

构网型控制的新能源电源故障控制参数辨识方法

贾科, 刘芸, 毕天姝, 孔嘉靖, 刘东昊

(新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京市 昌平区 102206)

Identification Method of Fault Control Parameters for Grid-forming Control of Renewable Energy

JIA Ke, LIU Yun, BI Tianshu, KONG Jiajing, LIU Donghao

(State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System With Renewable Energy Sources (North China Electric Power University), Changping District, Beijing 102206, China)

ABSTRACT: Determining the accurate fault control parameters is the foundation for analyzing and calculating the fault characteristics and protection configuration of grid-forming (GFM) renewable energy. However, there exists the coupling relationship between power outer loop and voltage and current inner loop in GFM fault control loops, resulting in inaccurate parameter values through unified identification. To address this issue, this paper proposes a stepwise parameter identification method based on time-sequence decoupling. This method identifies the power outer-loop in stages based on the control loop response time, and separately identifies the low voltage ride through control and voltage and current inner loop based on sensitivity analysis and parameter correlation analysis. Additionally, a virtual impedance reactive power equation is introduced to derive a virtual internal potential calculation formula independent of measurements. Intelligent algorithms are used to fit the output waveform, achieving identification of the power outer loop and the voltage/current inner loops. A semi-physical hardware in the loop testing system is built based on the RTDS (Real Time Digital Simulator) real-time simulation platform, demonstrating the effectiveness of the proposed parameter identification method. Furthermore, the feasibility of the method is validated by using recorded waveform data from a GFM artificial short-circuit test conducted at the photovoltaic power station in Xinjiang.

KEY WORDS: grid-forming control; parameter identification; parameter decoupling

摘要: 获取正确的故障控制参数, 是构网型(grid-forming, GFM)新能源电源故障特性分析计算和保护配置的基础。然

而, 构网型控制的新能源电源中的功率外环和电压电流内环参数相互耦合, 统一辨识难以得到准确的参数值。针对该问题, 该文提出基于故障时序解耦的分步参数辨识方法。该方法利用控制环响应时间不同分阶段辨识功率外环, 基于灵敏度分析及参数相关性分析对低电压穿越环和电压电流内环分步辨识, 引入虚拟阻抗无功功率方程得到不依赖于量测的虚拟内电势计算式, 通过智能算法拟合输出波形实现了功率外环、低穿控制环和电压电流内环的辨识。在 RTDS(real time digital simulator)实时仿真平台搭建半实物硬件在环测试系统, 证明所提参数辨识方法的有效性, 同时依托新疆光伏电站构网型人工短路试验, 利用实测录波数据验证所提参数辨识方法的可行性。

关键词: 构网型控制; 参数辨识; 参数解耦

0 引言

构网型新能源并网变流设备对外呈现“电压源”特性, 具备主动支撑电网电压和频率的能力, 可以适应极弱电网运行场景, 是建设新能源为主体新型电力系统的重要技术保障之一^[1-3]。然而, 由于涉及厂家机密无法获取正确的控制, 参数导致难以准确分析故障特征, 而准确的故障特征为保护新原理及保护整定计算提供理论基础。因此, 亟需研究构网型新能源电源故障控制参数辨识方法。

目前, 控制参数辨识方法主要针对跟网型控制的新能源电源, 其故障控制环包括锁相环、电流内环和低穿控制环^[4]。为解决控制方程欠秩从而出现辨识结果多解的问题, 跟网型控制参数辨识常借助数学模型降阶或增秩处理。

模型增秩即额外增加方程数量以补偿欠秩的方程。文献[5-8]注入直流或谐波信号构建出满秩方程从而实现参数的在线辨识。文献[9-11]构建了频

基金项目: 国家电网有限公司科技项目(4000-202356387A-2-3-XG)。

Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (4000-202356387A-2-3-XG).

域阻抗模型,注入扫频信号拟合阻抗频域特性辨识参数。这类方法在时域、频域下借助注入高频或直流信号解决了方程欠秩而部分参数无法正确辨识的问题,但增加了额外的设备,不适用于复杂的现场试验场景。

模型降阶即基于外特性等效简化以减少待辨识参数的个数,从而使得方程的秩等于待辨识参数个数。文献[12-13]提出仅通过输入和输出的外部测量数据辨识的黑箱模型,减少待辨识参数以辨识系统参数。但黑箱模型可解释性差,对于各控制环参数间的机理解释不清晰。文献[14-15]根据灵敏度分析将参数划分为高灵敏度参数和低灵敏度参数。在辨识过程中,参考工程实际中的经验值将低灵敏度参数设置为固定值而不进行辨识,仅通过优化算法辨识高灵敏度参数。而低灵敏度参数在不同扰动情况下数值偏差大,可能影响高灵敏度参数辨识精度,所建立的故障控制模型不准确。为此,文献[16-17]提出基于灵敏度分析的分步辨识算法,在第一轮辨识中仅高灵敏度参数进行寻优,而第二轮中低灵敏度参数进行寻优。

而构网型故障控制环是多输入多输出模型,存在有功及无功功率控制环、低穿控制环和电压电流内环的级联^[18]。较跟网型控制,构网型故障控制参数多,耦合关系更加复杂,且虚拟内电势作为无功环和电压电流内环的中间量在实际系统中无法量测。由于构网型故障控制方程非满秩,受参数相关性的影响,若对其进行统一辨识,不同参数值组合

可能会出现类似的输出波形,导致辨识结果不收敛。较跟网型分步辨识参数方法,构网型功率外环、电压电流内环和低穿控制环呈现的级联关系更为复杂,仅通过现有的分步辨识算法难以获得完备且准确的故障控制参数。

综上,本文针对构网型故障控制参数待辨识方程欠秩这一问题,提出基于时域解耦的构网型新能源电源故障控制参数分步辨识方法,基于不同控制环响应时间不同这一特性,提出时序解耦的分级参数辨识方法,将故障全过程划分阶段辨识不同控制环参数。引入虚拟阻抗无功功率方程得到不依赖于量测的虚拟内电势计算式。进而通过轨迹灵敏度和 Pearson 相关系数分别分析了内环参数的灵敏度和相关性,分步辨识内环参数,实现了对构网型故障控制参数的辨识。

1 构网型控制数学模型及关联性分析

故障期间构网型控制分别由功率外环、内环和低穿控制环组成,功率外环包括有功-频率环和无功-电压环,内环分为电压电流内环和直接电压环,直接电压环根据外环给定的电压参考和相位直接控制逆变器出口侧电压。为了使得构网型参数辨识算法在不同内环的场景下均适用,本文以含电压电流内环的虚拟同步发电机(virtual synchronous generator, VSG)控制为例,主电路与控制拓扑如图1所示。电压电流内环由4个PI环构成,共有13个故障控制参数需要辨识,其中包含有功-功率

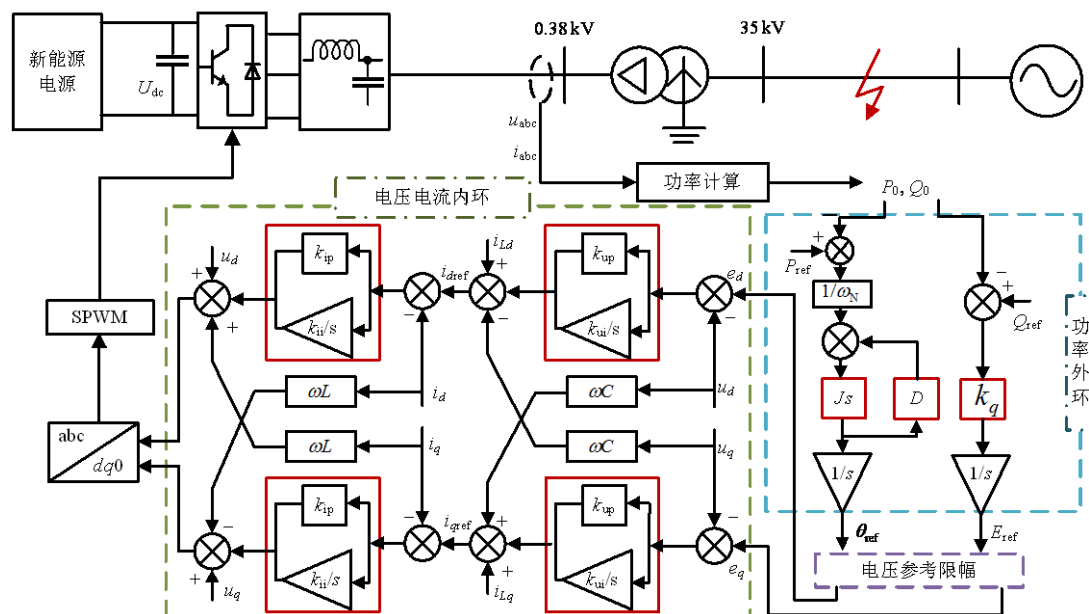


图1 构网型控制的新能源电源主电路及控制结构

Fig. 1 Topology and control scheme of grid-forming control of renewable energy

环中控制参数阻尼系数 D 和虚拟惯量 J 参数, 无功-电压环中无功系数 k_q , 以及级联的电压电流内环中 d 轴与 q 轴各 2 个 PI 参数。在故障期间为了保持构网型控制的电压源特性, 通常采用修改电压参考值或虚拟阻抗限制故障过流, 因此低穿控制环中的 dq 轴电压参考值也需辨识。

1.1 数学模型

有功功率环和无功功率环分别输出相位参考和电压参考以实现与电网的同步和内环的控制, 式(1)为功率外环控制方程:

$$\begin{cases} P_{\text{ref}} - P_e - D \cdot (\omega - \omega_N) = J \frac{d^2 \theta_{\text{ref}}}{dt^2} \\ k_q (Q_{\text{ref}} - Q_e) = \frac{d(E_{\text{ref}} - U_0)}{dt} \end{cases} \quad (1)$$

式中: E_{ref} 为虚拟内电势幅值; θ_{ref} 为相位参考值, D 为阻尼系数; J 为虚拟惯量; P_e 、 P_{ref} 、 Q_e 、 Q_{ref} 分别为有功和无功功率实际值和参考值; U_0 为电压基础值; ω_N 和 ω 分别为 VSG 虚拟转速额定值与实际值; k_q 为无功-电压下垂系数。

电压电流内环为两个级联的控制环, 经派克反变换后得到脉冲宽度调制信号以控制逆变器, 式(2)、(3)分别为电压和电流内环控制方程:

$$\begin{cases} i_{d\text{ref}} = (k_{up} + k_{ui}/s)(e_d^* - u_d) - \omega C u_q + i_d \\ i_{q\text{ref}} = (k_{up} + k_{ui}/s)(e_q^* - u_q) + \omega C u_d + i_q \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} u_{d\text{ref}} = (k_{ip} + \frac{k_{ii}}{s})(i_{d\text{ref}} - i_d) + u_d - \omega L i_q \\ u_{q\text{ref}} = (k_{ip} + \frac{k_{ii}}{s})(i_{q\text{ref}} - i_q) + u_q + \omega L i_d \end{cases} \quad (3)$$

式中: $i_{d\text{ref}}$ 和 $i_{q\text{ref}}$ 、 i_d 和 i_q 分别为 dq 轴电流参考值和实际值; $u_{d\text{ref}}$ 和 $u_{q\text{ref}}$ 、 u_d 和 u_q 分别为 dq 轴电压参考值和实际值; k_{up} 和 k_{ui} 、 k_{ip} 和 k_{ii} 分别为电压内环和电流内环的比例和积分系数。

结合输出功率计算式可得有功功率与无功功率分别为

$$\begin{cases} P_e = L^{-1} \left[\frac{S_E}{J\omega s^2 + Ds + S_E} \frac{P_{\text{ref}}}{s} \right] \\ Q_e = Q_{\text{ref}} - L^{-1} [(E_{\text{ref}} - U_0)s/k_q] \end{cases} \quad (4)$$

式中 S_E 为 E_0/U_Z 。

根据电压电流内环方程及滤波器电路方程可得输出电流计算式为

$$i(t) = L^{-1} \left[\frac{(k_{up}s + k_{ui})(k_{ip}s + k_{ii})}{Ls^3 + Rs^2 + k_{ip}s + k_{ii}} \right] u(t) \quad (5)$$

构网型故障穿越环节通过虚拟阻抗或直接给定电压限幅值降低电压参考值, 维持了故障期间的电压源特性, 避免了变流设备因故障过流而脱网。而作为无功外环输出量的虚拟内电势及电压内环的输入量无法直接量测, 因此故障电压限幅部分无法获取。为便于分析, 将虚拟内电势被限幅部分通过广义化的虚拟阻抗参数表示, 其方程为

$$\begin{cases} e_d^* = R_v i_d - \omega L_v i_q + u_d \\ e_q^* = R_v i_q + \omega L_v i_d + u_q \end{cases} \quad (6)$$

式中: e_d^* 和 e_q^* 为降电压后 dq 轴电压参考值; u_d 和 u_q 为并网点 dq 轴电压; i_d 和 i_q 为输出 dq 轴电流; R_v 和 X_v 为广义化虚拟阻抗值。

基于上文对故障控制环节数学模型的建立, 结合构网型故障特性分析可知, 电流的自由分量与低穿控制参数、电压电流内环参数有关, 电流的强制分量与低穿控制参数有关^[19-21]。因此, 为分析故障电流特性, 有必要对各控制环参数进行辨识。

1.2 参数关联性分析

根据 1.1 节中构网型控制建立的数学模型可知, 故障期间涉及控制环多, 参数间关系不明晰, 为分析各控制环间的参数关联性, 结合功率外环、电压电流内环和低穿控制环的控制方程, 得到复频域下逆变器输出电流式为:

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = T_{3 \times 2} \frac{k_{ip}s + k_{ii}}{Ls^2 + (R + k_{ip})s + k_{ii}} \begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\theta_{\text{ref}}(t) = L^{-1} \left[\frac{1}{Js^2 + Ds} (P_{\text{ref}} - P_e) \right] \quad (8)$$

式中: L 为等效电感值; R 为等效电阻值; X 为等效电抗值; T 为派克变换矩阵。

式(9)中派克反变化矩阵是非线性矩阵, 由于故障期间并网点相位通常变化不大, 将派克变换矩阵中的余弦项和正弦项线性化, 以 A 相电流为例, 电流表达式为式(10)。

$$\begin{bmatrix} \cos \theta_{\text{ref}} & -\sin \theta_{\text{ref}} \\ \cos(\theta_{\text{ref}} - 120^\circ) & -\sin(\theta_{\text{ref}} - 120^\circ) \\ \cos(\theta_{\text{ref}} + 120^\circ) & -\sin(\theta_{\text{ref}} + 120^\circ) \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} 1 & -\theta_{\text{ref}} \\ 1 - \theta_{\text{ref}} + 120^\circ \\ 1 - \theta_{\text{ref}} - 120^\circ \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$I_a = \begin{bmatrix} \frac{k_{ip}s + k_{ii}}{Ls^2 + (R + k_{ip})s + k_{ii}} \\ \frac{(P_{\text{ref}} - P_e)}{Js^2 + Ds} \frac{k_{ip}s + k_{ii}}{Ls^2 + (R + k_{ip})s + k_{ii}} \end{bmatrix}^T G_u(s) \begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} \quad (10)$$

构网型控制的传递函数矩阵表现为两个二阶

传递函数相乘形式,因此功率外环控制参数和电压电流内环控制参数间具有数值相关性,若统一辨识易出现多解,需对控制参数解耦后再进一步辨识。

2 基于时序解耦的构网型故障控制参数辨识算法

如前文所述,虚拟内电势在实际工程中作为连接无功外环和内环的中间变量,无法测量得到,而功率外环与电压电流内环控制参数在数值上相互耦合。为了解决这一问题,本文提出基于时域解耦的分步辨识方法,首先引入虚拟阻抗无功功率计算式得到虚拟内电势计算式,再根据级联控制环的响应时间不同,划分不同故障控制阶段,从时域上解耦。最后对内环参数进行分析,基于电压电流内环参数和低穿控制参数灵敏度的不同分步辨识。

2.1 虚拟内电势的计算

功率外环分别为内环提供了相位和幅值参考,为防止故障过流威胁变流设备安全,故障期间低穿控制环将无功外环中提供的虚拟内电势降压后输入内环中。由于无功-电压环控制参数中的无功系数未知,且虚拟内电势无法直接量测,作为连接外环与内环的中间变量,若无法获取虚拟内电势则无法辨识无功外环及内环参数。

1.1 节中,通过虚拟阻抗统一描述虚拟内电势的限幅环节,为简化计算将 d 轴与虚拟内电势重合,根据广义化后的虚拟阻抗等效电路,由虚拟阻抗两端虚拟内电势与逆变器出口侧电压关系,可得逆变器送出无功功率计算式:

$$Q = \text{Im}(U \angle \theta (\frac{E_{\text{ref}} - U \angle \theta}{R_v + jX_v})^*) \quad (11)$$

$$Q = u_q i_d - u_d i_q \quad (12)$$

式中: E_{ref} 为虚拟内电势; U 为电压限幅后的逆变器出口侧电压; θ 为电压相位。

由式(11)中无功功率计算式,结合 dq 轴坐标系下的电压电流计算的无功功率式(13),即可得到虚拟内电势计算式:

$$E_{\text{ref}} = \frac{(u_q i_d - u_d i_q) Z_v^2 + X_v (u_q^2 + u_d^2)}{R_v u_q + X_v u_d} \quad (13)$$

通过引入虚拟阻抗电压计算无功功率,得到由逆变器出口侧电压、电流及虚拟阻抗表示的虚拟内电势,解决了虚拟内电势无法直接量测导致无功内

环参数辨识困难的问题。

2.2 故障时序划分

构网型控制的功率外环、低穿控制环和电压电流内环呈现出级联关系,工程实际上,为了减少级联控制环相互之间的影响,通常将功率外环带宽设置远小于内环,功率外环与内环间存在弱耦合关系。因此,在不忽略电压电流内环的动态响应过程时,认为功率外环响应时间远长于电压电流内环,呈阶梯状分布^[19]。

图2为构网型各级控制环响应时间示意图,故障前以额定状态运行,电流幅值与相位均保持恒定,故障后内环首先到达稳态,在 t_1 后电压电流内环参数将不再影响构网型控制输出的电流波形。随后,功率外环到达稳态,功率环的控制参数不再影响电流波形。低穿控制参数保证故障全过程流经变流设备的短路电流不超限,影响故障暂态和故障稳态的输出电流值。

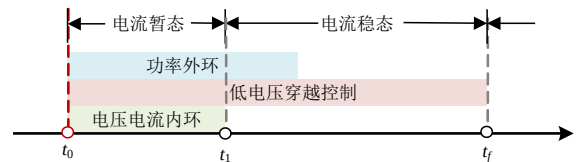


图2 故障时序划分图

Fig. 2 Fault time series segmentation constraint

本文所采用的辨识算法为离线辨识,借助电流突变量判据判断故障发生及切除时刻后,利用内外环对电流波形响应时间不同这一特性,通过希尔伯特变换提取三相电流包络线,包络线导数值为0的时刻作为电流暂态和稳态临界时间,用以划分内外环参数辨识区域:

$$dI(t) = \frac{H(I(t) + \Delta t) - H(I(t))}{\Delta t} < \alpha \quad (14)$$

式中: α 为电流幅值阈值; Δt 为差分间隔; $H(I(t))$ 为希尔伯特变换后的电流幅值。

故障后短路电流表达式可简化为

$$i = I' + (I - I')e^{-t/T_a} \quad (15)$$

式中: I' 为故障电流; I 为故障前正常运行的电流。

为保证变流设备安全,切换至低穿控制后构网型故障期间短路电流约为额定电流的1.5~2倍,因此式中 $I - I'$ 可以用额定电流替换,当 $t = 3T_a$ 时,短路电流指数项已衰减至5%左右,电流阈值如式(16)所示。同时,为了避免暂态电流波动导致的时域错误划分,临界时刻需满足至故障切除后均满足包络线导数值小于电流阈值。

$$\alpha = \frac{dI_{\text{mag}}}{dt} = \frac{(I' - I)e^{-t/T_a}}{T_a} = \frac{I_N}{T_a} e^{-3T_a/T_a} \quad (16)$$

通过划分故障控制参数辨识区域, 将功率外环与电压电流内环分时域解耦, 减少了待辨识参数的个数, 电流暂态与稳态期间保证待辨识方程满秩, 参数寻优过程中能收敛至真值。

2.3 内环参数辨识

根据不同控制环影响电流波形特征的时间段划分辨识阶段, 故障发生时刻 t_0 至临界时刻 t_1 这一阶段内暂态电流未完全衰减, 辨识低穿控制环参数、电压电流内环的 PI 参数。若参数间具有关联性, 则无法通过寻优算法辨识出稳定结果。轨迹灵敏度能反映参数对系统输出量的影响, 且 Pearson 相关系数能较好反映两参数间线性相关程度, 因此本文通过轨迹灵敏度及 Pearson 相关系数先分析内环参数关联性, 再确定辨识方法。

通过计算式(17)同一采样时间内轨迹灵敏度的平均值, 输出电流 y 对控制参数 θ 较灵敏时, 轨迹灵敏度平均值较大, 反之则较小。

$$S_i = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K |J(\theta_i, k)| \quad (17)$$

借助轨迹灵敏度分析电压电流内环及低穿控制环参数, 在双环控制结构中, 电流内环参数灵敏度远小于电压内环及低穿控制参数, 因此在内环参数辨识过程中, 若统一辨识, 电流内环参数可能会出现由于灵敏度过低而辨识结果误差大的问题。

同时, 关联参数的轨迹灵敏度线性相关^[22-26], 因此可通过 Pearson 相关系数分析参数之间的线性相关程度。相关系数的取值范围从-1~1, 其绝对值越接近 1 则表示变量之间的线性相关性越显著, $|r|$ 大于 0.8 时表现为强相关^[22]。

$$r(x, y) = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (18)$$

式中: x_i 与 y_i 为待分析的变量轨迹灵敏度值; $\bar{x}$ 和 $\bar{y}$ 为变量轨迹灵敏度平均值; r 为所计算得的相关系数。

为了直观反映内环各控制参数间的相关性, 将自相关系数设置为 0, 根据式(18)计算 Pearson 相关系数, 绘制雷达图, 如图 3 所示。由图 3 可知, 各相关系数范围均在 0.8 以内, 即各参数无强线性相关性。

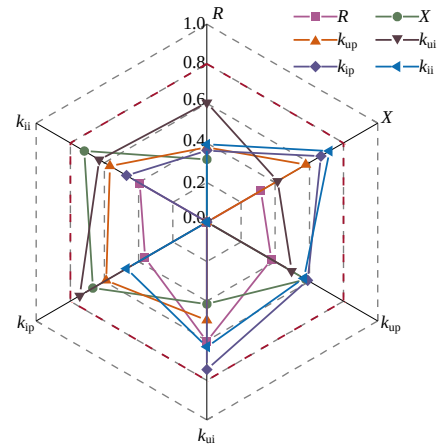


图 3 构网型电压电流内环及低穿参数相关系数雷达图
Fig. 3 Radar chart of grid-forming correlation coefficient between voltage and current inner-loop and low voltage ride through loop

部分文献参考典型值或者经验值将低灵敏度参数设置为固定值, 不参与辨识算法的寻优过程。但不同变流设备的电流内环参数存在较大差异, 经验值与实际值相差较大。电流内环参数同样也会影响电压内环参数和低穿控制参数的准确性。

为了解决灵敏度低的电流内环参数的辨识问题, 本文基于电压内环参数和低穿控制参数对输出电流波形的影响远大于灵敏度低的电流内环参数, 采用分步辨识。首先, 随机给定各控制参数, 灵敏度低的电流内环比例系数及积分系数不参与第一轮寻优过程, 其余灵敏度高的参数参与寻优。通过寻优算法得到最优的低穿控制参数和电压内环参数, 固定为已知量, 将电流内环参数设置为未知量参与第二轮寻优, 得到电流内环参数。分步辨识电压电流内环参数, 减少了高灵敏度参数对低灵敏度参数的影响, 同时保证了待辨识方程满秩。因此, 参数寻优过程中能收敛至真值。

2.4 功率外环辨识

从控制的响应时间上将功率外环与电压电流内环控制参数解耦辨识, 在 t_1-t_f 时间段内辨识功率外环控制参数。故障发生后, 若功率外环中的有功功率参考值仍保持故障前的值运行, 构网型控制功角特性曲线的加速面积可能大于减速面积, 从而造成失步现象。因此, 为保证故障期间构网型控制的暂态稳定性, 应在故障期间降低有功功率参考值, 参考国标《GB/T 19964-2024》按并网点电压跌落程度设置功率参考值^[27]。

当电压跌落至低穿控制投入的临界电压以下, 即 0.9 pu 时, 有功功率环降低功率参考值, 防止电

压相角变化过大造成失步，当并网点电压大于 0.9 pu 时，以正常运行方式送出额定有功功率，式(19)为调节后的功率参考值。

$$P_{\text{ref}} = \begin{cases} P_0, & U_f \geq 0.9 \text{ pu} \\ P_0 \cdot M, & U_f < 0.9 \text{ pu} \end{cases} \quad (19)$$

式中： P_{ref} 为有功功率参考值； P_0 为故障前功率参考值； M 为并网点电压标么值，衡量电压跌落程度。

而对于无功-电压环，根据国标要求，当并网点电压低于 0.9 pu 时，应向电网注入无功功率，因此无功参考值在故障前后为

$$Q_{\text{ref}} = \begin{cases} Q_0, & U_f \geq 0.9 \text{ pu} \\ 1.5 \times (0.9 - M) S_N, & U_f < 0.9 \text{ pu} \end{cases} \quad (20)$$

式中： Q_{ref} 为无功功率参考值； Q_0 为故障前功率参考值； S_N 为新能源电源额定容量。

基于以上对故障期间功率参考值的分析，根据 1.1 节分析的输出功率式，通过智能算法分别拟合有功和无功功率功率波形得到最优的参数值。

构网型故障控制参数辨识难点在于其涉及控制环多，控制参数耦合，不依赖某种特定的寻优算法，因此本文采用收敛速度快，计算效率高的 PSO 算法作为参数寻优辨识算法，选择欧氏距离作为辨识算法的目标函数，计算式为

$$Q = \sqrt{\sum_{i=1}^N (y(i) - y_{\text{cal}}(i))^2} \quad (21)$$

式中： Q 为拟合值与实际值的欧式距离，用以描述相似程度； $y(i)$ 与 $y_{\text{cal}}(i)$ 分别为实际值与拟合值。

3 参数辨识算法验证及算例分析

3.1 算法验证

3.1.1 参数辨识方法有效性验证

为验证本文所提构网型控制参数辨识算法的有效性，在 RTDS 实时仿真平台中搭建图 1 所示拓扑的半实物测试系统进行硬件在环测试，如图 4 所示，具体参数见附表 A1。控制器通过光纤从 RTDS 采样并网点处电压及电流数据，数据经 Aurora 协议传输，通信频率为 20 kHz，并产生调制信号。调制信号返回 RTDS 实现闭环控制。

在 0 s 时设置电压跌落 0.5 pu 的三相对称故障，故障持续时间为 100 ms，通过计算 10 次各辨识结果的误差均值来描述算法辨识的准确性。

图 5 为实验数据电流暂态和稳态时域划分图，根据式(16)计算得电流阈值为 0.8 pu/s，为避免暂态

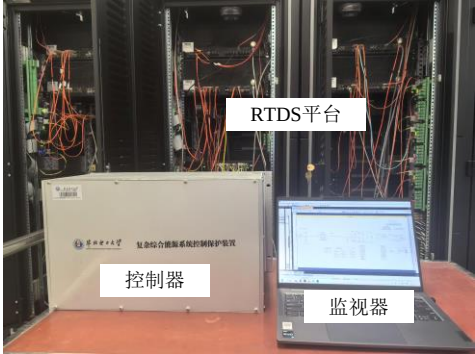


图 4 构网型故障控制参数辨识硬件在环实验平台
Fig. 4 Hardware-in-loop experiment platform for GFM fault control parameter identification

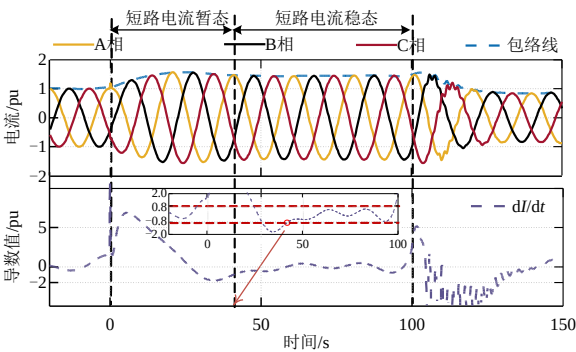


图 5 实验数据时域划分图

Fig. 5 Hardware-in-loop experiment data

电流波动的影响，将 40 ms 作为暂态与稳态临界时刻。

通过时域解耦分别辨识功率外环和电压电流内环及低穿控制环参数，辨识结果如表 1 所示，图 6 为实验输出曲线与拟合曲线的波形。

表 1 构网型故障控制参数辨识结果

Table 1 Grid-forming fault control parameters identification results

控制环	参数	真值	辨识结果	辨识误差/%
有功-频率环	阻尼系数 D	5	4.793	4.125
	惯性系数 J	0.6	0.612	2
无功-电压环	无功系数 k_q	5	5.159	3.18
低穿控制环	虚拟电阻 R_v	0.2	0.194	3
	虚拟电抗 X_v	0.942	0.988	4.88
电压内环	d 轴比例系数 k_{upd}	0.4	0.417 8	4.45
	d 轴积分系数 k_{uid}	20	19.065	4.67
	q 轴比例系数 k_{upq}	0.4	0.408 6	2.15
	q 轴积分系数 k_{uiq}	20	19.45	2.72
电流内环	d 轴比例系数 k_{ipd}	0.2	0.207 7	3.85
	d 轴积分系数 k_{iid}	15	15.33	2.2
	q 轴比例系数 k_{ipq}	0.2	0.190 8	4.6
	q 轴积分系数 k_{iiq}	15	15.746	4.97

由表 1 参数辨识结果可知，通过时域解耦辨识的功率环参数及经分步辨识高灵敏度的低穿控制

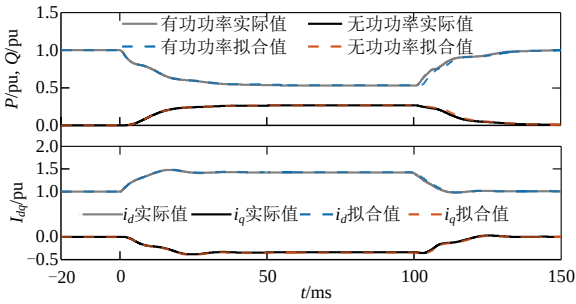


图 6 实验数据辨识输出波形

Fig. 6 Experimental data identification of waveform

参数和电压内环参数和低灵敏度的电流内环参数均与实验模型中设置的真值之间的误差均值较小，但由于电流内环灵敏度低，辨识结果稳定性较差，输出波形吻合，能实现构网型故障控制参数的正确辨识。

3.1.2 参数辨识方法耐噪性验证

为充分考虑所提辨识算法在实际工程应用中的可行性，对算法耐受噪声能力进行验证，在并网点电压跌落至 0.5 pu 的三相对称故障下设置了信噪比分别为 40、30、20 dB 的噪声干扰。不同噪声下多次辨识误差如表 2 所示。

表 2 不同噪声下辨识结果

Table 2 Parameters identification results under different noise intensities

控制环	参数	40 dB 辨识	30 dB 辨识	20 dB 辨识
		误差/%	误差/%	误差/%
有功-频率环	阻尼系数 D	3.977	8.67	15.6
	惯性系数 J	2.71	7.385	73.84
无功-电压环	无功系数 k_q	1.15	4.59	14.95
低穿控制环	虚拟电阻 R_v	3.85	5.59	79
	虚拟电抗 X_v	1.21	0.764	14.9
电压内环	d 轴比例系数 k_{upd}	6.72	3.82	61.2
	d 轴积分系数 k_{uid}	1.05	3.78	13.6
	q 轴比例系数 k_{upq}	1.471	2.816	59.74
	q 轴积分系数 k_{uiq}	4.583	5.54	10.99
电流内环	d 轴比例系数 k_{ipd}	0.36	0.3	41.48
	d 轴积分系数 k_{iid}	1.463	2.2	19.26
	q 轴比例系数 k_{ipq}	4.557	4.024	21.33
	q 轴积分系数 k_{iiq}	3.974	3.861	23.2

由表 2 得，信噪比 30 dB 以上时，该算法辨识结果与真值的误差均在 5% 以内，能准确辨识故障控制参数；信噪比为 20 dB 时，电压内环比例系数及电流内环的辨识误差均超过 10%，认为辨识结果不可接受。因此，本文所提参数辨识算法能耐受信噪比为 30 dB 以上的噪声，具有一定的噪声鲁棒性。

3.2 新疆构网录波验证

为进一步验证本文所提参数辨识方法的有效性，依托新疆龙源—奥依塔克光伏电站构网型人工短路试验实测数据验证，通过时域划分解耦外环与内环，先辨识电压电流内环和低穿控制参数，计算虚拟内电势后辨识功率外环参数。场站拓扑如图 7 所示，在光伏二线处箱变高压侧 0 s 发生并网点电压跌落 0.5 pu 的三相对称故障，故障持续时间 54 ms，故障前光伏二线空载。

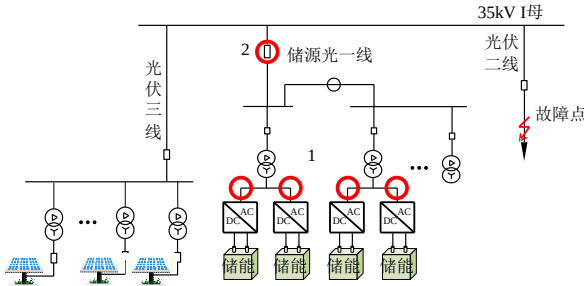


图 7 新疆龙源奥依塔克新能源场站拓扑图

Fig. 7 Topology of Xinjiang Longyuan Aoyitake renewable power station

构网型储能场站额定容量为 5 MW，由 4 个 1.25 MW/2.5 MW h 的储能单元组成，每个储能单元由两组电池堆经变流器逆变成交流，而后经变比为 37 kV/0.63 kV 的变压器升压，汇集到储能光一线送出。测点 1 取为储能电池出口处，共有 4 组数据。

图 8 为测点 1 中一组数据的电压及电流波形，由图 8 可知，实测数据中含有明显的噪声和高次谐波。故障发生后 14 ms 波形畸变严重，为故障不可控阶段，14—54 ms 为故障控制投入阶段，采用此

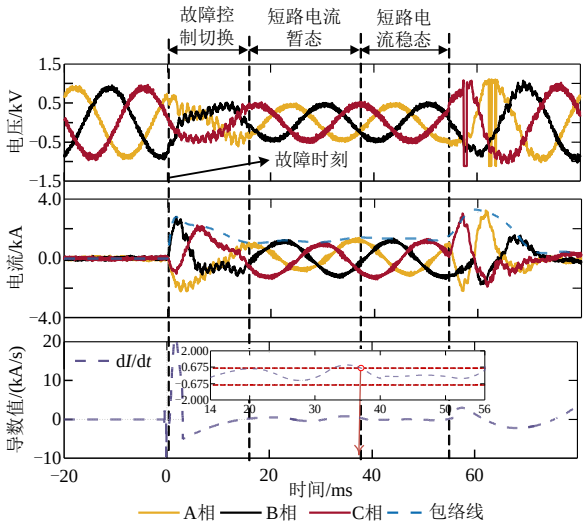


图 8 逆变器出口侧实测电压及电流录波数据

Fig. 8 Recorded data of voltage and current at outlet side of inverter

段数据作为辨识算法输入。如图 7 所示,由电流阈值计算式得为 0.675 kA/s,将 37 ms 作为暂态与稳态临界时刻。

测点 1 处的 4 组实测数据均在储能电池型号相同、控制策略及参数相同且同样电压跌落下,因此将 4 组录波数据的辨识结果平均值作为真值,若 4 组数据辨识结果相差不大,则证明参数辨识算法的正确性。

通过故障可控阶段 40 ms 的实测数据验证本文所提算法的有效性,借助平均误差衡量 4 组辨识参数值的离散程度,表 3 为实测数据的辨识结果与误差,图 9 和 10 分别为电流、功率实测数据与辨识拟合波形。表 3 中 4 组数据辨识结果误差均小于 10%,即辨识所得结果一致,进一步验证了该参数辨识算法的可靠性,能为构网型故障特性分析提供高精度参数支撑。

表 3 实测录波数据辨识结果
Table 3 Parameters identification results of Recorded data

控制环	参数	储能 3 电池堆 1	储能 3 电池堆 2	储能 4 电池堆 1	储能 4 电池堆 2	辨识结果	辨识结果
		辨识结果	辨识结果	辨识结果	辨识结果	均值	误差/%
有功-频率环	阻尼系数 D	0.978 7	0.978 22	1.060 6	1.060 1	1.019	4.017
	惯性系数 J	0.152	0.158	0.190	0.197	0.174 2	9.945
无功-电压环	无功系数 k_q	2.268	2.213	2.504	2.521	2.376	5.723
低穿控制环	虚拟电阻 R_v	1.443 6	1.2838	1.608 3	1.220 5	1.389	9.88
	虚拟电抗 X_v	9.113 5	11.076 6	10.459 6	10.6851	10.333	5.9
电压内环	d 轴比例系数 k_{upd}	0.373 7	0.4314	0.439	0.328	0.393	9.734
	d 轴积分系数 k_{uid}	32.053	26.041 6	26.178	31.545	28.954	9.824
	q 轴比例系数 k_{upq}	0.385 9	0.438 9	0.4139	0.477 6	0.429	6.799
	q 轴积分系数 k_{uiq}	35.714	34.246	29.586	34.246	33.448	5.773
电流内环	d 轴比例系数 k_{ipd}	0.199	0.258	0.266	0.288	0.252	9.633

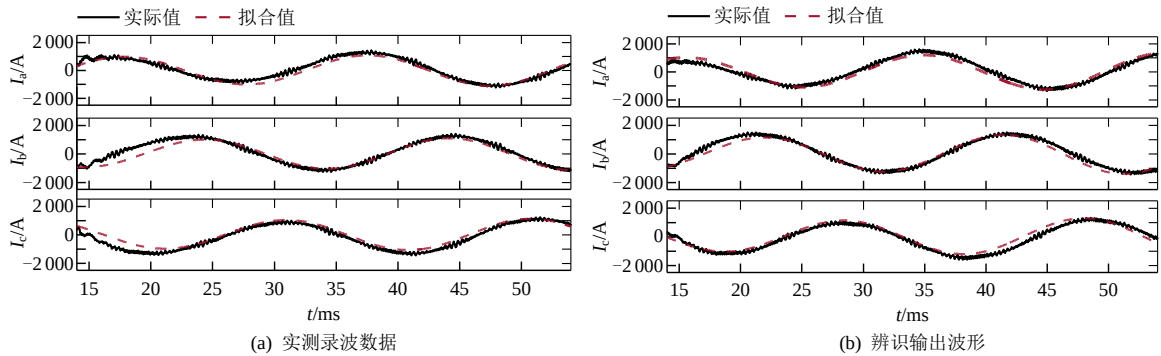


图 9 电流实测录波数据与辨识输出波形

Fig. 9 Recorded current data and identification of waveform

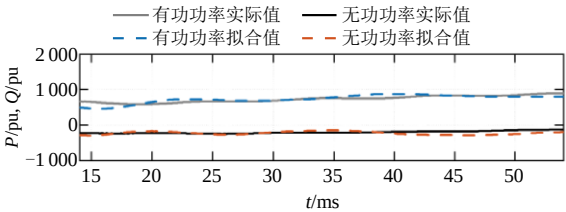


图 10 功率实测录波数据与辨识输出波形

Fig. 10 Recording power data and identification of waveform

4 结论

本文分析了构网型故障控制参数关联性及参数可辨识性,并在此基础上根据控制环响应时间不同及灵敏度差异提出一种多级解耦的构网型故障控制

参数辨识方法,解决了功率外环与内环参数耦合统一辨识易出现多解的问题,通过硬件在环测试数据及新疆构网人工短路录波数据进行验证,该辨识方法能准确辨识出故障控制参数,并得出如下结论:

- 1) 基于灵敏度分析电压电流内环,电流内环参数灵敏度远低于电压内环;基于 Pearson 相关系数分析低穿控制参数和电压内环参数相关性,各参数均为独立参数,无强相关性。
- 2) 基于功率外环响应时间约为内环的十倍左右划分故障时域,在电流暂态期间辨识内环及低穿控制参数,在电流稳态期间辨识功率外环参数,解除各控制环参数间关联性;基于电压电流内环参数

的灵敏度分析, 针对电流内环灵敏度低统一辨识误差大的问题, 采用分步辨识。

3) 通过基于 RTDS 平台的硬件在环系统测试数据和新疆构网人工短路试验实测录波数据验证了本文所提构网型故障控制参数辨识算法的性能, 并且该算法能耐受信噪比为 30 dB 以上的噪声。

参考文献

- [1] 许诒翊, 刘威, 刘树, 等. 电力系统变流器构网控制技术的现状与发展趋势[J]. 电网技术, 2022, 46(9): 3586-3594.
XU Jieyi, LIU Wei, LIU Shu, et al. Current state and development trends of power system converter grid-forming control technology[J]. Power System Technology, 2022, 46(9): 3586-3594(in Chinese).
- [2] 詹长江, 吴恒, 王雄飞, 等. 构网型变流器稳定性研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(6): 2339-2358.
ZHAN Changjiang, WU Heng, WANG Xiongfei. An overview of stability studies of grid-forming voltage source converters[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(6): 2339-2358(in Chinese).
- [3] FAN Bo, LIU Teng, ZHAO Fangzhou, et al. A review of current-limiting control of grid-forming inverters under symmetrical disturbances[J]. IEEE Open Journal of Power Electronics, 2022, 3: 955-969.
- [4] ZHANG Yang, JIA Ke, JIANG Xinying, et al. Multistage parameter identification for fault control parameters of the IRES[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2023, 38(11): 14590-14600.
- [5] WANG Qiwei, ZHAO Nannan, WANG Gaolin, et al. An offline parameter self-learning method considering inverter nonlinearity with zero-axis voltage[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(12): 14098-14109.
- [6] 刘细平, 胡卫平, 丁卫中, 等. 永磁同步电机多参数辨识方法研究[J]. 电工技术学报, 2020, 35(6): 1198-1207.
LIU Xiping, HU Weiping, DING Weizhong, et al. Research on multi-parameter identification method of permanent magnet synchronous motor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(6): 1198-1207(in Chinese).
- [7] 吴春, 赵宇纬, 孙明轩. 采用测量电压的永磁同步电机多参数在线辨识[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(13): 4329-4339.
WU Chun, ZHAO Yuwei, SUN Mingxuan. Multiparameter online identification for permanent magnet synchronous machines using voltage measurements[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(13): 4329-4339(in Chinese).
- [8] 马钦林, 袁浩, 尹威, 等. 考虑等效电磁损耗电阻偏移的永磁同步电机直流信号注入在线参数辨识方法[J]. 电工技术学报, 2023, 38(22): 6015-6026.
MA Yilin, YUAN Hao, YIN Wei, et al. DC-Signal-Injection-Based online parameters identification for permanent magnet synchronous machine considering variation of equivalent electromagnetic loss resistance [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(22): 6015-6026(in Chinese).
- [9] WANG Yangrui, XU Yongxiang, ZOU Jibin. Online multiparameter identification method for sensorless control of SPMSM[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(10): 10601-10613.
- [10] 周佩朋, 孙华东, 刘涛, 等. 基于多电气端口频域特性的新能源发电设备控制参数辨识方法[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(1): 111-123.
ZHOU Peipeng, SUN Huadong, LIU Tao, et al. Identification methods of control parameters of renewable energy generation equipment based on frequency domain characteristics of multiple electrical ports[J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(1): 111-123(in Chinese).
- [11] WANG Qiwei, WANG Gaolin, ZHAO Nannan, et al. An impedance model-based multiparameter identification method of PMSM for both offline and online conditions [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(1): 727-738.
- [12] 郑伟, 熊小伏. 基于 Wiener 模型的光伏并网逆变器模型辨识方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(36): 18-26.
ZHENG Wei, XIONG Xiaofu. A model identification method for photovoltaic grid-connected inverters based on the wiener model[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(36): 18-26(in Chinese).
- [13] MA Conggan, ZUO Shuguang. Black-Box method of identification and diagnosis of abnormal noise sources of permanent magnet synchronous machines for electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(10): 5538-5549.
- [14] HU Xiaorui, SHANG Zengyi, YI Pengbo, et al. Wind turbine clustering and equivalent parameter identification in multitime scales based on the deep migration of multiview features[J]. IEEE Access, 2022, 10: 89568-89580.
- [15] 韩平平, 范桂军, 孙维真, 等. 基于数据测试和粒子群优化算法的光伏逆变器 LVRT 特性辨识[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(2): 49-54.
HAN Pingping, FAN Guijun, SUN Weizhen, et al. Identification of LVRT characteristics of photovoltaic inverters based on data testing and PSO algorithm [J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(2): 49-54(in Chinese).
- [16] 朱益华, 李卫星, 李成翔, 等. 基于频域通用建模的双馈风电机组参数的一体化辨识方法[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(15): 92-101.
ZHU Yihua, LI Weixing, LI Chengxiang, et al. Integrated identification method for parameters of doubly-fed wind turbines based on general modeling in frequency domain [J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(15): 92-101(in Chinese).
- [17] 秦继朔, 贾科, 孔繁哲, 等. 基于寻优算法的永磁风机

- 并网逆变器故障穿越控制参数分步辨识[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(S1): 59-69.
- QIN Jishuo, JIA Ke, KONG Fanzhe, et al. Stepwise parameter identification of fault ride-through control parameters of PMSG grid-connected inverter based on optimization algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(S1): 59-69(in Chinese).
- [18] BANAIEMOQADAM A, HOOSHYAR A, AZZOUZ M A.. A comprehensive dual current control scheme for inverter-based resources to enable correct operation of protective relays[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 36(5): 2715-2729.
- [19] LIANG Zhigang, LIN Xinchun, KANG Yong, et al. Short circuit current characteristics analysis and improved current limiting strategy for three-phase three-leg inverter under asymmetric short circuit fault[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(8): 7214-7228.
- [20] 郑华, 伏睿, 张颖, 等. 构网型储能系统与风力发电的协同控制研究[J]. 电力信息与通信技术, 2023, 21(11): 48-54.
- ZHENG Hua, FU Rui, ZHANG Ying, et al. Research on collaborative control of the grid-forming electrical storage system with the wind power plant[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2023, 21(11): 48-54(in Chinese).
- [21] 张宇, 张琛, 蔡旭, 等. 虚拟同步机电流受限暂态电压支撑机理与改进故障穿越控制研究[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(15): 5996-6009.
- ZHANG Yu, ZHANG Chen, CAI Xu, et al. Current-Constrained transient voltage response analysis and an improved fault-ride through control of the virtual synchronous generator[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(15): 5996-6009(in Chinese).
- [22] 郑华, 伏睿, 张颖, 等. 构网型储能系统与风力发电的协同控制研究[J]. 电力信息与通信技术, 2023, 21(11): 48-54.
- ZHENG Hua, FU Rui, ZHANG Ying, et al. Research on collaborative control of the grid-forming electrical storage system with the wind power plant[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2023, 21(11): 48-54(in Chinese).
- [23] 鲍明堃, 周扬忠, 钟天云. 基于传动模型重构的永磁同步直线电机机械参数辨识[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(4): 1597-1607.
- BAO Mingkun, ZHOU Yangzhong, ZHONG Tianyun. Mechanical parameter identification of permanent magnet synchronous linear motor based on transmission model reconstruction[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(4): 1597-1607(in Chinese).
- [24] SUN Xiaodong, SHI Zhou, LEI Gang, et al. Multi-Objective design optimization of an IPMSM based on multilevel strategy[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(1): 139-148.
- [25] 潘学萍, 鞠平, 温荣超, 等. 解耦辨识双馈风电机组转子侧控制器参数的频域方法[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(20): 19-25, 108.
- PAN Xueping, JU Ping, WEN Rongchao, et al. Decoupling estimation of parameters in rotor side controller of DFIG-based wind turbine by frequency domain method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(20): 19-25,108(in Chinese).
- [26] 张毅伟, 黄旭珍, 徐济安. 基于混合自适应扩展卡尔曼滤波的永磁同步直线电机等效机械参数辨识策略[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(3): 1162-1172.
- ZHANG Yiwei, HUANG Xuzhen, XU Jian. Equivalent mechanical parameter identification of permanent magnet synchronous linear motor based on hybrid adaptive extended Kalman filter[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(3): 1162-1172(in Chinese).
- [27] 肖大军, 张逸茹, 徐遐龄, 等. 基于 Bert 的电网故障处置预案信息抽取研究与实现[J]. 电力信息与通信技术, 2023, 21(3): 26-32.
- XIAO Dajun, ZHANG Yiru, XU Xialing, et al. Research and implementation of power grid fault handling plan information extraction based on Bert[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2023, 21(3): 26-32(in Chinese).

附录 A

表 A1 硬件在环系统主要参数

Table A1 Primary parameters of the hardware in the loop testing system

模型名称	参数	数值
逆变器	额定容量/MW	0.5
	额定电压/kV	0.38
	额定频率/Hz	50
硬件控制器	采样频率/kHz	20
	Xilinx 开发板	Xilinx Zynq 7035
滤波器	滤波电感/mH	5
	滤波电容/ μ F	50
电网	额定电压/kV	35
	网侧电感/mH	5.95



贾科

在线出版日期: 2024-10-28.

收稿日期: 2024-05-30.

作者简介:

贾科(1986), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统保护与控制、新型配电网保护与故障定位, ke.jia@ncepu.edu.cn;

刘芸(2000), 女, 硕士研究生, 研究方向为大型新能源基地构网型机组的故障特性分析及穿越控制研究, 3105785086@qq.com;

毕天姝(1973), 女, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统保护与控制、广域同步相量测量技术及应用。

(责任编辑 邱丽萍)