

DOI:10.12158/j.2096-3203.2021.06.023

## 基于小波模型的同步调相机转子故障诊断

张玉良<sup>1</sup>, 蔚超<sup>2</sup>, 林元棣<sup>2</sup>, 马宏忠<sup>1</sup>, 陈湏斐<sup>1</sup>, 蒋梦瑶<sup>1</sup>

(1. 河海大学能源与电气学院, 江苏 南京 211100;

2. 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103)

**摘要:**随着新能源的并网与特高压直流输电的发展,电网对无功调节的要求也逐步提高,因此大型调相机再次被投入使用。为了提高调相机运行的稳定性,针对同步电机转子绕组匝间短路故障特征信号不易提取的问题,文中在 $dq$ 坐标系下利用派克方程推导出了同步调相机励磁电流与转子绕组短路匝数之间的数值关系,并通过求解调相机微分方程仿真得出转子绕组正常与不同短路状态下的励磁电流。然后设计小波模型构建非线性映射,提取出故障信号的特征能量值,输入径向基函数神经网络进行故障诊断。最后利用 Matlab 仿真证明所提方法可以有效检测调相机转子绕组匝间短路故障程度。

**关键词:**故障模型;转子绕组;匝间短路;励磁电流;小波模型;径向基函数神经网络

中图分类号:TM342

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2021)06-0179-06

### 0 引言

随着新能源的并网与特高压直流输电的发展,电网对无功调节的要求也逐步提高,随着电压等级的提高,系统整体的稳定性和安全性问题也日益严重。调相机是一种大型无功调节设备,其增加无功和吸收无功的能力都较强,在电力系统中可以加强电压的动态调节能力<sup>[1-4]</sup>。例如在特高压变电站,调相机可以有效避免电力系统电压突然提高,尤其是在电网侧,调相机可以快速吸收大量由于换相失败而产生的无功功率,同时又能大量增加无功,加快故障后系统无功的恢复<sup>[5]</sup>。因此,大型调相机是电力系统中调节无功的重要装置。

对于大型调相机,其励磁绕组匝间短路故障在初期并不严重,大多数情况下仅是在绕组间有微小的接触,然而这一情况是不平稳的,从某种程度来看,会令调相机的励磁绕组电流越来越大,无功功率不断下降,使轴承振动幅度不断加大。通常情况下,励磁绕组匝间短路初期,调相机可以正常运行,然而若工作条件不佳,比如三相负荷不对称,那么调相机仍可以持续工作,但在调相机中出现的负序旋转磁场会导致发生短路的转子绕组产生倍频电动势形成回路,从而使短路环电流越来越大,短路点温度越来越高,相邻绕组绝缘老化也越来越快,最终这一情况不断反复<sup>[6-7]</sup>。因此没有被及时发现的一部分轻微故障如果继续长期运行最终会导致

严重故障。调相机内部一旦出现较为严重的故障甚至宕机,不仅需要投入大量的人力、物力来修整这些设备,而且整个电力系统的稳定性和安全性都会受到影响,造成巨大的经济损失和社会影响。

近几年调相机才被重新装机运行,针对转子绕组匝间短路的相关鉴别方法较少。但调相机本质上就是没有原动机和机械负载的同步电机,因此可以根据当前对于大型汽轮发电机等同步电机的研究对调相机进行类比分析<sup>[8-9]</sup>。文中通过分析同步电机数学模型,推导得到励磁电流与转子绕组匝数之间的对应关系,并利用小波包分析与径向基函数(radial basis function, RBF)神经网络相结合的形式对匝间短路故障进行仿真诊断分析,为其他相关机组的实验分析提供了数学仿真模型的参考。

### 1 调相机励磁电流模型

若调相机转子绕组在正常运行中发生了匝间短路故障,那么匝间短路就相当于励磁绕组的有效匝数降低,而气隙合成磁通的原本条件没有发生改变,所以只能是励磁电流升高<sup>[10-14]</sup>,同时短路匝中也相当于增加了一个短路回路(短路环)。对励磁电流的计算思路如下:将调相机转子绕组匝间短路后的输出当作没有发生短路的正常输出值,代入反向算出励磁电流,则计算值与实际测量值之间的差值就可以用来识别是否发生转子绕组匝间短路故障,并判断出其故障程度。

对于 $dq$ 坐标系来说,结合派克表达式对其逆向推理,能够得出同步电机的派克表达式。设电机运行在对称稳态下, $\delta$ 为功角,则边界条件为:

收稿日期:2021-05-22;修回日期:2021-07-08

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51907052);高等学校学科创新引智计划(111计划)资助项目(B14022)

$$\begin{cases} i_{ld} = 0 \\ i_{lq} = 0 \\ i_o = (i_a + i_b + i_c)/3 \\ u_d = U \sin \delta \\ u_q = U \cos \delta \\ \psi_d, \psi_q \text{ 为恒值} \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $i_{ld}$  为直轴阻尼绕组电流;  $i_{lq}$  为交轴阻尼绕组电流;  $i_o$  为零序电流;  $i_a, i_b, i_c$  为三相电流;  $u_d$  为直轴电压;  $u_q$  为交轴电压;  $U$  为端电压;  $\psi_d$  为直轴磁链;  $\psi_q$  为交轴磁链。

将上述边界条件代入派克方程可得:

$$\begin{cases} u_d = -\psi_q - r i_d = x_q i_q - r i_d \\ u_q = \psi_d - r i_q = E - x_d i_d - r i_q \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} i_d = \frac{-r u_d + x_q (E - u_q)}{r^2 + x_d x_q} = \\ \frac{-r U \sin \delta + x_q (E - U \cos \delta)}{r^2 + x_d x_q} \\ i_q = \frac{x_d u_d + r (E - u_q)}{r^2 + x_d x_q} = \frac{x_d U \sin \delta + r (E - U \cos \delta)}{r^2 + x_d x_q} \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $i_d$  为直轴电流;  $i_q$  为交轴电流;  $x_d$  为直轴同步电抗;  $x_q$  为交轴同步电抗;  $E$  为电动势;  $r$  为定子电阻。同步电机中定子电阻  $r$  值很小, 因此可以通过忽略  $r$  简化式(3), 结果如下:

$$\begin{cases} i_d = \frac{E - U \cos \delta}{x_d} \\ i_q = \frac{U \sin \delta}{x_q} \end{cases} \quad (4)$$

将式(4)代入同步电机派克方程可以得到有功和无功输出如下:

$$\begin{cases} P = u_d i_d + u_q i_q = \frac{EU}{x_d} \sin \delta + \left( \frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \frac{U^2}{2} \sin 2\delta \\ Q = u_q i_q - u_d i_d = \frac{EU}{x_d} \cos \delta - \\ \left( \frac{1}{x_q} + \frac{1}{x_d} \right) \frac{U^2}{2} + \left( \frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \frac{U^2}{2} \cos 2\delta \end{cases} \quad (5)$$

因为是隐极同步电机, 所以  $x_d = x_q$ , 代入上式可得:

$$\begin{cases} P = \frac{EU}{x_d} \sin \delta \\ Q = \frac{EU}{x_d} \cos \delta - \frac{U^2}{x_d} \end{cases} \quad (6)$$

同步电机的空载电动势为:

$$\begin{cases} E = x_{ad} I_{fd} \\ x_{ad} = L_{ad} = M_{afd} \\ M_{afd} = \frac{16\tau l p}{a_s a_{fd} \pi^2} (\omega_{fd} k_{o\delta fd}) \left( \frac{\omega}{2p} k_{o\delta l} \right) \lambda_{dl} \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $x_{ad}$  为直轴电枢反应电抗;  $I_{fd}$  为励磁电流;  $L_{ad}$  为直轴同步电感;  $M_{afd}$  为定子绕组与励磁绕组互感系数;  $\tau$  为调相机的极距;  $l$  为定子铁芯的有效长度;  $p$  为调相机的极对数;  $\omega_{fd}$  为调相机转子绕组的匝数;  $a_s$  为调相机定子绕组的支路数;  $a_{fd}$  为励磁绕组支路数量;  $k_{o\delta fd}$  为绕组系数;  $k_{o\delta l}$  为定子绕组的基波绕组系数;  $\omega$  为绕组匝数;  $\lambda_{dl}$  为气隙磁导系数。

对于同步电机来说, 未出现匝间短路情况下, 其励磁电流为:

$$I_{fd} = \frac{a_s a_{fd} \pi^2 L_{\delta} k_{ifd}}{8\tau \omega_{fd} k_{o\delta fd} l k_{o\delta l} \lambda_{dl} \omega U} \sqrt{x_d^2 S^2 + 2Qx_d + U^4} \quad (8)$$

式中:  $L_{\delta}$  为定子自感基值;  $k_{ifd}$  为定子电流基值与转子电流基值比;  $S$  为视在功率;  $Q$  为无功功率。

如果转子绕组出现匝间短路问题, 用  $\Delta n$  来代表其短路匝数, 那么出现故障后的匝数为:

$$\omega'_{fd} = \omega_{fd} - \Delta n \quad (9)$$

将其代入式(8), 则出现故障后的励磁电流:

$$I'_{fd} = \frac{a_s a_{fd} \pi^2 L_{\delta} k_{ifd}}{8\tau \omega'_{fd} k_{o\delta fd} l k_{o\delta l} \lambda_{dl} \omega U} \sqrt{x_d^2 S^2 + 2Qx_d + U^4} \quad (10)$$

假设调相机转子绕组发生匝间短路故障后其有功和无功输出都保持不变, 则将式(8)和式(10)相比可得:

$$\frac{I_{fd}}{I'_{fd}} = \frac{\omega_{fd} - \Delta n}{\omega_{fd}} \quad (11)$$

根据式(11)可知, 发电机转子绕组发生匝间短路故障前后励磁电流与匝数有着对应关系, 且与发电机的有功和无功输出无关, 因此可以将发电机励磁电流认作是否短路及短路程度的判别参数。

## 2 调相机绕组匝间短路仿真

通过上述分析能够得出, 结合励磁电流的改变, 能够判断出转子绕组是否出现匝间短路等情况, 因此利用仿真得到发电机在不同匝间短路程度以及正常情况下的励磁电流波形, 有利于下一步利用神经网络来诊断故障。应用 Matlab 建立转子绕组匝间短路问题模型, 电机部分参数有: 调相机定子绕组的电阻值  $r = 2.9069 \Omega$ ; 励磁绕组的电阻值  $R_{fd} = 0.59013 \Omega$ ,  $R_{kd} = 11.900 \Omega$ ,  $R_{kq} = 20.081 \Omega$ ; 励磁电压  $U_{fd} = 24 \text{ V}$ ; 绕组的匝数  $\omega = 377$ 。

根据调相机基本参数构造电感系数矩阵和电阻矩阵,并在  $dq$  坐标系下建立电压过程微分方程,利用 Matlab 中可变阶数的多步算法 ode113(adams) 求解微分方程,得到励磁电流的变化曲线,对调相机启动运行以及匝间短路程度分别为 20% 和 50% 时进行仿真,励磁电流变化情况如图 1—图 3 所示。

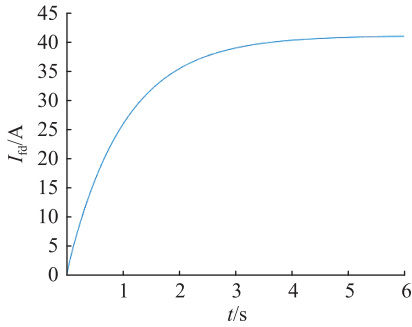


图 1 启动运行中励磁电流

Fig.1 Excitation current in start-up operation

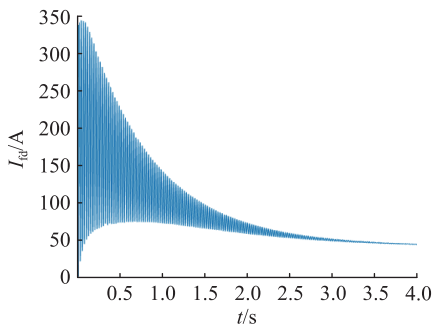


图 2 绕组匝间短路程度 20% 时励磁电流

Fig.2 The winding turns short the excitation current by 20%

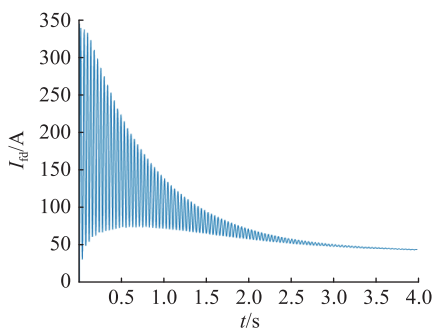


图 3 绕组匝间短路程度 50% 时励磁电流

Fig.3 The winding turns short the excitation current by 50%

### 3 小波模型提取故障特征信息

文中采用小波分析与基础神经网络模型相结合的方式对数据进行特征提取,根据搜集到的文献资料可知,目前将小波分析与神经网络相结合主要有 2 种方法:(1) 先利用小波分析对待处理信号进

行第一步处理,再将结果送入神经网络进行分析;(2) 用小波元替代神经网络中的神经元,同时保持神经网络本身的结构不变,从而将二者相结合,大大提高计算效率,而且这种方式具有不同的分辨率,即在数据量大的地方使用高分辨率,在数据量小的地方使用低分辨率,同时对数据进行小波分析,并适时地调整各种因子来提高分类效果<sup>[15—17]</sup>。文中设计的小波模型采用第二种方法。

基于多层感知机的传播过程,将该小波模型分为 3 层:输入层、隐藏层和输出层。3 个前馈网络集中在 1 层隐藏层中可以使该网络模型以任意精度无限趋于任意函数(文中取非线性映射)。图 4 为三层小波模型的结构示意。

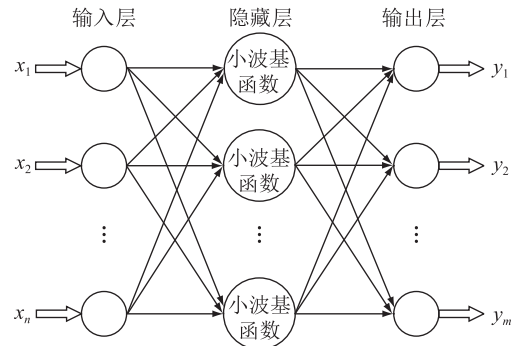


图 4 小波模型结构示意图

Fig.4 Schematic diagram of wavelet model structure

通过多次建模对比, Morlet 小波函数是能够最快实现模型训练完成的基函数,因此选其作为模型隐藏层中的激励函数,即:

$$\psi_{a,b}(x) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{x-b}{a}\right) \quad (12)$$

$$\psi(t) = \cos(1.75x) e^{-\frac{x^2}{2}} \quad (13)$$

式中:  $a$  为 Morlet 小波函数的伸缩因子;  $b$  为 Morlet 小波函数的平移因子。

假设第  $i$  个节点对应的第  $m$  个写入样本为  $x_{im}$ ,  $O_{lim}$  为输入层(即 I 层)的第  $i$  个节点对第  $m$  个写入样本的输出,  $O_{jlm}$  为隐藏层(即 J 层)第  $j$  个节点的输出,  $O_{klm}$  为输出层(即 K 层)第  $k$  个节点的输出,则 I 层第  $i$  个节点的输出值为:

$$O_{lim} = x_{im} \quad (14)$$

J 层第  $j$  个节点的输出值为:

$$O_{jlm} = \psi\left(\frac{\sum_{i=1}^{N_1} \omega_{ij} O_{lim} - b_j}{a_j}\right) \quad (15)$$

式中:  $N_1$  为输入层节点数量;  $a_j$  为小波函数第  $j$  个节点的伸缩因子;  $b_j$  为小波函数第  $j$  个节点的平移因子;  $\omega_{ij}$  为  $O_{lim}$  对应的权值。

K 层第  $k$  个节点的输出值为:

$$O_{Kkm} = \sum_{j=1}^{N_j} \omega_{jk} O_{jkm} \quad (16)$$

式中:  $N_j$  为隐藏层节点数量;  $\omega_{jk}$  为  $O_{jkm}$  对应的权值。

则能量函数,即误差为:

$$E = \frac{1}{2} \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^{N_k} (Y_{kkm} - O_{Kkm})^2 \quad (17)$$

式中:  $Y_{kkm}$  为相应样本的实际输出;  $N_k$  为输出层节点数量;  $M$  为对应样本的容量。

将上述小波模型计算所得各能量值进行归一化处理。如果输入神经网络的特征值太大有时会导致网络饱和,所以需要将根据调相机励磁电流信号计算所得的各能量值归一化,过程如下:

$$E_{sum} = \sum_{j=1}^{2^i} E_{ij} \quad (18)$$

$$E'_{ij} = \frac{E_{ij}}{E_{sum}} \quad (19)$$

式中:  $E_{ij}$  为各频率段的能量值;  $E_{sum}$  为各频率段的总能量;  $E'_{ij}$  即为归一化的能量值。

归一化后,利用能量值形成特征向量:

$$\mathbf{T}' = (E'_{i1}, E'_{i2}, \dots, E'_{in}) \quad (20)$$

利用上述小波模型对调相机转子绕组发生不同短路程度故障时电机的励磁电流进行分析,得到各频率段的能量值和总能量值,并进行归一化处理,最终构成故障特征的样本数据库,送入 RBF 神经网络进行故障诊断。

#### 4 RBF 神经网络故障诊断

RBF 神经网络是三层前馈神经网络之一,具有整体优化的优点,且其逼近效果也较好,被大量运用于模式分类等。RBF 神经网络主要包括输入层,隐藏层和输出层。但不同于常规多层感知器,其不同层有着各不相同的功能,尤其隐藏层是非线性的,RBF 能够将输入向量空间向隐藏层空间进行转变,这样线性不可分问题便可向线性可分问题进行转变,输出层则是线性的。而 RBF 神经网络主要特点就是隐藏层神经元应用欧氏距离,将其当成是基函数,且其激活函数使用的是高斯函数。

RBF 神经网络的隐藏层可写为  $\varphi_i(\|\mathbf{x} - \mathbf{c}_i\|)$ ,表示隐藏层中  $i$  个神经元相对应的激活函数,其中  $\mathbf{x}$  为 RBF 神经网络中样本数据的输入向量,  $\mathbf{c}_i = [c_{i1} \ c_{i2} \ \dots \ c_{in}]^T$ ,且  $\mathbf{c}_i \in \mathbf{R}^n$ ,为隐藏层中的神经元向量。实际应用中 RBF 的输出节点能够使用很多种函数,文中使用线性函数。由此可总结出 RBF 神经网络的第  $j$  个输出表达式如下:

$$y_j = \sum_{i=1}^h \omega'_{ij} \varphi_i(\|\mathbf{x} - \mathbf{c}_i\|) + d_j \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (21)$$

式中:  $\omega'_{ij}$  为输出层、隐藏层间的权值;  $d_j$  为输出层中不同神经元的阈值;  $i$  为隐藏层不同神经元的编码;  $j$  为输出层不同神经编码。

RBF 神经网络不可能出现局部极小值,其函数逼近效果要好一些,可以通过输入数据的数量或结束运算的阈值条件等命令的选择使得网络以任意精度对复杂函数进行逼近。

小波模型具有更高的分辨率和精确度,可以对故障信号的高频部分再次进行多层分解,对于提取信号特征信息作用很大。RBF 神经网络在训练速率、自适应性等方面优势较大,能够较好地完成电机的故障诊断任务。因此文中将上述两者相结合,通过小波模型对调相机故障励磁电流信号提取特征值,将结果向 RBF 神经网络传送,从而诊断出故障,其整体流程如图 5 所示。

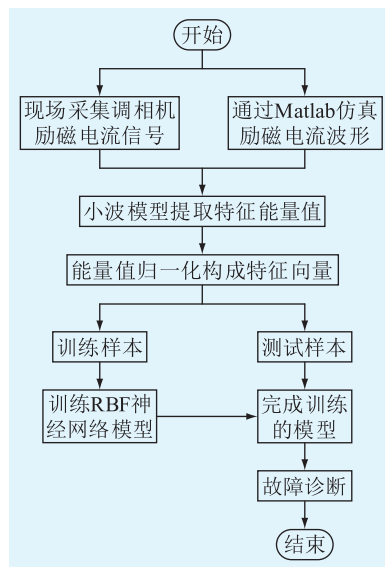


图 5 调相机转子故障诊断流程

Fig.5 Flow chart of rotor fault diagnosis for synchronous condenser

具体的故障诊断过程如下:

(1) 通过 Matlab 对调相机转子绕组发生匝间短路时的励磁电流进行仿真,并利用小波模型分析进行特征提取,作为神经网络的输入向量。文中利用小波模型提取了 150 组样本特征用于模型训练,向 RBF 神经网络输入样本数据进行计算对比分析。

(2) 建立 RBF 神经网络模型<sup>[18-19]</sup>,输入层节点有 4 个,输出层节点有 5 个。

(3) 向 RBF 神经网络送入训练样本进行模型训练,网络的收敛如图 6 所示。

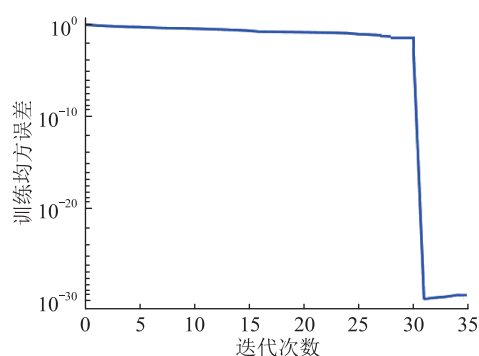


图6 RBF神经网络收敛情况

Fig.6 Convergence of RBF neural networks

经过计算发现,当RBF神经网络模型迭代30次时,训练均方误差已经达到 $2.40541 \times 10^{-30}$ ,收敛速度较快。

(4) 完成网络模型训练后,额外提取50组样本特征用于模型测试,将测试样本送入RBF神经网络,测试该模型对转子绕组匝间短路的故障能否精确判别,模型输出结果如表1所示。

表1 RBF神经网络模型输出  
Table 1 RBF neural network model output

故障程度	模型输出
空载正常运行	(0.999 8, 0.000 1, 0.000 4, 0.000 9, 0.000 8)
匝间短路5%	(0.000 4, 0.998 7, 0.000 3, 0.000 3, 0.001 5)
匝间短路10%	(0.000 5, 0.000 7, 0.998 6, 0.001 2, 0.000 2)
匝间短路20%	(0.000 4, 0.001 0, 0.000 9, 0.999 6, 0.000 3)
匝间短路50%	(0.000 8, 0.000 6, 0.001 1, 0.000 7, 0.998 9)

由表1可以发现,RBF神经网络的输出结果已经非常逼近期望输出(各类型对应输出结果为1),且收敛速度较快,展现了RBF神经网络诊断电机故障的优势。

## 5 结语

文中建立了调相机励磁电流的数学模型,在dq坐标系下利用派克方程推导出转子绕组匝间短路与励磁电流之间的关系,并通过Matlab求解同步电机微分方程对不同故障程度下的调相机励磁电流进行仿真。再利用小波模型对励磁电流信号进行特征提取,然后输入RBF神经网络进行故障诊断,验证了基于小波模型的调相机转子绕组匝间短路故障诊断方法的快速收敛性及高精度。

本文得到国网江苏省电力有限公司科技项目(J2019114)资助,谨此致谢!

### 参考文献:

[1] 山东电力研究院组. 大型调相机运行维护培训教材[M]. 北京:中国电力出版社,2018.

Shandong Electric Power Research Institute. Training textbook for operation and maintenance of large adjustable camera[M]. Beijing:China Electric Power Press,2018.

[2] 叶立文. 基于RBF神经网络的调相机故障诊断算法研究[D]. 武汉:华中科技大学,2018.

YE Liwen. Research on fault diagnosis algorithm of adjustable camera based on RBF neural network[D]. Wuhan:Huazhong University of Science and Technology,2018.

[3] 李志强,蒋维勇,王彦滨,等. 大容量新型调相机关键技术参数及其优化设计[J]. 大电机技术,2017(4):15-22.

LI Zhiqiang,JIANG Weiyong,WANG Yanbin,et al. Key technical parameters and optimal design of new types of large capacity synchronous condenser[J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine,2017(4):15-22.

[4] 王雅婷,张一驰,周勤勇,等. 新一代大容量调相机在电网中的应用研究[J]. 电网技术,2017,41(1):22-28.

WANG Yating,ZHANG Yichi,ZHOU Qinyong,et al. Study on application of new generation large capacity synchronous condenser in power grid[J]. Power System Technology,2017,41(1):22-28.

[5] 张开宇,崔勇,庄侃沁,等. 加装同步调相机对多直流馈入受端电网的影响分析[J]. 电力系统保护与控制,2017,45(22):139-143.

ZHANG Kaiyu,CUI Yong,ZHUANG Kanqin,et al. Analysis of the influence of synchronous condensers on receiving-end grid with multi-infeed HVDC[J]. Power System Protection and Control,2017,45(22):139-143.

[6] 班国邦,李永刚,赵立进,等. 基于电磁特性的转子绕组动态匝间短路故障联合诊断方法研究[J]. 华北电力大学学报(自然科学版),2014,41(3):32-35.

BAN Guobang,LI Yonggang,ZHAO Lijin,et al. Research on joint diagnostic methods of dynamic rotor winding inter-turn short circuit fault based on the electromagnetic properties[J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition),2014,41(3):32-35.

[7] 李永刚,李和明,赵华. 汽轮发电机转子绕组匝间短路故障诊断新判据[J]. 中国电机工程学报,2003,23(6):112-116,169.

LI Yonggang,LI Heming,ZHAO Hua. The new criterion on inter turn short-circuit fault diagnose of steam turbine generator rotor windings[J]. Proceedings of the CSEE,2003,23(6):112-116,169.

[8] 万书亭,李和明,李永刚. 转子匝间短路对发电机定子振动特性的影响[J]. 中国电机工程学报,2005,25(10):122-126.

WAN Shuting,LI Heming,LI Yonggang. Analysis of generator vibration characteristic on rotor winding inter-turn short circuit fault[J]. Proceedings of the CSEE,2005,25(10):122-126.

[9] 杨玉磊. 1000 MW 汽轮发电机转子绕组匝间短路故障诊断与分析[J]. 电力工程技术,2019,38(1):157-162.

YANG Yulei. Diagnosis and analysis of 1000 MW turbine generator rotor winding inter turn short-circuit fault[J]. Electric

- Power Engineering Technology, 2019, 38(1):157-162.
- [10] 刘俊英. 大型汽轮发电机转子匝间短路原因分析及磁的影响[J]. 大电机技术, 2014(2):36-39.  
LIU Junying. The causes of inter-turn short circuit of large turbo-generator rotor and influence of magnetism[J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine, 2014(2):36-39.
- [11] 国家能源局. 中华人民共和国电力行业标准: 隐极同步发电机转子匝间短路故障诊断导则: DL/T 1525—2016[S]. 北京: 中国电力出版社, 2016.  
National Energy Bureau of the People's Republic of China. Electricity & Power Standard of the People's Republic of China; Guide for the detection of interturn short-circuit fault in cylindrical rotors of synchronous machines; DL/T 1525-2016[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2016.
- [12] 孙宇光, 余锡文, 魏锟, 等. 发电机绕组匝间故障检测的新型探测线圈[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(6):917-924.  
SUN Yuguang, YU Xiwen, WEI Kun, et al. A new type of search coil for detecting inter-turn faults in synchronous machines[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(6):917-924.
- [13] FAIZ J, KERAVAND M, GHASEMI-BIJAN M, et al. Impacts of rotor inter-turn short circuit fault upon performance of wound rotor induction machines[J]. Electric Power Systems Research, 2016, 135:48-58.
- [14] MEZANI S, HAMITI T, BELGUERRAS L, et al. Computation of wound rotor induction machines based on coupled finite elements and circuit equation under a first space harmonic approximation[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2016, 52(3):1-4.
- [15] 夏长亮, 金雪峰, 方红伟, 等. 基于 R/S 分析和小波变换的同步发电机定子绕组匝间短路故障分析[J]. 电工技术学报, 2006, 21(6):101-105.  
XIA Changliang, JIN Xuefeng, FANG Hongwei, et al. Fault analysis of internal stator windings in synchronous generators based on R/S and wavelet transform[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2006, 21(6):101-105.
- [16] 杨存祥, 牛云龙, 张志艳, 等. 小波包分析在永磁同步电机转子偏心故障中的应用[J]. 电机与控制应用, 2015, 42(4):42-46.  
YANG Cunxiang, NIU Yunlong, ZHANG Zhiyan, et al. Application of wavelet packet analysis in PMSM rotor eccentricity fault[J]. Electric Machines & Control Application, 2015, 42(4):42-46.
- [17] 王旭红, 何怡刚. 基于小波包和 Elman 神经网络的异步电机转子断条故障诊断方法[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2010, 37(5):45-48.  
WANG Xuhong, HE Yigang. Method of fault diagnosis for induction machine rotor broken bar based on wavelet package and Elman neural network[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2010, 37(5):45-48.
- [18] 王旭东, 邵惠鹤. RBF 神经网络在非线性系统建模中的应用[J]. 控制理论与应用, 1997, 14(1):59-66.  
WANG Xudong, SHAO Huihe. Nonlinear system modeling using the radial basis function neural networks[J]. Control Theory & Applications, 1997, 14(1):59-66.
- [19] LIAO C C. Genetic K-means algorithm based RBF network for photovoltaic MPP prediction[J]. Energy, 2010, 35(2):529-536.

作者简介:



张玉良

张玉良(1997),男,硕士在读,研究方向为大型电力设备故障诊断(E-mail:13905206751@163.com);

蔚超(1984),男,硕士,工程师,从事特高压直流工程建设、运检相关工作;

林元棣(1988),男,博士,工程师,从事特高压直流工程建设、运检相关工作。

### Diagnosis of rotor fault in synchronous condenser based on wavelet model

ZHANG Yuliang<sup>1</sup>, WEI Chao<sup>2</sup>, LIN Yuandi<sup>2</sup>, MA Hongzhong<sup>1</sup>, CHEN Zhenfei<sup>1</sup>, JIANG Mengyao<sup>1</sup>

(1. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China;

2. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Research Institute, Nanjing 211103, China)

**Abstract:** With the application of new energy in grid-connected system and the development of ultra-high voltage direct current transmission, the grid's requirements for reactive power regulation have gradually increased. Considering that, large-scale synchronous condensers have been put into use again. However, it is difficult to extract the characteristic signal of the inter-turn short-circuit fault in rotor windings of synchronous motors. In order to improve the stability of condensers, a certain relationship between the field current and the number of turns is derived using the Parker equation in the  $dq$  coordinate system, and the differential equation simulates the excitation current. Then the characteristic energy value of the fault signal is extracted through wavelet packet decomposition and reconstruction, and it is input to the radial basis function neural network for fault diagnosis. It is proved by Matlab simulation that the diagnostic method proposed in this paper can effectively detect the degree of short-circuit faults among the turns of the rotor in condensers.

**Keywords:** fault model; rotor winding; inter-turn short-circuit; field current; wavelet model; radial basis function neural network

(编辑 方晶)