

# 基于遗传算法的风电变流器控制环节参数辨识实用方法

变流器是风力发电系统的重要组成部分，但在实际并网运行中其控制参数往往无法直接获得。区别于利用传递函数的常规做法，提出一种直接在时域利用实数编码的遗传算法对风电系统中变流器控制参数进行辨识的实用策略，先计算参数灵敏度以证明参数重要性，并通过仿真算例比较风速扰动及短路故障情况下的辨识效果，分析和对比不同扰动类型下采集数据的特点及辨识效果，最后通过参数的适用性检验验证了该辨识策略的有效性。

丁明 钟林恒 韩平平 朱乾龙/教育部光伏系统工程研究中心(合肥工业大学) 贺敬/中国电力科学研究院

## 0 引言

变流器是风力发电系统的重要组成部分，其控制参数的准确性是确保电力系统分析计算结果可信的前提。通常情况下，实际运行的变流器因厂方技术保密等原因，其内部结构参数、控制策略等信息是无从得知的，因而使后续工作进展相当困难。此外，变流器部分的高度非线性<sup>[1]</sup>、扰动不可预测等特点进一步提高了变流器准确建模的难度，给变流器控制参数辨识带来了困难和挑战。当前变流器环节的辨识研究成果并不多：文献[2]基于暂态响应分析，研究了功率变流器的黑箱特性建模与辨识；文献[3]以解决超级电容与电网之间的能量交换为目的进行了变流器参数辨识；文献[4]对双馈风电机组中多个参数进行了灵敏度分析和辨识。

电力系统的参数辨识方法主要包括：时域辨识方法、频域辨识方法和智能优化方法。时域辨识方法直接依据系统的时域采样信息辨识模型参数，最常用的方法是最小二乘法：文献[5]即是基于最小二乘法对光伏逆变器进行参数辨识。频域辨识方法利用快速傅里叶变换将待辨识系统的时域信息转换到频域上，通过系统的频域响应函数求得待辨识参数值。文献[6]采用频域法辨识大型互联电力系统动态等效发电机组的参数。智能优化方法基于优化算法本身的全局寻优特性，通过计算目标函数适应度确定模型参数的最优值。常用的智能优化算法有蚁群算法<sup>[7]</sup>、粒子群算法<sup>[8]</sup>和遗传算法。

蚁群算法适合于解决路径寻优的问题；粒子群算法存在着陷入局部最优等问题；而遗传算法是一种基于自然选择和遗传变异等生物进化机制的全局优化搜索算法，具有良好的并行搜索性能。传统的遗传算法<sup>[9]</sup>采用二进制编码(BCGA)，此编码将问题空间的参数表示为基于{0|1}字符集构成的染色体位串，具有简单易行的优点，却难以克服搜索准确度与搜索效率之间的矛盾。改进的实数编码方式(RCGA)<sup>[10]</sup>直接使用问题变量进行编码，具有准确度高，便于大空间搜索等优点，在同步电机参数辨识<sup>[11]</sup>、直流电机PID控制参数<sup>[12]</sup>、厂级负荷优化<sup>[13]</sup>和无功优化<sup>[14]</sup>等实际工程问题中获得成功应用。

通常，对于含有积分环节的辨识，



丁明/教授

### 关键词/Keywords

风力发电 ·  
变流器 ·  
参数辨识 ·  
遗传算法 ·

国家自然科学基金项目(51207039)，国家电网公司科技项目(NY17201200073)，广东省引进创新科研团队计划资助(2011N015)。

常将输入、输出数据变换到复频域,对应系统模型用传递函数表示,且需要做离散化处理。当其运用遗传算法进行辨识时,上述变换内容将在生成每一个个体的过程中反复进行,庞大的计算量势必导致计算机辨识时间的延长。

基于上述原因,提出一种工程实用辨识策略,直接从时域模型入手,先对微分方程作一定简化后直接采集时域输入、输出数据进行辨识。以双馈风力发电系统中转子侧变流器控制系统为研究对象,通过参数灵敏度分析证明PI调节器参数为重要参数,充分采集仿真系统在风速扰动和短路故障情况下的运行参数,采用实数编码的遗传算法进行辨识,最后通过适用性检验证明了基于遗传算法的变流器控制参数辨识实用方法的有效性。

## 1 风力发电系统的转子侧变流器模型及PI调节器简化

### 1.1 模型分析

双馈式风力发电系统的结构图如图1所示。

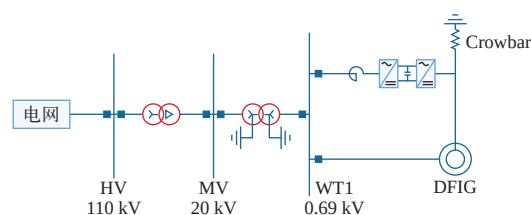


图1 双馈式风力发电系统的结构图

风力发电系统主要由发电机、桨距控制式风力机、变流器和控制系统组成。变流器包括转子侧变流器和网侧变流器。在双馈风力发电系统中,发电机的转子侧变流器实现定子磁链定向矢量控制策略,电网侧变流器实现电网电压定向矢量控制策略,定子有功功率 $P_{stat}$ 和无功功率 $Q_{stat}$ 可实现解耦控制,并可分别由转子电流的分量 $I_{rq}$ 、 $I_{rd}$ 控制<sup>[15]</sup>。图2为双馈风力发电系统在定子磁链定向下的矢量控制系统框图。

图2中,系统采用双闭环结构<sup>[16]</sup>,外环为功率控制环,内环为电流控制环。在功率控制环中,有功指令 $P_{ref}$ 由风力机特性根据风力机最佳转速给

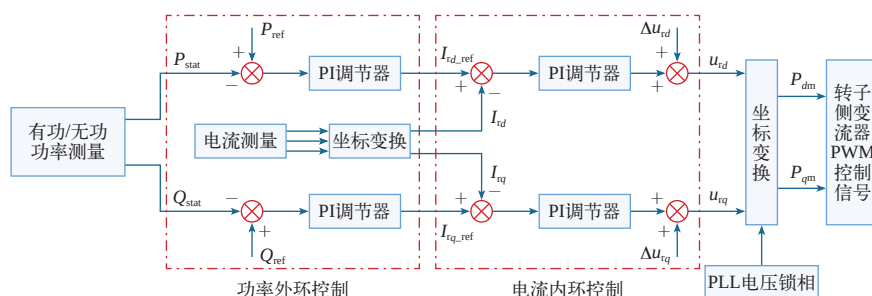


图2 转子侧变流器控制策略

出。无功指令 $Q_{ref}$ 根据电网需求设计。反馈功率 $P_{stat}$ 、 $Q_{stat}$ 是通过对发电机定子侧输出电压、电流检测后再经过坐标变换后计算得到的。根据风机出口处电压 $u$ 的高低,控制系统分别采取正常PQ控制模式和低电压穿越(LVRT)模式,如图3所示。

当 $u$ 高于0.9(pu)时,按照有功指令 $P_{ref}$ 优先向系统发出有功功率;当 $u$ 低于0.9(pu)时,根据电压跌落情况优先向系统发出无功功率以支撑电压,在容量有剩余的情况下发出部分有功功率。将功率控制指令转化为转子电流 $dq$ 轴参考值的过程通过PI调节器完成。

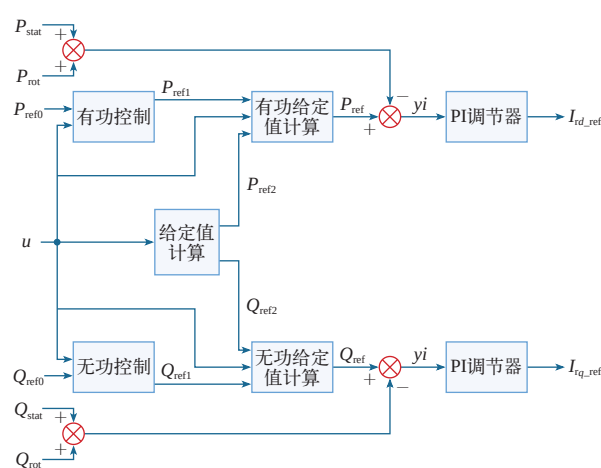


图3 LVRT控制逻辑框图

$d$ 轴PI调节器用微分方程可表示为

$$\frac{d(I_{rd\_ref})}{dt} = K_d y_i / T_d + K_d \frac{d(y_i)}{dt} \quad (1)$$

式中,  $y_i$ 为有功功率的给定值与实际值之差。

更常用的复频域表达式为

$$I_{rd\_ref} = \left( K_{pd} + \frac{K_{ld}}{s} \right) y_i \quad (2)$$

即比例系数 $K_{pd}=K_d$ , 积分系数 $K_{ld}=K_d/T_d$ 。

$q$ 轴分量 $I_{rq\_ref}$ 的生成步骤与上述过程基本相同, 此处不再赘述。

上述控制逻辑表明, 当风机出口处电压发生剧烈变化时, 应将采集数据按电压大小分段处理, 依据各段控制逻辑进行给定值的限制, 才能进行辨识。

## 1.2 PI调节器的简化过程

仿真算例中采集的数据为离散数据, 为了对变流器功率控制环的PI调节器参数 $K_d$ 、 $T_d$ 、 $K_q$ 和 $T_q$ 进行辨识, 需对控制环节中的微分方程进行简化处理, 即

$$d(I_{rd\_ref}) = K_d y_i dt / T_d + K_d d(y_i) \quad (3)$$

用差分方程近似代替, 即

$$\begin{aligned} I_{rd\_ref} - I_{rd\_ref0} &= K_d y_i dt / T_d + K_d d(y_i - y_{i0}) \\ &= (K_d dt / T_d + K_d) y_i - K_d y_{i0} \\ &= A y_i + B y_{i0} \end{aligned} \quad (4)$$

其中

$$A = K_d dt / T_d + K_d \quad (5)$$

$$B = -K_d \quad (6)$$

$I_{rd\_ref0}$ 表示 $I_{rd\_ref}$ 上一时刻的值,  $y_{i0}$ 为 $y_i$ 上一时刻的值。

同样的, 对于 $q$ 轴的微分方程也有类似的近似结果, 即

$$I_{rq\_ref} - I_{rq\_ref0} = C y_{i1} + D y_{i1} \quad (7)$$

其中,  $y_{i1}$ 为无功功率的给定值与实际值之差, 且

$$C = K_q dt / T_q + K_q \quad (8)$$

$$D = -K_q \quad (9)$$

由此可知, 辨识所采集的数据必须是等间距的, 保证 $dt$ 是一个常数, 采用遗传算法辨识出 $A$ 、

$B$ 、 $C$ 和 $D$ 的值, 就可计算出参数 $K_d$ 、 $T_d$ 、 $K_q$ 和 $T_q$ 的值。由于是用两个时刻的变量差值来代替原来的微分项, 理论上 $dt$ 越小越好。

## 2 辨识策略

### 2.1 辨识参数的灵敏度分析

灵敏度是指研究与分析一个系统(或模型)的状态或输出变化对系统参数或周围条件变化的敏感程度<sup>[17]</sup>。时域范围内轨迹灵敏度的表达式为

$$S_{\theta_j} = \lim_{\Delta \theta_j \rightarrow 0} \frac{\frac{f_i(\theta_1, \dots, \theta_j + \Delta \theta_j, \dots, \theta_m, k) - f_i(\theta_1, \dots, \theta_j, \dots, \theta_m, k)}{\Delta \theta_j}}{\theta_j} \quad (10)$$

式中,  $f_i$ 为系统中第 $i$ 个变量的轨迹;  $\theta_j$ 为系统中第 $j$ 个参数;  $m$ 为参数总量;  $k$ 为时间采样点。

通过灵敏度分析可以验证所选参数对系统外特性的重要性。文献[18]在辨识同步发电机参数时提到“扰动越大, 参数辨识的准确度越高”。因此, 试验分别在系统处于风速扰动和并网点处三相短路故障情况下进行辨识。考虑到风速扰动和短路故障两种情况下各参数对外特性的影响程度不同, 对这两种情况分别进行灵敏度分析。

#### (1) 风速扰动

设置一段快速变化的风况, 如图4所示。

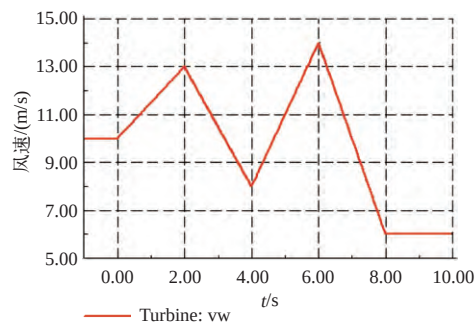


图4 风速变化情况

分别选取双馈风力发电机出口处的有功功率 $P$ 、无功功率 $Q$ 、定子电压 $U_s$ 和定子电流 $I_s$ 为观测量。PI调节器待辨识参数 $K_d$ 、 $T_d$ 、 $K_q$ 和 $T_q$ 的轨迹灵敏度如图5~图8所示。

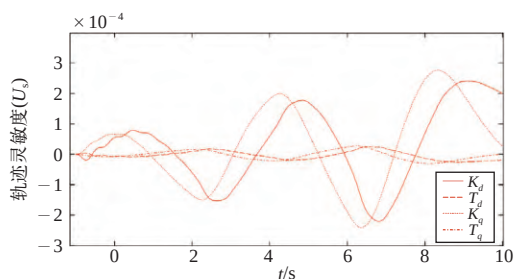


图5 待辨识参数关于定子电压的轨迹灵敏度曲线

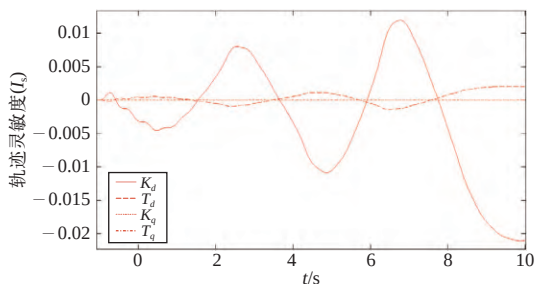


图6 待辨识参数关于定子电流的轨迹灵敏度曲线

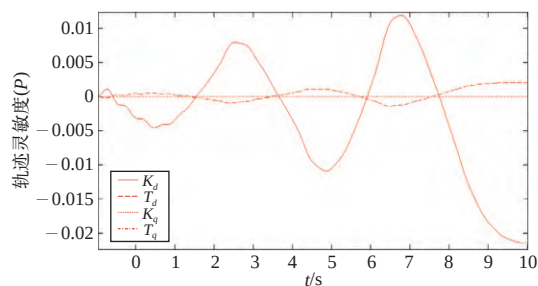


图7 待辨识参数关于有功功率的轨迹灵敏度曲线

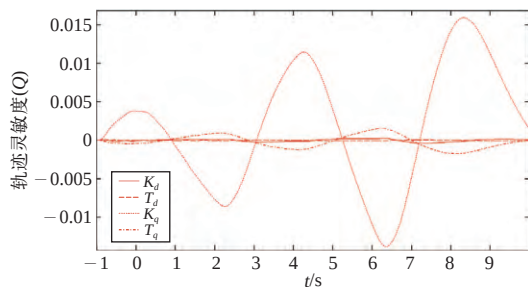


图8 待辨识参数关于无功功率的轨迹灵敏度曲线

## (2) 短路故障

在系统并网点处 (HV) 设置一个故障点, 令其在 0 s 时刻发生三相短路故障, 其短路阻抗为  $1 + j10 \Omega$ , 并在 0.15 s 时刻故障清除, 系统逐渐恢复正常运行。分别选取双馈风力发电机出口处的有功功率  $P$ 、无功功率  $Q$ 、定子电压  $U_s$  和定子电流  $I_s$  为观测量。PI 调节器待辨识参数  $K_d$ 、 $T_d$ 、 $K_q$  和  $T_q$  的轨迹灵敏度如图 9~图 12 所示。

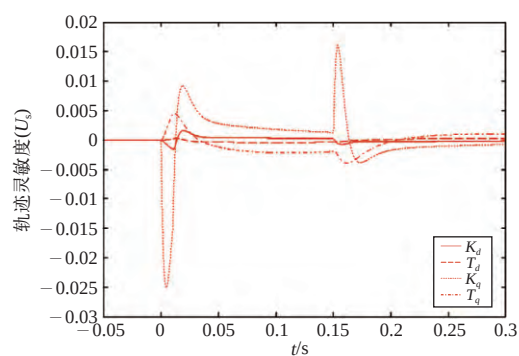


图9 待辨识参数关于定子电压的轨迹灵敏度曲线

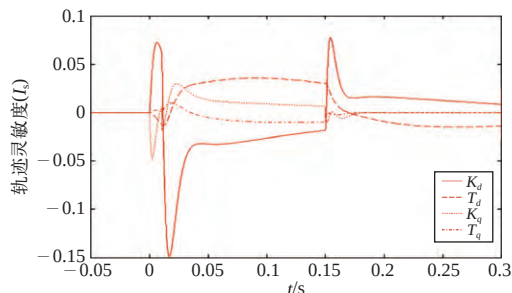


图10 待辨识参数关于定子电流的轨迹灵敏度曲线

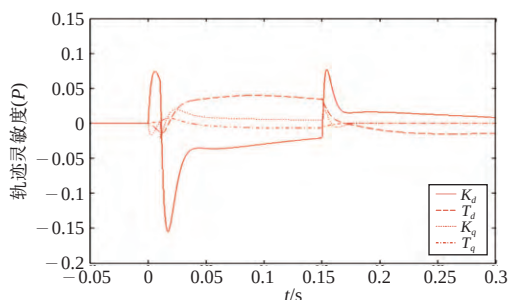


图11 待辨识参数关于有功功率的轨迹灵敏度曲线

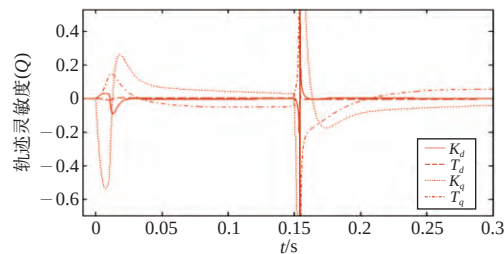


图12 待辨识参数关于无功功率的轨迹灵敏度曲线

## (3) 灵敏度分析

在风速扰动及短路故障情况下各观测量对参数的灵敏度大小如表 1 所示。

上述结果表明, 有功功率和定子电流对  $d$  轴参数  $K_d$  和  $T_d$  更为敏感; 无功功率对  $q$  轴参数  $K_q$  和  $T_q$  更为敏感; 短路故障时定子电压对  $q$  轴参数  $K_q$  和  $T_q$  更为敏感, 但在风速扰动时影响较小。因此, 为了

表1 观测量对参数的灵敏度

| 扰动   | 观测量   | $K_d$ | $T_d$ | $K_q$ | $T_q$ |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 风速扰动 | $U_s$ | 小     | 小     | 小     | 小     |
|      | $I_s$ | 大     | 大     | 小     | 小     |
|      | $P$   | 大     | 大     | 小     | 小     |
|      | $Q$   | 小     | 小     | 大     | 大     |
| 短路故障 | $U_s$ | 小     | 小     | 大     | 大     |
|      | $I_s$ | 大     | 大     | 小     | 小     |
|      | $P$   | 大     | 大     | 小     | 小     |
|      | $Q$   | 小     | 小     | 大     | 大     |

获得系统准确完整的外特性,必须保证参数 $K_d$ 、 $T_d$ 、 $K_q$ 和 $T_q$ 的辨识结果具有较高准确度。

## 2.2 试验数据采集

采用了DIgSILENT/PowerFactory 14.1环境下的仿真模型以获得试验所需数据,如图1所示,设定参数的真实值 $K_d=4$ ,  $T_d=0.1$ ,  $K_q=4$ ,  $T_q=0.1$ 。

### (1) 风速扰动

由于风速扰动引起的PQ控制模块输入输出端数据变化不大,无须对辨识进行分段处理。但在风速扰动情况下,采集的数据波动很小,而受到数据准确度位数限制,描出的点将离散地分布在各近似点处,给辨识带来很大误差,选择合适的时间间隔能得到最好的辨识效果。

由于风速扰动主要影响系统的有功功率变化,而无功功率变化不大,因而在选取时间间隔 $dt$ 的过程中应优先考虑 $d$ 轴参数的辨识效果。表2给出了风速在7~15 m/s之间,以不同匀加速或匀减速扰动采集数据的加权辨识结果。

表2  $dt$ 的选取对参数辨识结果的影响

| $dt/s$ | $K_d$     | $T_d$     |
|--------|-----------|-----------|
| 0.001  | 2.950 205 | 0.073 725 |
| 0.002  | 3.480 692 | 0.087 008 |
| 0.004  | 3.770 32  | 0.094 257 |
| 0.005  | 3.797 292 | 0.094 931 |
| 0.008  | 3.799 65  | 0.094 99  |
| 0.01   | 3.774 232 | 0.094 355 |
| 0.05   | 2.983 825 | 0.074 593 |
| 0.1    | 1.989 412 | 0.049 734 |

$dt$ 过大时,作差的值不能很好地反映此时的增

量情况;而 $dt$ 过小时,由于数据准确度的限制,采集数据的差值有效位数很少,带来很大的误差。从表2看出,当 $dt$ 介于0.004~0.01 s之间时,得到的参数辨识结果与真值的误差在6%以内,辨识效果较好。

因此,将风速扰动的采集时间间隔设定为0.008 s。此外,在其他条件相同的情况下,风匀加速或匀减速的辨识结果非常接近,平均误差为2.9%左右,最大误差不超过7%,因此可以认为风速扰动方向不影响辨识结果。试验中将风速扰动情况设定为7~15 m/s之间的匀减速变化。

### (2) 暂态情况

由于短路故障情况下试验数据的波动很大,两个相邻时刻的数据差值可以得到正确反映,因此时间间隔可以大大缩小,本文设为 $5 \times 10^{-6}$  s。

根据电压幅值变化的不同,研究了发生轻微故障和严重故障时的辨识结果。故障试验时设置0 s故障发生,0.15 s故障清除,采集0~0.2 s间的运行数据进行辨识。

当电压幅值变化过大时,需对辨识过程进行分段。图13给出了严重故障时给定值 $P_{ref}$ 的大小。

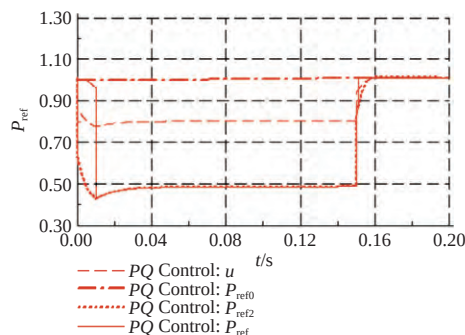


图13  $d$ 轴给定值 $P_{ref}$

按照 $u$ 值的大小将分为4个阶段,分段后按各段逻辑计算得到 $y_i$ ,再将各段数据合并,进行参数辨识。对于 $q$ 轴参数也有类似的分段处理,此处不再赘述, $Q_{ref}$ 的大小如图14所示。

## 3 辨识结果

### 3.1 稳态情况辨识结果

基于风速的不同变化,以0.008 s为时间间隔

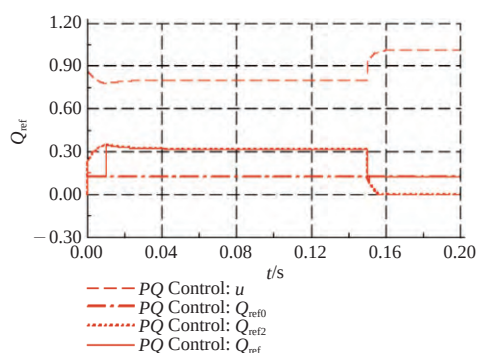


图14 q轴给定值 $Q_{ref}$

采集数据进行了5种情况的辨识。其中，“持续时间”指风速由初始风速变为最终风速所经历的时间，表3为5种情况下的辨识结果。

表3 风速扰动辨识结果

| 持续时间/s | $K_d$    | $T_d$    | $K_q$    | $T_q$    |
|--------|----------|----------|----------|----------|
| 20     | 3.829 15 | 0.095 73 | 3.484 76 | 0.087 23 |
| 40     | 3.818 82 | 0.095 47 | 3.536 77 | 0.088 47 |
| 60     | 3.809 51 | 0.095 24 | 3.580 83 | 0.089 58 |
| 80     | 3.799 27 | 0.094 98 | 3.593 51 | 0.089 90 |
| 100    | 3.783 89 | 0.094 59 | 3.612 55 | 0.090 37 |

5种情况中 $d$ 轴参数的辨识结果较好，与真实值的误差均不超过5.5%，而 $q$ 轴参数的辨识效果稍差，平均误差为10.92%。

可见，改变风速引起的系统变化能得到比较准确的 $d$ 轴参数，这是由于风速扰动主要通过引起有功功率的变化来影响系统，而无功功率的变化波动则相对较小，因此辨识结果与真实值存在一定差距，还需作进一步分析。该组参数辨识结果的适用性检验将在下文中给出。

### 3.2 暂态情况辨识结果

#### (1) 轻微故障情况

在系统并网点处（HV）设置一个轻微故障点，令其在0 s时刻发生三相短路故障，其短路阻抗为 $1.9 + j19 \Omega$ ，并在0.15 s时刻故障清除，系统逐渐恢复正常运行。采集0~0.2 s的运行数据对 $d$ 轴参数及 $q$ 轴参数进行辨识，结果及误差如表4所示。

表4 轻微故障辨识结果

| $K_d$     | $T_d$        | $K_q$    | $T_q$       |
|-----------|--------------|----------|-------------|
| 3.999 87  | 0.099 996 75 | 3.999 9  | 0.099 997 5 |
| 0.003 25% | 0.003 25%    | 0.002 5% | 0.002 5%    |

4个参数与真实值的误差均不超过0.003 25%。这是由于系统发生短路故障时，即使故障程度不大，但有功功率和无功功率都发生了很大变化，故采集到的数据分布很广，这一特点显著地减小了辨识的误差，并且对 $d$ 轴分量和 $q$ 轴分量都有很强的适用性。

#### (2) 严重故障情况

如上文所述，当风机出口处电压 $u$ 跌落得较低时，控制系统将对给定值做出不同于轻微故障时的多种限制，以此为依据，可将输入数据分段，各段内依据各自逻辑限定给定值，再计算出送入PI调节器的差值 $y_i$ 和 $y_{i0}$ ，合并所有段数据送入算法进行辨识。

在上述轻微故障设置的基础上，将短路阻抗改为 $0.7 + j7 \Omega$ ，辨识结果及误差如表5所示。

表5 严重故障辨识结果

| $K_d$    | $T_d$       | $K_q$    | $T_q$       |
|----------|-------------|----------|-------------|
| 3.999 9  | 0.099 997 5 | 3.999 9  | 0.099 997 5 |
| 0.002 5% | 0.002 5%    | 0.002 5% | 0.002 5%    |

由此可见，严重故障时采集的数据具有最好的辨识效果，因为此种情况下输入输出数据的波动最大，数据的大范围波动最能体现控制模块的工作特点，印证了文献[18]的观点。同时通过表3、表4可以看出，暂态情况下的辨识结果与真实值均非常接近，因此在该种情况下本文辨识策略具有很高的有效性。

## 4 模型验证

在辨识暂态数据方面的准确度已经通过误差计算来验证，为证明该辨识策略在稳态情况下的适用程度，进一步对风速扰动下的辨识结果进行适用性检验<sup>[19]</sup>。

具体思路是将3.1节中根据稳态数据所得的参数辨识结果设置为PI调节器的参数，用另一种运行状态——三相对称短路故障来检验辨识参数的有效性。

取表3中5组结果的平均值 $K_d = 3.808 12$ ， $T_d = 0.095 20$ ， $K_q = 3.561 68$ ， $T_q = 0.089 11$ ，在系统并

网点处 (HV) 设置一个故障点, 令其在 0 s 时刻发生三相短路故障, 其短路阻抗为  $1 + j10 \Omega$ , 并在 0.15 s 时故障清除。采集双馈风力发电机出口处的有功功率  $P$ 、无功功率  $Q$ 、定子电压  $u_s$  和定子电流  $i_s$  并与使用真实值时的对应数据进行比较, 结果如

图15~图18所示。

以上辨识结果准确地呈现了故障情况下原系统的外特性, 因此在风速扰动条件下的辨识结果也可以用于仿真系统的搭建, 其能够较好地反映原系统的输入输出关系。

## 5 结束语

提出了一种利用实数编码的遗传算法对风电系统中变流器控制参数进行辨识的工程实用方法, 将其运用到暂态系统能得到非常准确的辨识结果, 并在严重故障的系统中具有非常高的准确度, 而采集风速扰动数据的仿真结果表明, 该方法同样适用于风速扰动, 能准确再现原系统的外特性。综上所述, 所提出的策略对风速扰动和短路故障均适用, 能高度呈现系统原型的工作特性。

### 参考文献

- [1] 杨淑英. 双馈型风力发电变流器及其控制 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2007.
- [2] Valdivia V, Barrado A, Lazaro A, et al. Simple modeling and identification procedures for “black-box” behavioral modeling of power converters based on transient response analysis [J]. IEEE Transactions Power Electron, 2009, 24 (12): 2776-2790.
- [3] Bensmaine F, Tnani S, Champenois G, et al. Modeling and parameter identification of supercapacitors using a bidirectional DC-AC converter [C]. Industrial Electronics Society, IECON 2013 – 39th Annual Conference of the IEEE, 2013: 1019-1024.
- [4] 张金龙. 双馈风电机组模型参数辨识与模型验证 [D]. 济南: 山东大学, 2012.
- [5] 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.
- [6] 刘丽芳. 大型互联电力系统动态等值发电机组参数辨识 [D]. 武汉: 武汉大学, 2004.
- [7] 陈谦, 邵正炎, 付红军, 等. 电力负荷参数辨识

(下转第57页)

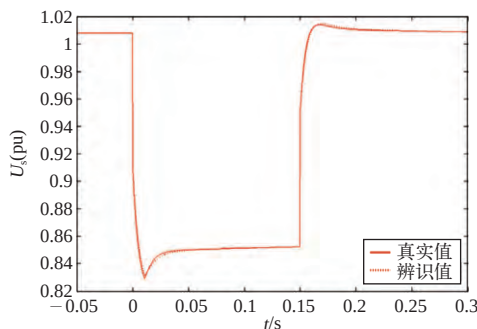


图15 模型验证定子电压  $u_s$

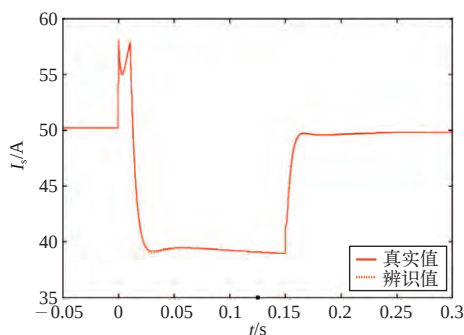


图16 模型验证定子电流  $i_s$

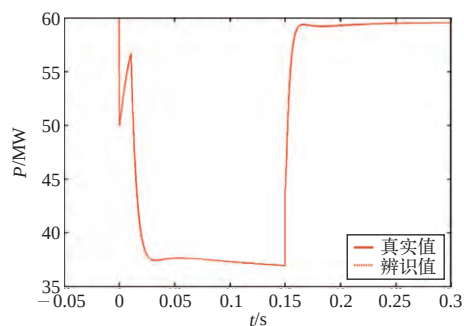


图17 模型验证有功功率  $P$

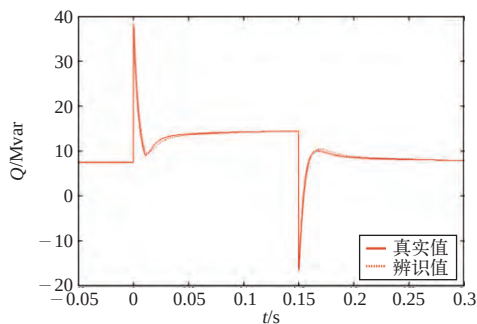


图18 模型验证无功功率  $Q$

## 4 结束语

结合电力行业的业务特性,对LTE的随机过程进行了研究,结合电力不同业务的优先级特性,给出了不同网络发展阶段的随机接入策略,提出了基于功率优先级的随机接入算法,算法具有不改变3GPP协议规定、使用灵活的特点,下一步工作将对该算法与传统算法进行性能比较。

### 参考文献

- [1] 梁芝贤,邱小耕,安然.智能电网对通信的影响与需求[J].电力系统通信,2010,31(9):1-4.
  - [2] 姚继明,黄莉.认知无线电技术在电力通信中的应用浅析[J].现代电力,2012,29(S1):145-148.
  - [3] 周佳陈.智能电网信息和通信技术关键问题探讨[J].通信世界,2013(2):61-63.
  - [4] 孙鹏,刘险峰.无线通信LTE技术及其应用领域研究[J].中国新通信,2015(11):80.
  - [5] 范少锋.基于TD-LTE建立县域电力无线通信专网的研究[J].通信世界,2015(8):173.
  - [6] 孙方楠,胡秀园,吴润泽.面向智能配用电的多介质通信方式及应用方案研究[J].现代电力,2012,29(1):47-51.
  - [7] 郭经红,姚继明,刘森,等.面向城市配电网的延长网络寿命路由算法[J].电力系统自动化,2015,39(12):113-120.
  - [8] 汤奕,赵琳,宋卓然,等.基于马尔可夫模型的配电异构无线网络选择算法[J].现代电力,2013,30(6):84-87.
  - [9] 赵先明,朱伏生,朱晓荣.TD-LTE随机接入过程研究[J].南京邮电大学学报:自然科学版,2013,33(5):15-20.
  - [10] 唐宏,李敏,周到.TD-LTE集群通信系统基于优先级划分的随机接入算法[J].重庆邮电大学学报:自然科学版,2013,25(6):711-715.
  - [11] 杨柳,范平志,郝莉.LTE系统中事件驱动M2M业务的流量控制随机接入协议[J].通信学报,2014,35(12):53-61.
  - (收稿日期:2015-08-19) EA
- ~~~~~
- (上接第52页)
- 的实用改进及实测结果[J].中国电力,2007,40(4):1-5.
  - [8] 姜惠兰,陈平,王敬朋,等.改进粒子群算法在电网无功优化中的应用[J].中国电力,2011,44(12):11-15.
  - [9] 席裕庚,柴天佑,恽为民.遗传算法综述[J].控制理论与应用,1996,13(6):697-708.
  - [10] 田小梅,龚静.实数编码遗传算法的评述[J].湖南环境生物职业技术学院学报,2005,11(1):25-31.
  - [11] 倪良华,李先允.基于改进混合遗传算法的同步电机参数辨识[J].电力系统保护与控制,2010,38(1):51-55.
  - [12] 李俊,于歆杰.实数编码遗传算法的直流电机PID控制参数寻优[J].2005年中国智能自动化会议论文集,2005.
  - [13] 陈彦桥,倪敏,刘吉臻,等.实数编码的遗传算法在厂级负荷优化分配中的应用[J].中国电机工程学报,2007,27(20):107-112.
  - [14] 马晋弢,杨以涵.遗传算法在电力系统无功优化中的应用[J].中国电机工程学报,1995,15(5):347-353.
  - [15] 姚广秀.双馈型风力发电机组用变流器控制策略的研究[D].济南:山东大学,2011.
  - [16] 胡腾华.双馈风力发电系统低电压穿越控制策略与模型验证[D].合肥:合肥工业大学,2013.
  - [17] 鞠平,郭磊,高昌培,等.频域灵敏度及其在电力系统参数辨识中的应用[J].中国电机工程学报,2010,30(28):19-24.
  - [18] 黄其新,孙黎霞,甄威,等.同步发电机参数辨识的蚁群算法及扰动分析[J].电力自动化设备,2009,29(11):50-53.
  - [19] 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.
  - (收稿日期:2015-07-30) EA