达式^[19-20]。基于电路机理建立的谐波源建模, 其解析表达式中各参数物理意义明确, 可解释性较好。但基于机理性建模方法要求完全知晓电路拓扑结构等信息, 在实际工程中有时难以做到。此外, 当电路拓扑发生变化时, 需重新完成建模工作, 通用性不强^[21-23]。机理性建模方法按照时域和频域可划分为两类, 每类下又有不同的分支, 下文将对各类建模方法进行纵向和横向的比较。

1.1 机理性时域谐波源模型

基于机理性建模的时域模型通常是输入与输出的时变函数关系式, 在时域仿真程序如 PSCAD/EMTDC 和 Matlab/Simulink 中用时域模型以实现时域仿真功能^[24-26]。时域模型可进一步划分为无源类和有源类谐波源模型, 对应图 1 的 I 部分。下文对两种谐波源模型进行论述和对比。

1.1.1 无源类谐波源的时域建模方法

1981 年国际大电网会议电磁兼容工作组 (CIGREWG36-05) 提出的负荷模型中, 利用对基波等效阻抗的简单修正反映负荷的谐波响应情况^[27]。此类谐波源建模方法使用方便, 被用于后续研究中: 文献[28]将无源电路模型用于研究交流三相输电系统的谐波渗透问题; 文献[29]基于无源电路模型理论提出了一种用于分析变压器移相时谐波变化情况的模型。

无源模型建模方便且物理意义明确, 适用于结构简单的无源电路。但无源模型也有不足: 其一, 并未考虑负荷群谐波产生的效应; 其二, 非线性拟合能力较差; 其三, 无法反映运行工况的变化; 其四, 由于是针对无源电路, 并不适用于有源类谐波源建模。随着大规模可再生能源的接入, 无源模型已经无法满足现今的建模需求。该类模型如今常用作其他谐波源建模方法的基础框架, 结合数据驱动技术构成图 1 中第 III 部分的谐波源模型。

1.1.2 有源类谐波源的时域建模方法

由于无源模型已无法适应现今有源谐波源激增的情况, 有源类谐波源模型正逐步取代无源模型, 成为主流的谐波源模型。在无源模型的基础上, 引入了恒流源或时变电源, 使得有源模型可以较好地反映有源电路端口的 $U-I$ 函数关系。

1989 年, 文献[30]首次提出有源谐波源模型, 并在此基础上提出了可用于开关电容灵敏度分析的配电系统模型。文献[31]采用状态估计的方法, 分别针对已知谐波参数和从采样中获得谐波参数两种情况, 提出利用负荷端口处电压电流采样值来进行模型参数估计的时域状态估计方法。文献[32]首次

提出适用于配电网的诺顿等效模型,完善了电力负荷时域有源模型的理论依据,至今在谐波分析时仍有较为广泛的应用,亦是现今许多谐波建模方法的理论基石。

在时域谐波源建模方面,针对电弧炉建立非线性时变谐波源的研究成果颇多。关于电弧炉的谐波源模型,最早使用了分段线性化的时变电阻进行等效^[33]。但是,该模型结构过于简单,分段线性化精度偏低。文献[34]以电弧长度为自变量,用时变电阻来表示电弧炉谐波特性。其电阻值由两个时刻的电流值共同决定。文献[35]考虑了电极调节系统带来的影响,在时域模型内引入了负反馈环节,进一步提高了建模的精度。文献[36]提出三种时域模型,其一是由多个随机时变的特定频次电流源叠加合成的谐波电流源模型。此模型简单明了,能反映电弧炉谐波的随机性;其二在非线性时变电阻模型的基础上,从能量转化角度对电阻值进行修正,提高了建模精度;其三在作为自变量的电弧长度上叠加混沌信号,构成混沌模型,能够反映电弧炉内部的混沌情况。文献[37]把谐波源模型分为稳态和动态两个部分,稳态部分用微分方程列写,动态部分利用信号调制思想调节微分方程状态量,从而实现动态建模。

综上所述,时域有源谐波源建模方法的整体思路主要是从电路拓扑结构或从能量守恒等角度出发,建立微分方程,再进一步利用迭代算法结合信号调制等手段进行参数求解。

1.2 机理性频域谐波源模型

基于机理的频域谐波源模型是使用最广泛的一类谐波源模型,对应于图 1 中的II部分。频域下的谐波源端口处各次谐波的伏安特性可以用函数表达式统一表示为

$$\dot{I}_k = F_k(C_k, \dot{U}_1, \dot{U}_2, \dots, \dot{U}_n) \quad (1)$$

式中: \dot{I}_k 为第 k 次谐波电流向量; \dot{U}_k 为第 k 次谐波电压向量; C_k 为当前运行工况参数,通常是一组功率参数。

机理性频域建模的一般步骤如下:首先分析电路拓扑结构和内在机理,之后推导出频域下端口的 $U-I$ 解析表达式,最后求出各参数。

1.2.1 恒流源型谐波源模型

恒流源模型是最为简单的一类频域谐波源模型。此类模型根据谐波源典型频率图谱,各次谐波都各用一个恒流源替代。文献[30]最早提出恒流源模型,将谐波源等效为内阻抗无穷大的受控电流源,控制量是基波电流。文献[38-39]在分析谐波源的定

义后,认为谐波源产生的谐波电流仅受其运行工况和外电路电压的影响,而与外电路的阻抗无关。由此提出了基于谐波源设备典型频谱的谐波源模型,如式(2)和式(3)所示。

$$I_n = I_1 \cdot \frac{I_{n\text{-spectrum}}}{I_{1\text{-spectrum}}} \quad (2)$$

$$\theta_n = \theta_{n\text{-spectrum}} + n \cdot (\theta_1 - \theta_{1\text{-spectrum}}) \quad (3)$$

式中: I_n 、 θ_n 分别为第 n 次谐波的电流幅值和相角; $I_{n\text{-spectrum}}$ 、 $\theta_{n\text{-spectrum}}$ 分别为第 n 次谐波的电流幅值和相角的典型频谱值,可通过查阅设备说明书或相关参考资料获悉^[40-41]。

恒流源模型只需知晓谐波源类别,即可根据典型谐波频谱快速建立模型,使用便捷。但此类模型也存在一些问题:未考虑不同频次谐波之间的耦合关系,建模精度不高;依赖典型谐波频谱,不一定契合于实际场景,也无法针对动态谐波源进行建模。因此,恒流源模型逐步被其他频域模型取代。

1.2.2 基于交叉频率导纳矩阵的谐波源模型

为反映端口处各频次谐波分量相互耦合、相互激励的特点^[42],文献[43]首次提出基于交叉频率导纳矩阵的频域谐波模型。该类模型的基本结构如式(4)所示。

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \\ \dot{I}_3 \\ \vdots \\ \dot{I}_M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{Y}_{11} & \dot{Y}_{12} & \dot{Y}_{13} & \cdots & \dot{Y}_{1N} \\ \dot{Y}_{21} & \dot{Y}_{22} & \dot{Y}_{23} & \cdots & \dot{Y}_{2N} \\ \dot{Y}_{31} & \dot{Y}_{32} & \dot{Y}_{33} & \cdots & \dot{Y}_{3N} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \dot{Y}_{M1} & \dot{Y}_{M2} & \dot{Y}_{M3} & \cdots & \dot{Y}_{MN} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{U}_2 \\ \dot{U}_3 \\ \vdots \\ \dot{U}_M \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: \dot{I}_j 和 \dot{U}_k 分别为第 j 次谐波电流向量和第 k 次谐波电压向量; \dot{Y}_{jk} 为第 j 次谐波电流和第 k 次谐波电压的耦合导纳元素。其中,矩阵元素是在特定运行工况下通过近似线性化求出,当运行工况发生变化时,各元素也将发生变化。交叉频率导纳矩阵模型的提出为研究谐波耦合关系提供了理论框架。文献[43]也提供了导纳矩阵元素的具体求解方法,分为两个步骤:首先将一个基本正弦电压源加在非线性负荷两端,测量电流值并利用傅里叶分解求出各分量,由式(5)计算出 \dot{Y}_{k1} ;在接入基波电压源的基础上,叠加谐波电压 \dot{U}_j ,测出负荷的第 k 次谐波电流 \dot{I}'_k ,由式(6)计算出 \dot{Y}_{kj} ,依次对各次谐波重复以上步骤,即可求取交叉频率导纳矩阵的各元素值。

$$\dot{Y}_{k1} = \frac{\dot{I}'_k}{\dot{U}_1} \quad (5)$$

$$\dot{Y}_{kj} = \frac{\dot{I}'_k - \dot{Y}_{kl}\dot{U}_l}{\dot{U}_j} \quad (6)$$

交叉频率导纳矩阵模型后续被应用于多种谐波源, 并不断改进参数求解方法。文献[44]将交叉频率导纳矩阵建模方法应用于不可控整流桥中, 并提出了迭代谐波分析方法^[29,45-46]。文献[47]在其研究基础上, 由单相拓展到三相, 实现了三相不可控整流桥的精细化建模。该文献从整流桥的机理出发, 推导出可方便计算谐波源模型具体参数的一组公式, 并能适应工况变化情况, 是一种研究整流桥谐波问题的优秀建模方法。基于文献[47]的建模方法, 文献[48]对台式计算机、文献[49]对荧光灯、文献[50]对部分家用电器依次完成了基于交叉频率导纳矩阵的机理性分析建模工作。文献[51]在保证模型精度的情况下, 简化了交叉频率导纳矩阵模型及其参数求解方法。

基于交叉频率导纳矩阵的谐波源建模方法从电路的运行机理和拓扑结构出发, 物理意义明确, 清晰地反映了各次谐波电压电流之间的耦合关系。此外, 交叉频率导纳矩阵模型是部分频域谐波源建模方法的基础框架, 例如基于谐波状态空间建模和基于最小二乘拟合建模等。

此类建模方法也有不足之处: 首先, 交叉频率导纳矩阵建立在谐波源能够线性化或近似线性化处理的基础上, 而对于随机时变的新能源类谐波源, 线性化处理会带来较大误差, 故无法实现高精度建模; 此外, 矩阵各元素对应于特定运行工况, 工况发生变化时需重新计算矩阵各元素。因此, 基于交叉频率导纳矩阵的谐波源不适用于谐波源工况变化频繁或谐波源具有强随机性的情况。

1.2.3 基于谐波状态空间的谐波源模型

随着能源结构转型, 大量电力电子设备接入电网。这些电力电子设备通常存在较为复杂的谐波成分和耦合关系, 呈现出非线性和随机性的特征。谐波状态空间(Harmonic State Space, HSS)建模方法被提出以解决电力电子设备的谐波建模问题。

谐波状态空间理论最初由 Wereley 在文献[52]中提出, 并在文献[53]中进一步完善公式推导。谐波状态空间模型首先需建立状态方程, 如式(7)和式(8)所示。

$$\dot{x}(t) = \mathbf{A}(t)x(t) + \mathbf{B}(t)u(t) \quad (7)$$

$$y(t) = \mathbf{C}(t)x(t) + \mathbf{D}(t)u(t) \quad (8)$$

式中: $\dot{x}(t)$ 、 $u(t)$ 、 $y(t)$ 分别表示系统的状态变量、输入变量、输出变量; $\mathbf{A}(t)$ 、 $\mathbf{B}(t)$ 、 $\mathbf{C}(t)$ 、 $\mathbf{D}(t)$ 分别表示系统的状态矩阵、输入矩阵、输出矩阵和传

递矩阵, 矩阵内各元素均为周期时变量。根据傅里叶级数理论和谐波平衡理论, 可推导出频域 HSS 方程, 如式(9)所示。

$$s\dot{X} = (\mathbf{A} - \mathbf{Q})\dot{X} + \mathbf{B}\dot{U} \quad (9)$$

式中: \mathbf{A} 、 \mathbf{B} 为托普利兹矩阵; \mathbf{Q} 为对角矩阵。基于此理论, 分别对三相晶闸管控制型电抗器、单相逆变器、直流电力系统、模块化多电平转化器、并联下垂控制逆变器建立了谐波状态空间模型, 并基于此模型研究各类电力电子设备的谐波耦合特性^[54-58]。

谐波状态空间建模方式可概括如下: 首先基于电路的拓扑结构, 列写特定工况下的时域状态方程和输出方程; 之后利用谐波平衡原理, 将周期时变系统的状态空间线性方程转化为频域谐波状态空间方程; 在状态空间方程的基础上, 结合小信号分析、调制函数等手段, 线性化方程; 最后, 再引入控制环节、反馈环节、环流抑制环节等多个环节, 实现谐波源的高精度建模, 建模流程如图 2 所示。

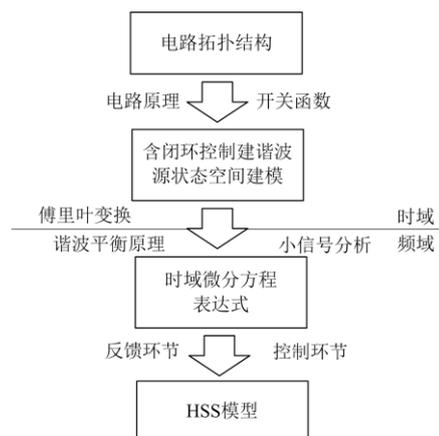


图 2 基于状态空间的谐波源建模流程图

Fig. 2 Flow chart of harmonic source modeling based on state space

基于状态空间的谐波源模型物理意义明确, 可解释性较强, 适用于分析各频次谐波耦合关系。此外, 建模时利用小信号分析线性化方程, 使模型精度较高。引入开关函数和闭环控制环节使该方法适用于电力电子设备的整体化建模。由此可见, 基于状态空间的谐波源建模方法是一种适用于理论分析的实用电力电子设备建模方法。

但此类建模方法也有一定的局限性: 其一, 需完全已知电路的拓扑结构及各元件的参数, 但在工程实际中不一定能满足; 其二, 所建模型不具备通用性和迁移性, 当拓扑结构发生变化时, 应重新建模; 其三, 建模步骤繁琐, 不适用于动态建模; 其

四,模型基于特定运行工况建立,故不适用于工况频繁变化的谐波源。综上所述,基于状态空间的谐波源建模方法更适合用于电力电子设备的谐波机理研究。

1.3 机理性谐波源建模方法特点

基于电路机理的时域谐波源建模方法需完全知晓电路内部拓扑结构及各元件具体参数,用解析表达式的形式反映端口电压电流关系。此建模方法各参数物理意义明确,可解释性较强,建模精度较高。但面对复杂的耦合系统时,模型会由复杂的多元微分方程组构成,建模工作量较大,也会使后续的方程组求解较为繁琐。因此,基于电路机理的时域性谐波源建模方法适用于简单电路,面对拓扑结构未知或耦合程度高的谐波源时,应采用其他建模方式。

基于电路机理的频域谐波源建模方法则从电路拓扑结构和各元件具体参数出发,构建频域解析函数表达式。较时域模型而言,频域模型能更直观地反映各次谐波幅值相位的大小和不同频次间的耦合关系。对复杂谐波源建模时,各次谐波相互耦合、逐次激励的情况在频域模型更能体现。但此类模型也有一些不足:首先,傅里叶变换时采样率、数据量等因素都会影响建模精度,此问题可使用滑窗来解决。此外,傅里叶变换会丢失波形的时域信息,无法获得各次谐波的出现时间和出现次数。针对此不足可使用小波包变换或希尔伯特-黄变换代替傅里叶变换进行时域-频域转化。三种基于电路机理的频域建模方式中,恒流源模型适合对建模速度要求较高的场合;基于交叉频率导纳矩阵的谐波源模型适合谐波耦合关系分析;基于谐波状态空间的谐波源模型适用于电力电子设备的谐波耦合关系研究。在工程实践中,应根据不同的应用场景和需求,选择不同的谐波源建模方法。

2 数据驱动型建模

电力系统作为世界上规模最大、结构最复杂的人造系统之一,其通信网发达且可靠、接入传感器丰富,使电力系统有很好的大数据应用潜力^[59-60]。随着数据感知能力增强,数据存储成本下降,电力系统逐步积累了大规模的数据储备,令数据驱动的谐波源建模方法成为较好的系统化、通用性建模方案。随着电力系统积累数据量的不断扩大,数据驱动建模是谐波源建模未来的一大发展方向。

2.1 时域模型

此类谐波源模型对应图1中的III。这类模型实质上是时间序列的映射回归问题,在算法领域已有很多出色的成果。文献[61]提出的LSTM-CRF网络

能很好地拟合与预测时间序列,文献[62]将此类神经网络运用到了实际问题中。谷歌通过引入注意力机制,提出了transformer网络以解决长时记忆遗失问题,获得了更好的时间序列的学习与映射能力^[63]。此类型谐波源建模方法虽有较好的拟合性能,但无法体现各次谐波之间的耦合关系,故在电气领域的相关研究和使用并不多。

2.2 频域建模

基于数据驱动的频域谐波源模型是伴随着智能电网发展而逐渐走入人们视野的一种建模方法,对应图1的第IV部分。这类建模方法无需知晓具体的拓扑结构,可适用于复杂系统。作为通用性建模方法,数据驱动频域建模方法能隐式地反映各频次谐波之间的耦合关系,并能适应动态变化,运算速度快,使用便捷。

2.2.1 诺顿等效谐波源模型

E.Thunberg在文献[32]中首次提出了谐波源建模的诺顿等效模型,模型结构如图3所示。

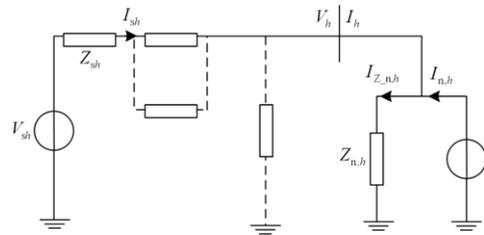


图3 诺顿等效电路图

Fig. 3 Norton equivalent circuit diagram

图3中, V_{sh} 和 I_{sh} 分别表示电源侧第 h 次谐波的电压和电流, Z_{sh} 表示电源侧第 h 次谐波的等效阻抗, V_h 和 I_h 表示PCC点第 h 次谐波的电压和电流, $Z_{n,h}$ 表示第 h 次谐波的诺顿等效阻抗, $I_{n,h}$ 表示第 h 次谐波的诺顿等效电流源。改变电源侧阻抗,测得两组在不同阻抗下(代表两种不同的电网运行方式)的PCC点数据,分别记为谐波电压 V_{h1} 、 V_{h2} 和谐波电流 I_{h1} 、 I_{h2} ,则第 h 次谐波阻抗和谐波电流可以用式(10)和式(11)计算得出。

$$Z_{n,h} = \frac{V_{h,1} - V_{h,2}}{I_{h,1} - I_{h,2}} \quad (10)$$

$$I_{n,h} = I_{h,1} + \frac{V_{h,1}}{Z_{n,h}} \quad (11)$$

文献[32]提出的谐波诺顿等效模型以线性函数关系式反映同频次电压电流耦合关系,只需两组不同运行工况下PCC点测量数据即可建立模型,建模快速且便捷。但此种模型也存在不足:仅改变电源

侧的参数, 无法反映负荷侧的变化; 未考虑不同频次谐波电压电流之间的耦合关系, 模型精度不高^[64]。文献[24]研究了诺顿谐波模型的应用场景与使用范围, 并对一个小型测试系统建模, 之后与 EMTDC 程序的仿真结果进行比对, 证实了诺顿模型的正确性。文献[65]发现频率耦合诺顿导纳矩阵 (frequency coupled Norton admittance matrix, Y_N -matrix) 中的非对角元素会对诺顿等效模型的参数产生更大的影响。文献[66]将诺顿谐波源等效模型运用于非线性负荷。文献[67]利用诺顿等效电路模拟典型居民区的负荷谐波效应, 证明大型谐波系统可用多个诺顿模型叠加表示。文献[50]对典型的非线性负荷建立诺顿等效谐波源模型, 论证了诺顿模型的正确性。

此外, 诺顿模型还有多种用途, 包括谐波源识别^[68-70]、谐波贡献度计算^[11,71-72]、谐波溯源^[71,73-74]等。但诺顿模型也有局限性: 其一, 量测过程产生的误差会影响到模型的精度; 其二, 建模仅选用两组不同运行工况下的测量数据, 模型鲁棒性不高; 其三, 未考虑不同次谐波间的耦合关系, 建模精度不高; 其四, 不适合随机性较强的谐波源。诺顿模型的一些优缺点及相应的解决措施如表 1 所示。

表 1 诺顿模型优缺点及改进措施

Table 1 Advantages and disadvantages of Norton model and improvement measures

优点	不足	解决措施
无需知晓具体拓扑结构	模型参数的可解释性不强	引入机理性分析
仅需两组量测数据量	建模精度易受量测数据影响	采用多组量测数据进行最小二乘拟合
便于进行贡献度计算和溯源分析	未考虑不同频次谐波之间的耦合关系	引入耦合阻抗矩阵诺顿模型
使用子网络组合为总网络应对复杂系统建模	无法对随机性较强或工况变化频繁模型进行建模	利用先验经验覆盖尽可能多的工况

2.2.2 基于最小二乘法的谐波源建模

最小二乘法是一种数学优化方法, 在线性系统和非线性系统上均可获得不错的拟合效果, 被广泛地用于谐波源的数据驱动建模。

传统最小二乘法曲线拟合容易受到特殊数据的影响, 因此应针对此问题加以改进。文献[75]引入 Huber 影响函数, 并利用中位数的稳健性, 将最小二乘法变为加权最小二乘法。该方法解决了最小二乘法易受到奇异值影响的问题, 但未考虑工况变化及不同次谐波间的耦合关系。文献[76]将拟合函数值与实测参数进行权重最小二乘, 以此作为优化的

目标函数, 求解松弛约束下的可行解。文献[77]采用结合偏最小二乘与主成分分析法, 建模精度较高, 但主成分分析法可能会漏选对因变量解释能力较强的成分。针对主成分分析法的局限性, 文献[78]提出的方法能更有效地提取成分。文献[79]采用复线性最小二乘法, 直接用复数形式进行最小二乘回归, 以提高模型精度。文献[80]提出用最小截尾二乘法计算迭代初值, 以提高对异常数据的鲁棒性, 并结合 IGG 权函数进行加权最小二乘回归迭代, 进一步提高精度。文献[81]将求解过程分为两个阶段, 分别求解自变量 x 、因变量 y 与主成分间的依赖关系及自变量 x 和因变量 y 的关系。

最小二乘算法作为一种经典的统计学算法, 具有较好的统计学理论基础, 但该方法具有一个较为明显的缺点, 即易受异常值的影响。在实际的电力系统中, 突发故障或测量噪声影响等因素均会产生异常数据。为提高建模精度, 应用于电气领域的最小二乘算法应提高其鲁棒性。偏最小二乘、稳健最小二乘、复回归最小二乘等多种方法均可降低异常数据对建模结果的影响, 以提高模型的鲁棒性, 几种改进方法的核心思想归纳如表 2 所示。

表 2 几种最小二乘改进方法的核心思想总结表

Table 2 Summary of the core ideas of several least squares improvement methods

改进方法	核心思想
影响函数最小二乘法	引入 Huber 函数作为影响函数修改最小二乘的目标函数, 利用影响函数对异常值进行限制, 并采用迭代算法减小异常值的影响
偏最小二乘法	利用主成分分析法 PCA 和典型关联分析法 CCA 对样本进行降维, 再利用协方差最大化关联性, 以降低异常值对回归结果的影响
复回归最小二乘法	在复数域内求解误差模的平方和最小值, 从而降低了异常值对回归结果的影响
最小截尾二乘法	通过将各残差平方统计量进行排序并选择残差初始值平方和最小的一项作为最小截为估计的解

最小二乘算法也具有一定的局限性: 其一, 模型物理意义不够清晰, 并不适合于理论方面的研究; 其二, 无法反映不同频次谐波之间的耦合关系; 其三, 对非线性谐波源的拟合程度不够理想。

2.2.3 基于支持向量机的谐波源建模

支持向量机 (Support Vector Machines, SVM) 优越的学习能力在模式识别和函数拟合等领域均得以体现^[82-84]。文献[85]提出了最小二乘支持向量机 (Least Squares Support Vector Machine, LS-SVM) 算法。LS-SVM 的原理简述如下: 各组数据集记为 $\{(x_i, y_i), i=1, 2, \dots, m\}$, 首先通过非线性映射把样本映射到高维特征空间, 之后在高维特征空间中构造

最优的决策函数,即可将原始特征空间里的非线性估计函数转化为高维特征空间里的线性估计函数。其转化后的优化问题可用式(12)表示。

$$\begin{cases} \min J(w, e) = 0.5w^T w + 0.5\gamma \sum_{i=1}^m e_i^2 \\ \text{s.t. } y_i = w^T \varphi(x_i) + b + e_i (i=1, 2, \dots, m) \end{cases} \quad (12)$$

引入拉格朗日乘子对函数变量求偏导后,令偏导数为0,可获得其对偶问题的线性系统,如式(13)所示。

$$\begin{bmatrix} 0 & \mathbf{1}_m^T \\ \mathbf{1}_m & \Omega + \frac{1}{\gamma} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b \\ \alpha \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ y \end{bmatrix} \quad (13)$$

式中, $\Omega_{jk} = K(x_j, x_k)$, $K(x_j, x_k)$ 为满足 Mercer 条件的核函数,经过求解后,可以获得 LS-SVM 的函数估计表达式如式(14)所示。

$$y(x) = \sum_{i=1}^m a_i K(x, x_i) + b \quad (14)$$

LS-SVM 通过将 SVM 中的不等式约束转化为等式约束,并利用误差平方和代替松弛变量,把二次规划问题转化为线性方程组求解问题,提高模型精度。文献[86]利用改进的粒子群算法,通过自适应方法动态调整惯性权重和学习因子的参数,能够有效加快收敛速度并提高建模精度。文献[87]证明了基于网格搜索的支持向量机和基于遗传算法的支持向量机模型均有一定的抗噪性。

基于支持向量机的谐波源建模仅需较小的数据量和较少的计算资源,即可实现理想的建模精度。此外,支持向量机建模速度快,抗噪声能力优越,鲁棒性较强,故适用于在线建模。但此类模型物理意义不够明确,可解释性不佳。综上,基于支持向量机的谐波源建模方法更适用于源数据较少的简单谐波源建模。

2.2.4 基于神经网络的谐波源建模

随着算力和计算机理论的快速发展,深度学习在图像领域(Computer Vision, CV)的突破性进展再次掀起了神经网络研究的热潮,如径向基神经网络、卷积神经网络、长短时间记忆网络、深度置信网络等多类神经网络都取得了突出的研究进展^[61,88-91]。神经网络具有极优异的非线性拟合能力。经分析证明^[92-94],只要神经网络的隐含层数够多,网络就能高精度地拟合任何非线性函数。利用神经网络可在未知具体拓扑结构的情况下,实现高精度、强鲁棒性的谐波源建模。

目前,针对谐波源的神经网络建模主要采用径向基神经网络(Radial-Basis Function Neural Network,

RBFNN)进行相关的建模工作,其简单原理介绍如下:径向基函数神经网络结构仅有一个隐含层,隐含层的神经元使用径向基函数作为激活函数。

文献[95]使用径向基神经网络建立静态的简化频域模型,依靠仿真获取训练集,利用批处理的方式进行训练。文献[96]采用广义生长-剪枝 RBF 网络(GGAP-RBF)进行相关的建模。该网络进行神经元的增加和剪枝操作,能有效地减少运算量,实现了动态化建模。文献[37]利用径向基神经网络,对电弧炉进行建模。此外,结合查表技术(Lookup table method, LUT)后,该网络能够处理时间序列,从而能够反映工况变化。文献[97]建立广义回归神经网络,综合考虑了不同频次电流的耦合关系,且能适应工况变化,进一步提高了建模精度。文献[98]用小波分析代替傅里叶算法,以制作包含谐波的频域与时域信息的数据集。除径向基神经网络外,其他神经网络也被用于建立谐波源模型。文献[99]在研究了多谐波源叠加的基础上,利用 BP 网络进行了谐波源建模^[100-101];文献[102]则使用了进化小波神经网络进行谐波源建模。

不同的神经网络建模方法虽各有侧重,但本质上均是靠神经网络强大的非线性拟合能力来映射各次谐波电压电流的耦合关系。较其它数据驱动的建模方式而言,神经网络拥有更强的非线性映射能力,可以实现高精度的非线性复杂谐波源建模;但这也带来更大的运算资源消耗与更大规模的数据集需求。若数据集规模较小或谐波源非线性程度不高,则选用统计学方法建模会更为合适。因此,神经网络类谐波源建模方法更适用于拥有较多历史量测数据的复杂谐波源。

2.3 频域-时域建模

此类型建模是一类较为小众的建模方法,属于图 1 中的 V 类模型。文献[103]考虑到频域模型丢失时域信息、时域模型无法反映谐波耦合关系的不足,提出建立时域-频域模型,具体的建模思路如图 4 所示。该类模型的先进性在于从时域和频域均进行反馈调节,提高建模精度。此外,结合时域和频域的优点,在保留时间信息的同时又能反映各次谐波之间的耦合关系。但该类模型也有不足:物理意义不够明确;训练过程繁琐,数据集需求较大;不适用于动态建模。因此,此类模型还应进一步研究以实用化。

2.4 数据驱动谐波源建模方法特点

基于数据驱动的谐波源建模无需知晓具体拓扑结构,仅需 PCC 端口的量测数据即可建立谐波源模型。不同的建模方法各有侧重,适用于不同的建模

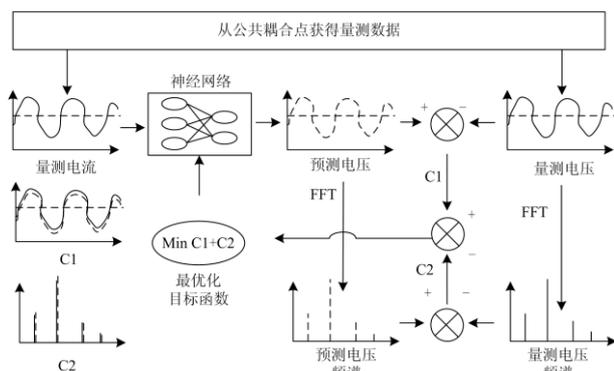


图4 频域-时域模型建模思路

Fig. 4 Frequency domain-time domain model modeling

场景：基于诺顿模型的谐波源建模方法理论基础完善，建模时需要的数据集规模较小，可作为基础框架供后续分析和研究；基于最小二乘算法的谐波源建模方法需使用一定规模的数据集，但其非线性拟合效果要优于诺顿模型；基于支持向量机的建模方法运算速度快，建模精度高且需要的数据集规模小于传统最小二乘法，但其非线性拟合能力不强；基于神经网络的谐波源建模需较大规模的数据集，训练耗费时间较长，故不适用于实时建模，但由于其非线性拟合能力强，适用于复杂谐波源建模。基于上述分析，不同模型的优劣如图5所示。

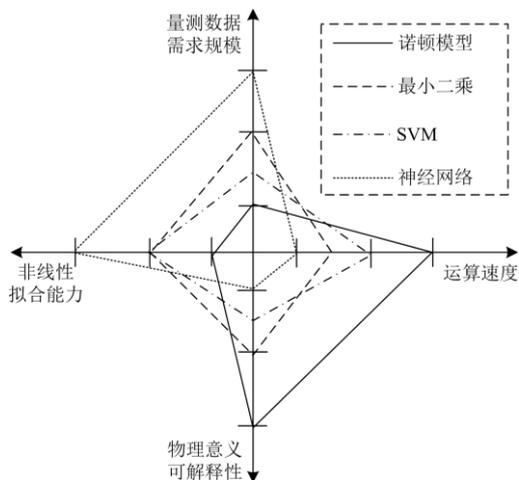


图5 不同数据驱动频域建模方法对比图

Fig. 5 Comparison of different data-driven frequency domain modeling methods

3 研究展望

现有的谐波源建模方法仍然存在一些尚未解决的问题，以下分为四个方面分别进行阐述，并对未来谐波源建模发展方向进行展望：

1) 暂无数据驱动与机理性建模交叉的建模方法

当前的数据驱动建模和机理性建模相互分离的，通常被对立看待。但两者其实有所关联，各有优势与劣势。基于机理性建模物理意义明确，但不具备通用性和迁移性；基于数据驱动建模能在未知具体拓扑结构的情况下建模，属于通用型的谐波源建模方法，但其物理可解释性较差，特别是神经网络建模类非线性映射能力较强的模型，几乎不具备物理可解释性。如何将两者融合从而获得一个既具较为清晰的物理意义，又能适用于多种谐波源建模的通用建模方法，是值得进一步探究的。一个可行的思路是，以机理性建模为基础，利用数据驱动算法去合理简化部分复杂的环节，从而有机结合两者优势与劣势，建立更加具有工程实用价值的谐波源模型。

2) 谐波源建模方法无法很好地适应多种工况变化

现有的数据驱动类谐波源建模大部分常假设数据集均来源于同一运行模态，并未考虑工况变化。在此假设下，不同工况下的耦合关系变化常被忽略，部分出现时间较短或出现频率较低的工况，容易被当作噪声处理。因此，如何定义和划分不同工况，如何处理多种运行工况杂糅的情况，如何设计模型使其能实现不同运行工况之间的切换，都是需要进一步去研究的问题。针对此问题，可考虑根据工程实践经验提前划分不同工况，并对每个典型工况分别建模，之后再设计检测与识别环节，从而区分不同工况并使用对应的谐波源模型，提高建模精度。

3) 谐波源本身具有的不确定性影响建模

随着大规模的可再生能源接入电网，谐波呈现出随机性和混沌特征。因此，可考虑引入概率谐波源模型，利用统计学理论处理谐波源的随机性。此外，伴随着风电、潮汐能、光伏发电等接入电网，谐波会具有一定的周期性特征。但频域模型往往无法反映这些时域规律，时域模型又不能很好地反映各谐波分量间的耦合关系。基于此考虑，频域-时域模型是较好的切入口，能同时反映频域和时域特征，值得进一步探索。

4) 谐波内部作用机理尚未清晰

目前，通用性谐波内部耦合机理方面的研究还较少。此类工作大部分是从特定的电路结构入手，进行机理分析研究，也有部分文献从实验结果反推谐波作用机理。但仍未实现通用性的谐波机理分析。此外，此类工作常忽略附加电路的影响，如忽略反馈调节等环节产生的谐波变化。随着电网智能化的不断推进，通用性谐波机理分析的需求会越来越大，故针对谐波源内部机理的研究应不断推进。可尝试

从抽象的电路结构入手, 首先研究某种电路拓扑结构产生的谐波所固有的规律, 再进一步研究拓扑发生不同变化时, 谐波耦合关系会发生何种变化。此类工作可为谐波源识别和高精度建模提供进一步的理论支持。

4 结论

本文总结现有的不同谐波源建模思路, 结合新能源大量接入和电网智能化转型的时代背景, 对各谐波源建模方法进行简要介绍及优缺点分析。谐波源建模方法按基于电路机理和数据驱动可分为两类, 每类又按照时域和频域可分为两个子类。其中, 基于谐波源机理建模的时域模型包括有源模型和无源模型两类; 频域模型包括恒流源模型、基于交叉频率导纳矩阵模型和基于谐波状态空间模型三类。基于数据驱动频域建模包括诺顿等效模型、基于最小二乘建模、基于支持向量机建模和基于神经网络建模四种类型。除上述建模方法外, 本文也介绍了数据驱动下的时域模型和频域-时域模型。这些建模方法的梳理为谐波源建模工作和谐波仿真与溯源分析工作奠定了基础。

机理性建模具有较为明晰的物理意义, 可解释性较强。建模从电路机理出发, 所建模型是解析函数表达式, 内含电路拓扑结构和元件参数等电路的具体信息, 便于分析谐波耦合情况、计算谐波贡献度。此外, 机理性建模方法对较为简单的谐波源可实现高精度建模, 提高了谐波分析的精度。但此类建模方法也存在一些不足: 其一, 需知晓详细的电路拓扑结构和元件具体参数, 但在工程实际中较难满足; 其二, 不适用于强随机性的谐波源建模; 其三, 不适用于工况频繁变化的谐波源建模; 其四, 此类方法通用性和迁移性不强; 其五, 所建模型鲁棒性不高。综上所述, 机理性建模方法不适合用作通用谐波源建模方法, 而更适合用于谐波耦合关系研究。

区别于机理性建模, 数据驱动类建模无需知晓电路的具体拓扑结构和内部各元件的参数即可完成谐波源建模, 适用于内部结构不可知或耦合关系复杂的谐波源。但这也造成谐波源内部作用机理被完全屏蔽, 故不适合分析谐波源内部谐波作用机理。因此, 数据驱动建模更加适用于系统层面的谐波建模与研究。在大力推进智能电网建设的背景下, 大量智能传感器接入使电力系统运行时产生的海量数据得以感知和存储。伴随着算力的提升和深度学习的发展, 庞大的数据集规模孕育出多样化的数据驱动型谐波源建模方法。这些方法能更直观地反映出

谐波源的外特性, 具有更好的鲁棒性。因此, 数据驱动型谐波源建模方法更能适应工况变化及谐波源的随机性, 更适合实际工程场景运用。

不同谐波源建模方法并无优劣之分, 某方面具有突出优势的谐波源建模方法, 也伴随一定的不足。因此, 针对不同的应用场景和建模需求, 应该因地制宜, 选择不同的建模方法。

参考文献

- [1] 刘振亚. 全球能源互联网跨国跨洲互联研究及展望[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(19): 5103-5110, 5391.
LIU Zhenya. Research and prospect of transnational and intercontinental interconnection of global energy internet[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(19): 5103-5110, 5391.
- [2] 潘翔峰, 黄畅, 张琪, 等. 风-光-储能源系统变工况动态仿真研究[J]. 热力发电, 2021, 50(8): 164-171.
PAN Xiangfeng, HUANG Chang, ZHANG Qi, et al. Dynamic simulation study of wind-light-storage energy system under variable conditions[J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(8): 164-171.
- [3] 何青, 沈轶. 风氢耦合储能系统技术发展现状[J]. 热力发电, 2021, 50(8): 9-17.
HE Qing, SHEN Yi. Development status of wind-hydrogen coupled energy storage system technology[J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(8): 9-17.
- [4] 孙立明, 杨博. 蓄电池/超导混合储能系统非线性鲁棒分数阶控制[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(22): 76-83.
SUN Liming, YANG Bo. Nonlinear robust fractional-order control of battery/superconducting hybrid energy storage system[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(22): 76-83.
- [5] 徐衍会, 耿雨柔, 杨博文. 风电场引发火电机组次同步振荡的机理及影响因素研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(18): 1-9.
XU Yanhui, GENG Yurou, YANG Bowen. Research on the mechanism and influencing factors of subsynchronous oscillation of thermal power units induced by wind farms[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(18): 1-9.
- [6] 杨鸿珍, 赵建朋, 范超, 等. 基于智能光网络系统的配用电业务承载方案研究[J]. 浙江电力, 2020, 39(1): 22-28.
YANG Hongzhen, ZHAO Jianpeng, FAN Chao, et al. Bearing scheme for power distribution and consumption services based on intelligent optical network[J]. Zhejiang Electric Power, 2020, 39(1): 22-28.
- [7] 李红霞, 张祥成, 李芳, 等. 清洁能源示范省建设背景下青海能源需求预测及清洁化发展对策[J]. 中国电力, 2021, 54(7): 1-10, 26.

- LI Hongxia, ZHANG Xiangcheng, LI Fang, et al. Qinghai energy demand forecast and clean development countermeasures under the background of the construction of clean energy demonstration province[J]. *Electric Power*, 2021, 54(7): 1-10, 26.
- [8] 何黎君, 程杉, 陈梓铭. 考虑交互功率控制和双边竞价交易的多微电网双层优化调度[J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(11): 10-17.
HE Lijun, CHENG Shan, CHEN Ziming. Multi-micro grid dual-layer optimal dispatch considering interactive power control and bilateral bidding transactions[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(11): 10-17.
- [9] 潘永长, 李紫莲, 凌军, 等. 基于谐波特征的活体触电判据研究[J]. *浙江电力*, 2021, 40(1): 56-60.
PAN Yongchang, LI Zilian, LING Jun, et al. Research on live electric shock criterion based on harmonic characteristics[J]. *Zhejiang Electric Power*, 2021, 40(1): 56-60.
- [10] 华志刚, 范佳卿, 郭荣, 等. 人工智能技术在火电行业的应用探讨[J]. *中国电力*, 2021, 54(7): 198-207.
HUA Zhigang, FAN Jiaqing, GUO Rong, et al. Discussion on the application of artificial intelligence technology in thermal power industry[J]. *Electric Power*, 2021, 54(7): 198-207.
- [11] 张金平, 周强, 王定美, 等. “双碳”目标下新型电力系统发展路径研究[J]. *华电技术*, 2021, 43(12): 46-51.
ZHANG Jinping, ZHOU Qiang, WANG Dingmei, et al. Research on the development path of new power system to achieve carbon peaking and carbon neutrality[J]. *Huadian Technology*, 2021, 43(12): 46-51.
- [12] 邵振国, 许昊铂, 肖颂勇, 等. 新能源电网中的谐波问题[J]. *电力系统保护与控制*, 2021, 49(4): 178-187.
SHAO Zhenguo, XU Haobo, XIAO Songyong, et al. Harmonic problems in new energy grids[J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49(4): 178-187.
- [13] 李虎. 发电厂厂用电系统中电子开关型谐波源分析[J]. *华电技术*, 2016, 38(11): 30-34, 77.
LI Hu. Power plant auxiliary power system electronic switch type harmonic source analysis[J]. *Huadian Technology*, 2016, 38(11): 30-34, 77.
- [14] VALAVI M, DEVILLERS E, BESNERAIS J L, et al. Influence of converter topology and carrier frequency on airgap field harmonics, magnetic forces, and vibrations in converter-fed hydropower generator[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2018, 54(3): 2202-2214.
- [15] DOM ÍNGUEZ-CRESPO M A, RODR ÍGUEZ E, TORRES-HUERTA A M, et al. Production of BN nanostructures by pulsed laser ablation in liquids: Influence of the applied Nd: YAG harmonics on the structural, optical and photoluminescence properties[J]. *Ceramics International*, 2020, 46(13): 21667-21680.
- [16] 张伟晨, 熊永新, 李程昊, 等. 基于改进 VDCOL 的多馈入直流系统连续换相失败抑制及协调恢复[J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(13): 63-72.
ZHANG Weichen, XIONG Yongxin, LI Chenghao, et al. Continuous commutation failure suppression and coordinated recovery of multi-infeed DC system based on improved VDCOL[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(13): 63-72.
- [17] 陈磊, 何慧雯, 王磊, 等. 基于限流器与断路器协调的混合直流输电系统故障隔离方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(19): 119-127.
CHEN Lei, HE Huiwen, WANG Lei, et al. Fault isolation method for hybrid DC transmission system based on coordination of current limiter and circuit breaker[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(19): 119-127.
- [18] 吴昊, 方旭光, 贾立忠, 等. 应用多级有源滤波系统的分布式电源谐波治理[J]. *浙江电力*, 2020, 39(1): 35-40.
WU Hao, FANG Xuguang, JIA Lizhong, et al. Distributed power harmonic control based on a multi-level active filtering system[J]. *Zhejiang Electric Power*, 2020, 39(1): 35-40.
- [19] MAKSIMOVIC D, STANKOVIC A M, THOTTUVELIL V J, et al. Modeling and simulation of power electronic converters[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2001, 89(6): 898-912.
- [20] 徐震, 陈山林, 孙成明. 谐波分析仪中采样截断误差的分析及其抑制[J]. *电测与仪表*, 1990(2): 3-5.
XU Zhen, CHEN Shanlin, SUN Chengming. Analysis and suppression of sampling truncation error in harmonic analyzer[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 1990(2): 3-5.
- [21] 刘进军, 卓放, 王兆安. 电容滤波型整流电路的网侧谐波分析[J]. *电力电子技术*, 1995(4): 14-19.
LIU Jinjun, ZHUO Fang, WANG Zhaoan. Grid-side harmonic analysis of capacitor filter type rectifier circuit[J]. *Power Electronics Technology*, 1995(4): 14-19.
- [22] 刘进军, 王兆安. LC 滤波的单相桥式整流电路网侧谐波分析[J]. *电力电子技术*, 1996(2): 7-11.
LIU Jinjun, WANG Zhaoan. Harmonic analysis on the grid side of single-phase bridge rectifier circuit based on LC filter[J]. *Power Electronics Technology*, 1996(2): 7-11.
- [23] 裴云庆, 姜桂宾, 王兆安. LC 滤波的三相桥式整流电路网侧谐波分析[J]. *电力电子技术*, 2003(3): 34-36.
PEI Yunqing, JIANG Guibin, WANG Zhaoan. Three-phase bridge rectifier circuit grid-side harmonic analysis based on LC filter[J]. *Power Electronics Technology*, 2003(3): 34-36.
- [24] NASCIMENTO A L, YAHYAOU I, FARDIN J F, et al.

- Modeling and experimental validation of a PEM fuel cell in steady and transient regimes using PSCAD/EMTDC software[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2020, 45(55): 30870-30881.
- [25] CAICEDO J E, ROMERO A A, ZINI H C. Frequency domain modeling of nonlinear loads considering harmonic interaction[C] // 2017 IEEE Workshop on Power Electronics and Power Quality Applications (PEPQA), May 31-June 2, 2017, Bogota, Colombia: 1-6.
- [26] SOSNINA E, KRALIN A, BEDRETDINOV R, et al. Harmonic analysis of the thyristor regulator output voltage[C] // 2018 IEEE PES Transmission Distribution Conference and Exhibition - Latin America (T D-LA), September 18-21, 2018, Lima, Peru: 1-5.
- [27] CIGRE W. 36-05. Harmonics, characteristic parameters, methods of study, estimates of existing values in the network[J]. *Electra*, 1981, 77: 35-54.
- [28] DENSEM T J, BODGER P S, ARRILLAGA J. Three phase transmission system modelling for harmonic penetration studies[J]. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 1984, PAS-103(2): 310-317.
- [29] SHARMA V, FLEMING R I, NIEKAMP L. An iterative approach for analysis of harmonic penetration in the power transmission networks[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1991, 6(4): 1698-1706.
- [30] HIYAMA T, HAMMAM M S A A, ORTMEYER T H. Distribution system modeling with distributed harmonic sources[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1989, 4(2): 1297-1304.
- [31] SOLIMAN S A, AL-KANDARI A M, EL-HAWARY M E. Time domain estimation techniques for harmonic load models[J]. *Electric Machines & Power Systems*, Taylor & Francis, 1997, 25(8): 885-896.
- [32] THUNBERG E, SODER L. A Norton approach to distribution network modeling for harmonic studies[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1999, 14(1): 272-277.
- [33] DUGAN R C. Simulation of arc furnace power systems[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1980, IA-16(6): 813-818.
- [34] 刘小河, 赵刚, 于娟娟. 电弧炉非线性特性对供电网影响的仿真研究[J]. *中国电机工程学报*, 2004, 24(6): 34-38.
LIU Xiaohu, ZHAO Gang, YU Juanjuan. Simulation research on the influence of electric arc furnace nonlinear characteristics on power supply network[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2004, 24(6): 34-38.
- [35] 吕晓东, 刘小河. 电弧炉电极调节器对电网电压波动影响的仿真研究[J]. *中国电机工程学报*, 2006, 26(7): 95-100.
LÜ Xiaodong, LIU Xiaohu. Simulation study on the influence of electric arc furnace electrode regulator on power grid voltage fluctuation[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2006, 26(7): 95-100.
- [36] 张峰, 何新, 杨丽君. 用于电能质量分析的电弧炉仿真模型[J]. *电气技术*, 2013(7): 34-38.
ZHANG Feng, HE Xin, YANG Lijun. Electric arc furnace simulation model for power quality analysis[J]. *Electrical Technology*, 2013(7): 34-38.
- [37] CHANG G W, CHEN C I, LIU Y J. A neural-network-based method of modeling electric arc furnace load for power engineering study[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2010, 25(1): 138-146.
- [38] Modeling and simulation of the propagation of harmonics in electric power networks I concepts, models, and simulation techniques[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1996, 11(1): 452-465.
- [39] Modeling and simulation of the propagation of harmonics in electric power networks II sample systems and examples[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1996, 11(1): 466-474.
- [40] IEEE draft recommended practices and requirements for harmonic control in electric power systems[J]. *IEEE P519/D6ba*, 2013: 1-26.
- [41] IEEE recommended practices and requirements for harmonic control in electrical power systems[J]. *IEEE Std 519-1992*, 1993: 1-12.
- [42] JALALI S G, LASSETER R H. Harmonic interaction of power systems with static switching circuits[C] // *PESC '91 Record 22nd Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference*, June 24-27, 1991, Cambridge, MA, USA: 330-337.
- [43] FAURI M. Harmonic modelling of non-linear load by means of crossed frequency admittance matrix[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 1997, 12(4): 1632-1638.
- [44] MAYORDOMO J G, BEITES L F, ASENSI R, et al. A contribution for modeling controlled and uncontrolled AC/DC converters in harmonic power flows[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1998, 13(4): 1501-1508.
- [45] XU W, MARTI J R, DOMMEL H W. A multiphase harmonic load flow solution technique[J]. *IEEE Power Engineering Review*, 1991, 11(2): 54-64.
- [46] XU W, DRAKOS J E, MANSOUR Y, et al. A three-phase converter model for harmonic analysis of HVDC systems[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1994, 9(3): 1724-1731.
- [47] SUN Y, ZHANG G, XU W, et al. A harmonically coupled admittance matrix model for AC/DC converters[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2007, 22(4): 1574-1582.
- [48] 雍静, 陈亮, 陈双燕. 台式计算机负荷的频域谐波模型及衰减特性[J]. *中国电机工程学报*, 2010, 30(25): 122-129.

- YONG Jing, CHEN Liang, CHEN Shuangyan. Frequency domain harmonic model and attenuation characteristics of desktop computer load[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(25): 122-129.
- [49] YONG J, CHEN L, NASSIF A B, et al. A frequency-domain harmonic model for compact fluorescent lamps[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(2): 1182-1189.
- [50] NASSIF A B, YONG J, XU W. Measurement-based approach for constructing harmonic models of electronic home appliances[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2010, 4(3): 363-375.
- [51] 孙媛媛, 王小宇, 尹志明. 三相整流装置谐波产生机理分析及简化模型[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(7): 51-56.
- SUN Yuanyuan, WANG Xiaoyu, YIN Zhiming. Analysis and simplified model of harmonic generation mechanism of three-phase rectifier device[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(7): 51-56.
- [52] WERELEY N M. Analysis and control of linear periodically time varying systems[D]. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology, 1990.
- [53] WERELEY N M, HALL S R. Linear time periodic systems: transfer function, poles, transmission zeroes and directional properties[C] // 1991 American Control Conference, June 26-28, 1991, Boston, MA, USA: 1179-1184.
- [54] ORILLAZA J R C, WOOD A R. Harmonic state-space model of a controlled TCR[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(1): 197-205.
- [55] KWON J B, WANG X, BLAABJERG F, et al. Harmonic instability analysis of a single-phase grid-connected converter using a harmonic state-space modeling method[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2016, 52(5): 4188-4200.
- [56] KWON J, WANG X, BLAABJERG F, et al. Frequency-domain modeling and simulation of DC power electronic systems using harmonic state space method[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(2): 1044-1055.
- [57] 刘志凯, 郑文悦, 李海弘, 等. 多接入电动汽车充电桩对电网谐波的影响研究[J]. 浙江电力, 2020, 39(2): 77-82.
- LIU Zhikai, ZHENG Wenyue, LI Haihong, et al. Study on the impact of electric vehicle charging pole with multiple access points on power grid harmonic[J]. Zhejiang Electric Power, 2020, 39(2): 77-82.
- [58] WANG S, LIU Z, LIU J, et al. Small-signal modeling and stability prediction of parallel droop-controlled inverters based on terminal characteristics of individual inverters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(1): 1045-1063.
- [59] 彭小圣, 邓迪元, 程时杰, 等. 面向智能电网应用的电力大数据关键技术[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(3): 503-511.
- PENG Xiaosheng, DENG Diyuan, CHENG Shijie, et al. Power big data key technologies for smart grid applications[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(3): 503-511.
- [60] 王俊康, 谭小兵, 朱小燕, 等. 一种智能化母线保护大差高低值判别逻辑分析[J]. 浙江电力, 2020, 39(1): 53-59.
- WANG Junkang, TAN Xiaobing, ZHU Xiaoyan, et al. Analysis of large difference discrimination logic for intelligent bus protection[J]. Zhejiang Electric Power, 2020, 39(1): 53-59.
- [61] HUANG Z, XU W, YU K. Bidirectional LSTM-CRF models for sequence tagging[J]. arXiv:1508.01991, 2015.
- [62] LAI C, CHIEN W, YANG L T, et al. LSTM and edge computing for big data feature recognition of industrial electrical equipment[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019, 15(4): 2469-2477.
- [63] 崔朴奕, 李国丽, 张倩, 等. 基于 VMD-CNN 的小电流接地系统故障电弧检测方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(23): 18-25.
- CUI Puyi, LI Guoli, ZHANG Qian, et al. Research on fault arc detection method of small current grounding system based on VMD-CNN[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(23): 18-25.
- [64] MANSOOR A, GRADY W M, THALLAM R S, et al. Effect of supply voltage harmonics on the input current of single-phase diode bridge rectifier loads[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1995, 10(3): 1416-1422.
- [65] THUNBERG E, SODER L. Influence of the network impedance on distribution system harmonic Norton models[C] // PowerCon 2000. 2000 International Conference on Power System Technology. Proceedings (Cat. No.00EX409), December 4-7, 2000, Perth, WA, Australia: 1143-1148.
- [66] ABDELKADER S, ABDEL-RAHMAN M H, OSMAN M G A Norton equivalent model for nonlinear loads[C] // LESCOPE 01. 2001 Large Engineering Systems Conference on Power Engineering. Conference Proceedings. Theme: Powering Beyond 2001 (Cat. No.01ex490), July 11-13, 2001, Halifax, NS, Canada: 63-67.
- [67] WATSON N R, SCOTT T L, HIRSCH S J J. Implications for distribution networks of high penetration of compact fluorescent lamps[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2009, 24(3): 1521-1528.
- [68] MOUSTAFA A A, MOUSSA A M, EL-GAMMAL M A. Separation of customer and supply harmonics in electrical power distribution systems[C] // Ninth International Conference on Harmonics and Quality of

- Power. Proceedings (Cat. No.00EX441), October 1-4, 2000, Orlando, FL, USA: 1035-1040.
- [69] SRINIVASAN K. On separating customer and supply side harmonic contributions[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1996, 11(2): 1003-1012.
- [70] XU W, AHMED E E, ZHANG X, et al. Measurement of network harmonic impedances: practical implementation issues and their solutions[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2002, 17(1): 210-216.
- [71] 陆文钦, 张强, 商连永, 等. 电力系统谐波源定位方法研究综述[J]. 电工电气, 2019(2): 1-6.
- LU Wenqin, ZHANG Qiang, SHANG Lianyong, et al. Research review of harmonic source location methods in power systems[J]. Electrical Engineering & Electronics, 2019(2): 1-6.
- [72] 谢香敏. 居民谐波源负荷的谐波特性分析及随机性建模研究[D]. 济南: 山东大学, 2020.
- XIE Xiangmin. Harmonic characteristic analysis and random modeling research of resident harmonic source load[D]. Jinan: Shandong University, 2020.
- [73] CHEN C, LIU X, KOVAL D, et al. Critical impedance method—a new detecting harmonic sources method in distribution systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2004, 19(1): 288-297.
- [74] 惠锦, 杨洪耕, 叶茂清. 基于阻抗归一化趋势判别的谐波发射水平估计[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(10): 73-80.
- HUI Jin, YANG Honggeng, YE Maoqing. Harmonic emission level estimation based on impedance normalization trend discrimination[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(10): 73-80.
- [75] 车权, 杨洪耕. 基于稳健回归的谐波发射水平估计方法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(4): 43-46, 53.
- CHE Quan, YANG Honggeng. Harmonic emission level estimation method based on robust regression[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(4): 43-46, 53.
- [76] ORTEGA J M M, EXPOSITO A G, GARCIA A L T, et al. A state estimation approach to harmonic polluting load characterization in distribution systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20(2): 765-772.
- [77] 黄舜, 徐永海. 基于偏最小二乘回归的系统谐波阻抗与谐波发射水平的评估方法[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(1): 93-97.
- HUANG Shun, XU Yonghai. Evaluation method of system harmonic impedance and harmonic emission level based on partial least squares regression[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(1): 93-97.
- [78] 冯飞, 谢小磊. 基于加强的部分最小二乘回归方法的电网谐波发射水平评估[J]. 计量与测试技术, 2014, 41(5): 33-35.
- FENG Fei, XIE Xiaolei. Evaluation of harmonic emission level of power grid based on enhanced partial least squares regression[J]. Measurement & Testing Technology, 2014, 41(5): 33-35.
- [79] 贾秀芳, 华回春, 曹东升, 等. 基于复线性最小二乘法的谐波责任定量划分[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(4): 149-155, 20.
- JIA Xiufang, HUA Huichun, CAO Dongsheng, et al. Quantitative division of harmonic liability based on complex linear least squares method[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(4): 149-155, 20.
- [80] 艾永乐, 王玉栋, 都静静, 等. 基于 LTS 初值的稳健回归的谐波发射水平评估方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(21): 99-105.
- AI Yongle, WANG Yudong, DU Jingjing, et al. Harmonic emission level assessment method based on robust regression of LTS initial value[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(21): 99-105.
- [81] 李湘, 陈民铀, 郑永伟, 等. 基于稳健偏最小二乘法的谐波发射水平估计[J]. 电力系统及其自动化学报, 2016, 28(6): 86-90.
- LI Xiang, CHEN Minyou, ZHENG Yongwei, et al. Harmonic emission level estimation based on robust partial least squares method[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2016, 28(6): 86-90.
- [82] BRAUN A C, WEIDNER U, HINZ S. Support vector machines, import vector machines and relevance vector machines for hyperspectral classification—a comparison[C] // 2011 3rd Workshop on Hyperspectral Image and Signal Processing: Evolution in Remote Sensing (WHISPERS), June 6-9, 2011, Lisbon, Portugal: 1-4.
- [83] STRACHAN S M, MCARTHUR S D J, STEPHEN B, et al. Providing decision support for the condition-based maintenance of circuit breakers through data mining of trip coil current signatures[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22(1): 178-186.
- [84] ZHANG R, MA J, CHEN X, et al. Feature selection for hyperspectral data based on modified recursive support vector machines[C] // 2009 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium II, July 12-17, 2009, Cape Town, South Africa: 847-850.
- [85] 李彬, 吴萍, 刘小龙, 等. 基于最小二乘支持向量机的谐波源建模[J]. 低压电器, 2010(8): 58-62.
- LI Bin, WU Ping, LIU Xiaolong, et al. Harmonic source modeling based on least squares support vector machine[J]. Low Voltage Apparatus, 2010(8): 58-62.
- [86] 汪洋, 龚仁喜, 贾僖泉, 等. 基于改进粒子群优化 LS-SVM 的谐波源特性研究[J]. 计算机仿真, 2015, 32(9): 158-162.

- WANG Yang, GONG Renxi, JIA Xiquan, et al. Research on harmonic source characteristics based on improved particle swarm optimization LS-SVM[J]. Computer Simulation, 2015, 32(9): 158-162.
- [87] 黄焯麒. 基于支持向量机的电力系统谐波源电流估计[D]. 成都: 西南交通大学, 2014.
HUANG Zhuoqi. Power system harmonic source current estimation based on support vector machine[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2014.
- [88] 陈德, 孟安波, 蔡涌烽. 基于CSO-BP神经网络的电缆谐波损耗智能评估[J]. 华电技术, 2021, 43(8): 41-47.
CHEN De, MENG Anbo, CAI Yongfeng. Intelligent evaluation of cable harmonic loss based on CSO-BP neural network [J]. Huadian Technology, 2021, 43(8): 41-47.
- [89] ELANAYAR V T S, SHIN Y C. Radial basis function neural network for approximation and estimation of nonlinear stochastic dynamic systems[J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 1994, 5(4): 594-603.
- [90] KHODAYAR M, KAYNAK O, KHODAYAR M E. Rough deep neural architecture for short-term wind speed forecasting[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2017, 13(6): 2770-2779.
- [91] 刘倩, 胡强, 杨凌帆, 等. 基于时间序列的深度学习光伏发电模型研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(19): 87-98.
LIU Qian, HU Qiang, YANG Lingfan, et al. Research on deep learning photovoltaic power generation model based on time series[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(19): 87-98.
- [92] YAROTSKY D. Error bounds for approximations with deep ReLU networks[J]. Neural Networks, 2017, 94: 103-114.
- [93] SUZUKI T. Adaptivity of deep ReLU network for learning in Besov and mixed smooth Besov spaces: optimal rate and curse of dimensionality[J]. arXiv: 1810.08033, 2018.
- [94] HE J, LI L, XU J, et al. ReLU deep neural networks and linear finite elements[J]. Journal of Computational Mathematics, 2020, 38(3): 502-527.
- [95] MORENO M A, USAOLA J. A new balanced harmonic load flow including nonlinear loads modeled with RBF networks[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2004, 19(2): 686-693.
- [96] 占勇, 程浩忠, 葛乃成, 等. 基于广义生长-剪枝径向基函数神经网络的谐波源建模[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(16): 42-46.
ZHAN Yong, CHENG Haozhong, GE Naicheng, et al. Harmonic source modeling based on generalized growth-pruning radial basis function neural network[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(16): 42-46.
- [97] 谢康, 杨洪耕, 张逸, 等. 基于广义回归神经网络的谐波源建模[J]. 电工电能新技术, 2012, 31(3): 64-67, 72.
XIE Kang, YANG Honggeng, ZHANG Yi, et al. Harmonic source modeling based on generalized regression neural network[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2012, 31(3): 64-67, 72.
- [98] CHANG G W, SHIH M F, CHEN Y Y, et al. A hybrid wavelet transform and neural-network-based approach for modelling dynamic voltage-current characteristics of electric arc furnace[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(2): 815-824.
- [99] 曹栋, 扈罗全. 基于BP神经网络的多谐波源同次谐波叠加模型[J]. 测试技术学报, 2018, 32(5): 381-385.
CAO Dong, HU Luoquan. Multi-harmonic source same-order harmonic superposition model based on BP neural network[J]. Journal of Testing Technology, 2018, 32(5): 381-385.
- [100] 扈罗全, 曹栋. 新的多谐波源同次谐波叠加模型: 标准化应用[J]. 测试技术学报, 2017, 31(5): 443-447.
HU Luoquan, CAO Dong. New multi-harmonic source same-order harmonic superposition model: standardized application[J]. Journal of Testing Technology, 2017, 31(5): 443-447.
- [101] 华回春, 郑璐, 王莉, 等. 多谐波源同次谐波叠加计算方法[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(19): 107-112.
HUA Huichun, ZHENG Lu, WANG Li, et al. Multi-harmonic source and same order harmonic superposition calculation method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(19): 107-112.
- [102] REZVANI H, KHODADADI H. Designing an evolutionary wavelet neural network for estimating the foaming slag quality in electric arc furnace using power quality indices[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2021, 7(4): 1-11.
- [103] CHEN C I, CHEN Y C. A neural-network-based data-driven nonlinear model on time- and frequency-domain voltage-current characterization for power-quality study[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(3): 1577-1584.

收稿日期: 2021-08-10; 修回日期: 2021-09-26

作者简介:

陈思源(1998—), 男, 硕士研究生, 研究方向为人工智能在电网中的运用; E-mail: chensiyuan9801@foxmail.com

景巍巍(1981—), 男, 高级工程师, 研究方向为电力系统规划;

史明明(1986—), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为新能源与分布式发电。E-mail: simon8612@126.com

(编辑 张爱琴)