

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2024.01.026

## 新型同步调相机转子匝间短路故障定位方法

孙川<sup>1</sup>, 徐钢<sup>1</sup>, 李成博<sup>2</sup>, 蔚超<sup>2</sup>, 王伟<sup>2</sup>, 程明<sup>2</sup>

(1. 江苏方天电力技术有限公司, 江苏 南京 211100;

2. 东南大学电气工程学院, 江苏 南京 210096)

**摘要:** 转子绕组匝间短路故障是新型同步调相机的一种典型故障, 对调相机长期运行和电网稳定都有严重影响。为保障新型同步调相机高可靠稳定运行, 文中提出一种转子绕组匝间短路故障在线诊断与定位的方法。从故障导致的气隙磁场磁动势畸变出发, 推导出定子同相两支路将出现偶次谐波环流现象, 并通过对支路环流进行傅里叶分解, 提取谐波中的明显特征量。对该特征量进行分析, 得出其大小仅与故障所在转子上的空间位置有关, 而与故障匝数无关的结论, 最后通过查表的方式来实现故障诊断与定位。文中基于已规模投入使用的 TTS-300-2 型同步调相机开发有限元软件的仿真模型, 并搭建基于新型调相机的模拟机实验平台进行实验。仿真与实验结果验证了利用支路环流谐波进行转子匝间短路故障定位的有效性。

**关键词:** 同步调相机; 匝间短路故障; 磁动势; 故障定位; 有限元; 转子绕组

**中图分类号:** TM342

**文献标志码:** A

**文章编号:** 2096-3203(2024)01-0238-08

### 0 引言

我国能源资源与能源需求呈逆向分布, 西部能源资源丰富而用能低, 东部与之相反。针对东、西部用能供需矛盾, 特高压直流输电系统近几年得到了迅速发展<sup>[1]</sup>。为使能源高效率、高可靠地长距离传输, 特高压直流输电工程客观要求直流大规模有功输送必须匹配大规模动态无功<sup>[2-3]</sup>。新型调相机单机容量为 300 Mvar, 能够全面提升系统动态无功储备, 解决受端电网动态无功不足、弱送端电网短路容量支撑不足等各种类型的电压稳定问题<sup>[1,4-6]</sup>, 因此在特高压直流输电系统中得到广泛应用<sup>[7-8]</sup>。

新型调相机多在电网故障时承担维持电网电压的作用, 因此在电网故障时常被强大的冲击电流影响, 长此以往会造成局部温度过高、绝缘损坏、机械振动等问题<sup>[2]</sup>。转子绕组匝间短路故障是调相机的一种典型故障。绕组线圈的绝缘老化、磨损, 励磁系统或电网故障时的冲击电流等均会造成转子绕组匝间短路故障, 导致电机气隙磁场畸变, 降低电机性能。同时, 故障处会由于过高的短路电流导致电机局部过热、机械结构损坏甚至烧毁等严重事故, 对系统有巨大危害。因此, 研究新型同步调相机在转子绕组匝间短路下的故障诊断以及故障定位, 对调相机高可靠运行具有重要意义<sup>[9-10]</sup>。

新型调相机本质为同步电动机, 因此转子绕组

匝间短路故障诊断方法可以借鉴大型同步发电机的相关研究成果<sup>[11-18]</sup>。目前, 针对新型调相机已有一些匝间短路故障诊断的相关研究<sup>[19-24]</sup>。文献[19]对比分析了新型调相机定、转子匝间短路故障机理, 其中转子部分的故障机理分析对文中故障定位理论推导有重要借鉴意义。文献[20]提出基于相位差的定子绕组匝间短路故障定位方法, 其设定故障定位阈值的思想对文中研究具有参考意义。文献[21]利用调相机 V 型曲线偏移来诊断调相机定子匝间短路, 文献[22]基于瞬时功率偶数次谐波的方式诊断定子匝间短路, 文献[23]通过比较故障相支路电流间的相位差诊断定子匝间短路, 但文献[21-23]只从定子侧进行故障诊断, 对文中研究参考意义较小。文献[24]提出基于穿心螺杆和支持筋的转子绕组匝间短路诊断方法, 该方法为侵入式诊断方法, 对大型调相机而言, 安装相对困难, 检测方式容易受到干扰, 且缺乏实验数据支撑。整体而言, 新型调相机的相关文献中对转子绕组匝间短路故障诊断与定位的研究较少, 现有与转子侧故障诊断相关的文献也缺乏实验数据支撑。

为此, 文中针对新型调相机转子绕组匝间短路故障定位进行研究, 采用非侵入式诊断方法, 安装与检测更方便、更准确。首先, 从励磁磁场磁动势发生变化对气隙磁场磁动势产生的影响出发, 分析在转子绕组发生匝间短路故障后定子绕组出现偶次谐波环流现象的原因。然后, 通过对该偶次谐波环流进行傅里叶分解来诊断与定位转子绕组匝间短路故障。最后, 基于新型调相机搭建小型模拟机

收稿日期: 2023-07-23; 修回日期: 2023-10-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51991384)

实验平台,提供实验数据,以支撑文中所提理论分析与仿真结果。

## 1 新型调相机励磁绕组工作原理

以国内主流的 TTS-300-2 型调相机为研究对象进行研究,定子绕组电路模型如图 1 所示。在正常工作状态下,定子绕组采用三相星形双分支结构,其中 Y 为星形连接节点,三相定子绕组定义为 A、B、C,每相包含 2 条支路。例如,A 相绕组包含支路  $a_1$ 、 $a_2$ , $i_{a1}$ 、 $i_{a2}$  为支路  $a_1$ 、 $a_2$  的电流; $i_A$  为 A 相电流。另外两相采取类似定义。

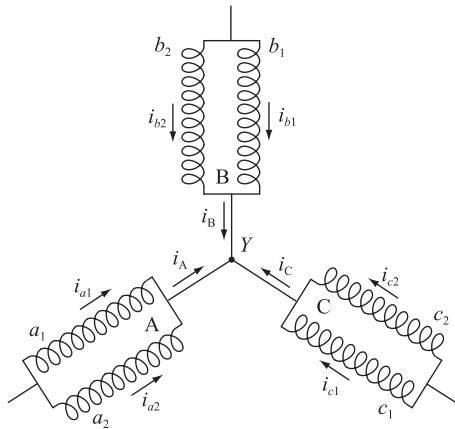


图 1 定子绕组电路模型

Fig.1 Stator winding circuit model

新型调相机转子为一对极结构,正常状态下,调相机转子励磁绕组会产生对称的阶梯型磁动势,这是因为励磁绕组对称分布,且每匝线圈产生的磁动势可相互叠加。励磁磁动势波形如图 2 所示,其中 N、S 为磁极方向; $\gamma$  为转子齿圆周角; $\beta$  为转子槽间角; $\alpha$  为转子的初始电角度; $F$  为气隙合成磁动势。阶梯波半周期为  $\pi$ 。

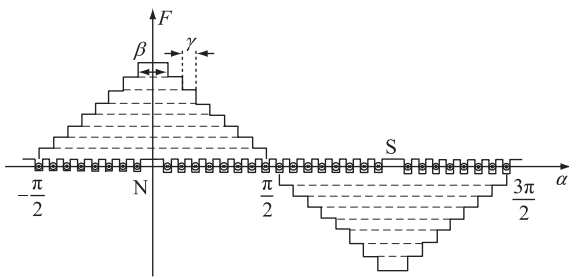


图 2 正常状态下励磁磁动势

Fig.2 Excitation magnetomotive force under normal condition

励磁磁动势  $F_f$  经傅里叶展开后的表达式为:

$$F_f(\alpha) = I_f \frac{4}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} W_{2n-1} \frac{(-1)^{n-1}}{2n-1} \cos((2n-1)\alpha) \quad (1)$$

其中:

$$W_{2n-1} = \sum_{k=1}^{N_{\text{slot}}} N_k \sin\left((2n-1) \frac{\gamma + 2k\beta}{2}\right) \quad (2)$$

式中: $I_f$  为励磁电流; $N_k$  为转子第  $k$  槽的绕组匝数; $N_{\text{slot}}$  为转子槽数; $n$  为正整数。

由图 1 星形结构可知,电枢磁动势  $F_a$  不包括 3 和 3 的整数次谐波。正常情况下,其余高次谐波幅值较小。鉴于调相机多运行在空载、进相或迟相状态,电枢磁动势  $F_a$  与励磁磁动势  $F_f$  的基波分量仅存在幅值差异,则可表示为:

$$F_a(\alpha) = \eta I_f \frac{4}{\pi} W_1 \cos \alpha \quad (3)$$

式中: $\eta$  为电枢磁动势与励磁磁动势的幅值转换系数。故气隙合成磁动势  $F$  可表示为:

$$F = F_f + F_a \quad (4)$$

由式(1)和式(3)可知,调相机正常运行时,气隙合成磁动势也由基波与奇数次谐波构成。

## 2 转子绕组匝间短路故障机理分析

转子绕组匝间短路等效电路如图 3 所示,其中  $e_f$  为励磁直流电压源; $i_f$  为励磁电流瞬时值; $r_{\text{RSC}}$  为转子绕组短路电阻; $L_f$  为励磁绕组电感。

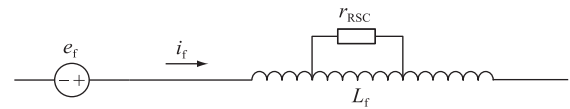


图 3 转子绕组匝间短路模型

Fig.3 Model of inter-turn short circuit in rotor winding

当发生转子匝间短路故障时,短路电阻的引入导致转子绕组阻抗降低,转子总电流将增大,此时转子总电流中只有励磁电流。此外,气隙合成磁动势  $F$  发生畸变,相关分析见 2.1 节。

### 2.1 气隙磁场磁动势

在正常情况下,某一槽内的转子绕组会产生如图 4 实线所示的励磁磁动势波形。图 4 为 N 极第 5 槽磁动势波形图。

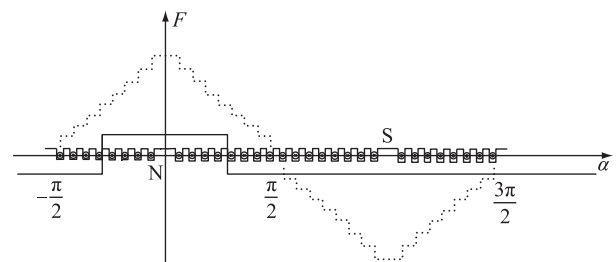


图 4 某一槽励磁磁动势

Fig.4 Excitation magnetomotive force of a slot

对  $d$  槽产生的励磁磁动势  $F_{fd}$  进行傅里叶分解

可得:

$$F_{fd}(\alpha) = I_f \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} W_{dn} \cos n\alpha \quad (5)$$

其中:

$$W_{dn} = N_{fd} \sin\left(n\left(\frac{\gamma + 2d\beta}{2}\right)\right) / n \quad (6)$$

式中: $N_{fd}$ 为被短路绕组匝数。

由式(1)和式(5)可知,当该线圈被短路时,气隙合成磁动势  $F$  将发生畸变,基波与奇次谐波分量将降低,同时会新引入偶次谐波分量。如图3所示,短路电阻  $r_{RSC}$  的引入会使得支路总体阻抗减小,从而导致励磁电流变大为  $I'_f$ 。由于5次以上高次谐波幅值较小,对文章所用方法没有影响,因此忽略5次以上高次谐波。此时,励磁磁动势  $F_f(\alpha_m, t)$  可表示为:

$$F_f(\alpha_m, t) = I'_f \frac{4}{\pi} \sum_{n=1}^3 W_{2n-1} \cos((2n-1)(\omega t + \alpha_m)) - I'_f \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^5 W_{dn} \cos(n(\omega t + \alpha_m)) \quad (7)$$

式中: $t$ 为时间变量; $\alpha_m$ 为沿气隙空间电角度; $\omega$ 为电流频率。结合式(4)和式(7)可知,转子匝间短路故障之后,气隙合成磁动势的基波分量将变大,且新引入2、4次偶次谐波分量。

### 2.2 定子绕组三相支路电流

以A相为例,建立A相并联支路电路模型,如图5所示。图5中, $R_{a1}$ 、 $R_{a2}$ 分别为 $a_1$ 、 $a_2$ 支路绕组电阻; $L_{a1}$ 、 $L_{a2}$ 分别为 $a_1$ 、 $a_2$ 支路绕组电感; $i_c$ 为支路环流; $e_{a1}$ 、 $e_{a2}$ 分别为 $a_1$ 、 $a_2$ 支路瞬时感应电动势。正常状况下,两支路对称,感应电动势、支路电流、支路阻抗均相等,此时两支路电压差为0。

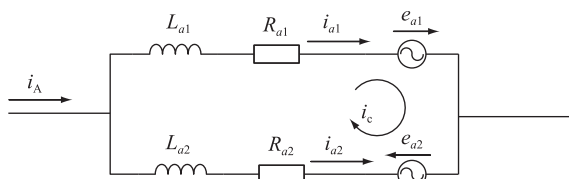


图5 定子绕组并联支路环流模型

Fig.5 Parallel branch circulating current model of stator winding

定子绕组A相感应电动势瞬时值  $e_A(\alpha_m, t)$  的表达式为:

$$e_A(\alpha_m, t) = N_c k_{wn} F(\alpha_m, t) \Delta l v \quad (8)$$

式中: $N_c$ 为每相绕组匝数; $k_{wn}$ 为 $n$ 次谐波绕组因数; $\Delta$ 为真空磁导率; $l$ 为气隙长度; $v$ 为磁密切割绕组线速度。

而当发生转子匝间短路故障后,根据式(7)和

式(8)可得:

$$\left\{ \begin{aligned} e_{a1}(\alpha_m, t) &= N_c l v \Delta I'_f \frac{2}{\pi} \times \left[ \sum_{n=1,3,5} (2W_n + W_{dn}) k_{wn} \cos(n(\omega t + \alpha_m)) + \sum_{n=2,4} W_{dn} k_{wn} \cos(n(\omega t + \alpha_m)) + F_a \right] \\ e_{a2}(\alpha_m, t) &= N_c l v \Delta I'_f \frac{2}{\pi} \times \left[ \sum_{n=1,3,5} (2W_n + W_{dn}) k_{wn} \cos(n(\omega t + \alpha_m + \pi)) + \sum_{n=2,4} W_{dn} k_{wn} \cos(n(\omega t + \alpha_m + \pi)) + F_a \right] \end{aligned} \right. \quad (9)$$

此时两支路电压差  $\Delta u$  为:

$$\Delta u = N_c l v \Delta I'_f \frac{2}{\pi} \sum_{n=2,4} W_{dn} k_{wn} \cos(n(\omega t + \alpha_m)) \quad (10)$$

因此,并联支路将出现偶次谐波环流,而该环流的2次谐波幅值  $I_{c2}$  和4次谐波幅值  $I_{c4}$  之比如式(11)所示。

$$\frac{I_{c2}}{I_{c4}} = \frac{W_{a2} k_{w2} / X_2}{W_{a4} k_{w4} / X_4} \quad (11)$$

式中: $X_2$ 为支路2次谐波等效电抗; $X_4$ 为支路4次谐波等效电抗。环流现象在B、C两相同样存在。

### 3 转子绕组匝间短路在线故障定位方法

基于上述分析,理想情况下,新型同步调相机三相对称运行,气隙磁场磁动势中仅有奇次谐波分量,定子同相两支路电流幅值、相位均相等。而当新型同步调相机发生转子匝间短路故障时,气隙磁场磁动势将新引入偶次谐波分量,尤其是2、4次谐波分量,导致定子同相两支路之间产生2、4次谐波电势差,并因此产生环流。

由式(7)与式(10)可知,根据励磁电流变大以及定子同相两支路间出现偶次谐波环流这2种故障特征,可以进行转子绕组匝间短路故障诊断。

由式(6)与式(11)可知,环流的2、4次谐波幅值之比仅与转子匝间短路故障发生所在槽的空间位置有关,与短路匝数无关,因此该环流的2、4次谐波幅值之比可用作定位依据。考虑到实际情况下,即使同一槽内的不同匝之间也存在一定的空间位置差,因此计算该公式会出现一定的误差;又考虑到调相机实际常运行在饱和状态,环流与气隙磁场

磁动势并非正比关系,也会出现一定的计算误差。因此,为减小误差,在仿真与实验的条件下,对计算结果进行统一的比例修正。修正后的公式为:

$$\frac{I_{c2}}{I_{c4}} = C_d \frac{W_{d2} k_{w2} / X_2}{W_{d4} k_{w4} / X_4} \quad (12)$$

式中: $C_d$ 为修正系数。

文中所提新型调相机转子匝间短路故障在线定位步骤具体如下。

步骤1:在线获取定子三相任意一条支路电流,以 $i_{a1}$ 为例表示。每0.02 s对检测到的 $i_{a1}$ 电流值进行在线傅里叶分解,获得其2、4次谐波电流幅值 $I_{c2}$ 、 $I_{c4}$ 。

步骤2:若 $I_{c2} \leq T_{H2}$ 且 $I_{c4} \leq T_{H4}$ ,则认为转子绕组处于健康状态,跳转至步骤1;否则,转至步骤3。其中, $T_{H2}$ 、 $T_{H4}$ 为转子绕组匝间短路故障诊断阈值。设置该阈值是为了避免测量噪声造成的误诊断,其具体获取方法为在调相机正常且稳定的状态下,每0.02 s对 $a_1$ 支路电流值进行在线傅里叶分解,得到2、4次谐波电流幅值 $I_{c2}$ 、 $I_{c4}$ ,分别取100次分解中的 $I_{c2}$ 、 $I_{c4}$ 的最大值,计为 $T_{H2}$ 和 $T_{H4}$ 。此处的100次不为固定值,可根据实际应用做相应调整,理论上次数越多越准确。

步骤3:计算比值 $D_m = I_{c2} / I_{c4}$ 。

步骤4:查表对照 $D_m$ 所在区间,即可定位转子匝间短路故障所在槽。

步骤5:完成故障定位。

新型调相机转子匝间短路故障在线定位流程如图6所示。

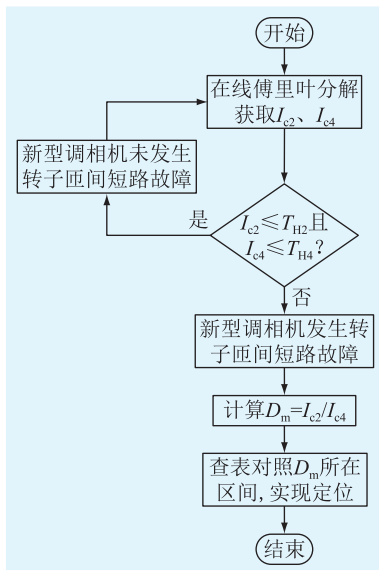


图6 在线故障定位流程

Fig.6 Flow chart of online fault location

## 4 仿真分析

文中根据已投入运行的TTS-300-2型调相机参数建立如图7所示的二维有限元仿真模型。该调相机的主要参数如表1所示。

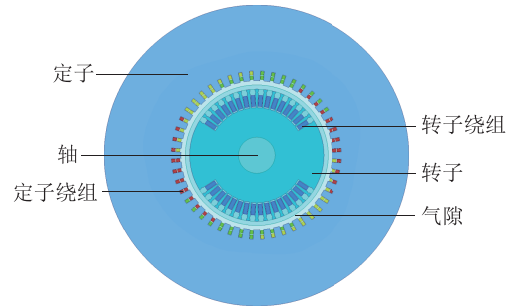


图7 新型同步调相机二维有限元模型

Fig.7 Two-dimensional finite element model of new synchronous condenser

表1 新型同步调相机参数

Table 1 Model parameters of new synchronous condenser

参数	数值	参数	数值
额定容量/Mvar	300	定子槽数	48
额定励磁电流/A	1 800	转子槽数	32
额定励磁电压/V	415	定子额定电压/kV	20
空载励磁电压/V	137	定子额定电流/A	8 660
空载励磁电流/A	705	定子绕组并联支路数	2
极对数	1	相数	3
气隙(单边)/mm	70	转子每槽导体数	12

在转子匝间短路仿真中,设置靠近大齿侧的第一个槽内发生10匝线圈短路。故障发生后,励磁电流、定子故障相支路电流如图8所示。转子侧故障相较于定子侧故障瞬态过程时间常数较大,图8只展示了故障前、后0.1 s的波形。

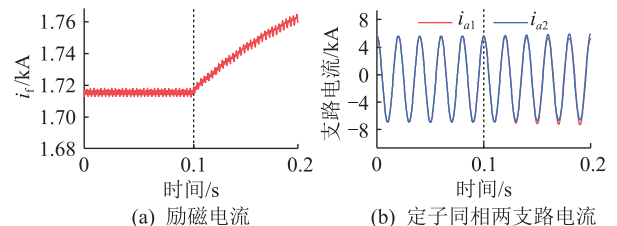


图8 转子匝间短路故障前后波形变化

Fig.8 Waveform changes before and after rotor inter-turn short circuit fault

从图8可以看到,当转子匝间短路故障发生后,励磁电流变大,定子同相两支路电流产生环流,验证了第2章的结论。

为进一步验证故障定位方法,对同一磁极下的所有槽设置不同程度的故障。设定靠近大齿处的

槽为1号槽,依次远离大齿为2号—8号槽,并提取故障发生后支路环流的2、4次偶次谐波分量。相关数据分析如表2所示。

表2 转子匝间短路仿真数据分析

Table 2 Analysis of simulation data of rotor inter-turn short circuit

故障槽	短路匝数	$I_{c2}/I_{c4}$ (仿真值)	$I_{c2}/I_{c4}$ (计算值)
1号	3	26.63	
	6	28.35	17.01~33.98
	9	32.01	
2号	3	87.00	
	6	63.52	33.98~∞
	9	50.37	
3号	3	13.86	
	6	13.00	9.50~17.0
	9	12.06	
4号	3	7.03	
	6	6.72	5.80~9.50
	9	6.41	
5号	3	4.68	
	6	4.45	3.65~5.80
	9	4.24	
6号	3	3.41	
	6	3.23	2.80~3.65
	9	3.05	
7号	3	2.71	
	6	2.51	2.40~2.80
	9	2.42	
8号	3	2.31	
	6	2.30	2.24~2.40
	9	2.30	

根据理论分析,转子匝间短路故障发生后,环流的2、4次谐波幅值之比与空间位置有关,这使得在2号槽发生匝间短路故障这一情况下出现了环流的4次谐波幅值为0的情况,导致理论计算值为无穷大。实际仿真中,受到仿真精度以及模型精度的约束,4次谐波仍有一个极小值,因此在2号槽发生匝间短路故障的情况下并未出现无穷大的情况。另外,在仿真模型中,每一槽都有一定的宽度,所以槽内的不同匝之间也有空间位置差,这使得环流的2、4次谐波幅值之比为一个区间。同样,受到仿真精度以及模型精度约束,仿真值与理论计算值可能会存在一定误差。但总体而言,误差并未影响到不同槽之间的差异性,仍可用于故障定位。

因此,从表2数据中可以看到,不同槽的理论计算值与仿真值均有差异,且从仿真值得以验证该定位方式不受故障匝数的影响,而仅与故障槽所处空

间位置相关。

## 5 实验验证

为验证上述理论分析结果,按照表1所列的实际TTS-300-2型调相机电磁参数设计一台缩小版的调相机模拟机,其参数如表3所示。在此基础上,搭建如图9所示的实验平台。使用断路器的方式模拟匝间短路故障,通过功率分析仪 YOKOGAWA WT1806E 记录实验数据。实验室所用的是一台小型模拟机,铜线细且匝数多,各电气量数值较小,但本身测量装置的噪声误差就比较大,如果匝数过少,实验现象非常不明显。为便于观察,文中适当增加实验电机短路匝数。

表3 同步调相机模拟机参数

Table 3 Simulator parameters of the synchronous condenser

参数	数值	参数	数值
额定容量/kvar	2	定子槽数	36
额定励磁电流/A	3.6	转子槽数	24
定子额定电压/V	380	定子绕组并联支路	2
极对数	1	转子每槽导体数	25

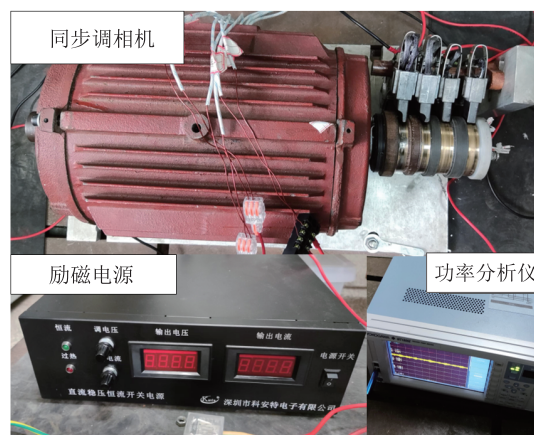


图9 实验平台

Fig.9 Experimental platform

在转子匝间短路实验中,将抽头从转子轴中心引出,通过与滑环和外电路相连来实现转子匝间短路故障。由于实验电机结构紧凑,仅设置4组实验。设置同一磁极下1、4、6号槽中发生匝间短路,如图10所示。故障前、后1号槽转子匝间短路故障的实验结果如图11所示,支路电流频谱如图12所示。具体分析如表4所示。

从图11中可以看到,当转子匝间短路故障发生后,励磁电流直流量由3.1 A上升到3.3 A。从图12中可以直观地看到,相较于故障前,故障后支路电流的2、4次谐波含量分别由0.03、0.04 A上升到



图 10 转子硅钢片横截面

Fig.10 Cross section of rotor silicon steel sheet

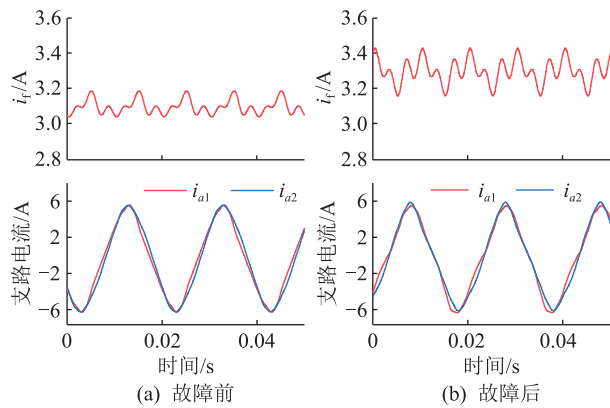


图 11 1号槽转子匝间短路故障实验结果

Fig.11 Test results of rotor inter-turn short circuit fault in slot 1

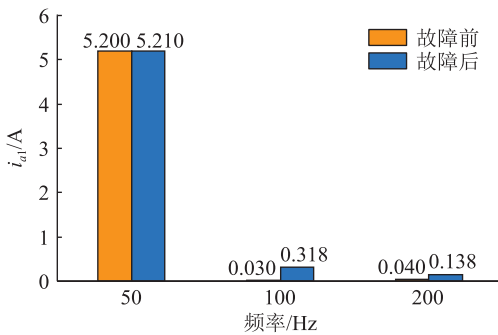


图 12 1号槽转子匝间短路故障支路电流频谱

Fig.12 Branch current spectrum of rotor inter-turn short circuit fault in slot 1

表 4 转子匝间短路实验数据分析

Table 4 Analysis of experimental data of rotor inter-turn short circuit

故障槽	短路匝数	$I_{c2}/I_{c4}$ (实验值)	$I_{c2}/I_{c4}$ (计算值)
1号	20	2.31	1.92~2.44
4号	10	4.68	2.44~6.96
	20	4.91	
6号	20	1.62	1.384~1.63

0.318、0.138 A,从而验证了第 2 章中理论分析的相关结论。根据表 4 具体分析,对比 1、4、6 号槽

发生 20 匝短路故障的实验结果,验证了利用环流的 2、4 次谐波幅值之比可以实现对转子匝间短路的故障定位;再根据 4 号槽发生 10 匝与 20 匝短路故障的对比结果,验证了同一槽发生故障时 2、4 次谐波之比不受故障匝数的影响。仿真结果与实验数据均验证了第 3 章所提定位方法的有效性与准确性。

## 6 结论

文中从故障后气隙磁场磁动势的改变出发,推导出对定子并联两支路的影响,再通过傅里叶分解,得到转子匝间短路故障的关键特征量。利用此特征量包含的 2、4 次谐波幅值之比,给出了针对 300 Mvar 新型同步调相机转子匝间短路在线故障定位的方法。通过对新型调相机进行有限元仿真以及对基于调相机的模拟机进行实验,验证了该方法的可行性,并得出了以下结论:

(1) 转子匝间短路故障后,转子绕组阻抗减小,使得励磁电流直流量变大;同时,励磁磁动势发生畸变,在气隙合成磁动势中增加了偶次谐波分量,使得三相绕组各自两支路电流产生偶次谐波环流。

(2) 偶次谐波环流的 2、4 次谐波含量仅与故障匝所在槽的空间位置有关,与匝数无关,可根据 2、4 次谐波幅值之比对故障进行定位。

## 致 谢

本文得到江苏方天电力技术有限公司科技项目(KJ202109)资助,谨此致谢!

## 参考文献:

[1] 汤广福,庞辉,贺之渊. 先进交直流输电技术在中国的发展与应用[J]. 中国电机工程学报,2016,36(7):1760-1771.  
TANG Guangfu,PANG Hui,HE Zhiyuan. R&D and application of advanced power transmission technology in China[J]. Proceedings of the CSEE,2016,36(7):1760-1771.

[2] 程明,田伟杰,王伟,等. 新型同步调相机的关键技术及研究进展[J]. 电力工程技术,2020,39(2):2-9.  
CHENG Ming,TIAN Weijie,WANG Wei,et al. Review on key technologies and latest development of new synchronous condenser[J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39 (2):2-9.

[3] 李志强,肖洋,李程昊,等. 励磁系统对调相机动态无功特性的影响[J]. 电网与清洁能源,2023,39(7):1-8.  
LI Zhiqiang,XIAO Yang,LI Chenghao,et al. Influence of excitation system on the dynamic reactive power characteristics of condensers[J]. Power System and Clean Energy,2023,39(7):1-8.

[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 con-

- denser in power grid[J]. Power System Technology, 2017, 41(1):22-28.
- [5] 胡帅,刘杰,王廷旺,等. 300 Mvar 调相机大轴保护方案的研究[J]. 浙江电力, 2021, 40(1):50-55.  
HU Shuai, LIU Jie, WANG Tingwang, et al. Research on shaft protection scheme for 300 Mvar synchronous condenser [J]. Zhejiang Electric Power, 2021, 40(1):50-55.
- [6] 索之闻,李晖,张锋,等. 高比例新能源直流送端系统分布式调相机优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(23):133-141.  
SUO Zhiwen, LI Hui, ZHANG Feng, et al. Optimal configuration of a distributed synchronous condenser for an HVDC sending-end system with a high-proportion of renewable energy [J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(23):133-141.
- [7] 李志强,种芝艺,黄金军. 快速动态响应同步调相机动态无功特性试验验证[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(23):6877-6885, 7101.  
LI Zhiqiang, CHONG Zhiyi, HUANG Jinjun. Test verification of dynamic reactive power characteristics of fast dynamic response synchronous condenser[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(23):6877-6885, 7101.
- [8] 张一驰,李志强,王喆,等. 基于频域、时域分析的新一代调相机与 STATCOM 对比及适用场景研究[J]. 发电技术, 2021, 42(1):69-77.  
ZHANG Yichi, LI Zhiqiang, WANG Zhe, et al. Comparison and applicability of new generation synchronous condenser and STATCOM based on characteristic analysis in frequency and time domains[J]. Power Generation Technology, 2021, 42(1):69-77.
- [9] 张玉良,马宏忠,蒋梦瑶. 基于 VMD-MSVM 的同步调相机载荷分配故障诊断方法[J]. 电力工程技术, 2022, 41(1):185-191.  
ZHANG Yuliang, MA Hongzhong, JIANG Mengyao. Load distribution fault diagnosis method of synchronous condenser based on VMD-MSVM [J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(1):185-191.
- [10] 张宁宇,刘建坤,周前,等. 同步调相机对直流逆变站运行特性的影响分析[J]. 江苏电机工程, 2016, 35(3):17-20.  
ZHANG Ningyu, LIU Jiankun, ZHOU Qian, et al. Analysis on the impact of synchronous condenser on DC inverter operating characteristic [J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2016, 35(3):17-20.
- [11] HE Y L, ZHANG Y Y, XU M X, et al. A new hybrid model for electromechanical characteristic analysis under SISC in synchronous generators[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(3):2348-2359.
- [12] 郝亮亮,孙宇光,邱阿瑞,等. 隐极发电机励磁绕组匝间短路故障定位及短路匝数估算[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(21):85-92.  
HAO Liangliang, SUN Yuguang, QIU Arui, et al. Fault location and short circuit turns estimation of inter-turn short circuits of field windings in non-salient-pole synchronous generator [J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(21):85-92.
- [13] 桂林,李岩军,詹荣荣,等. 大型调相机内部故障特征及纵向零序电压保护性能分析[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(8):145-149.  
GUI Lin, LI Yanjun, ZHAN Rongrong, et al. Analysis of internal fault characteristics and longitudinal zero-sequence over-voltage protection performance of large-scale condenser [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(8):145-149.
- [14] HANG J, ZHANG J Z, CHENG M, et al. Online interturn fault diagnosis of permanent magnet synchronous machine using zero-sequence components [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(12):6731-6741.
- [15] 李俊卿. 汽轮发电机励磁绕组动态匝间短路故障的定位研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(7):1775-1781.  
LI Junqing. Research on dynamic interturn short circuit fault location of exciting winding in turbine generators[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(7):1775-1781.
- [16] 李环宇,王小虎,杨超伟,等. 基于误差电流的同步调相机励磁系统晶闸管开路故障诊断[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(23):8159-8169.  
LI Huanyu, WANG Xiaohu, YANG Chaowei, et al. Error-current-based diagnosis of open-circuit faults for thyristor-based excitation system of synchronous condenser [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(23):8159-8169.
- [17] WEI C, LI H Y, WANG X H, et al. Discrimination method of interturn short-circuit and resistive unbalance faults for synchronous condenser [J]. IEEE Access, 2021, 9:129706-129717.
- [18] 罗晓祎,张凤阁. 一种分数槽永磁同步电机的转矩计算方法[J]. 电气工程学报, 2021, 16(3):1-8.  
LUO Xiaoyi, ZHANG Fengge. Torque calculation method of fractional slot permanent magnet synchronous motor [J]. Journal of Electrical Engineering, 2021, 16(3):1-8.
- [19] 王伟,李成博,王小虎,等. 新型同步调相机匝间短路故障机理分析[J/OL]. 中国电机工程学报:1-11 [2023-08-03]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.TM.20230210.184-4.005.html>.  
WANG Wei, LI Chengbo, WANG Xiaohu, et al. Mechanism analysis of inter-turn short circuit fault for new synchronous condenser [J/OL]. Proceedings of the CSEE:1-11 [2023-08-03]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.TM.20230210.184-4.005.html>.
- [20] 王伟,黄思遥,王小虎,等. 基于相位差的同步调相机定子绕组匝间短路故障定位方法[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(18):7268-7277.  
WANG Wei, HUANG Siyao, WANG Xiaohu, et al. A fault location method of stator winding inter-turn short circuit for synchronous condenser based on phase angle difference [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(18):7268-7277.
- [21] 李永刚,姜猛,马明哈. 基于 V 型曲线偏移的大型调相机定子绕组匝间短路故障诊断方法[J]. 大电机技术, 2019(6):1-6.

- LI Yonggang, JIANG Meng, MA Minghan. Fault diagnosis method of stator winding interturn short circuit in large synchronous compensator based on V-shaped curve offset[J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine, 2019(6):1-6.
- [22] 蒋梦瑶, 马宏忠, 陈贞斐, 等. 同步调相机定子绕组匝间短路故障诊断[J]. 电机与控制学报, 2021, 25(7):75-86.
- JIANG Mengyao, MA Hongzhong, CHEN Zhenfei, et al. Fault diagnosis of stator inter-turn short-circuit in synchronous condensers[J]. Electric Machines and Control, 2021, 25(7):75-86.
- [23] 马宏忠, 蒋梦瑶, 李呈营, 等. 一种新型同步调相机定子绕组匝间短路故障诊断方法[J]. 电机与控制学报, 2021, 25(9):35-45.
- MA Hongzhong, JIANG Mengyao, LI Chengying, et al. New fault diagnosis method for stator winding interturn short circuit in synchronous condensers[J]. Electric Machines and Control, 2021, 25(9):35-45.
- [24] 马明哈, 姜猛, 李永刚, 等. 大型双水内冷调相机转子绕组匝间短路故障诊断方法研究[J]. 电机与控制学报, 2021, 25(2):19-27.
- MA Minghan, JIANG Meng, LI Yonggang, et al. Research on fault diagnosis method of turn to turn short circuit in rotor winding of large-scale dual water internal cooling condenser[J]. Electric Machines and Control, 2021, 25(2):19-27.

作者简介:



孙川

孙川(1988),男,硕士,工程师,从事调相机运检工作(E-mail:176316435@qq.com);

徐刚(1967),男,硕士,高级工程师,从事继电保护及励磁相关工作;

李成博(1998),男,博士在读,研究方向为同步调相机故障诊断与状态检测。

### Fault location method for rotor inter-turn short circuit of new synchronous condenser

SUN Chuan<sup>1</sup>, XU Gang<sup>1</sup>, LI Chengbo<sup>2</sup>, WEI Chao<sup>2</sup>, WANG Wei<sup>2</sup>, CHENG Ming<sup>2</sup>

(1. Jiangsu Frontier Electric Power Technology Co., Ltd., Nanjing 211100, China;

2. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

**Abstract:** The inter-turn short circuit fault of winding is a typical serious fault of the new synchronous condenser, which has a serious impact on the long-term operation of the condenser and the stability of the power grid. In order to ensure the reliable and stable operation of the new synchronous condenser, a method of online diagnosis and location of rotor inter-turn short circuit fault is proposed in this paper. Based on the distortion of the air-gap magnetic field magnetomotive force caused by fault it is deduced that the phenomenon of even harmonic circulation will occur in the same phase and double branches of the stator. Through Fourier decomposition of the branch circulation, the obvious characteristic quantity of harmonics is extracted and analyzed. It is concluded that the characteristic quantity is only related to the spatial position of the rotor where the fault is located, and has nothing to do with the number of fault turns. Therefore, this characteristic quantity can help realize fault diagnosis and location. Based on the TTS-300-2 type synchronous condenser which has been put into use on a large scale, a simulation model is established with the actual condenser in the finite element software while an experiment platform is developed with a condenser simulator for experiments. The simulation and experimental results validate the effectiveness of locating rotor inter turn short circuit faults through branch circulating current harmonics.

**Keywords:** synchronous condenser; inter-turn short circuit fault; magnetomotive force; fault location; finite element; rotor winding

(编辑 陆海霞)