

# 基于相间短路故障电流的同步发电机参数辨识方法

葛馨远<sup>1</sup>, 饶毅<sup>1</sup>, 谢睿<sup>1</sup>, 孙峥<sup>1</sup>, 吴汪平<sup>1</sup>, 周念成<sup>2</sup>

(1. 广东电网有限责任公司广州白云供电局, 广东 广州 510405;

2. 输变电装备技术全国重点实验室(重庆大学), 重庆 400044)

**摘要:** 同步发电机的精确参数辨识是保证电力系统暂稳态分析的重要基础。本文首先在同步发电机等效数学模型、序网图、等效电路的基础上, 推导了其通过外部阻抗相间短路故障情况下的暂态电流表达式; 然后以短路试验与辨识得到参数计算的短路电流间标准化误差平方和最小目标函数, 采用增加权重系数的改进鲸鱼优化算法, 提出基于相间短路故障电流的同步发电机参数辨识方法; 最后在某实际同步发电机上进行短路试验, 验证了所提方法的正确性与有效性。本文方法通过增大同步发电机的激励能量, 采用大扰动过程中的故障电流作为原始数据, 以提高辨识的准确性; 同时结合短路电流模型非线性特点, 对鲸鱼优化算法进行改进, 能更好地适应非线性参数辨识。

**关键词:** 同步发电机; 短路电流; 参数辨识; 鲸鱼优化算法

**DOI:** 10.12067/ATEEE2212015

**文章编号:** 1003-3076(2024)05-0050-08

**中图分类号:** TM341

## 1 引言

电力系统各组成部分精确、可靠的等效模型是电网暂稳态分析的重要基础<sup>[1-3]</sup>。同步发电机是电力系统中的重要电能生产设备<sup>[4]</sup>, 在各种能源类型的发电厂中得到广泛应用<sup>[5]</sup>。同步发电机在实际运行中, 因温度升高、元件老化等原因, 定子电感、电阻等参数会出现变化, 影响电机运行性能<sup>[6,7]</sup>。因此, 获得精确的同步发电机参数对电力系统的稳定性分析及故障后暂态期间电力系统的运行规划、动态特性研究尤为重要。

目前, 同步发电机参数辨识方法主要分为离线辨识与在线辨识两类。在离线辨识方面, 文献[8]采用直流阶跃电压试验, 从电流响应信号中推算同步发电机稳态与动态参数; 文献[9]则通过静止频率响应试验, 对同步发电机数学模型与状态方程进行简化, 实现电机参数辨识; 文献[10,11]分别将正弦函数信号、线性调频信号作为激励信号来评估同步发电机 d-q 轴等效参数; 针对上述方法需要转子预定位的问题, 文献[12]通过 Dalton-Cameron 变换, 提出任意转子位置下的参数辨识试验方案。上述离

线辨识方案均需注入不同类型的激励信号, 需要额外的信号发生设备, 增加了试验成本。文献[13,14]提出通过抛载试验辨识同步发电机参数, 但抛载过程的负荷扰动无法引起同步发电机运行参数的大幅度变化, 由此对时间常数辨识准确性不高。此外, 文献[15]提出通过短路试验辨识同步发电机参数, 但过大的短路电流可能会对设备产生损害。

在线辨识方面, 文献[16]在同步发电机方程变换基础上, 采用变步长自适应线性神经网络算法对同步发电机参数进行辨识; 文献[17]则借助滑模控制器, 在线辨识电机转动惯量与摩擦因数; 文献[18]在同步发电机最大转矩电流比控制策略下, 采用快速粒子群优化算法实现参数快速辨识; 此外, 文献[19]基于卡尔曼滤波联合估计系统动态, 并通过一组修正参数来计算实际模型参数; 在此基础上, 文献[20]采用分布辨识策略与 d 轴扰动电流注入, 以解决多参数在线辨识存在的欠秩与互耦合问题。上述在线辨识方法设计与控制较为复杂, 且易受同步发电机运行时的噪声影响, 并且电流注入可能会对设备运行状态产生影响, 且未利用故障电流进行参数的在线辨识, 无法通过同步发电机短时大幅的暂

**收稿日期:** 2022-12-09

**基金项目:** 中国南方电网有限责任公司科技项目(GZHKJXM20190067)

**作者简介:** 葛馨远(1984-), 女, 河北籍, 高级工程师, 硕士, 研究方向为电力系统及其自动化;  
周念成(1969-), 男, 重庆籍, 教授, 博士, 研究方向为电力系统运行控制(通信作者)。

态特性准确反映其特征参数。

针对现有方法的局限性,首先以短路试验作为出发点,在同步发电机等效数学模型、序网图、等效电路基础上,推导了其通过外部阻抗相间短路故障情况下的暂态电流表达式;然后以试验结果与通过辨识参数计算的短路电流间标准化误差平方和最小为目标函数,采用增加权重系数的改进鲸鱼优化算法,提出基于相间短路故障电流的同步发电机参数辨识方法;最后用实际同步发电机短路试验验证本文方法的有效性。

## 2 同步发电机模型及相间短路故障电流参数辨识优化模型

同步发电机定子绕组通常采用星形接线,中性点经适当阻抗接地<sup>[21]</sup>。静止坐标系中,定子电抗为随转子角位置变化的时变量。因此,为便于分析,采用 Park 变换将同步发电机模型转换至 d-q 旋转坐标系,得到同步发电机双轴模型如式(1)所示。

$$\begin{cases} u_d = R_a i_d + \frac{d\psi_d}{dt} + \omega\psi_q \\ u_q = R_a i_q + \frac{d\psi_q}{dt} - \omega\psi_d \\ u_f = R_f i_f + \frac{d\psi_f}{dt} \\ u_{kd} = R_{kd} i_{kd} + \frac{d\psi_{kd}}{dt} = 0 \\ u_{kq} = R_{kq} i_{kq} + \frac{d\psi_{kq}}{dt} = 0 \\ \psi_d = (L'_d + L_a) i_d + L'_d i_f + L'_d i_{kd} \\ \psi_q = (L'_q + L_a) i_q + L'_q i_{kq} \\ \psi_f = (L'_d + L_f) i_f + L'_d i_d + L'_d i_{kd} \\ \psi_{kd} = (L'_d + L_{kd}) i_{kd} + L'_d i_f + L'_d i_d \\ \psi_{kq} = (L'_q + L_{kq}) i_{kq} + L'_q i_q \end{cases} \quad (1)$$

式中, $u$  为电压; $i$  为电流; $R$  为电阻; $\omega$  为角速度; $\psi$  为磁链; $L$  为绕组漏感; $L'$  为绕组互感;下标 d、a、q、f、kd 和 kq 分别为直轴、电枢、交轴、励磁、d 轴阻尼和 q 轴阻尼绕组。

正常情况下,图 1 为同步发电机的等效序网图。其中, $E$  为同步发电机绕组正序感应电压; $R^P$  为正序等效电阻; $X^P$  为正序等效电抗; $I^P$  为正序等效电流; $R^N$  为负序等效电阻; $X^N$  为负序等效电抗; $I^N$  为负序等效电流; $Z_E$  为中性点接地阻抗; $R^Z$  为零序等效电阻; $X^Z$  为零序等效电抗; $I^Z$  为零序等效电流。

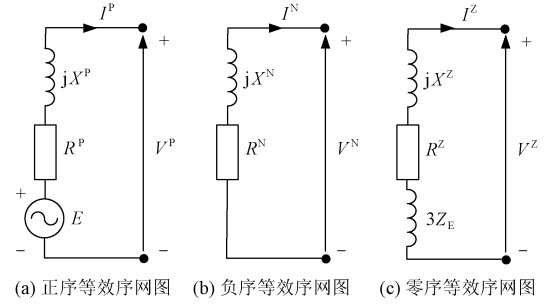


图 1 同步发电机等效序网图

Fig. 1 Equivalent sequence network diagram of synchronous generator

在实际情况下,短路故障多发生在与同步发电机直接相连或通过专用变压器连接的网络上。因此,同步发电机和故障位置间存在一个等效阻抗。该等效电抗受短路故障对定子漏抗和定子电阻的影响。此时,同步发电机在外部短路下的 d 轴、q 轴等效电路如图 2 所示。

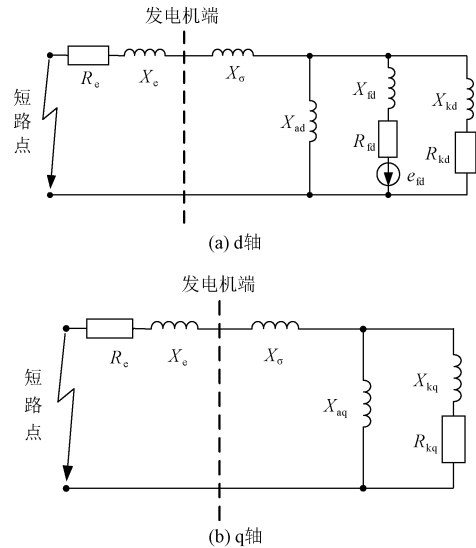


图 2 同步发电机通过外部阻抗短路的等效电路

Fig. 2 Equivalent circuit of three-phase short circuit of synchronous motor through external impedance

图 2 中, $R_e$  为故障点与同步发电机端间等效电阻; $X_e$  为故障点与同步发电机端间等效电抗; $X_\sigma$  为定子漏抗; $X_{ad}$  为直轴互感抗; $X_{fd}$  为励磁绕组电抗; $R_{fd}$  为励磁绕组电阻; $e_{fd}$  为励磁绕组等效电压源; $X_{kd}$  为 d 轴阻尼绕组电抗; $R_{kd}$  为 d 轴阻尼绕组电阻; $X_{aq}$  为交轴互感抗; $X_{kq}$  为 q 轴阻尼绕组电抗; $R_{kq}$  为 q 轴阻尼绕组电阻。

结合式(1)与图 1、图 2,推导得到同步发电机通过外部阻抗三相短路的一相短路电流表达式如式(2)、式(3)所示<sup>[22]</sup>。

$$i_k(t) = \left[ \frac{1}{X_d + X_e} + \left( \frac{1}{X'_d + X_e} - \frac{1}{X_d + X_e} \right) e^{-\frac{t}{T'_d}} + \left( \frac{1}{X''_d + X_e} - \frac{1}{X'_d + X_e} \right) e^{-\frac{t}{T''_d}} \right] \sqrt{2} E_0 \cos(\omega_s t + \theta_0 - \frac{\pi}{2}) - \frac{1}{2} \left( \frac{1}{X''_d + X_e} + \frac{1}{X'_q + X_e} \right) e^{-\frac{t}{T_a}} \sqrt{2} E_0 \cos(\omega_s t + \theta_0 - \frac{\pi}{2}) - \frac{1}{2} \left( \frac{1}{X''_d + X_e} - \frac{1}{X'_q + X_e} \right) e^{-\frac{t}{T_a}} \sqrt{2} E_0 \cos(2\omega_s t + \theta_0 - \frac{\pi}{2}) \quad (2)$$

$$\begin{cases} X_d = X_\sigma + X_{ad} \\ X'_d = X_\sigma + \frac{1}{\frac{1}{X_{ad}} + \frac{1}{X_{fd}}} \\ X''_d = X_\sigma + \frac{1}{\frac{1}{X_{ad}} + \frac{1}{X_{fd}} + \frac{1}{X_{kd}}} \\ T'_d = \frac{1}{\omega_s R_{fd}} \left( X_{fd} + \frac{1}{\frac{1}{X_{ad}} + \frac{1}{X_\sigma}} \right) \\ T''_d = \frac{1}{\omega_s R_{kd}} \left( X_{kd} + \frac{1}{\frac{1}{X_{ad}} + \frac{1}{X_\sigma} + \frac{1}{X_{fd}}} \right) \\ X''_q = X_\sigma + \frac{1}{\frac{1}{X_{aq}} + \frac{1}{X_{kq}}} \\ T_a = \frac{2}{\omega_s R_a \left( \frac{1}{X''_d} + \frac{1}{X''_q} \right)} \end{cases} \quad (3)$$

式中,  $X_d$  为直轴稳态电抗;  $X'_d$  为直轴暂态电抗;  $T'_d$  为直轴暂态时间常数;  $X''_d$  为直轴次暂态电抗;  $T''_d$  为直轴次暂态时间常数;  $E_0$  为短路前相电压幅值;  $\omega_s$  为短路期间角速度;  $\theta_0$  为短路发生时 A 相与直轴间的夹角;  $X''_q$  为交轴次暂态电抗;  $T_a$  为定子短路时间常数。

通过三相短路试验获得同步发电机短路电流, 并采用智能算法与式(2)短路电流计算值进行拟合, 进而得到同步发电机等效电路中各参数取值。但该方法仅可辨识同步发电机正序网络等效电路参数。故在此基础上, 推导同步发电机通过外部阻抗相间短路时的一相短路电流表达式如式(4)、式(5)所示。

$$i_s(t) = - \left[ \frac{1}{X_d + X^N} + \left( \frac{1}{X'_d + X^N} - \frac{1}{X_d + X^N} \right) e^{-\frac{t}{T'_{d2}}} + \left( \frac{1}{X''_d + X^N} - \frac{1}{X'_d + X^N} \right) e^{-\frac{t}{T''_{d2}}} \right] \sqrt{3} \sqrt{2} E_0 \cdot \cos(\omega_s t + \theta_0) - \frac{1}{X''_d + X^N} e^{-\frac{t}{T_{a2}}} \sqrt{3} \sqrt{2} E_0 \cos \theta_0 \quad (4)$$

$$\begin{cases} T'_{d2} = \frac{(X'_d + X^N)(X_{ad} + X_{fd})}{\omega_s R_{fd}(X_d + X^N)} \\ T''_{d2} = \frac{X''_d + X^N}{\omega_s R_{kd}(X'_d + X^N)} \left( X_{kd} + \frac{1}{\frac{1}{X_{ad}} + \frac{1}{X_{fd}}} \right) \\ T_{a2} = \frac{X^N}{\omega_s R_a} \end{cases} \quad (5)$$

式中,  $T'_{d2}$  为两相短路下直轴暂态时间常数;  $T''_{d2}$  为两相短路下直轴次暂态时间常数;  $T_{a2}$  为两相短路下定子短路时间常数。

可以看出, 式(4)中同时包含正序与负序网络等效电路参数。并且式(4)的短路电流表达式为交流分量  $I_{ac}$  (第一项) 与不对称分量  $I_{as}$  (第二项) 之和, 即可将式(4)改写为:

$$\begin{cases} i_s(t) = I_{ac} + I_{as} \\ I_{ac} = - \left[ \frac{1}{X_d + X^N} + \left( \frac{1}{X'_d + X^N} - \frac{1}{X_d + X^N} \right) e^{-\frac{t}{T'_{d2}}} + \left( \frac{1}{X''_d + X^N} - \frac{1}{X'_d + X^N} \right) e^{-\frac{t}{T''_{d2}}} \right] \sqrt{3} \sqrt{2} E_0 \cos(\omega_s t + \theta_0) \\ I_{as} = - \frac{1}{X''_d + X^N} e^{-\frac{t}{T_{a2}}} \sqrt{3} \sqrt{2} E_0 \cos \theta_0 \end{cases} \quad (6)$$

以试验与式(4)计算得到的同步发电机通过外部阻抗两相短路的一相短路电流间标准化误差平方和最小为目标, 定义如下目标函数:

$$J = \frac{\sum_{k=1}^{N_1} [I_{ac, \exp}(k) - I_{ac, \text{cal}}(k)]^2}{\sum_{k=1}^{N_1} I_{ac, \exp}^2(k)} + \frac{\sum_{k=1}^{N_1} [I_{as, \exp}(k) - I_{as, \text{cal}}(k)]^2}{\sum_{k=1}^{N_1} I_{as, \exp}^2(k)} \quad (7)$$

式中,  $N_1$  为测量点数;  $I_{ac,exp}$ 、 $I_{as,exp}$  分别为试验短路电流交流和不对称分量;  $I_{ac,cal}$ 、 $I_{as,cal}$  分别为计算短路电流交流和不对称分量。

### 3 基于改进鲸鱼优化算法的同步发电机参数辨识方法

#### 3.1 鲸鱼优化算法

鲸鱼优化算法 (Whale Optimization Algorithm, WOA) 是根据座头鲸群体捕猎行为启发的新型智能优化算法<sup>[23]</sup>。WOA 模拟鲸鱼的气泡网捕食机制, 经搜索猎物、包围猎物、抓捕猎物三个阶段实现寻优过程中的位置更新。

在算法第一次迭代前对猎物种群进行初始化。然后计算种群中每个搜索个体的目标函数值, 选取当前最优的鲸鱼个体。鲸鱼会同时以环形收缩和螺旋上升的方式包围猎物, 模拟该行为的数学模型为:

$$X(t+1) = \begin{cases} X^*(t) - AD & p < 0.5 \\ D'e^{bl} \cos(2\pi l) + X^*(t) & p \geq 0.5 \end{cases} \quad (8)$$

$$A = 2ar - a \quad (9)$$

$$a = 2 - \frac{2t}{N} \quad (10)$$

$$D = |CX^*(t) - X(t)| \quad (11)$$

$$C = 2r \quad (12)$$

$$D' = |X^*(t) - X(t)| \quad (13)$$

式中,  $p$  为区间  $[0, 1]$  上的随机数;  $t$  为算法迭代次数;  $X$  为每代鲸鱼搜索个体的位置矢量;  $X^*$  为每代鲸鱼搜索个体中的最佳位置矢量;  $A$ 、 $C$ 、 $D$  为系数矢量因子;  $D'$  为当前鲸鱼个体与最优位置 (猎物) 间距离;  $b$  为螺旋上升线的形状常参数;  $l$  为区间  $[-1, 1]$  上的随机数;  $r$  为区间  $[0, 1]$  上的随机矢量;  $a$  为从 2 线性下降到 0 的实数向量;  $N$  为最大迭代次数。当  $p < 0.5$  时, 表示采取环形收缩方式搜寻猎物; 当  $p \geq 0.5$  时, 表示以螺旋上升方式搜寻猎物。

#### 3.2 改进鲸鱼优化算法

WOA 算法参数设置少、结构简单、收敛速度快, 但随着迭代次数增加, 容易提前停留至理论最优值附近, 导致陷入局部最优。因此, 本文在式 (9) 的搜索模型中加入权重参数  $y$ , 如下所示:

$$X(t+1) = \begin{cases} y(t)X^*(t) - AD & p < 0.5 \\ D'e^{bl} \cos(2\pi l) + y(t)X^*(t) & p \geq 0.5 \end{cases} \quad (14)$$

$$y(t) = e^{-\left(\frac{t}{N}\right)^m} \quad (15)$$

式中,  $m$  为区间  $[0, 1]$  上固定的常数。

由式 (15) 可以看出, 权重参数  $y$  随着迭代次数增加而非线性减小。在模型迭代前期, 较大的搜索步长提高了模型的全局搜索能力; 而在模型迭代后期, 搜索步长减小保证了模型在最优值附近的搜索精度, 避免陷入局部最优。

#### 3.3 参数辨识计算流程

本文所建立的参数辨识优化目标函数中存在大量非线性关系, 故选择在非线性优化中全局搜索能力较好的改进鲸鱼优化算法进行计算, 形成参数辨识计算流程如图 3 所示, 其具体计算步骤如下:

步骤 1: 输入通过外部故障相间短路的同步发电机电流交流和不对称分量。

步骤 2: 将输入的数据代入式 (8) 中, 设置改进鲸鱼优化算法的初始参数。

步骤 3: 利用改进鲸鱼优化算法进行优化计算, 得到使目标函数最小的同步发电机参数值。

步骤 4: 将本次计算得到的同步发电机参数值代入式 (8) 中, 更新改进鲸鱼优化算法的参数值。

步骤 5: 重复步骤 2~步骤 4, 直至达到最大迭代次数, 完成优化目标的拟合, 输出同步发电机参数。

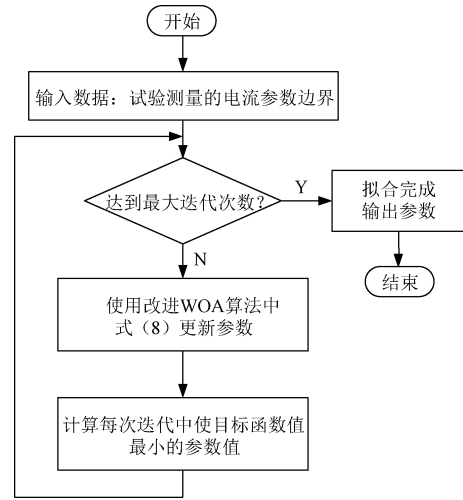


图 3 同步发电机参数辨识流程图

Fig. 3 Synchronous motor parameter identification flow chart

### 4 算例仿真

按照 IEEE 标准<sup>[24]</sup>, 在端电压为 30% 额定电压下, 对某同步水轮发电机进行经外部阻抗两相短路试验, 试验接线图如图 4 所示。短路试验前, 发电机保持 30% 额定电压的机端电压。然后通过闭合三相断路器经外部阻抗发生两相短路, 短路时间维持 5 s。同步发电机的部分关键参数见表 1。



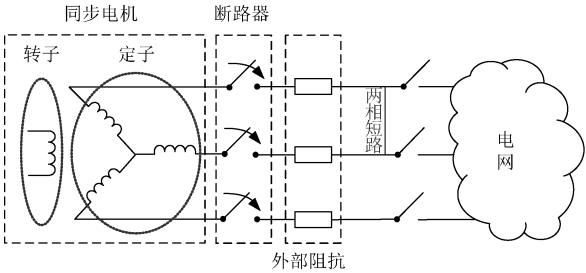


图 4 同步发电机短路试验接线图  
Fig. 4 Synchronous motor short circuit test wiring diagram

表 1 同步发电机部分关键参数

Tab. 1 Key parameters of synchronous motor			
参数	数值	参数	数值
定子外径/mm	9 480	功率因数	0.95
定子内径/mm	8 796	频率/Hz	50
气隙长度/mm	24.55~24.76	额定功率/(MV·A)	109.6
轴直径/mm	970	绝缘等级	F
定子槽数	462	定子电流密度/(A/m <sup>2</sup> )	3.18
极数	44	转子电流密度/(A/m <sup>2</sup> )	2.45
每相匝数	77	额定电压/kV	15.65
额定转速/(r/min)	136.4	额定电流/kA	4.043

分别采用本文提出的方法、IEEE 标准测试方法、文献[25]中的方法和文献[15]中的解析计算方法,对同步发电机  $X_d$ 、 $X'_d$ 、 $X''_d$ 、 $X^N$ 、 $T'_{d2}$ 、 $T''_{d2}$ 、 $T_{a2}$  参数进行拟合计算。为了公平比较不同方法间的优越性,统一将各方法的迭代次数设置为 50 次,种群规模设置为 30。参数的搜索范围为 IEEE 标准测试值的  $\pm 10\%$ ,具体见表 2。

表 2 参数范围上下限

Tab. 2 Upper and lower limits of parameter range							
参数	$X_d$ / $\Omega$	$X'_d$ / $\Omega$	$X''_d$ / $\Omega$	$X^N$ / $\Omega$	$T'_{d2}$ /s	$T''_{d2}$ /s	$T_{a2}$ /s
下限	1.918	0.666	0.362	0.373	2.113	0.039	0.229
上限	2.362	0.814	0.517	0.485	2.607	0.055	0.286

4.1 各方法计算结果对比分析

使用上述 4 种方法计算得到的同步发电机参数见表 3。表 3 中最后一列为同步发电机厂家提供的出厂试验数据。考虑到额定电压下短路试验可能对同步发电机产生损害,本文在 30%额定电压下进行试验,表 3 中参数值可放大至与额定电压对应的数值。根据计算结果绘制同步发电机的暂态特性曲线,得到各方法下的定子电流与时间的关系如图 5 所示。

表 3 不同方法确定的参数值

Tab. 3 Parameter values determined by different methods					
参数	本文方法	IEEE 测试法	文献 [15] 方法	文献 [25] 方法	出厂试验
$X_d/\Omega$	2.044	2.083	2.187	—	2.037
$X'_d/\Omega$	0.726	0.722	0.772	0.726	0.737
$X''_d/\Omega$	0.421	0.407	—	—	0.412
$X^N/\Omega$	0.435	—	—	—	—
$T'_{d2}/s$	2.014	2.241	2.133	2.003	2.011
$T''_{d2}/s$	0.047	0.045	0.041	0.040	0.044
$T_{a2}/s$	0.281	0.255	0.221	0.241	—

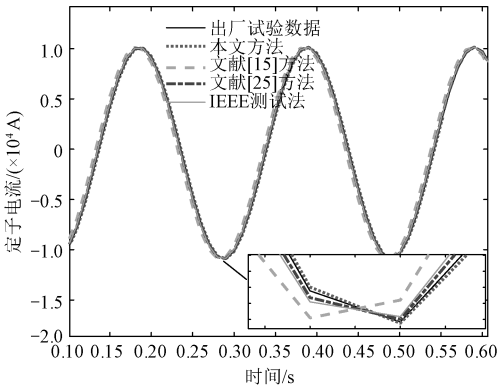


图 5 不同方法下的同步发电机暂态特性曲线  
Fig. 5 Transient characteristic curves of synchronous generators under different methods

由图 5 可知,通过本文方法辨识得到的参数最接近同步发电机的自特性。此外,使用 4 种不同方法,计算得到短路电流试验与计算值间标准化误差平方和最小目标函数  $J$  值如图 6 所示。

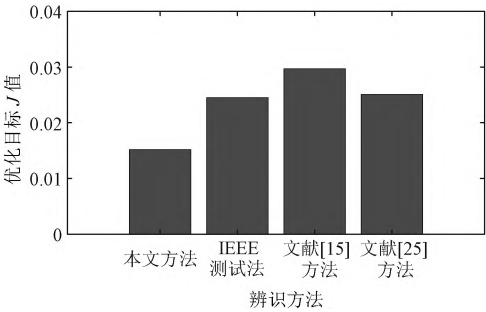


图 6 不同方法的目标函数  $J$  值  
Fig. 6 Objective function  $J$  value for different methods

从图 6 中可以看出,本文提出的方法所获得目标函数  $J$  值最小。即本文所提出方法辨识得到的同步发电机参数与试验结果匹配效果最好。

4.2 外部阻抗对参数辨识精度影响

为了验证短路位置变化对本文所提出同步发电机参数辨识方法的影响,分别在 20%、40%、60%、

80%、100%外部阻抗下进行两相短路试验。5次短路试验下计算得到的目标函数 $J$ 值如图7所示。

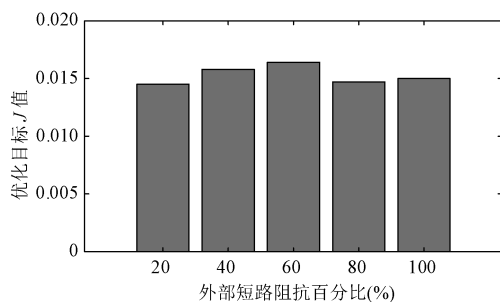


图7 不同外部短路阻抗的目标函数 $J$ 值

Fig.7 Objective function  $J$  value of different external short circuit impedance

由图7可知,即使是在外部阻抗变化时,本文提出的同步发电机参数辨识方法目标函数值波动较小,仍可保证较高的精度。

## 5 结论

本文提出了一种基于短路电流的同步发电机参数辨识方法。推导了其通过外部阻抗相间短路故障情况下的暂态电流表达式;建立短路试验与拟合计算电流间标准化误差平方和最小的目标函数。使用改进的鲸鱼优化算法求解使目标函数最小下的同步发电机参数,并通过实际同步发电机参数下的实验与其他技术方法进行了比较,在参数辨识精度方面表现出优越的性能。

## 参考文献 (References):

- [1] 汤涌, 姚伟, 王宏志, 等. 电网仿真分析与决策的人工智能方法[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(15): 5384-5406.  
TANG Yong, YAO Wei, WANG Hongzhi, et al. Artificial intelligence techniques for power grid simulation analysis and decision making [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(15): 5384-5406.
- [2] 郭相辰, 闫大鹏, 王涛. 考虑多信息因素干扰及DG接入的配电网可靠性评估[J]. 电工电能新技术, 2023, 42(3): 55-65.  
GUO Xiangchen, YAN Dapeng, WANG Tao. Reliability assessment of distribution network considering multi-information factor interference and DG access [J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2023, 42(3): 55-65.
- [3] 隋佳闽, 易建波, 黄琦, 等. 基于序电流比值关系的高压输电线路断线故障判别与保护方法[J]. 电工电能新技术, 2022, 41(10): 73-80.
- [4] SUI Jiamin, YI Jianbo, HUANG Qi, et al. Identification and protection method of disconnection fault based on sequence current ratio for high voltage transmission lines [J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2022, 41(10): 73-80.
- [5] DU W, DONG W, WANG Y, et al. Small-disturbance stability of a wind farm with virtual synchronous generators under the condition of weak grid connection [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(6): 5500-5511.
- [6] REZA B, MAHDI D, MAJID S, et al. Novel approach for secure islanding detection in synchronous generator based microgrids [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 34(2): 457-466.
- [7] 班斐, 连广坤, 顾国彪, 等. 永磁同步电机单矢量解耦模型预测转矩控制策略研究[J]. 电工电能新技术, 2020, 39(12): 44-51.  
BAN Fei, LIAN Guangkun, GU Guobiao, et al. Research on single vector decoupling model predictive torque control strategy for PMSM [J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2020, 39(12): 44-51.
- [8] 史婷娜, 刘华, 陈炜, 等. 考虑逆变器非线性因素的表贴式永磁同步电机参数辨识[J]. 电工技术学报, 2017, 32(7): 77-83.  
SHI Tingna, LIU Hua, CHEN Wei, et al. Parameter identification of surface permanent magnet synchronous machines considering voltage-source inverter nonlinearity [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(7): 77-83.
- [9] 马一鸣, 周理兵, 王晋, 等. 基于直流阶跃电压试验与NSGA II算法的同步电机动态参数辨识方法[J]. 电工技术学报, 2019, 34(23): 4890-4900.  
MA Yiming, ZHOU Libing, WANG Jin, et al. A method for synchronous machine dynamic parameters identification based on DC step voltage test and NSGA II algorithm [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(23): 4890-4900.
- [10] 蔡然, 杨俊华, 杨梦丽, 等. 基于改进静止频率响应试验的同步电机参数辨识[J]. 电测与仪表, 2015, 52(7): 123-128.  
CAI Ran, YANG Junhua, YANG Mengli, et al. Parameter identification of the synchronous machine based on an improved standstill frequency response test [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2015, 52(7): 123-128.
- [11] ARJONA M A, CISNEROS-GONZALEZ M, HERNANDEZ C. Parameter estimation of a synchronous generator

- using a sine cardinal perturbation and mixed stochastic-deterministic algorithms [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58 (2): 486-493.
- [11] CISNEROS-GONZALEZ M, HERNANDEZ C, MORALES-CAPORAL R, et al. Parameter estimation of a synchronous-generator two-axis model based on the standstill chirp test [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2013, 28 (1): 44-51.
- [12] 马一鸣, 周理兵, 王晋, 等. 基于频域扩展 Dalton-Cameron 变换的同步电机任意转子位置全参数辨识实验方法 [J]. 电工技术学报, 2020, 35 (6): 1208-1218.
- MA Yiming, ZHOU Libing, WANG Jin, et al. A novel full parameters identification method for synchronous machine based on an expanded Dalton-Cameron transformation in arbitrary rotor position [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35 (6): 1208-1218.
- [13] 夏潮, 肖洋, 李志强, 等. 抛载试验和数值差分在发电机参数辨识中的应用 [J]. 电网技术, 2021, 45 (4): 1553-1558.
- XIA Chao, XIAO Yang, LI Zhiqiang, et al. Application of load rejection test and numerical difference in identification of generator parameter [J]. Power System Technology, 2021, 45 (4): 1553-1558.
- [14] 黄淼. 基于抛载试验和在线时域测试的同步发电机参数辨识新方法 [D]. 重庆: 重庆大学, 2011.
- HUANG Miao. New methods of identifying synchronous machine parameters based on load rejection test and online time-domain test [D]. Chongqing: Chongqing University, 2011.
- [15] MIHAILO M, MARTIN C, DRAGAN S P, et al. Field current waveform-based method for estimation of synchronous generator parameters using adaptive black widow optimization algorithm [J]. IEEE Access, 2020, 8: 207537-207550.
- [16] 张立伟, 张鹏, 刘曰锋, 等. 基于变步长 Adaline 神经网络的永磁同步电机参数辨识 [J]. 电工技术学报, 2018, 13 (S2): 377-384.
- ZHANG Liwei, ZHANG Peng, LIU Yuefeng, et al. Parameter identification of permanent magnet synchronous motor based on variable step-size Adaline neural network [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 13 (S2): 377-384.
- [17] 梁戈, 黄守道, 李梦迪, 等. 基于高阶快速终端滑模扰动观测器的永磁同步电机机械参数辨识 [J]. 电工技术学报, 2020, 35 (S2): 395-403.
- LIANG Ge, HUANG Shoudao, LI Mengdi, et al. A high-order fast terminal sliding-mode disturbance observer based on mechanical parameter identification for PMSM [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35 (S2): 395-403.
- [18] 李婕, 杨淑英, 谢震, 等. 基于有效信息迭代快速粒子群优化算法的永磁同步电机参数在线辨识 [J]. 电工技术学报, 2022, 37 (18): 4604-4613.
- LI Jie, YANG Shuying, XIE Zhen, et al. Online parameter identification of permanent magnet synchronous motor based on fast particle swarm optimization algorithm with effective information iterated [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37 (18): 4604-4613.
- [19] GONZALEZ-CAGIGAL M A, ROSENDO-MACIAS J A, GOMEZ-EXPOSITO A. Parameter estimation of fully regulated synchronous generators using unscented Kalman filters [J]. Electric Power Systems Research, 2019, 168: 210-217.
- [20] 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): 4329-4340.
- WU Chun, ZHAO Yuwei, SUN Mingxuan. Multiparameter online identification of permanent magnet synchronous motors using voltage measurements [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40 (13): 4329-4340.
- [21] JIA L, HÉMIN G, HASSAN B, et al. Grid integration evaluation of virtual synchronous generators using a disturbance-oriented unified modeling approach [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36 (5): 4660-4671.
- [22] ADKINS B, HARLEY R G. The general theory of alternating current machines: Applications to practical problems [M]. London: Chapman & Hall, 1975.
- [23] ZHANG Q, LIU L J. Whale optimization algorithm based on lamarckian learning for global optimization problems [J]. IEEE Access, 2019, 7: 36642-36666.
- [24] IEEE Guide. Test procedures for synchronous machines: IEEE Standard 115-1995 [S]. 1995.
- [25] BRKOVIĆ B, PETROVIĆ D, VASIĆ R. Determination of synchronous generator parameters using the field current waveform [C] // 18th International Symposium on Power Electronics-EE 2015. Novi Sad, Serbia, 2015: 28-30.

## Parameter identification of synchronous generator based on phase to phase fault current

GE Xinyuan<sup>1</sup>, RAO Yi<sup>1</sup>, XIE Rui<sup>1</sup>, SUN Zheng<sup>1</sup>, WU Wangping<sup>1</sup>, ZHOU Niancheng<sup>2</sup>

(1. Guangdong Power Grid Co., Ltd. Guangzhou Baiyun Power Supply Bureau, Guangzhou 510405, China; 2. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment Technology (Chongqing University), Chongqing 400044, China)

**Abstract:** Accurate parameter identification of synchronous generators is an important foundation for ensuring transient stability analysis of power systems. Firstly, based on the equivalent mathematical model, sequence network diagram and equivalent circuit of synchronous generator, the expression of transient current under the condition of phase to phase short circuit fault through external impedance is derived. Then, using short-circuit tests and identification to obtain the minimum objective function of the square sum of standardized errors between short-circuit currents, an improved whale optimization algorithm with increased weight coefficients is adopted to propose a parameter identification method for synchronous generators based on phase to phase short-circuit fault currents. Finally, a short-circuit test was conducted on an actual synchronous generator to verify the correctness and effectiveness of the proposed method. The method in this paper improves the accuracy of identification by increasing the excitation energy of synchronous generator and using the fault current in the process of large disturbance as the original data. At the same time, combining the nonlinear characteristics of the short-circuit current model, the whale optimization algorithm is improved to better adapt to nonlinear parameter identification.

**Key words:** synchronous generator; short-circuit current; parameter identification; whale optimization algorithm