

DOI: 10.7667/PSPC160806

面向故障暂态建模的光伏并网逆变器控制器参数辨识

孔祥平¹, 袁宇波¹, 阮思烨², 徐凯², 弓新月¹

(1. 国网江苏省电力公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103; 2. 国家电力调度控制中心, 北京 100031)

摘要: 为了构建电网故障情况下高可信度的光伏电源暂态等效模型, 为含光伏电源的电网故障特性分析和继电保护研究奠定基础, 提出了一种面向故障暂态建模的光伏并网逆变器的控制器参数辨识方法。该参数辨识方法以差分进化算法为基础, 不仅可以辨识出PI调节器参数, 也能准确辨识出限幅环节参数, 以弥补现有控制器参数辨识方法的不足, 从而确保光伏电源故障暂态建模的准确性。建立了PI调节器参数和限幅环节参数的分阶段辨识流程, 并采用理论计算方法确定了初始种群中各解向量的初始值, 以加快待辨识参数收敛到真实值的速度, 提高控制器参数的辨识效率。

关键词: 光伏电源; 暂态建模; 参数辨识; PI调节器; 限幅环节; 差分进化算法

Controller parameter identification of the grid connected PV inverter for fault transient modeling

KONG Xiangping¹, YUAN Yubo¹, RUAN Siye², XU Kai², GONG Xinyue¹

(1. State Grid Jiangsu Electric Power Company Research Institute, Nanjing 211103, China;

2. National Electric Power Dispatching and Control Center, Beijing 100031, China)

Abstract: In order to build a highly reliable equivalent transient model of PV power generator under grid fault, as well as establish a solid basis for the fault feature and relay protection study of the power grid with PV power generators, a controller parameter identification method of the grid connected PV inverter for fault transient modeling is proposed. The proposed parameter identification method is based on the differential evolution algorithm. With the proposed method, both the proportional gains and integral gains of the PI regulators and the limiter values can be correctly identified, which can make up the shortage of traditional controller parameter identification methods and ensure the accuracy of the fault transient modeling of the PV power generator. Moreover, the stepwise identification procedure of controller parameters is put forward, and the initial values of the initial population are set according to the theoretical calculation, to improve the convergence rate of the identified parameters and efficiency of the identification method.

Key words: PV power generator; transient modeling; parameter identification; PI regulator; limiter; differential evolution algorithm

0 引言

近年来, 在电力供应紧张和环境保护的双重压力下, 具有规模灵活、无污染等优点的光伏发电技术在我国得到了大力发展^[1-3]。合理开发利用光伏发电技术替代部分传统的火力发电, 对改善我国电力系统的电源结构、提高供电可靠性有重要意义。

但是, 光伏电源的复杂故障电流特性也给以电网故障特征为基础的继电保护带来了严峻的挑战,

可能导致传统电网继电保护无法准确地判断故障的位置, 引起保护拒动或误动^[4-7]。对于光伏电源而言, 其并网逆变器在电网故障期间的响应特性决定了光伏电源的故障电流特性, 而光伏并网逆变器的故障响应特性则取决于其控制器参数的选择。但是, 对于用户和电网来说, 光伏并网逆变器的控制器参数是不可知的, 这使得研究人员在对含光伏电源的电网进行暂态仿真分析时, 无法构建准确的、符合实际工程情况的光伏电源暂态等效模型, 影响研究结果的准确性。正确辨识光伏并网逆变器的控制器参数, 对于构建高可信度的光伏电源暂态等效模型、开展含光伏电源接入的电网故障特征和继电保护研

基金项目: 国家电网公司科技项目: “适应高渗透率分布式电源接入的配电网继电保护技术研究”

究具有重要意义。

在光伏并网逆变器模型辨识方面,有学者将光伏并网逆变器视为“黑箱”,仅利用并网逆变器输入、输出两侧的外部测量数据,分别建立了光伏并网逆变器的最小二乘模型^[8]、Wiener模型^[9]和NARX (Nonlinear Auto Regressive with eXogenous input)模型^[10]。上述并网逆变器的模型辨识方法均不涉及逆变器内部电路、功率开关器件等拓扑结构和参数及其控制系统的类型和逻辑关系,但是只能得到光伏并网逆变器的稳定工作状态模型,无法适用于电网故障情况下的电磁暂态分析。在光伏并网逆变器的控制参数辨识方面,文献^[11]提出了基于递推最小二乘法的光伏并网发电系统参数辨识方法,并利用光伏实测数据对光伏并网发电系统模型进行多次辨识,得到一组确切的比例、积分系数;文献^[12]提出了一种针对典型光伏并网逆变器双环控制模型的 dq 轴参数解耦辨识策略,对控制器电压外环和电流内环的比例、积分系数进行了辨识;文献^[13]提出了一种基于虚拟量测激励方法的光伏逆变器控制参数的分步辨识方法,辨识得到电压外环和电流内环的比例、积分系数。但是,上述控制器参数辨识方法都旨在辨识控制器内、外环PI调节器的参数,而没有辨识积分器输出限幅值和控制器输出限幅值等限幅环节的参数。实际上,当发生电网故障时,电网电压的扰动可能导致积分器、控制器输出限幅,使得光伏并网逆变器的控制器进入非线性环节,这将大大影响光伏电源的故障暂态特性^[14]。因此,利用上述光伏并网逆变器的控制器参数辨识方法构建出的光伏电源等效模型,无法准确反映光伏电源的故障暂态特性。

虽然目前存在PI、PR、无差拍、预测和重复控制等诸多控制算法,且各控制算法的具体实现细节也存在一定的差异,但最为成熟且工程应用最为广泛的仍是基于PQ解耦、前馈补偿和PI调节器的双环控制系统。因此,本文提出了一种针对上述双环控制系统的光伏并网逆变器的控制器参数辨识方法。该参数辨识方法以差分进化算法为基础,可以弥补现有控制器参数辨识方法的不足,准确辨识出PI调节器的比例系数、积分系数和限幅环节参数,为构建光伏电源的暂态等效模型和开展含光伏电源的电网故障特征研究奠定基础。此外,建立了PI调节器参数和限幅环节参数的分阶段辨识流程,以降低参数辨识维度;提出了基于理论计算的初始种群设置方法,以提高参数辨识效率。

1 光伏并网逆变器及其控制器结构

电压源型光伏并网逆变器结构如图1所示。

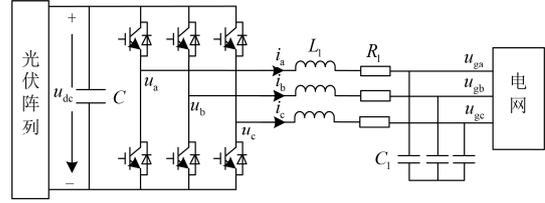


图1 光伏并网逆变器

Fig. 1 Structure of grid-connected PV inverter

在图1中, C 为直流电容, u_{dc} 为直流电容电压, u_a 、 u_b 、 u_c 和 i_a 、 i_b 、 i_c 分别为逆变器输出的三相交流电压和电流, u_{ga} 、 u_{gb} 、 u_{gc} 分别为并网点三相交流电压, L_1 、 C_1 为交流侧滤波电感、电容, R_1 为滤波电感 L_1 的内阻。

两相同步旋转 dq 坐标系下并网逆变器的数学方程如式(1)所示。

$$\begin{cases} u_d = L_1 p i_d + R_1 i_d - \omega_s L_1 i_q + u_{gd} \\ u_q = L_1 p i_q + R_1 i_q + \omega_s L_1 i_d + u_{gq} \end{cases} \quad (1)$$

式中: u_d 、 u_q 分别为逆变器输出电压的 d 、 q 轴分量; i_d 、 i_q 分别为逆变器输出电流的 d 、 q 轴分量; u_{gd} 、 u_{gq} 分别为并网点电压的 d 、 q 轴分量; $p=d/dt$,为微分算子; ω_s 为同步角速度。

图2给出了光伏并网逆变器基于电网电压矢量定向的稳态控制框图,其采用功率-电压外环和电流内环的双闭环控制结构。

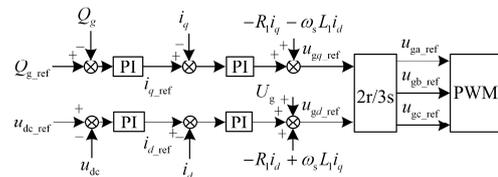


图2 光伏并网逆变器稳态控制框图

Fig. 2 Steady-state control diagram of PV inverter

在图2中,下标“ref”表示控制器指令值, Q_g 为光伏电源输出无功功率, U_g 为并网点电压幅值。

根据文献^[4]所提出的低电压穿越运行控制策略,在电网故障导致并网点电压跌落期间,为了提高控制器的响应性能,光伏并网逆变器的控制器外环被闭锁,并根据并网规程提出的无功支撑要求直接给定电流内环指令值。因此,以 d 轴为例,电网故障期间光伏并网逆变器的控制框图如图3所示^[4]。

在图3中, $G_d(s)=k_p+k_i/s$,为 d 轴电流内环PI调节器的传递函数,其中 k_p 、 k_i 为PI调节器的比例系数和积分系数; $1/(R_1+sL_1)$ 为交流滤波器的传递函数。

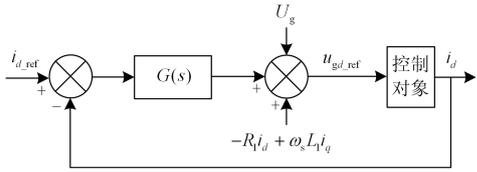


图3 电网故障期间光伏并网逆变器简化控制框图
Fig. 3 Control diagram of PV inverter during grid fault

受逆变器自身容量和过流保护等因素的影响, 光伏并网逆变器的输出电流必须受到限制。因此, 控制策略具体实现过程中, 需要对光伏并网逆变器的控制器输出进行限幅。在对控制器输出进行限幅的情况下, 出现大扰动时实际闭环系统的性能将会下降, 出现饱和(windup)现象^[15]。针对此, 有必要采取相应的抗饱和(anti-windup)措施^[16-18], 抑制控制器的饱和现象。其中, 最简单的抗饱和措施是对PI调节器中的积分环节的输出进行限幅^[19]。

以 d 轴为例, 考虑控制器输出限幅和积分器输出限幅后, 电流内环控制系统的具体实现环节如图4所示。

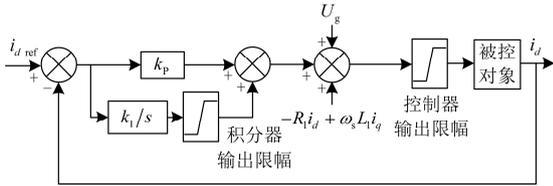


图4 电流内环控制器的具体实现

Fig. 4 Implementation of the inner current control loop

2 控制器参数辨识方法

根据上一节介绍的光伏电源低电压穿越控制策略可知, 电网故障期间光伏并网逆变器的功率-电压外环被闭锁。因此, 光伏电源故障电流特征取决于其电流内环控制器的参数, 而与功率-电压外环的参数无关。

为了建立电网故障期间光伏电源的暂态等效模型, 首先需要对电流内环PI调节器的参数进行辨识。此外, 在电网故障情况下, 并网点电压的扰动可能导致光伏并网逆变器的控制器和(或)积分器的输出达到限幅值, 电流内环控制器将进入非线性工作区域。这使得光伏电源的故障暂态响应特性较为复杂, 且光伏电源的故障暂态特征与限幅环节参数有关^[13]。因此, 除辨识电流内环的PI调节器参数外, 还有必要对限幅环节参数进行辨识。

光伏并网逆变器的 d 、 q 轴电流内环控制器是对称的, 其各项参数相等。因此, 为建立电网故障期间光伏电源的等效模型, 需要识别的参数包括电流

内环PI调节器的比例系数 k_p 、积分系数 k_i 、积分器输出限幅值 L_{int_up} 、 L_{int_low} 以及控制器输出限幅值 L_{out_up} 、 L_{out_low} 。

2.1 控制器参数辨识流程

差分进化算法(Differential Evolution Algorithm, DEA)基于自然界的进化理论, 模仿个体的进化过程来寻找最优解^[20]。差分进化算法由 NP (种群规模)个 D 维参数矢量 $x_{ij}(i=1, 2, \dots, NP; j=1, 2, \dots, D)$ 在搜索空间进行并行直接的搜索, 父代个体经过变异、交叉、选择等操作产生更优的子代个体, 最终实现最优化求解^[21]。基于差分进化算法的光伏并网逆变器控制参数辨识原理如图5所示。

在图5中, i_d 和 i_q 为某一电流内环指令值情况下, 实际光伏并网逆变器的输出; \tilde{i}_d 和 \tilde{i}_q 为相同指令值情况下, 光伏并网逆变器电流内环控制器跟踪模型的输出。

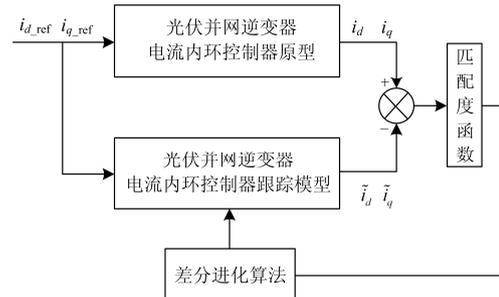


图5 基于差分进化算法的控制器参数辨识原理图

Fig. 5 Schematic diagram of controller parameter identification based on DEA

从图5可以看出, 基于差分进化算法的光伏并网逆变器控制器参数辨识过程是: 根据电网故障情况下实际光伏并网逆变器的输出和光伏并网逆变器电流内环控制器跟踪模型的输出的差值, 通过差分进化算法对跟踪模型不断地进行修正, 从而辨识出控制器参数。

在电网故障引起的并网点电压跌落深度较小的情况下, 电流内环指令值变化不大, 因此, 电流内环控制器和积分器的输出不会达到限幅值, 电流内环控制器仍工作在线性区。这意味着在并网点电压跌落深度较小时, 积分器输出限幅值 L_{int_up} 、 L_{int_low} , 以及控制器输出限幅值 L_{out_up} 、 L_{out_low} 不起作用, 可单独对PI调节器的比例系数 k_p 和积分系数 k_i 进行辨识。当 k_p 、 k_i 辨识成功后, 使并网点电压大幅跌落, 导致电流内环控制器进入非线性工作区, 然后对 L_{int_up} 、 L_{int_low} 、 L_{out_up} 、 L_{out_low} 进行辨识。上述控制器参数的分阶段辨识方法可以降低参数辨识维度,

提高参数辨识效率。

具体的控制器参数辨识过程如下。

Step 1: 设置种群规模 $NP=50$ 的进化种群为

$$P_{PI}^1 = \begin{bmatrix} x_{1,1}^1 & x_{1,2}^1 \\ x_{2,1}^1 & x_{2,2}^1 \\ \vdots & \vdots \\ x_{50,1}^1 & x_{50,2}^1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$P_{Lim}^2 = \begin{bmatrix} x_{1,3}^2 & x_{1,4}^2 & x_{1,5}^2 & x_{1,6}^2 \\ x_{2,3}^2 & x_{2,4}^2 & x_{2,5}^2 & x_{2,6}^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{50,3}^2 & x_{50,4}^2 & x_{50,5}^2 & x_{50,6}^2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中, $x_{i,1}^1$ 、 $x_{i,2}^1$ 、 $x_{i,3}^2$ 、 $x_{i,4}^2$ 、 $x_{i,5}^2$ 和 $x_{i,6}^2$ ($i=1, 2, \dots, 50$) 分别对应 t_1 、 t_2 时刻第 i 个种群中 d 、 q 轴电流内环PI调节器的比例系数 k_p 、积分系数 k_i 、积分器输出限幅值 L_{int_up} 、 L_{int_low} 以及控制器输出限幅值为 L_{out_up} 、 L_{out_low} 的取值。

定义匹配度函数 $J(\mathbf{x}_{i_PI}^1, \mathbf{x}_{i_Lim}^2)$,

$$J(\mathbf{x}_{i_PI}^1, \mathbf{x}_{i_Lim}^2) = \frac{1}{5N} \left\{ \sum_{k=1}^{5N} [i_d(k) - \tilde{i}_d(k)]^2 + \sum_{k=1}^{5N} [i_q(k) - \tilde{i}_q(k)]^2 \right\} \quad (4)$$

式中: $i_d(k)$ 、 $\tilde{i}_d(k)$ 、 $i_q(k)$ 和 $\tilde{i}_q(k)$ 均为标么值;

$\mathbf{x}_{i_PI}^1 = [x_{i,1}^1 \ x_{i,2}^1]^T$, $\mathbf{x}_{i_Lim}^2 = [x_{i,3}^2 \ x_{i,4}^2 \ x_{i,5}^2 \ x_{i,6}^2]^T$, 称为“解向量”; $N=48$, 为一个工频周期的采样数。

令 $t_1=0$, $t_2=0$, 并设置初始种群 P_{PI}^0 、 P_{Lim}^0 。初始种群的设置方法将在下文详细阐述。

设置较小的并网点电压跌落深度(如电压跌落为0.85 p.u.), 使得电流内环控制器工作在线性区域。

Step 2: 若 $t_1 > NG$ (NG 为最大进化代数, 在本文中, 取 $NG=1000$), 则PI调节器的比例系数和积分系数的辨识过程结束, 种群 P_{PI}^1 中匹配度函数值最小的解向量即为辨识出的PI调节器的比例系数和积分系数, 进入Step 7; 否则, 进入Step 3。

Step 3: 利用匹配度函数 $J(\mathbf{x}_{i_PI}^1, \mathbf{x}_{i_Lim}^2)$ 对种群 P_{PI}^1 中的各个解向量进行评价。若种群 P_{PI}^1 中存在某个解向量满足匹配条件。

$$J(\mathbf{x}_{i_PI}^1, \mathbf{x}_{i_Lim}^2) \leq \varepsilon \quad (5)$$

式中, ε 可取值为0.01, 则说明参数 k_p 、 k_i 辨识成功, 相应的解向量即为辨识出的PI调节器的比例系数和积分系数, 进入Step 7; 若种群 P_{PI}^1 中的各个解向量均不满足匹配条件, 则进入Step 4。

Step 4: 对种群 P_{PI}^1 中的解向量 $\mathbf{x}_{i_PI}^1$ 进行变异操作,

得到变异向量 $\mathbf{v}_{i_PI}^{1+1} = [v_{i,1}^{1+1} \ v_{i,2}^{1+1}]^T$ 。

$$\mathbf{v}_{i_PI}^{1+1} = \mathbf{x}_{i_PI}^1 + F \cdot (\mathbf{x}_{r_1_PI}^1 - \mathbf{x}_{r_2_PI}^1) \quad (6)$$

式中: r_1 、 r_2 、 $r_3 \in \{1, 2, 3, \dots, NP\}$, 均不等于 i , 且两两互不相等; F 为缩放因子。

Step 5: 将解向量 $\mathbf{x}_{i_PI}^1$ 与变异向量 $\mathbf{v}_{i_PI}^{1+1}$ 进行交叉操作, 产生试验向量 $\mathbf{u}_{i_PI}^{1+1} = [u_{i,1}^{1+1} \ u_{i,2}^{1+1}]^T$ 。交叉操作的方程为

$$u_{i,j}^{1+1} = \begin{cases} v_{i,j}^{1+1}, & \text{rand}(j) \leq CR \text{ or } j = \text{randn}(i) \\ x_{i,j}^1, & \text{rand}(j) > CR \text{ or } j \neq \text{randn}(i) \end{cases} \quad (7)$$

式中: $\text{rand}(j) \in [0, 1]$, 为均匀分布的随机数; $j \in \{1, 2\}$, 表示第 j 个变量; $\text{randn}(i) \in \{1, 2\}$ 为随机选择的维数变量索引; CR 为交叉概率常数。

Step 6: 经过变异与交叉操作后产生的试验向量与种群 P_{PI}^1 中的解向量 $\mathbf{x}_{i_PI}^1$ 进行竞争, 并选择匹配度函数值较小的向量作为子代, 得到 t_1+1 时刻的种群 P_{PI}^{1+1} 。选择操作的方程为

$$\mathbf{x}_{i_PI}^{1+1} = \begin{cases} \mathbf{u}_{i_PI}^{1+1}, & J(\mathbf{u}_{i_PI}^{1+1}, \mathbf{x}_{i_Lim}^2) < J(\mathbf{x}_{i_PI}^1, \mathbf{x}_{i_Lim}^2) \\ \mathbf{x}_{i_PI}^1, & J(\mathbf{u}_{i_PI}^{1+1}, \mathbf{x}_{i_Lim}^2) \geq J(\mathbf{x}_{i_PI}^1, \mathbf{x}_{i_Lim}^2) \end{cases} \quad (8)$$

令 $t_1=t_1+1$, 进入Step 2。

Step 7: 设置较大的并网点电压跌落深度(如电压跌落为0.4 p.u.), 使得电流内环控制器工作在线性区。

Step 8: 若 $t_2 > NG$, 则限幅环节参数辨识过程结束, 种群 P_{Lim}^2 中匹配度函数值最小的解向量即为辨识出的限幅环节参数; 否则, 进入Step 9。

Step 9: 若种群 P_{Lim}^2 中存在某个解向量满足式(5), 则说明限幅环节参数辨识成功, 辨识过程结束, 相应的解向量即为辨识出的限幅环节参数; 若种群 P_{Lim}^2 中的各个解向量均不满足匹配条件, 则进入Step 10。

Step 10: 利用与Step 4-Step 6相同的方法对 P_{Lim}^2 进行变异、交叉和选择, 得到 t_2+1 时刻的种群 P_{Lim}^{2+1} 。同时, 令 $t_2=t_2+1$, 进入Step 8。

为了维持种群的多样性, 克服早熟收敛以及难以找到全局最优的问题, 采用了文献[22]提出的 F 和 CR 的模糊自适应调节方法。

2.2 初始种群的设置

初始种群 P_{PI}^0 、 P_{Lim}^0 是进化开始的基本群体, P_{PI}^0 、 P_{Lim}^0 中各解相量的初始值的设置关系到参数辨

识算法能否收敛和正确辨识出待辨识参数。因此, 初始种群 P_{pi}^0 、 P_{lim}^0 的设置目标是覆盖整个搜索域, 并尽可能地提高参数辨识效率。

以 d 轴为例, 稳态情况下光伏并网逆变器的电流内环简化控制框图如图6所示^[4], 得到其闭环传递函数为

$$G_{cl}(s) = \frac{sk_p + k_i}{s^2 L_1 + s(k_p + R_1) + k_i} \quad (9)$$

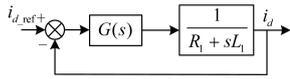


图6 稳态时电流内环简化控制框图

Fig. 6 Simplified steady-state control diagram of inner current control loop

为了获得较快的电流跟随性能, 可以按照典型1阶系统设计电流内环^[4], 则PI调节器的参数为

$$k_{p_1} = \omega_c L_1, \quad k_{i_1} = \omega_c R_1 \quad (10)$$

式中, ω_c 为截止角频率, 理论计算时一般取为 $10\omega_s$ 。另一方面, 为了改善电流内环的抗扰性能, 也可将电流内环控制器设计为典型2阶系统^[23], 得到PI调节器参数为

$$k_{p_2} = 2\zeta\omega_n L_1, \quad k_{i_2} = \omega_n^2 L_1 \quad (11)$$

式中: ζ 为阻尼比; ω_n 为自然振荡频率。理论计算时一般取为 $\zeta=0.707$, $\omega_n=10\omega_s$ 。

在实际的光伏电源系统中, 为了得到满足设计指标的控制效果, 还需要根据实践经验对理论计算得到的比例系数和积分系数作进一步的改进^[24]。因此, 在本文中, $x_{i_1}^0$ 可在区间 $[k_{p_1}/5, 5k_{p_2}]$ 内取值, $x_{i_2}^0$ 可在区间 $[k_{i_1}/5, 5k_{i_2}]$ 内取值。

此外, 控制器输出限幅环节和逆变器输出限幅环节的上限值 $x_{i_3}^0$ 、 $x_{i_5}^0$ 可在区间 $(0, 2.0]$ 内取值; 控制器输出限幅环节和逆变器输出限幅环节的下限值 $x_{i_4}^0$ 、 $x_{i_6}^0$ 可在区间 $[-2.0, 0]$ 内取值。

需要说明的是, 上述控制器参数均为标么值。

通过上述理论计算方法确定了初始种群 P_{pi}^0 、 P_{lim}^0 中各解向量的初始值, 可有效覆盖整个搜索域, 缩小了差分进化算法的搜索范围, 加快待辨识参数收敛到真实值的速度, 提高控制器参数辨识效率。

3 算例验证

为了验证所提出的控制器参数辨识方法的有效性, 利用PSCAD/EMTDC搭建了如图1所示光伏电源的仿真模型, 其一次系统参数为: 额定容量为1.0

MVA, 额定线电压为380 V, 直流电容额定电压为800 V, 交流滤波电感为0.06 mH, 滤波电感内阻为0.01 Ω , 交流滤波电容为0.1 mF。光伏并网逆变器电流内环控制器的各项参数如表1所示。

表1 电流内环控制器参数

Table 1 Parameters of inner current control loop

PI 调节器		积分器输出限幅环节		控制器输出限幅环节	
k_p	k_i	L_{int_up}	L_{int_low}	L_{out_up}	L_{out_low}
2.46	546.79	0.2	-0.2	1.5	-1.5

在下文所述各仿真算例中, 故障前光伏电源处于单位功率因数运行状态, 且输出有功功率为1.0 p.u.。

3.1 PI 调节器参数辨识

设置 $t=0.5$ s 时光伏电源的并网点三相电压从1.0 p.u. 对称跌落至0.85 p.u., 根据文献[4]所述光伏并网逆变器的低电压穿越运行控制策略, 电网电压跌落, 电流内环控制器 d 、 q 轴指令分别为 $i_{d_ref}=1.0$, $i_{q_ref}=0.3$ 。在这种情况下, 控制器和积分器的输出如图7所示。

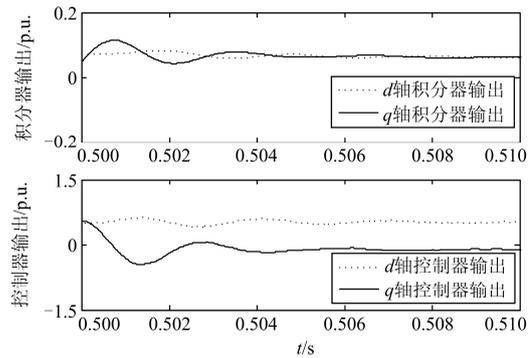


图7 控制器和积分器输出波形

Fig. 7 Outputs of controller and integrator

从图7可以看出, 电流内环 d 、 q 轴控制器和积分器的输出均未达到限幅值, 这说明电流内环 d 、 q 轴控制器均工作在线性区。

根据前文所述基于差分进化算法的控制器参数辨识方法, 得到辨识结果如表2和图8所示。

表2 PI 调节器参数辨识结果

Table 2 Parameter identification result of PI regulator

项目	PI 调节器	
	k_p	k_i
理论值	2.46	546.79
辨识值	2.39	513.98
辨识误差	-2.85%	-6.00%

从表2可看出, PI调节器参数的辨识值与理论值之间的误差很小。因此, 光伏并网逆变器电流内环的原型与跟踪模型输出的 d 、 q 轴电流非常接近, 如图8所示。

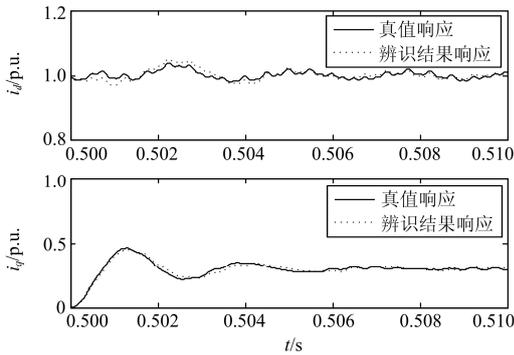


图 8 PI 调节器参数为理论值/辨识值时 d 、 q 轴电流波形
Fig. 8 d -axis and q -axis currents when the parameters of PI regulator are theoretical values or identified values

3.2 限幅环节参数辨识

设置光伏电源的并网点三相电压从 1.0 p.u. 对称跌落至 0.4 p.u., 根据文献[4]所述光伏并网逆变器的低电压穿越运行控制策略, 电网电压跌落后, 电流内环控制器 d 、 q 轴指令分别为 $i_{d_ref}=0.0$, $i_{q_ref}=1.2$ 。在这种情况下, 控制器和积分器的输出如图 9 所示。

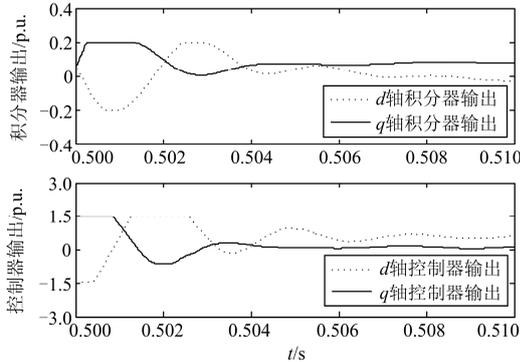


图 9 控制器和积分器输出波形
Fig. 9 Outputs of controller and integrator

从图9可以看出, 故障后电流内环 d 、 q 轴控制器和积分器的输出均达到过限幅值, 这说明电流内环 d 、 q 轴控制器均进入过非线性区工作。

根据前文所述基于差分进化算法的控制器参数辨识原理, 得到辨识结果如表3和图10所示。

表 3 限幅环节参数辨识结果

Table 3 Parameter identification result of limiters

项目	积分器输出限幅环节		控制器输出限幅环节	
	L_{int_up}	L_{int_low}	L_{out_up}	L_{out_low}
理论值	0.2	-0.2	1.5	-1.5
辨识值	0.22	-0.19	1.55	-1.54
辨识误差	10.00%	5.00%	3.33%	-2.67%

从表3可看出, 限幅环节参数的辨识值与理论值

之间的误差很小。因此, 光伏并网逆变器电流内环的原型与跟踪模型输出的 d 、 q 轴电流很接近, 如图 10 所示。

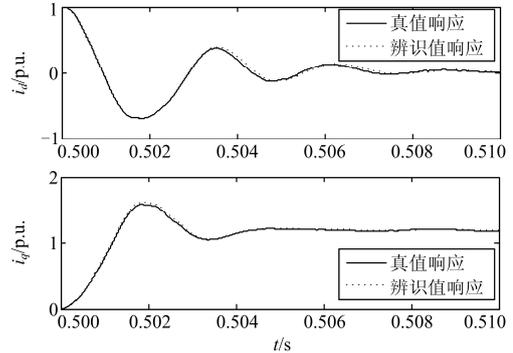


图 10 PI 调节器参数为理论值/辨识值时 d 、 q 轴电流波形
Fig. 10 d -axis and q -axis currents when the parameters of PI regulator are theoretical values or identified values

同时, 可以从表2和表3中看出, 虽然PI调节器积分系数和积分器输出限幅值的辨识效果稍差, 但对系统的整体动态特性影响不大。

综合上述控制器参数辨识结果可以发现, 通过设置光伏电源并网点电压的不同跌落深度, 所提出的控制器参数辨识方法可以准确地分阶段辨识出PI调节器参数和限幅环节参数, 验证了所提出的基于差分进化算法的控制器参数辨识方法的有效性。

4 结论

针对光伏并网逆变器的控制器参数(包括PI调节器参数和限幅环节参数)辨识问题, 本文提出了一种基于差分进化算法的参数辨识方法。该方法首先根据电流内环控制器的典型1阶系统和典型2阶系统设计方法, 提出了基于理论计算的初始种群设置方法, 可缩小差分进化算法的搜索范围, 加快待辨识参数收敛到真实值的速度。然后, 通过设置不同的并网点电压跌落深度, 对PI调节器参数和限幅环节参数进行了分阶段辨识, 有效地降低了参数辨识维度, 可提高控制器参数辨识效率。

仿真算例验证了本文所提出的参数辨识方法的可行性。基于该方法, 可以构建电网故障期间光伏电源的高可信度的暂态等效模型, 为含光伏电源的电网故障特性和继电保护研究奠定坚实的基础。

参考文献

[1] 王以笑, 崔丽艳, 雷振锋, 等. 分布式光伏电站区域智能调控系统的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(4): 118-122.

- WANG Yixiao, CUI Liyan, LEI Zhenfeng, et al. Research on the regional intelligent regulating system of distributed PV station[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(4): 118-122.
- [2] 于俊, 胡杨, 刘星, 等. 大型光伏电站变结构低电压穿越控制策略研究[J]. 电网与清洁能源, 2015, 31(5): 64-69.
- YU Jiao, HU Yang, LIU Xing, et al. Research on low voltage ride through of large-photovoltaic power plants[J]. Power System and Clean Energy, 2015, 31(5): 64-69.
- [3] 汤海宁, 朱守让, 王伟. 光伏电站并网有功功率控制策略的设计及实现[J]. 电网与清洁能源, 2015, 31(8): 75-79.
- TANG Haining, ZHU Shourang, WANG Wei. Design of grid-connected photovoltaic power station active power control strategy[J]. Power System and Clean Energy, 2015, 31(8): 75-79.
- [4] 孔祥平, 张哲, 尹项根, 等. 含逆变型分布式电源的电网故障电流特性与故障分析方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(34): 65-74.
- KONG Xiangping, ZHANG Zhe, YIN Xianggen, et al. Study on fault current characteristics and fault analysis method of power grid with inverter interfaced distributed generation[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(34): 65-74.
- [5] 王婷, 刘渊, 李凤婷, 等. 光伏 T 接高压配电网电流差动保护研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(13): 60-65.
- WANG Ting, LIU Yuan, LI Fengting, et al. Research on the current differential protection where PV access to the high voltage distribution network with T-type[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(13): 60-65.
- [6] 李育强, 宋国兵, 王维庆, 等. 基于模型识别光伏接入配电网线路纵联保护研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(6): 98-103.
- LI Yuqiang, SONG Guobing, WANG Weiqing, et al. Photovoltaic access to distribution network line pilot protection based on model identification[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(6): 98-103.
- [7] 文珊, 陈兵. 分布式光伏逆变器并网侧短路暂态特性分析[J]. 江苏电机工程, 2014, 33(6): 34-37.
- WEN Shan, CHEN Bing. Analysis on transient characteristics of the distributed photovoltaic inverter in the grid side short-circuit[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2014, 33(6): 34-37.
- [8] 熊小伏, 陈康, 郑伟, 等. 基于最小二乘法的光伏逆变器模型辨识[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(22): 52-57, 63.
- XIONG Xiaofu, CHEN Kang, ZHENG Wei, et al. Photovoltaic inverter model identification based on least squares method[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(22): 52-57, 63.
- [9] 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.
- [10] 郑伟, 熊小伏. 光伏并网逆变器 NARX 模型的系统辨识[J]. 电网技术, 2013, 37(9): 2440-2445.
- ZHENG Wei, XIONG Xiaofu. System identification for NARX model of photovoltaic grid-connected inverter[J]. Power System Technology, 2013, 37(9): 2440-2445.
- [11] 付兵彬, 贾春蓉, 杨昌海, 等. 光伏并网发电系统仿真模型的参数辨识[J]. 电力系统及其自动化学报, 2013, 25(5): 116-120.
- FU Bingbin, JIA Chunrong, YANG Changhai, et al. Parameter identification of distributed photovoltaic power generation system[J]. Proceedings of the CSU-EPSS, 2013, 25(5): 116-120.
- [12] 沈欣炜, 郑竞宏, 朱守真, 等. 光伏并网逆变器控制参数的 dq 轴解耦辨识策略[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(4): 38-43.
- SHEN Xinwei, ZHENG Jinghong, ZHU Shouzhen, et al. A dq axis decoupling parameter identification strategy for grid-connected inverter controller of photovoltaic generation system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(4): 38-43.
- [13] 金宇清, 鞠平, 潘学萍, 等. 光伏逆变器控制参数的分步辨识方法[J]. 电网技术, 2015, 39(3): 594-600.
- JIN Yuqing, JU Ping, PAN Xueping, et al. A stepwise method to identify controller parameters of photovoltaic inverter[J]. Power System Technology, 2015, 39(3): 594-600.
- [14] 孔祥平, 袁宇波, 黄浩声, 等. 光伏电源故障电流的暂态特征及其影响因素[J]. 电网技术, 2015, 39(9): 2444-2449.
- KONG Xiangping, YUAN Yubo, HUANG Haosheng, et al. Fault current transient features and its related impact factors of PV generator[J]. Power System Technology, 2015, 39(9): 2444-2449.

- [15] HIPPE P. Windup in control: its effects and their prevention[M]. London: Springer-Verlag, 2006: 1-20.
- [16] CHOI J W, LEE S C. Antiwindup strategy for PI-type speed controller[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(6): 2039-2046.
- [17] 张兴华, 姚丹. 感应电机直接转矩控制系统的“抗饱和”控制器设计[J]. 电工技术学报, 2014, 29(5): 182-188.
ZHANG Xinghua, YAO Dan. Anti-windup speed controller design for direct torque controlled induction motor drives[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(5): 182-188.
- [18] 于艳君, 柴凤, 高宏伟, 等. 基于 Anti-Windup 控制器的永磁同步电机控制系统设计[J]. 电工技术学报, 2009, 24(4): 66-70.
YU Yanjun, CHAI Feng, GAO Hongwei, et al. Design of PMSM system based on anti-windup controller[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(4): 66-70.
- [19] ESPINA J, ARIAS A, BALCELLS J, et al. Speed anti-windup PI strategies review for field oriented control of permanent magnet synchronous machines[C] // CPE 2009-6th International Conference-Workshop-Compatibility and Power Electronics. Badajoz, Spain: IEEE, 2009: 7p.
- [20] 黄俊辉, 李璇, 衣涛. 改进小生境差分进化算法在配网无功优化中的应用[J]. 电网与清洁能源, 2015, 31(6): 75-79.
HUANG Junhui, LI Hu, YI Tao, et al. Application of improved niching differential evolution algorithm in reactive power optimization of distribution system[J]. Power System and Clean Energy, 2015, 31(6): 75-79.
- [21] 刘国帅, 杨侃, 陈静, 等. 差分进化算法在三峡电站厂内经济运行中的应用[J]. 水文, 2012, 32(5): 69-71, 80.
LIU Guoshuai, YANG Kan, CHEN Jing, et al. Application of differential evolution in in-plant economical operation of three gorges hydropower station[J]. Journal of China Hydrology, 2012, 32(5): 69-71, 80.
- [22] LIU J, LAMPINEN J. A fuzzy adaptive differential evolution algorithm[C] // 2002 IEEE Region 10 Conference on Computers, Communications, Control and Power Engineering. Beijing, China: IEEE, 2002: 6p.
- [23] 孔祥平, 张哲, 尹项根, 等. 计及励磁调节特性影响的双馈风力发电机组故障电流特性[J]. 电工技术学报, 2014, 29(4): 256-265.
KONG Xiangping, ZHANG Zhe, YIN Xianggen, et al. Fault current characteristics of DFIG considering excitation and regulation characteristics[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(4): 256-265.
- [24] 汪万伟, 尹华杰, 管霖. 双闭环矢量控制的电压型 PWM 整流器参数整定[J]. 电工技术学报, 2010, 25(2): 67-72, 79.
WANG Wanwei, YIN Huajie, GUAN Lin. Parameter setting for double closed-loop vector control of voltage source PWM rectifier[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(2): 67-72, 79.

收稿日期: 2016-06-03; 修回日期: 2016-08-15

作者简介:

孔祥平(1988—), 男, 博士, 工程师, 研究方向为电力系统继电保护与控制。E-mail: kongxphust@163.com

(编辑 葛艳娜)