

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.230866

基于RBF神经网络的光伏并网系统自适应等效建模方法

张姝, 陈豪, 肖先勇

(四川大学, 四川 成都 610000)

摘要: 针对广义负荷建模中的光伏并网系统模型难以适应不同逆变器控制和频率扰动的动态响应问题, 提出了一种基于径向基函数(radial basis function, RBF)神经网络的光伏并网系统自适应等效建模方法。首先, 建立了光伏并网逆变器不同控制策略响应波形的检测判据。然后, 构建了以电压-频率扰动为输入, 有功功率和无功功率为输出的光伏并网系统RBF神经网络模型。最后, 在Matlab/Simulink中搭建了光伏并网系统模型, 并将其接入IEEE14节点配电网进行仿真验证。结果表明, 构建的光伏并网自适应等效模型能够有效辨识电压频率给定控制、有功无功给定控制、下垂控制策略类型, 能够准确反映光伏并网系统在不同电压、频率扰动下的有功功率、无功功率的动态响应特性。

关键词: 光伏并网系统; 等效建模; 逆变器控制; 电压-频率扰动; RBF神经网络

Adaptive equivalent modeling method for photovoltaic grid-connected systems based on an RBF neural network

ZHANG Shu, CHEN Hao, XIAO Xianyong

(Sichuan University, Chengdu 610000, China)

Abstract: There is a problem that the PV grid-connected system model in the generalized load modeling is difficult to adapt to the dynamic response of different inverter control and frequency disturbance. Thus this paper proposes an adaptive equivalent modeling method for a PV grid-connected system based on a radial basis function (RBF) neural network. First, the detection criteria of response waveforms of different control strategies of photovoltaic grid-connected inverters are established. Second, an RBF neural network model is constructed with voltage and frequency disturbances as input and active and reactive power as output. Finally, a photovoltaic grid-connected system model is built in Matlab/Simulink and connected to the IEEE14 node distribution network for simulation verification. The results indicate that the constructed adaptive equivalent model can effectively identify the types of voltage and frequency control, active and reactive power control, and droop control strategies, and can accurately reflect the dynamic response characteristics of the photovoltaic grid-connected system's active and reactive power under different voltage and frequency disturbances.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52007126 and No. U2166209).

Key words: photovoltaic grid-connected system; equivalent modeling; inverter control; voltage-frequency disturbance; RBF neural network

0 引言

以小容量光伏发电系统为代表的分布式电源越来越多地接入配电网^[1-3], 将严重影响配网侧的负荷特性。传统光伏电源以恒定功率源作为等效, 难以有效描述配网中分布式光伏并网系统不同控制策略

下受电压频率扰动后的动态响应^[4]。建立精确、实用的分布式光伏等效模型对电力系统稳定性和可靠性仿真计算分析有着重要意义。

目前国内学者对考虑分布式光伏并网系统建模可以分为两类。一类从机理模型出发, 研究分布式光伏系统模型的优化结构, 提高光伏模型的描述性能。文献[5]详细介绍了分布式电源发电系统的静态、暂态数学模型, 如太阳能光伏发电系统、储能

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(52007126, U2166209)

单元、PWM 变换器和 3 种类型的风力发电单元等。但此类物理模型参数过多、阶数较高，难以适用于电力系统负荷建模。文献[6]将光伏发电系统等效为电压源，采用恒功率控制的电压源模拟光伏发电系统，该模型对系统静态响应有较好描述能力，但对模型的动态响应拟合不理想。文献[7]建立基于恒功率因数控制的光伏发电系统传递函数等效模型，将光伏发电系统等值为二阶欠阻尼系统，模型结构简单、参数较少，但是并未考虑逆变器不同控制策略对光伏等效模型的影响。

另一类从非机理模型出发，以状态方程或神经网络描述分布式光伏系统的静、动态特性。文献[8]基于径向基函数(radial basis function, RBF)神经网络提出一种考虑系统频率动态行为的光伏等效模型，输入层接收湿度、温度、光照水平和频率偏差，以获得光伏系统非线性的输出功率动态行为，但是模型中并没有考虑系统的电压动态行为。文献[9]考虑了逆变器容量约束的问题，提出将分段函数拟合的思想应用于含分布式光伏系统负荷人工神经网络模型的训练。文献[10]将经总体测辨选得到的主要影响因素作为输入量，建立基于径向基函数神经网络负荷预测模型，有效提高了负荷预测精度，但是模型只考虑分钟级时间尺度，忽略了光伏系统在秒级时间尺度上的动态响应。

非机理模型不受模型成分和特性的限制，因此非机理模型在光伏并网建模系统方面更有优势^[8-11]。但是，目前面向广义负荷建模的光伏并网模型还存在以下问题：1) 针对含光伏发电系统的负荷建模技术往往忽略了频率的动态响应，由于配电网中新能源高比例接入，分布式电源电力电子化程度的加深，配电网系统惯性大大降低，频率稳定性不足，发生故障或存在特殊冲击负荷时，会发生严重的频率偏移^[11]。2) 当前的光伏并网模型只能等效单一控制下的光伏并网仿真系统，但是分布式光伏系统为了在配网中发挥支撑、调节等多种功能，存在多种控制策略的逆变器^[12]。因此，本文提出了一种基于 RBF 神经网络的光伏并网系统自适应等效建模方法。该方法依据波形特征自适应地辨识光伏并网系统控制策略，建立了以电压和频率为输入、有功和无功功率为输出的 RBF 神经网络模型，能够有效模拟光伏并网系统电压、频率动态响应，提升等效模型的准确性。

1 光伏发电并网系统

1.1 光伏并网系统

光伏并网系统主要包括 PV 阵列、Boost 升压电

路、三相电压源型逆变器、LCL 滤波器和电网等^[13]，本文在 Matlab/Simulink 仿真工具箱中搭建光伏系统并网模型，拓扑结构如图 1 所示。

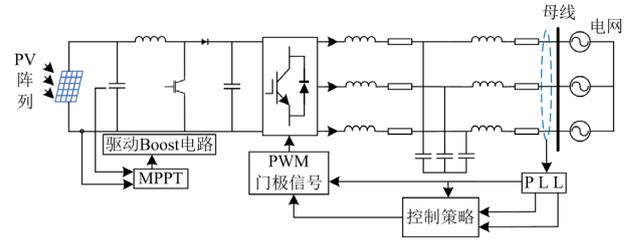


图 1 光伏并网系统拓扑及其控制

Fig. 1 Topology of PV grid connected system and its control

1.2 光伏并网逆变器控制策略

光伏逆变器的控制策略是影响光伏并网系统稳定性和动静态特性的重要因素。通常配网中光伏逆变器采用电压源型逆变器拓扑设计。实际应用中，常见的光伏逆变器控制策略有电压频率给定控制、有功无功给定控制、下垂控制等^[12]。

1.2.1 电压频率给定控制

电压频率(voltage and frequency, Vf)给定控制是能直接控制输出电压和频率不变的控制策略(如图 2 所示)，而逆变器输出的有功和无功功率取决于负载条件^[12]。Vf 控制通常用于主从控制配网中主控电源的控制，即一般采用具有储能系统的大功率光伏作为主控电源，用来支撑配网的电压和频率。

在图 2 中，以同步旋转 dq 坐标系 d 轴进行电压定值控制， q 轴电压设置为 0，图中： U^* 为给定的 d 轴电压设定值； u_{Cd} 和 u_{Cq} 是逆变器输出电压经内部 PLL 转换成 dq 轴的电压； i_{Ld} 、 i_{Lq} 分别为逆变器输出电流经内部锁相环 PLL 转换成 dq 轴的电流； u_d^* 、 u_q^* 分别为电压外环输出的 dq 轴参考电压； θ 为系统功角。

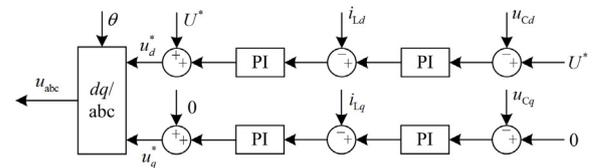


图 2 光伏逆变器典型 Vf 控制结构

Fig. 2 Typical Vf control structure of PV inverters

1.2.2 有功无功给定控制

有功无功(active and reactive power, PQ)给定控制是指在一定电网条件下，即电网电压稳定控制在设定值，电网频率稳定控制在设定值时，直接控制逆变器输出的有功和无功功率^[12]。有功和无功功率

输出的指令值可以是电网调度指令, 也可以是光伏系统的最大功率追踪(maximum power point tracking, MPPT)控制器输出。PQ 控制通常用于采用主从控制的配网中从控电源的控制, 需要配网自身维持电压, 适合于功率较小的分布式光伏。

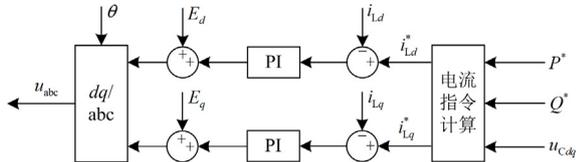


图 3 光伏逆变器典型 PQ 控制结构

Fig. 3 Typical PQ control structure of PV inverters

PQ 控制主要采用电流源控制, 系统给定有功、无功功率值计算逆变器输出电感电流指令值, 再利用电流指令值 i_{Ld}^* 、 i_{Lq}^* 进行电流闭环控制, 图 3 中: P^* 、 Q^* 分别为人为设定的有功和无功功率参考值; u_{cdq} 是输出相电压的 dq 分量; i_{Ld} 和 i_{Lq} 分别为

逆变器实际输出的 dq 轴电流; E_d 、 E_q 分别为系统 dq 轴电压。

1.2.3 下垂控制

下垂(Droop)控制是一种模拟同步发电机的下垂外特性对逆变器实施控制的方法, 如图 4 所示。下垂控制策略既可以单独控制来提供电压和频率支撑, 也可以和其他下垂控制的逆变器单元并联组网运行^[12]。因为感性线路阻抗下并联电源输出的有功功率和频率、无功功率和电压呈现类似于一次函数的下垂特性, 下垂控制策略模拟此下垂特性。当逆变器输出的有功和无功功率变化时, 逆变器输出频率和电压将按照下垂特性曲线变化。

图 4 中: m 是有功-频率下垂系数, n 是无功-电压下垂系数; P 、 Q 分别为光伏逆变器实际输出的有功和无功功率; P_0 、 Q_0 分别为光伏逆变器平均输出的有功和无功功率; U_0 为逆变器平均输出电压; U^* 为逆变器输出电压指令值; ω_0 为系统角频率。

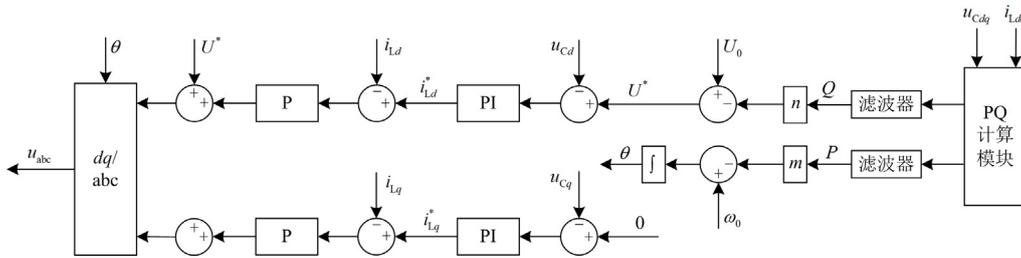


图 4 光伏逆变器典型 Droop 控制结构

Fig. 4 Typical Droop control structure of PV inverters

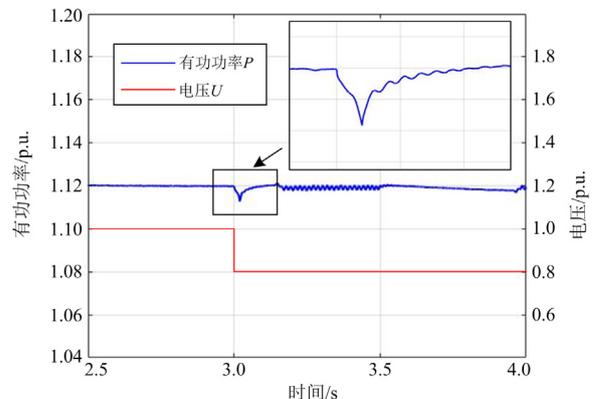
2 基于 RBF 神经网络的光伏并网系统自适应等效模型

2.1 光伏并网系统控制策略辨识判据

由于光伏并网系统在配电网中, 因为其容量大小差异, 发挥着支撑、补充、等效阻尼等不同作用, 因此光伏并网系统的控制方式主要有 3 种(Vf 控制、PQ 控制、Droop 控制), 其动态响应也有巨大区别。本节根据光伏并网系统的有功功率在电压变化后不同的响应特点^[13-16]识别模型的控制方式, 3 种控制策略的响应类型分别是过阻尼振荡响应、欠阻尼振荡响应和高阶振荡响应, 分别对应 Vf 控制、PQ 控制和 Droop 控制, 功率响应曲线如图 5 所示。

由图 5 可以看出, 由于控制方式策略不同, 导致输出功率的响应波形各有特点, 功率曲线特征总结如表 1 所示。Vf 控制的光伏并网系统在电压降落后输出有功功率降低并逐渐回升到最大功率, 形

似过阻尼振荡; PQ 控制的光伏并网系统在电压降落后输出有功功率在最大功率处波动, 形似欠阻尼振荡; Droop 控制的光伏并网系统在电压降落后输出功率在大幅振荡中逐渐上升, 形似高阶振荡响应^[14-16]。



(a) Vf 控制

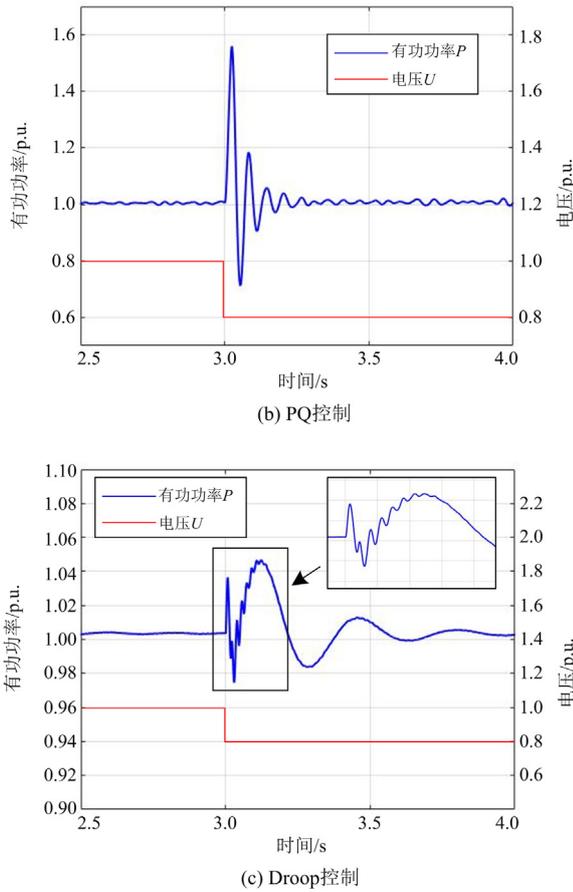


图 5 3 种控制方式下的有功功率响应曲线

Fig. 5 Active power response curve under three control methods

表 1 3 种控制策略下的光伏并网系统功率响应

Table 1 Power response of PV grid connected systems under three control strategies

控制策略	响应类型	有功功率响应波形
Vf 控制	过阻尼振荡响应	
PQ 控制	欠阻尼振荡响应	
Droop 控制	高阶振荡响应	

依据不同控制策略下有功功率响应波形的差异, 构建光伏并网系统控制策略辨识判据。本节利用五点求导法, 求取功率数据对时间的导数, 依据导数的正负关系判定响应曲线的变化状态。求导公式如式(1)所示。

$$\frac{dP(t)}{dt} = \frac{P(t-2T) - 8P(t-T) + 8P(t+T) - P(t+2T)}{12T} + O(T^4) \quad (1)$$

式中: T 为数据步长, $T = 0.001s$; $O(T^4)$ 为高阶无穷小, 一般取 0。

功率最小值 P_{\min} 对应的时刻为 t_{\min} , 功率最大值 P_{\max} 对应的时刻为 t_{\max} , 当 $t > t_{\min}$ 时, 如满足式(2), 说明有功功率在达到最小值后, 会持续上升至稳定值, 这是过阻尼振荡响应与其他两种响应的明确区别。所以可以确定该系统控制方式为电压频率控制。若不成立, 则排除该系统是电压频率控制的可能性, 继续进行后续计算。

当 $t < t_{\max}$ 时, 如满足(2), 说明有功功率在达到最大值前, 没有发生振荡, 单调上升至最大值, 这是欠阻尼振荡和高阶振荡的明确区别。所以可以确定该系统控制方式为有功无功给定控制。若不成立, 则确定该系统控制方式为下垂控制。

$$\frac{dP(t)}{dt} > 0 \quad (2)$$

2.2 光伏并网系统电压-频率响应等效模型

RBF 神经网络是一种性能优良的前馈型神经网络, 其拓扑结构紧凑、收敛速度快, 具有全局逼近能力, 结构参数可实现分离学习^[15]。RBF 神经网络通常只有 3 层, 即输入层、中间层和输出层, 中间层主要计算输入量 x 和样本量 c 之间欧氏距离的径向基函数值, 输出层对其做一个线性组合。径向基函数如式(3)所示。

$$h_j = \exp\left(-\frac{\|x - c_j\|^2}{2b_j^2}\right) \quad (3)$$

式中: h_j 为径向基函数; c_j 为神经网络中心向量; b_j 为高斯基函数宽度。

本文利用神经网络模型拟合光伏并网系统的动态响应, 利用径向基函数作为激活函数, 输入层数据分别是频率、电压, 输出层分别是逆变器输出的有功和无功功率。本文引入频率作为输入量, 影响光伏的输出功率, 在考虑模型的有功功率输出的同时, 实现模型对光伏并网系统无功功率的预测。本模型是假设光伏阵列在当前环境条件下始终输出最大可用功率, 模拟光伏并网系统的动态特性, 这是针对光伏模型暂态特性建模常用的假设^[17-20]。

基于 RBF 神经网络的光伏并网系统单元模型基本结构如图 6。输入层有两个神经元, 分配离散化电压信号到输入信号 \dot{x}_1 , 分配离散化频率信号到输入信号 \dot{x}_2 , 其中 $x = [\dot{x}_1, \dot{x}_2]^T = [U, f]^T$; 输入层信号经非线性高斯基函数计算得到隐藏层 $h = [h_1, h_2, \dots, h_n]^T$; 输出层有两个神经元, 其中 $y = [P_{out},$

\mathbf{Q}_{out}^T ; 输出层和隐藏层的关系如式(4)、式(5)所示。

$$\mathbf{y} = \mathbf{w}^T \mathbf{h} \quad (4)$$

$$\mathbf{w} = [w_1, w_2, \dots, w_n]^T \quad (5)$$

该网络的学习指标函数如式(6)所示。

$$E(k) = \frac{1}{2} (\mathbf{y}_m(k) - \mathbf{y}(k))^2 \quad (6)$$

式中: w_n 为输出层权值; $\mathbf{y}_m(k)$ 为实测有功和无功功率数据; $\mathbf{y}(k)$ 为输出层输出有功和无功功率数据; k 为取样功率数据序列号。

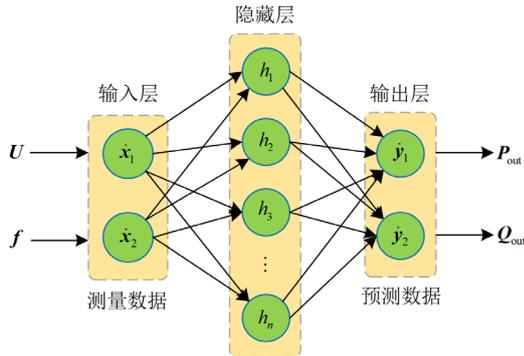


图6 基于RBF的光伏电压-频率响应模型

Fig. 6 Voltage-frequency response model of PV system based on RBF

2.3 考虑控制策略自适应的光伏并网系统电压-频率等效模型

为了兼顾光伏并网模型在不同控制策略下的自适应性以及频率变化下的动态响应, 本节提出了基于RBF神经网络的光伏并网系统自适应等效模型, 等效模型框架如图7所示。在并网母线处设置电压跌落或频率偏移, 采集不同故障程度下并网点处逆变器输出的有功和无功功率响应数据。在滤波和归一化环节后, 分别训练RBF神经网络单元模型。在获得3种模型的电压-有功功率响应数据后, 通过控制策略辨识算法, 根据光伏并网系统在电压变化后, 不同的有功功率响应特点识别模型的控制方式, 进一步确定RBF神经网络单元, 完成对光伏并网系统的自适应等效建模。图8为基于RBF神经网络的光伏并网系统自适应等效建模方法流程图。

3 算例仿真

3.1 光伏并网系统等效模型自描述能力

为验证本文提出的建模方法有效性, 光伏并网系统仿真模型中设置电压跌落区间为0~0.3 p.u., 频率偏移区间为0~0.6 Hz, 采集不同故障程度下并网

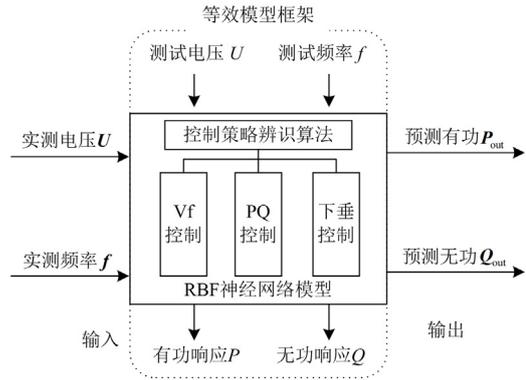


图7 等效模型框架

Fig. 7 Equivalent model framework

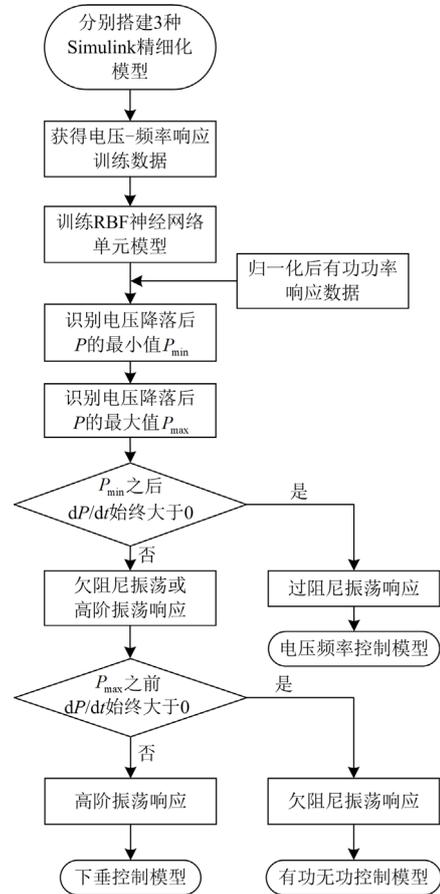


图8 等效外特性模型建模流程图

Fig. 8 Flow chart of equivalent external characteristic model modeling

点处逆变器输出的有功和无功功率响应数据。以上述采样的数据样本训练RBF神经网络模型, 训练数据用于更新网络的权重和偏差, 占总数据集的2/3; 而测试数据用于评估训练后的网络性能, 占总数据集的1/3。神经网络扩展函数设置为10, 迭代次数

上限设置为 1000, 学习率设置为 0.01。将本文提出的建模方法与有功电源并联二阶电路等效模型^[17](后文简称“机理模型”)进行比较。利用均方根误差 R_{MSE} 、均方误差 M_{SE} 以及平均绝对误差 M_{AE} 评价模型的准确性^[21], 如式(7)一式(9)所示。

$$R_{MSE} = \sqrt{\frac{1}{j} \sum_{i=1}^j (T_i - O_i)^2} \quad (7)$$

$$M_{SE} = \frac{1}{j} \sum_{i=1}^j (T_i - O_i)^2 \quad (8)$$

$$M_{AE} = \frac{1}{j} \sum_{i=1}^j |T_i - O_i| \quad (9)$$

式中: j 为样本数量; T_i 为实际数据; O_i 为预测数据。

图 9 为在 Vf 控制下, 当 1 s 时电压跌落 20% 时, 系统输出的有功和无功功率波动图。

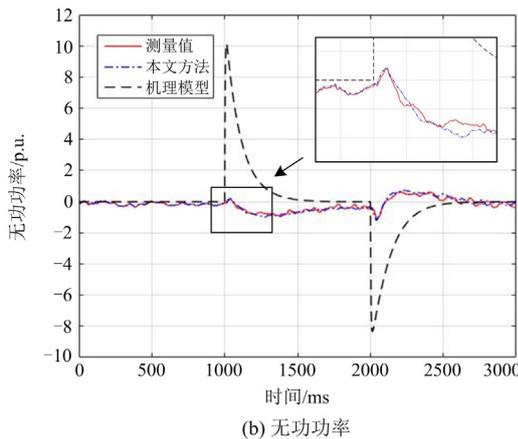
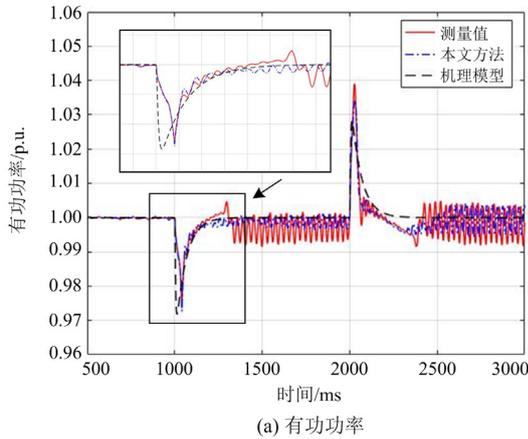


图 9 电压跌落 20% 时模型功率仿真结果

Fig. 9 Simulation results of model power when voltage drops by 20%

由于机理模型中只研究了 Vf 控制的光伏并网系统电压-有功功率等效模型^[17], 所以此处以 Vf 控制的光伏并网系统为例。从图 9 可以看出, 在受到

电压扰动时, 本文模型和机理等效模型对有功功率的仿真效果都较好, 大致接近测量值。不同方法的平均绝对误差如图 10 所示。在 15% 电压跌落时, 机理模型的有功功率平均绝对误差是 1.9×10^{-3} p.u., 本文方法的有功功率平均绝对误差是 8.5×10^{-4} p.u., 4 种工况下本文模型误差平均值均比机理模型低。由于机理模型仅考虑工频条件下电压与有功功率的关系, 未能考虑无功功率变化, 导致该机理模型在针对无功功率仿真时误差较大, 如图 9(b) 所示, 而本文无功功率平均绝对误差是 8.96×10^{-4} p.u.。

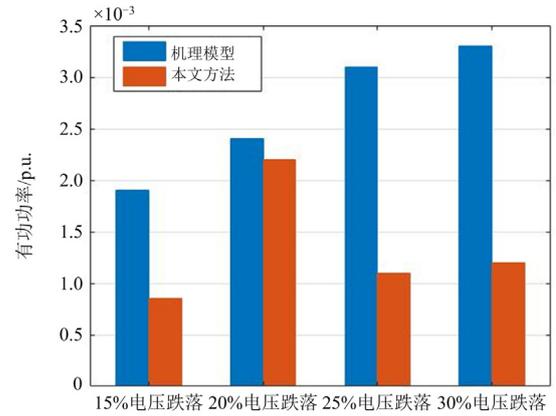


图 10 有功功率的平均绝对误差

Fig. 10 Mean absolute error of active power

由于机理模型是按照 15% 电压跌落的功率响应曲线进行参数辨识, 所以导致辨识出来的模型参数在面对其他电压跌落的情况时误差会变大, 这也是机理模型的固有缺陷之一。相比于有功电源并联二阶电路机理模型, 本文模型能较好地适应不同程度的电压扰动, 同时能够准确地反映并网系统的频率响应。

3.2 IEEE14 节点配电网仿真

本节搭建 IEEE14 节点 10 kV 配电网仿真测试系统, 在该系统中分别接入 4 台 Vf 控制的光伏、5 台 PQ 控制的光伏和 5 台 Droop 控制的光伏, 接入位置如图 11 所示。仿真时间设为 3 s, 仿真步长为 $1 \mu s$, 采样频率为 1×10^6 Hz, 设置光照强度恒定为 1000 kW/m^2 , 温度恒定为 $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 。光伏的额定容量和负荷参数如附录 A 中表 A1、表 A2 所示。本节将 Vf 控制的神经网络模型和本文提出的自适应等效模型相比较, 验证本文提出的等效模型对不同控制策略有较强自适应性。

3.2.1 不同电压扰动下的仿真结果

在负荷母线节点 2 处设置不同程度的三相短路故障, 使母线电压下降区间为 10%~40%, 在 1 s 时发生故障, 故障持续时间为 1 s。在扰动下分别测得

PV₁、PV₃、PV₉ 并网处输出有功和无功功率的标么值, 作为系统扰动时光伏并网系统功率的测量值。

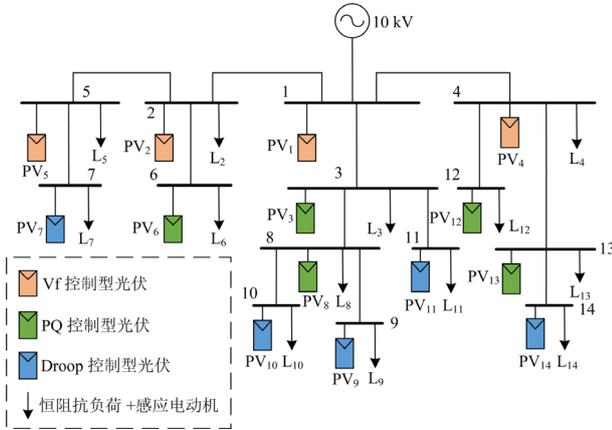
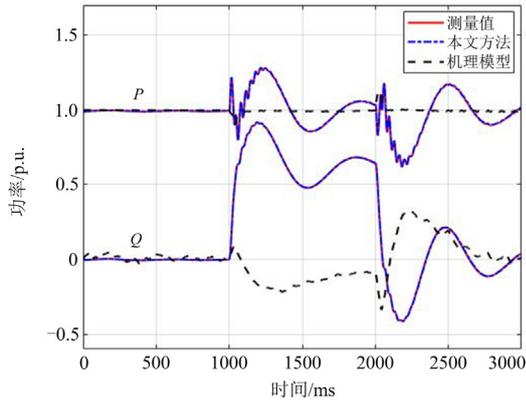


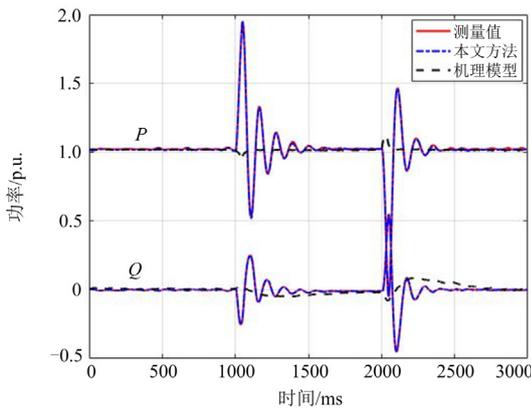
图 11 IEEE14 节点接入 PV 拓扑

Fig. 11 Topology of IEEE14 node system connected to PV

图 12 为电压跌落 17%、25% 时, Droop 控制和 PQ 控制的光伏系统有功和无功功率响应。



(a) 电压跌落 17% 时 Droop 型光伏功率响应



(b) 电压跌落 25% 时 PQ 型光伏功率响应

图 12 不同控制方式下电压扰动时光伏功率响应

Fig. 12 Response of voltage disturbance to PV power under different control methods

由图 12 可知, 相比于单一 Vf 控制的神经网络模型, 本文所提建模方法能自适应判断控制策略类型, 获得不同控制策略条件下的功率输出结果, 且曲线整体变化趋势与测量值十分接近。不同电压扰动下输出功率误差如表 2 所示。由表 2 可以看出, 随着电压跌落程度增加, 光伏模型输出功率平均绝对误差会逐渐变大, 但是总体上误差都小于 5%。

表 2 不同电压扰动下的光伏模型输出功率误差

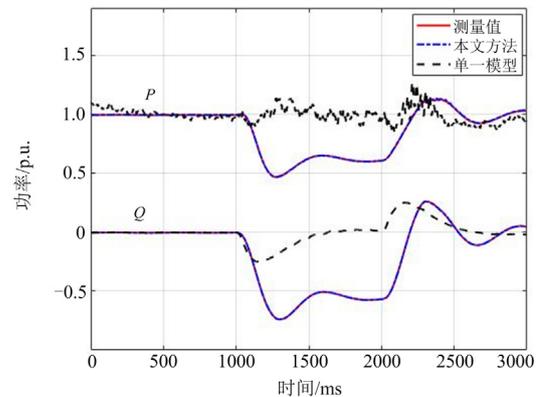
Table 2 Output power error of PV models under different voltage disturbances

功率	电压跌落百分比					
	17%		25%		33%	
	P	Q	P	Q	P	Q
平均绝对误差/($\times 10^{-4}$ p.u.)	41	13	43	33	298	228
均方根误差/($\times 10^{-4}$ p.u.)	56	21	51	46	458	156
均方误差/($\times 10^{-5}$ p.u.)	3.14	0.44	2.60	2.12	209.76	24.33

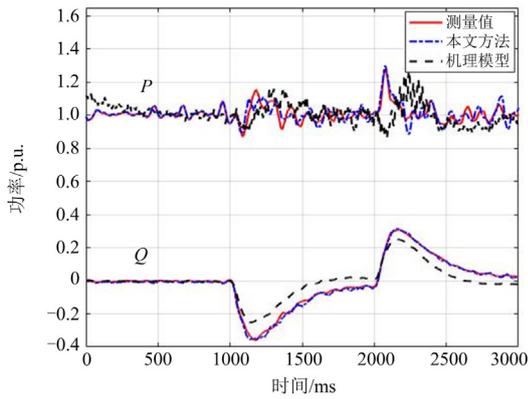
3.2.2 不同频率扰动下的仿真结果

在图 11 节点 1 处模拟配网系统因新能源并网出力不确定性带来的频率波动^[22-23], 使系统的频率波动范围为 $-0.6 \sim -0.2$ Hz。在 1 s 时发生频率下降, 2 s 时系统频率恢复到 50 Hz。图 13 为频率跌落 0.3 Hz、0.4 Hz 时, Droop 控制和 PQ 控制下光伏系统有功和无功功率响应。

由图 13 可知, 当频率扰动时, 光伏系统输出的功率也会发生显著的波动, 会影响系统的功率平衡, 因此有必要在建模时计及光伏系统的频率输入。为了更精确比较建模效果, 计算在本文方法下实现光伏等效建模的平均绝对误差、均方根误差和均方误差如表 3 所示, 可以看出无功功率相对于有功功率变化幅度更大, 而模型获得的无功功率误差比有功功率误差更小, 总体上误差都小于 5%。



(a) 频率跌落 0.3 Hz 时 Droop 型光伏功率响应



(b) 频率跌落0.4 Hz时PQ型光伏功率响应

图 13 不同控制方式下频率扰动时光伏功率响应

Fig. 13 Response of frequency disturbance to PV power under different control methods

表 3 不同频率扰动下的光伏模型输出功率误差

Table 3 Output power error of PV models under different frequency disturbances

功率	电压跌落百分比					
	17%		25%		33%	
	<i>P</i>	<i>Q</i>	<i>P</i>	<i>Q</i>	<i>P</i>	<i>Q</i>
平均绝对误差/($\times 10^{-4}$ p.u.)	418	81	66	13	459	269
均方根误差/($\times 10^{-4}$ p.u.)	281	123	90	21	388	302
均方误差/($\times 10^{-5}$ p.u.)	78.96	15.13	8.10	0.44	150.54	91.20

4 结论

本文兼顾光伏并网模型在不同控制策略下的自适应性以及频率变化下的动态响应，提出基于RBF神经网络的光伏系统自适应等效建模方法，主要结论如下。

1) 提出了光伏并网系统不同控制策略的辨识判据。依据不同电压扰动下的光伏并网系统输出有功功率的波形变化特征实现了Vf控制、PQ控制、Droop控制的检测。

2) 构建了基于RBF神经网络的光伏并网系统有功-无功功率的等效模型，实现了光伏并网系统电压-频率扰动下的有功和无功功率响应的准确刻画。

3) 本文模型相比于P-RLC模型能够适应不同的电压扰动和频率扰动，有功功率平均绝对误差相比机理模型减小了50%；相比于单一控制模型，本文模型能够准确获得Vf、PQ、Droop不同控制策略下的动态响应。

附录 A

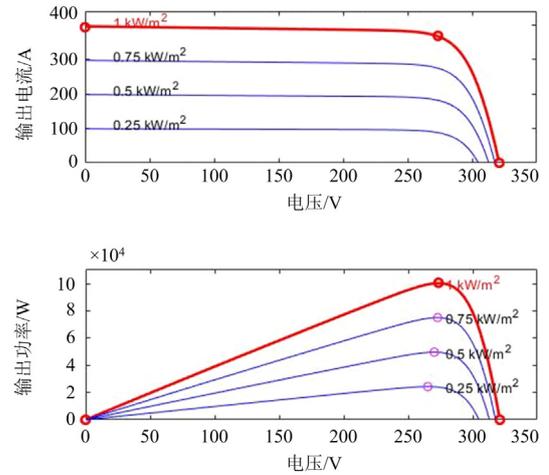


图 A1 光伏阵列的 I-V 和 P-V 特性

Fig. A1 I-V and P-V characteristics of photovoltaic array

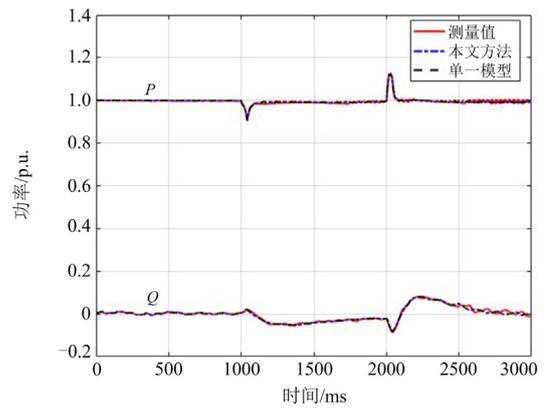


图 A2 电压跌落 33% 时 Vf 型光伏功率响应

Fig. A2 Vf controlled PV power response when voltage drops by 33%

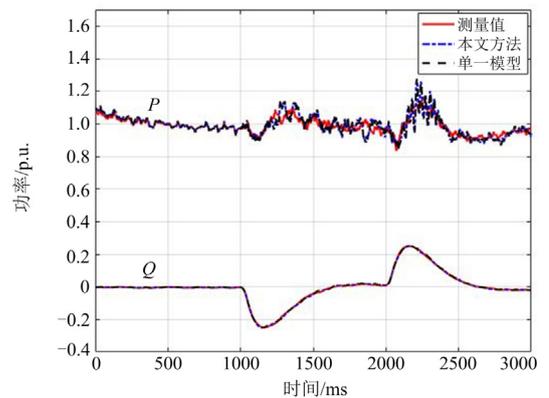


图 A3 频率跌落 0.2 Hz 时 Vf 型光伏功率响应

Fig. A3 Vf controlled PV power response when frequency drops by 0.2 Hz

表 A1 负荷参数

Table A1 Load parameter

负荷编号	接入电压等级/kV	有功功率/kW	无功功率/kvar	恒阻抗负荷比例/%	感应电动机比例/%	R_s	R_r	X_s	X_r	X_m
L ₂	10	20	16	80	20	0.046	0.02	0.3	0.12	3.5
L ₃	10	40	27	80	20	0.046	0.02	0.3	0.12	3.5
L ₄	10	10	9	50	50	0.046	0.02	0.3	0.12	3.5
L ₅	10	20	8	100	0	—	—	—	—	—
L ₆	10	30	15	80	20	0.046	0.02	0.3	0.12	3.5
L ₇	10	15	12	80	20	0.046	0.02	0.3	0.12	3.5
L ₈	10	10	6	100	0	—	—	—	—	—
L ₉	10	45	20	100	0	—	—	—	—	—
L ₁₀	10	6	1	100	0	—	—	—	—	—
L ₁₁	10	10	9	50	50	0.046	0.02	0.3	0.12	3.5
L ₁₂	10	10	7	80	20	0.046	0.02	0.3	0.12	3.5
L ₁₃	10	10	9	100	0	—	—	—	—	—
L ₁₄	10	21	10	100	0	—	—	—	—	—

表 A2 光伏并网系统参数

Table A2 Parameters of photovoltaic grid-connected system

光伏编号	接入电压等级/kV	控制方式	有功功率/kW	无功功率/kvar
PV ₁ 、PV ₂ 、PV ₄ 、PV ₅	10	Vf 控制	34	0
PV ₃ 、PV ₆ 、PV ₈ 、PV ₁₂ 、PV ₁₃	10	PQ 控制	25	0
PV ₇ 、PV ₉ 、PV ₁₀ 、PV ₁₁ 、PV ₁₄	10	Droop 控制	18	0

参考文献

- [1] 林勇, 康佳乐, 余浩, 等. 大规模光伏发电经串补输电线路并网系统强迫次同步振荡机制[J]. 上海交通大学学报, 2022, 56(9): 1118-1127.
LIN Yong, KANG Jiale, YU Hao, et al. Mechanism of forced subsynchronous oscillation of large-scale photovoltaic power generation grid-connected system with series compensation transmission lines[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2022, 56(9): 1118-1127.
- [2] 汪泽州, 张明明, 钱峰强, 等. 含光伏接入的中压配电网集中调控优化策略[J]. 中国电力, 2023, 56(2): 15-22.
WANG Zezhou, ZHANG Mingming, QIAN Fengqiang, et al. Centralized regulation and optimization strategy for MV distribution network with PV integration[J]. Electric Power, 2023, 56(2): 15-22.
- [3] 郭勇, 李秋燕, 马杰, 等. 新基建负荷与光伏接入下配电网可开放容量评估及优化[J]. 电力工程技术, 2023, 42(6): 64-73.
GUO Yong, LI Qiuyan, MA Jie, et al. Evaluation and optimization of available capacity of distribution network under new infrastructure load and photovoltaic access[J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(6): 64-73.
- [4] 刘可真, 陈雪鸥, 陈镭丹, 等. 光伏发电系统动态离散等值模型研究[J]. 上海交通大学学报, 2023, 57(4): 412-421, 505.
LIU Kezhen, CHEN Xueou, CHEN Leidan, et al. Dynamic discrete equivalent model of photovoltaic power generation system[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2023, 57(4): 412-421, 505.
- [5] 黄汉奇, 毛承雄, 王丹, 等. 可再生能源分布式发电系统建模综述[J]. 电力系统及其自动化学报, 2010, 22(5): 14-18, 24.
HUANG Hanqi, MAO Chengxiong, WANG Dan, et al. Modeling summarizing of distributed renewable energy power generation system[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2010, 22(5): 14-18, 24.
- [6] 钱军, 李欣然, 王玲, 等. 面向负荷的光伏电池和燃料电池建模及其等效描述[J]. 电网技术, 2011, 35(4): 135-142.
QIAN Jun, LI Xinran, WANG Ling, et al. Load modeling oriented modeling of photovoltaic cell and fuel cell and its equivalent description[J]. Power System Technology, 2011, 35(4): 135-142.
- [7] 李培强, 曾小军, 黄继元, 等. 面向综合负荷的并网光伏发电系统等效建模[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(8): 43-50.
LI Peiqiang, ZENG Xiaojun, HUANG Jiyuan, et al. Equivalent modeling of grid-connected photovoltaic power generation systems for comprehensive load[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(8): 43-50.

- [8] BAKEER A, MAGDY G. A sophisticated modeling approach for photovoltaic systems in load frequency control[J]. *Electrical Power and Energy Systems*, 2022, 134.
- [9] 郑秋宏, 韩蓓, 李国杰. 考虑逆变器容量约束的广义负荷建模研究[J]. *电测与仪表*, 2020, 51(1): 55-61.
ZHENG QiuHong, HAN Bei, LI Guojie. Research on generalized load modeling considering inverter capacity limitation[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2020, 51(1): 55-61.
- [10] 邹京希, 曹敏, 董立军, 等. 基于总体测辨和人工神经网络的负荷建模及预测方法[J]. *电力系统及其自动化学报*, 2018, 30(8): 108-112.
ZOU Jingxi, CAO Min, DONG Lijun, et al. Load modeling and forecasting method considering measurement-based method and artificial neural network[J]. *Proceedings of the CSU-EPSA*, 2018, 30(8): 108-112.
- [11] 贺仁睦, 叶静, 徐欢, 等. 计及频率特性的实测负荷建模[J]. *电工技术学报*, 2011, 26(5): 165-170.
HE Renmu, YE Jing, XU Huan, et al. Measurement-based load modeling considering frequency characteristics[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2011, 26(5): 165-170.
- [12] 王成山, 李琰, 彭克. 分布式电源并网逆变器典型控制方法综述[J]. *电力系统及其自动化学报*, 2012, 24(2): 12-20.
WANG Chengshan, LI Yan, PENG Ke. Overview of typical control methods for grid-connected inverters of distributed generation[J]. *Proceedings of the CSU-EPSA*, 2012, 24(2): 12-20.
- [13] 薛飞, 李旭涛, 李宏强, 等. 基于双侧电压反馈控制策略的并网光伏系统电压稳定性研究[J]. *中国电力*, 2022, 55(9): 183-191, 203.
XUE Fei, LI Xutao, LI Hongqiang, et al. Research on voltage stability of grid-connected photovoltaic system based on double-side voltage feedback control[J]. *Electric Power*, 2022, 55(9): 183-191, 203.
- [14] 马亚辉, 李欣然, 李小菊, 等. 并网光伏发电系统的动态模型研究[J]. *太阳能学报*, 2013, 34(11): 1860-1867.
MA Yahui, LI Xinran, LI Xiaoju, et al. Research on the dynamic model of grid connected PV generation system[J]. *Acta Energiae Solaris Sinica*, 2013, 34(11): 1860-1867.
- [15] 黄俊铭, 朱建全, 庄远灿. 基于动态 RBF 神经网络的广义电力负荷建模[J]. *电网技术*, 2018, 42(2): 591-597.
HUANG Junming, ZHU Jianquan, ZHUANG Yuancan. Generalized power load modeling based on dynamic RBF neural network[J]. *Power System Technology*, 2018, 42(2): 591-597.
- [16] 李亚楼, 张星, 胡善华, 等. 含高比例电力电子装备电力系统安全稳定分析建模仿真技术[J]. *电力系统自动化*, 2022, 46(10): 33-41.
LI Yalou, ZHANG Xing, HU Shanhua, et al. Modeling and simulation technology for stability analysis of power system with high proportion of power electronics[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2022, 46(10): 33-41.
- [17] 屈星, 李欣然, 盛义发, 等. 面向广义负荷的光伏发电系统等效建模研究[J]. *电网技术*, 2020, 44(6): 2143-2150.
QU Xing, LI Xinran, SHENG Yifa, et al. Research on equivalent modeling of PV generation system for generalized load[J]. *Power System Technology*, 2020, 44(6): 2143-2150.
- [18] 彭生江, 陆军, 张中丹, 等. 光伏接入对电网的影响研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2021, 49(6): 157-164.
PENG Shengjiang, LU Jun, ZHANG Zhongdan, et al. Research on the influence of photovoltaic access on a power grid[J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49(6): 157-164.
- [19] YUE Zhu, JOVICA V, MILANOVIC. Automatic identification of power system load models based on field measurements[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2018, 33(3): 3162-3171.
- [20] 田雨果, 王彤, 邢其鹏, 等. 计及虚拟惯量控制与低电压穿越的光伏发电系统暂态稳定分析[J]. *电力系统保护与控制*, 2022, 50(2): 52-59.
TIAN Yuguo, WANG Tong, XING Qipeng, et al. Transient stability analysis of a photovoltaic generation system considering virtual inertia control and low voltage ride-through[J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(2): 52-59.
- [21] 何怡林, 李长安, 吴忠强. 自编码器融合极限学习机的广义负荷建模[J]. *自动化仪表*, 2021, 45(9): 45-50.
HE Yilin, LI Chang'an, WU Zhongqiang. General load modeling of auto-encoder fused extreme learning machine[J]. *Process Automation Instrumentation*, 2021, 45(9): 45-50.
- [22] 于晶荣, 孙文, 于佳琪, 等. 基于惯性自适应的并网逆变器虚拟同步发电机控制[J]. *电力系统保护与控制*, 2022, 50(4): 137-144.
YU Jingrong, SUN Wen, YU Jiaqi, et al. Virtual synchronous generator control of a grid-connected inverter based on adaptive inertia[J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(4): 137-144.
- [23] FANG Xiaolun, YANG Qiang, YAN Wenjun. Power generation maximization of distributed photovoltaic systems using dynamic topology reconfiguration[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2022, 7(3): 508-522.

收稿日期: 2023-07-08; 修回日期: 2023-09-26

作者简介:

张 姝(1988—), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为配电网保护与故障定位、电力负荷特性与建模、电力扰动分析; E-mail: ZS20061621@163.com

陈 豪(1998—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为广义负荷建模。E-mail: 1657697067@qq.com

(编辑 张 颖)