

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2026.01.012

# 基于环流的同步调相机不同位置定子匝间短路故障诊断

李俊卿<sup>1</sup>, 黄涛<sup>1</sup>, 韩小平<sup>1</sup>, 张承志<sup>2</sup>, 苑浩<sup>1</sup>, 何玉灵<sup>3</sup>

(1. 华北电力大学电力工程系, 河北 保定 071003; 2. 国网河南省电力公司濮阳供电公司, 河南 濮阳 457000; 3. 华北电力大学机械工程系, 河北 保定 071003)

**摘要:** 同步调相机作为特高压直流输电系统中提供无功补偿和电压支撑的重要设备, 其运行安全性与可靠性对直流输电工程意义重大。针对轻微定子匝间短路难以诊断以及故障槽难以定位的问题, 文中提出一种基于定子支路环流的故障诊断方法。首先, 从定子支路单个线圈磁动势出发, 分析定子匝间短路故障位置对电枢磁动势以及定子支路环流的影响。其次, 搭建同步调相机定子匝间短路的场-路耦合模型, 对不同位置下定子匝间短路的故障特征进行仿真。最后, 总结不同匝间短路故障位置下定子支路环流的变化规律。仿真和实验结果表明, 在同步调相机发生相同匝数的定子匝间短路时, 短路位置越靠近支路绕组轴线位置, 定子支路环流幅值越大; 短路位置越远离绕组轴线位置, 定子支路环流幅值越小。

**关键词:** 同步调相机; 定子匝间短路; 定子支路环流; 故障定位; 故障诊断; 特高压直流输电系统

**中图分类号:** TM342

**文献标志码:** A

**文章编号:** 2096-3203(2026)01-0125-09

## 0 引言

同步调相机作为特高压直流输电系统中提供电压支撑及无功补偿的重要设备, 凭借其优良的动态无功响应能力得到了广泛应用<sup>[1-3]</sup>。

作为大型旋转电机, 同步调相机容量大、结构复杂, 定子匝间短路是其常见故障类型之一<sup>[4]</sup>, 目前主要通过电信号谐波与相位的关系实现同步调相机定子匝间短路故障诊断。文献<sup>[5-6]</sup>分别利用相电流三次谐波和励磁电流二次谐波诊断定子匝间短路故障。文献<sup>[7-8]</sup>提出基于瞬时功率偶次谐波的诊断方法, 实验表明其较相电流三次谐波诊断有更高的灵敏度。文献<sup>[9-10]</sup>分别通过故障相支路电流相位差和零序电压与定子相电流间相位差诊断定子匝间短路。此外, 还可从相电流与励磁电流间的关系以及振动信号方面进行定子匝间短路故障诊断。文献<sup>[11]</sup>利用电枢电流和励磁电流形成的V型曲线偏移程度进行故障诊断。文献<sup>[12-13]</sup>分别以相电流与励磁电流之比和相电流与励磁电流之间的线性关系诊断定子匝间短路故障。文献<sup>[14]</sup>分析了不同励磁电流下同步调相机发生定子匝间短路后无功功率与振动特性的变化特征。除上述从故障机理角度出发的分析外, 还可以采用神经网络方法对调相机定子匝间短路进行故障诊断<sup>[15-16]</sup>。以上文献均针对不同匝数下同步调相机定子匝间短路, 未对同步调相机在不同位置发生定子匝间短路的故障特征进行分析。

收稿日期: 2025-07-26; 修回日期: 2025-09-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52177042)

文献<sup>[17-24]</sup>研究了电机绕组故障时定子支路间环流。文献<sup>[17-18]</sup>推导同步调相机定子匝间短路下故障相两分支电流数值, 并建立有限元仿真模型。文献<sup>[19-22]</sup>分析不同电机在定子匝间短路下支路环流的变化特征。文献<sup>[23-24]</sup>分析汽轮发电机和抽水蓄能发电机的励磁绕组匝间短路故障下定子支路环流变化特征。但上述文献只分析了不同故障类型对支路环流造成的故障特征差异, 未考虑不同位置发生定子匝间短路时的故障特征差异。

因此, 文中从单匝线圈磁动势着手, 理论分析不同位置下发生定子匝间短路时相电势的变化情况, 建立同步调相机定子匝间短路的场-路耦合仿真模型, 对不同位置下定子匝间短路故障相支路间环流的变化规律进行仿真总结, 并通过动模实验对同步电机故障进行模拟, 进而验证理论分析与仿真结果的正确性。

## 1 同步调相机不同位置下定子匝间短路特征分析

文中以 TTS-300-2 型同步调相机为研究对象, 参数见表 1。定子绕组采用星型双分支结构, 每条支路由 8 个线圈串联而成。定子 A 相两支路分别命名为  $a_1$ 、 $a_2$ , B 相和 C 相支路命名类似。

以定子 A 相  $a_1$  支路部分绕组短路为例建立数学模型, 短路示意如图 1 所示。图中数字表示线圈所在槽对应的编号, 外侧为线圈上层边, 内侧为线圈下层边。

假设定子线圈通入电流  $i_c = \sqrt{2}I_c \cos(\omega t)$ ,  $I_c$  为流

表 1 TTS-300-2 型同步调相机主要参数  
Table 1 Main parameters of TTS-300-2 synchronous condenser

参数	数值	参数	数值
额定容量/(MV·A)	300	定子槽数	48
定子侧额定电压/kV	20	转子槽数	32
定子侧额定电流/A	8 660	电机极对数	1
额定励磁电流/A	1 835	并联支路数	2
空载励磁电流/A	705	额定转速/(r·min <sup>-1</sup> )	3 000

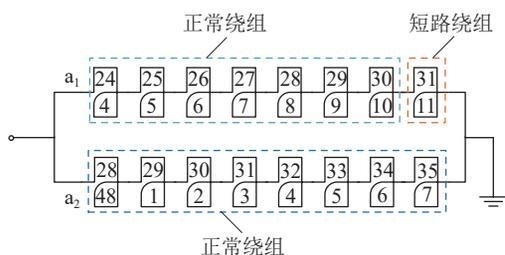


图 1 同步调相机定子匝间短路示意

Fig.1 Stator turn-to-turn short-circuit schematic diagram of synchronous condenser

过线圈电流有效值,  $\omega$  为电流频率。  $i_c$  产生的磁动势为脉振磁动势, 可分解为基波和一系列的高次谐波, 单个线圈产生的磁动势  $f_c(\alpha_m, t)$  为:

$$f_c(\alpha_m, t) = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} I_c w_c \cos(\omega t) \sum_{v=1}^h \frac{1}{v} \cos(v\alpha_m) \sin\left(\frac{\pi}{2}v\right) \quad (1)$$

式中:  $\alpha_m$  为气隙空间某一点距线圈轴线的空间距离;  $w_c$  为线圈匝数;  $v$  为谐波次数;  $h$  为总谐波次数。

以基波磁动势为例, 图 2 为调相机正常时定子 A 相  $a_1$  支路各个线圈及其合成基波磁动势的矢量图。其中,  $F_{c24}$ — $F_{c31}$  为定子 A 相  $a_1$  支路的线圈 24—线圈 31 对应的磁动势;  $F_{a1}$  为正常情况下定子 A 相  $a_1$  支路的合成磁动势。

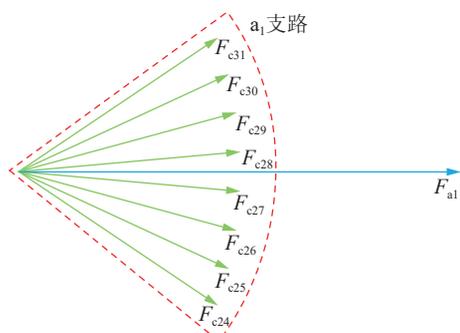


图 2 A 相  $a_1$  支路各个线圈的磁动势

Fig.2 Magnetic potential of each coil in phase A branch  $a_1$

发生定子匝间短路后, 短路匝线圈流过电流增大。线圈产生的磁动势是脉振磁动势, 时间变化仅改变磁动势的大小, 而不改变位置及方向, 因此可

等效认为短路后线圈产生的脉振磁动势能为正常磁动势和短路后产生的额外磁动势两部分。

定子匝间短路后合成的电枢磁动势可认为是正常合成电枢磁动势与短路后产生的额外磁动势之和。而短路匝数不同意味着额外磁动势大小不同, 短路位置不同则意味着额外磁动势位置不同。图 3 为定子匝间短路分别发生在线圈 29 和线圈 31 时,  $a_1$  支路的合成磁动势矢量图。其中,  $F'_{a1}$  和  $F''_{a1}$  分别为线圈 31 和线圈 29 短路后对应的  $a_1$  支路合成磁动势。

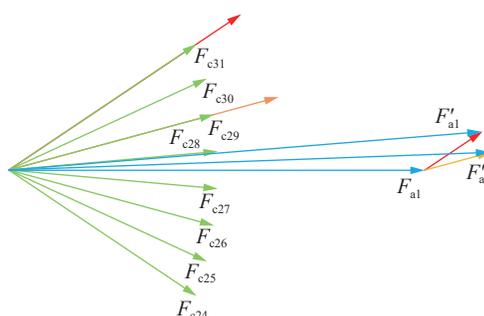


图 3 不同位置定子匝间短路后支路合成磁动势

Fig.3 Synthetic magnetomotive force of stator interturn short-circuit branch at different positions

分析图 3 可知, 定子匝间短路位置离绕组轴线越远, 对支路合成磁动势的影响越小, 离绕组轴线越近, 对支路合成磁动势的影响越大。同理, 该结论对于电枢合成磁动势及气隙合成磁动势同样适用。

正常情况下, A 相磁动势  $f_A(\alpha_m, t)$  为:

$$f_A(\alpha_m, t) = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} I_c (2q w_c) \cos(\omega t) \sum_{v=1}^h \frac{1}{v} k_{wv} \cos(v\alpha_m) \quad (2)$$

式中:  $q$  为每极每相槽数;  $k_{wv}$  为  $v$  次谐波磁动势的绕组因数。定子匝间短路时, 短路环流产生的附加磁动势  $f_{short}(\alpha_m, t)$  为:

$$f_{short}(\alpha_m, t) = F_d \cos(\omega t) \cos(\alpha_m - \alpha'_m) = F_{d+} \cos(\omega t - (\alpha_m - \alpha'_m)) + F_{d-} \cos(\omega t + (\alpha_m - \alpha'_m)) \quad (3)$$

式中:  $F_d$  为脉振磁动势的幅值;  $F_{d+}$ 、 $F_{d-}$  分别为脉振磁动势分解后正向和反向旋转分量的幅值;  $\alpha'_m$  为故障支路短路匝线圈距离绕组轴线的电角度。

以基波磁动势为例, 将三相合成磁动势相加, 正常情况下电枢合成基波磁动势为圆形旋转磁动势, 如式(4)所示。

$$f_a(\alpha_m, t) = F_m \cos(\omega t - \alpha_m) \quad (4)$$

式中:  $f_a(\alpha_m, t)$  为电枢合成基波磁动势;  $F_m$  为电枢合成磁动势的幅值。

当  $a_1$  支路发生定子匝间短路后, 基波合成磁动势为正常时磁动势与短路环流产生的附加磁动势

之和, 短路匝短路环流新增的短路磁动势使正常情况下的合成基波磁动势反向分量无法相互抵消, 合成基波磁动势变为椭圆形。短路线圈磁动势的反向分量在励磁绕组上感应出两倍频的附加电势和电流, 转子励磁电流  $I_f$  变为:

$$I_f = I_{f0} + I_{f2} \cos(2\omega t) \quad (5)$$

式中:  $I_{f0}$  为调相机正常运行时的励磁电流;  $I_{f2}$  为励磁绕组因定子匝间短路感应出的二次谐波电流幅值。

定子匝间短路后励磁电流产生的励磁磁动势  $f_r(\alpha_m, t)$  为:

$$f_r(\alpha_m, t) = (I_{f0} + I_{f2} \cos(2\omega t)) N_r \cos\left(\omega t - \alpha_m + \psi + \frac{\pi}{2}\right) \quad (6)$$

式中:  $N_r$  为励磁绕组总匝数;  $\psi$  为空载电动势与电枢电流之间的夹角。

因此, 忽略 5 次及以上高次谐波后, 同步调相机发生定子匝间短路后总的气隙合成磁动势  $f(\alpha_m, t)$  为:

$$\begin{aligned} f(\alpha_m, t) &= f_r(\alpha_m, t) + f_a(\alpha_m, t) + f_{\text{short}}(\alpha_m, t) = \\ & I_{f0} N \cos\left(\omega t - \alpha_m + \psi + \frac{\pi}{2}\right) + \\ & \frac{I_{f2} N}{2} \left( \cos\left(3\omega t - \alpha_m + \psi + \frac{\pi}{2}\right) + \right. \\ & \left. \cos\left(\omega t + \alpha_m - \psi - \frac{\pi}{2}\right) \right) + F_m \cos(\omega t - \alpha_m) + \\ & F_{d+} \cos(\omega t - (\alpha_m - \alpha'_m)) + F_{d-} \cos(\omega t + (\alpha_m - \alpha'_m)) \end{aligned} \quad (7)$$

短路后绕组的合成磁动势随着  $a_1$  支路短路匝位置的改变而改变, 短路匝越靠近绕组轴线, 对气隙合成磁动势的影响就越大。分析式(7)可知, 同步调相机在发生定子匝间短路后, 定子各支路产生了奇数次谐波电流, 相应地故障相支路环流也出现奇数次谐波。

产生两支路间环流的原因是短路后两支路间存在电压差, 两支路间短路环流结构如图 4 所示。

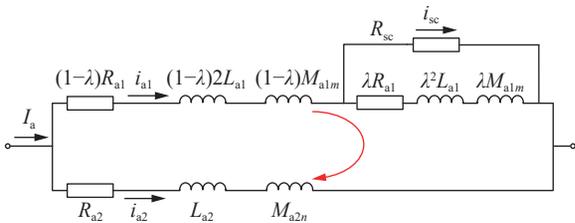


图 4 两支路间环流示意

Fig.4 Schematic diagram of the circulation current between two branches

图 4 中,  $\lambda$  为故障程度系数, 为短路匝数与支路总匝数之比;  $R_{a1}$ 、 $R_{a2}$  分别为  $a_1$  支路和  $a_2$  支路电阻;  $R_{sc}$  为匝间短路点的接触电阻;  $i_{a1}$ 、 $i_{a2}$  分别为流过

$a_1$  支路和  $a_2$  支路的电流;  $L_{a1}$ 、 $M_{a1m}$  分别为  $a_1$  支路的自感以及  $a_1$  支路与支路  $m$  的互感,  $m$  为除  $a_1$  支路外的其他支路;  $L_{a2}$ 、 $M_{a2n}$  分别为  $a_2$  支路的自感以及  $a_2$  支路与支路  $n$  的互感,  $n$  为除  $a_2$  支路外的其他支路;  $i_{sc}$  为流过接触电阻的短路电流。分析图 4 可得,  $a_1$  支路和  $a_2$  支路的电压  $u_{a1}$ 、 $u_{a2}$  分别为:

$$u_{a1} = i_{a1} R_{a1} - i_{sc} \lambda R_{a1} + L_{a1} p i_{a1} + \sum_m M_{a1m} p i_m - (\lambda^2 L_{a1} + M_{a1a1\text{short}}) p i_{sc} \quad (8)$$

$$u_{a2} = i_{a2} R_{a2} + L_{a2} p i_{a2} + \sum_n M_{a2n} p i_n \quad (9)$$

式中:  $p$  为微分算子;  $i_m$ 、 $i_n$  分别为支路  $m$ 、 $n$  的电流;  $M_{a1a1\text{short}}$  为  $a_1$  支路短路绕组与正常绕组的互感。

假设正常情况下, 同步调相机 A 相两支路的电阻和电感大小相同, 即  $R_{a1} = R_{a2} = R_a$ 、 $L_{a1} = L_{a2} = L_a$ 。则两支路间的电压差  $u_{a1a2}$  为:

$$\begin{aligned} u_{a1a2} &= (i_{a1} - i_{a2} - \lambda i_{sc}) R_a + L_a p (i_{a1} - i_{a2}) - \\ & (\lambda^2 L_a + M_{a1a1\text{short}}) p i_{sc} + \sum_m M_{a1m} p i_m - \sum_n M_{a2n} p i_n \end{aligned} \quad (10)$$

可以看出, 发生定子匝间短路后, 两支路间电压差与电机参数有关。其中电阻分量及自感分量仅与被短路绕组匝数有关, 而互感分量除受被短路绕组匝数影响外, 还与被短路绕组所处的空间位置有关。故障匝数不变时, 故障绕组的位置越靠近支路绕组中心, 其与正常绕组间的空间电磁耦合越大, 互感越大, 相应地, 两支路间的电压差越大。

短路时支路间环流的产生是因为故障相两支路间存在电压差, 且电压差随短路匝数的增加而增大。在故障匝数不变的情况下, 故障位置越靠近绕组轴线位置, 电压差越大, 相应地, 故障相支路间环流越大。

## 2 同步调相机不同位置下定子匝间短路仿真

### 2.1 仿真模型搭建

采用 Ansys Maxwell 软件搭建同步调相机有限元模型, 采用 Ansys Twinbuilder 软件搭建同步调相机外电路, 通过场-路耦合的方法对同步调相机定子匝间短路故障进行联合仿真。首先, 同步调相机初始运行于正常状态, 在 0.3 s 时设置定子 A 相  $a_1$  支路发生定子匝间短路, 短路匝接触电阻设置为  $0.3 \Omega$ 。分别对  $a_1$  支路的 8 个线圈设置短路故障以研究不同位置下定子匝间短路的故障特征, 仿真模型整体结构如图 5 所示。

图 5 中,  $E_A$ 、 $E_B$ 、 $E_C$ 、 $I_f$  分别为电网侧三相电压以及励磁电流源;  $R_1$ — $R_6$ 、 $L_1$ — $L_6$  分别为同步调相机定子绕组每条支路的电阻与端部漏感;  $L_9$ 、 $L_{10}$ 、 $L_{11}$

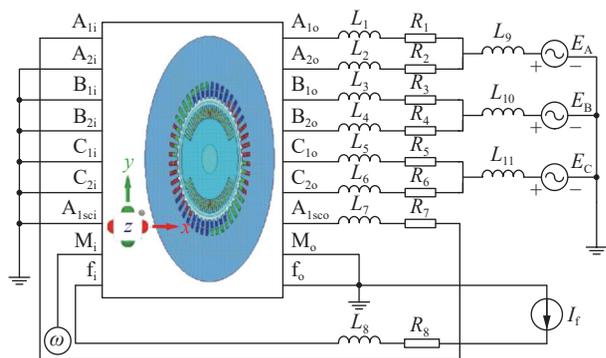


图5 同步调相机仿真示意

Fig.5 Schematic diagram of synchronous condenser simulation

为变压器漏感;  $L_7$ 、 $R_7$  分别为短路绕组电感与电阻;  $L_8$ 、 $R_8$  分别为励磁绕组电感与电阻;  $A_{1i}$ 、 $A_{2i}$ 、 $B_{1i}$ 、 $B_{2i}$ 、 $C_{1i}$ 、 $C_{2i}$  分别为  $a_1$ 、 $a_2$ 、 $b_1$ 、 $b_2$ 、 $c_1$ 、 $c_2$  绕组对应的输入端口;  $A_{1o}$ 、 $A_{2o}$ 、 $B_{1o}$ 、 $B_{2o}$ 、 $C_{1o}$ 、 $C_{2o}$  分别为  $a_1$ 、 $a_2$ 、 $b_1$ 、 $b_2$ 、 $c_1$ 、 $c_2$  绕组对应的输出端口;  $A_{1sci}$ 、 $A_{1sco}$  分别为短路绕组输入、输出端口;  $M_i$ 、 $M_o$  分别为转矩输入、输出端口;  $f_i$ 、 $f_o$  分别为励磁绕组输入、输出端口。

## 2.2 仿真结果分析

首先,对同步调相机正常情况下,两支路电流及环流结果进行仿真分析,以验证模型的准确性。图6为同步调相机正常情况下两支路电流与环流仿真结果,两支路电流大小、相位均相同,环流为0。这是因为两支路的线圈匝数、阻抗、感应电动势均相同,通过前述理论分析可知两支路间不存在电压差,因此两支路间不存在环流。

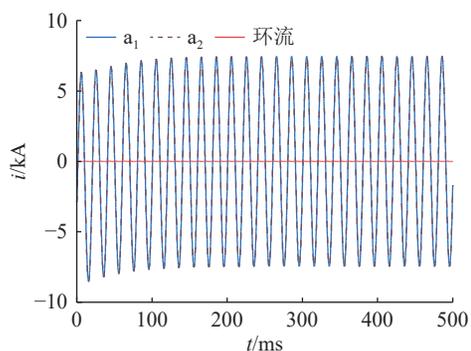


图6 同步调相机正常情况下两支路电流及支路间环流  
Fig.6 The currents of two branches and the circulating current between branches of synchronous condenser under normal conditions

对定子  $a_1$  支路绕组各个槽进行单匝定子匝间短路仿真,图7为不同槽发生单匝定子匝间短路后,其故障支路短路绕组与正常绕组间的互感  $M$ 。

从图7可以看出,同步调相机在发生定子匝间短路后,在短路匝数不变的条件下故障绕组位置的

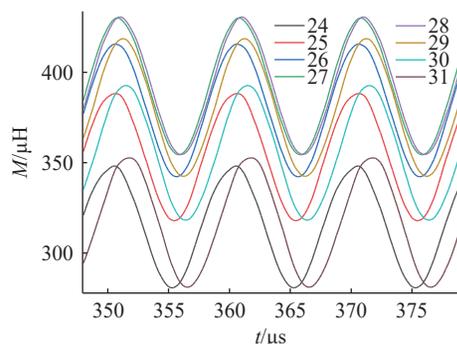


图7 故障支路短路绕组与正常绕组间的互感

Fig.7 The mutual inductances between the faulty circuit's short-circuit winding and the normal winding

不同导致其与正常绕组间的互感大小也不同。故障绕组越靠近绕组轴线,其与故障支路正常绕组间的互感就越大,轴线两端对称的位置发生定子匝间短路对应的互感在幅值上基本相同。

图8为上层边位于24—27槽的各个线圈发生单匝定子匝间短路下支路间环流  $i_{cc}$  的波形,图9为图8的局部放大。故障支路各线圈发生单匝定子匝间短路的支路环流幅值大小如表2所示,不同故障位置下的环流幅值变化趋势如图10所示。

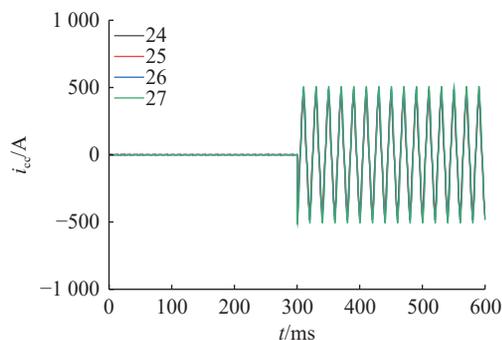


图8 不同短路位置下支路环流对比

Fig.8 Comparison of branch circulation currents under different short-circuit positions

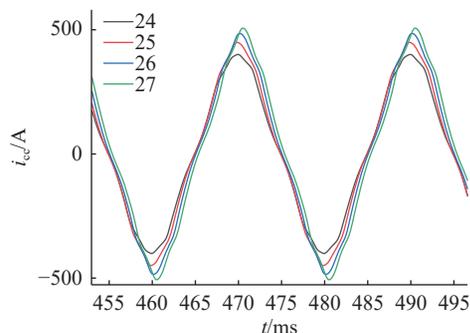


图9 不同短路位置下支路环流对比局部放大

Fig.9 A partial enlarged view of the comparison of branch circulation currents under different short-circuit positions

从图8和图9可以看出,当同步调相机发生定子匝间短路后,故障相两支路间出现较大环流。故

表 2 不同故障位置下支路环流幅值

Table 2 Branch circulating current amplitudes under different fault positions

故障位置	环流幅值/A	故障位置	环流幅值/A
24	401.254	28	521.465
25	449.744	29	493.946
26	485.409	30	454.499
27	506.840	31	403.897

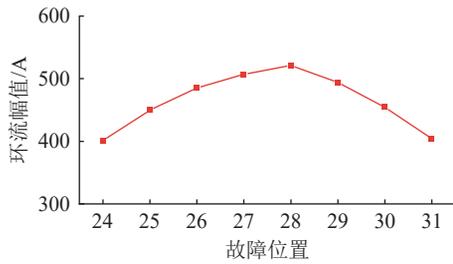


图 10 不同故障位置下环流幅值变化趋势

Fig.10 Variation trend of circulating current amplitude under different fault positions

障位置越靠近支路绕组轴线位置,支路间环流幅值越大,仿真结果与理论分析结果一致。

从表 2 和图 10 可以看出,支路间环流幅值在绕组边界处最低分别为 401.254 A 和 403.897 A,在绕组轴线位置达到了 506.840 A 和 521.465 A。整体趋势符合中间大,两边小的特点,环流幅值在 28 槽发生短路时达到最大值。

为验证理论分析及仿真的可靠性,对定子 A 相  $a_1$  支路设置 2 匝短路,其中短路绕组的上层边所在位置分别为 24 和 25 槽、26 和 27 槽、28 和 29 槽以及 30 和 31 槽,仿真结果如图 11—图 13 所示。

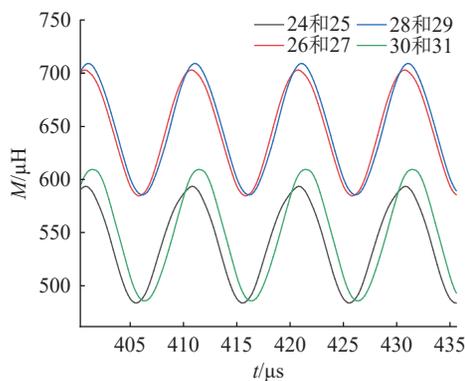


图 11 2 匝短路故障支路短路绕组与正常绕组间的互感  
Fig.11 The mutual inductances between the shorted winding and the normal winding in case of a two-turn short-circuit

分析可知,同步调相机在发生 2 匝定子匝间短路故障时,故障位置越靠近绕组轴线,短路绕组与正常绕组间的互感越大。其中,短路绕组上层边最靠近绕组轴线的两槽发生故障时,其互感幅值分别达

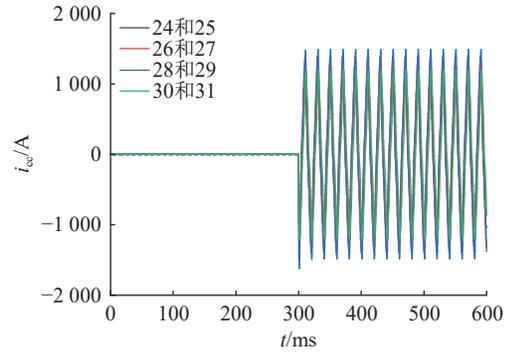


图 12 2 匝短路不同短路位置下支路环流对比

Fig.12 Comparison of branch circulation currents under different short-circuit positions with the two-turn short-circuit

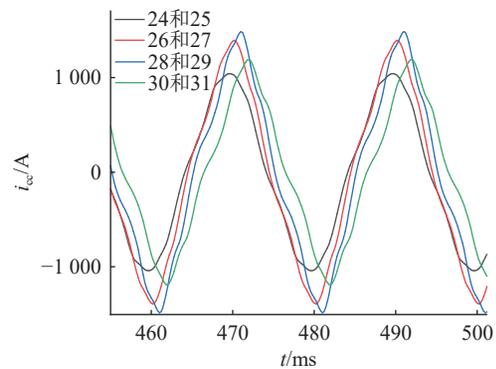


图 13 2 匝短路不同短路位置下支路环流对比局部放大

Fig.13 A partial enlarged view of the comparison of branch circulation currents under different short-circuit positions with the two-turn short-circuit

到了 703  $\mu\text{H}$  与 709  $\mu\text{H}$ ,而距离绕组轴线较远的两槽发生故障时,其互感幅值分别为 593  $\mu\text{H}$  与 609  $\mu\text{H}$ 。关于绕组轴线对称的 2 个位置发生相同匝数的定子匝间短路时,顺时针方向位置的槽短路后的互感较小,支路环流具有和互感相同的变化趋势。因此,当同步调相机不同位置发生相同匝数的定子匝间短路时,短路位置越靠近绕组轴线,其短路环流越大。

对比同步调相机发生 1~4 匝定子匝间短路,其支路间环流仿真波形与频谱分析如图 14 和图 15 所示。图 15 中  $I_{cc}$  为支路环流基波与各次谐波幅值。

可以看出,同步调相机发生不同匝数的定子匝间短路后,故障相支路环流幅值随着短路匝数的增加而增大。当同步调相机短路匝数由 1 匝变为 2 匝后,其支路环流幅值升高约 174%,而由表 2 可知,同步调相机定子发生 1 匝短路时因故障支路位置不同造成的支路环流差异最大约为 30%。因此,当同步调相机发生定子匝间短路时,因故障位置不同导致的环流幅值增大与短路匝数增加造成的环流幅值增大可有效区分。除此之外,同步调相机发

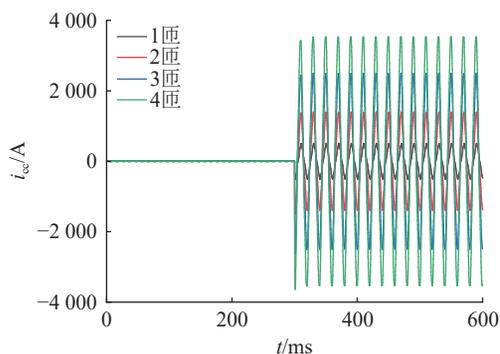


图 14 不同匝数定子匝间短路支路环流对比

Fig.14 Comparison of circulating currents in stator inter-turn short-circuit branches with different numbers of shorted turns

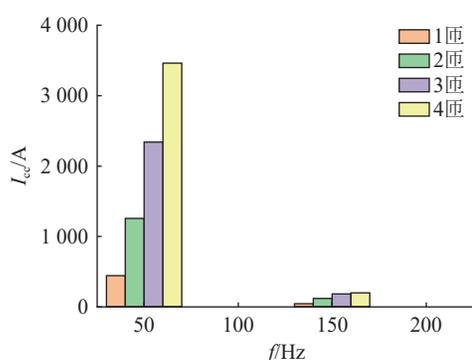


图 15 不同匝数定子匝间短路支路环流谐波对比

Fig.15 Comparison of harmonic components of circulating currents in stator inter-turn short-circuit branches with different numbers of shorted turns

生定子匝间短路时产生的支路环流含有奇数次谐波,且奇数次谐波幅值随故障匝数增加而增大。

### 3 实验验证

为验证仿真与理论分析的正确性,选择动模实验室 MJF-30-6 故障模拟机组进行实验。实验机组相关参数见表 3,故障模拟机组实物见图 16,详细实验电机接线见图 17。

表 3 MJF-30-6 故障模拟机组主要参数  
Table 3 Main parameters of MJF-30-6 fault simulation unit

参数	数值
额定容量/(kV·A)	30
额定电压/kV	400
额定电流/A	43.3
额定转速/(r·min <sup>-1</sup> )	1 000
功率因数	0.8

实验电机定子单条支路有 2%、5%、10%、20% 共 4 个抽头,在 2 个抽头间接入一滑动变阻器,通过调整滑动变阻器的电阻来调整短路程度。定义



图 16 故障模拟机组实物

Fig.16 Physical picture of fault simulation unit

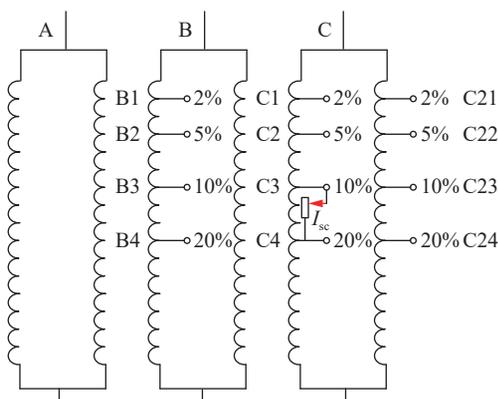


图 17 实验电机接线

Fig.17 Electrical connections for the experimental motor

短路故障程度系数  $f_{\text{degree}}$  [25] 为:

$$f_{\text{degree}} = \frac{I_{\text{sc}}}{I_{\text{c1N}}} \times \frac{n_s}{N_s} \times 100\% \quad (11)$$

式中:  $I_{\text{sc}}$  为故障支路中流经滑动变阻器的电流;  $I_{\text{c1N}}$  为正常工况下支路电流额定值;  $n_s$  为短路绕组匝数;  $N_s$  为支路绕组总匝数。

在不同短路位置的抽头设置相同故障程度的定子匝间短路,检测其故障相支路环流。检测结果如图 18 和图 19 所示,图 20 为 2% 和 1.4% 短路程度下不同位置基波环流幅值对比。

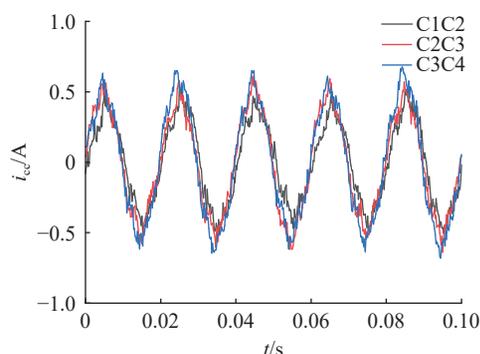


图 18 2% 短路程度时不同短路位置支路环流对比

Fig.18 Comparison of branch circulation currents at different short-circuit positions under 2% short-circuit condition

分析可知,在不同位置发生相同故障程度的定子匝间短路时,短路位置越靠近绕组轴线部分,支

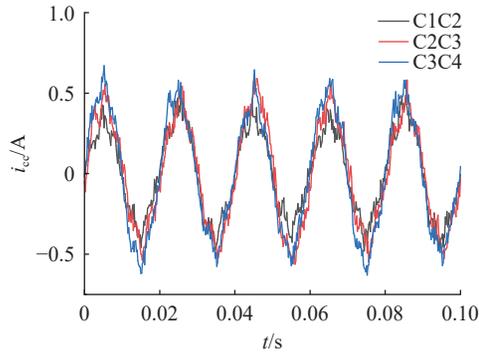


图 19 1.4% 短路程度时不同位置支路环流对比

Fig.19 Comparison of branch circulation currents at different positions under 1.4% short-circuit condition

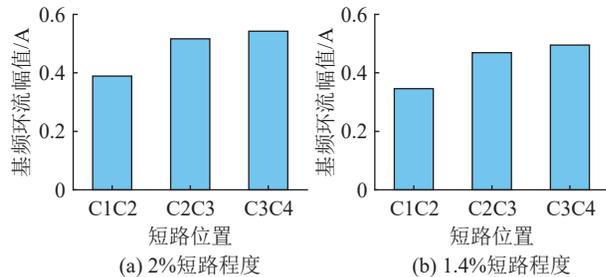


图 20 不同短路程度下不同短路位置基波环流幅值对比

Fig.20 Comparison of fundamental wave circulating current amplitudes at different short-circuit positions with different short-circuit conditions

路环流幅值越大。对其进行傅里叶频谱分析可知,发生 2% 短路程度的定子匝间短路时,不同位置的基波环流幅值分别为 0.389、0.516、0.542 A;发生 1.4% 短路程度的定子匝间短路时,不同位置的基波环流幅值分别为 0.346、0.469、0.495 A。短路位置越靠近绕组轴线则基频环流幅值越大。实验结果与理论分析、仿真结果一致,验证了上述分析的正确性。

对实验电机进行不同短路程度的定子匝间短路实验,分别调节 C1C2 端子所接滑动变阻器的阻值,使其分别流过 0.5、0.4、0.3 A 的电流。实验结果如图 21 和图 22 所示。

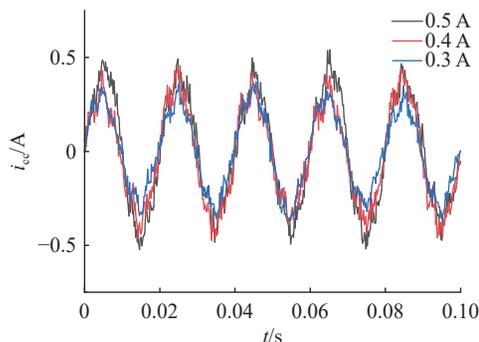


图 21 相同位置不同短路程度的支路环流对比

Fig.21 Comparison of branch circulation currents with different short-circuit conditions at the same position

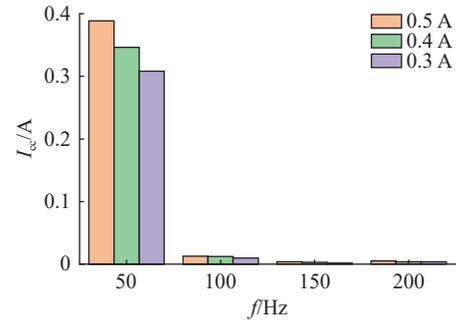


图 22 相同位置不同短路程度的支路环流谐波对比

Fig.22 Comparison of branch circulation current harmonics with different short-circuit conditions at the same position

分析可知,当电机发生不同短路程度的定子匝间故障时,故障程度越大,故障相支路环流幅值越大,且环流中含有奇数次谐波。图 22 中,由于电机使用年限较长,其电机内部含有一定程度的偏心故障,因此环流中出现偶数次谐波。但支路环流幅值随故障程度增大而增大以及奇数次谐波的出现符合理论分析与仿真实验。因此可以采用定子支路环流作为同步调相机定子匝间短路的诊断特征量。

## 4 结论

文中研究同步调相机不同位置发生定子绕组匝间短路故障时的定子支路环流特征,分析影响支路环流特征的因素,并通过场-路耦合仿真与实验验证了理论分析结果的正确性。主要结论如下:

(1) 同步调相机在正常情况下,两支路有效匝数及阻抗均相等,两支路电流相同,支路间不存在支路环流。发生定子匝间短路后,故障相两支路间会产生定子环流并包含 3 次谐波。

(2) 当同步调相机发生相同匝数的定子匝间短路时,故障位置的不同会造成定子环流的幅值改变。短路位置越靠近绕组轴线,环流幅值越大;短路位置越远离绕组轴线,环流幅值越小。

(3) 当同步调相机相同位置发生定子匝间短路时,短路程度越大,故障相两支路间环流越大,可以采用支路环流对同步调相机定子匝间短路进行故障诊断。

### 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 陈晓强,康纪良,刘超,等.基于测量阻抗动态轨迹的大型调相机失磁保护[J].电力工程技术,2024,43(2):218-228.

- CHEN Xiaoqiang, KANG Jiliang, LIU Chao, et al. Loss of excitation protection for large condenser based on measured impedance dynamic trajectory[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2024, 43(2): 218-228.
- [3] 郭强, 李志强. 同步调相机发展综述[J]. *中国电机工程学报*, 2023, 43(15): 6050-6064.
- GUO Qiang, LI Zhiqiang. Summarization of synchronous condenser development[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2023, 43(15): 6050-6064.
- [4] 李俊卿, 黄涛, 张承志. 调相机故障诊断及研究进展[J]. *电机与控制应用*, 2023, 50(10): 1-8, 16.
- LI Junqing, HUANG Tao, ZHANG Chengzhi. Progress and research in fault diagnosis of synchronous condenser[J]. *Electric Machines & Control Application*, 2023, 50(10): 1-8, 16.
- [5] JIANG M Y, MA H Z, LIN Y D, et al. Stator interturn short-circuit fault diagnosis in synchronous condensers based on the third current harmonic[C]//2020 International Conference on Electrical Machines (ICEM). Gothenburg, Sweden. IEEE, 2020: 1438-1444.
- [6] WANG X H, XU S M, YE Y L, et al. A fault diagnosis strategy for stator windings inter-turn short circuit of synchronous condenser[C]//2021 24th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS). Gyeongju, Korea, Republic of. IEEE, 2021: 2616-2620.
- [7] 蒋梦瑶, 马宏忠, 陈滇斐, 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.
- [8] 谷兵, 蒋琛, 黄思遥, 等. 基于对称分量法的调相机定子故障特征分析[J]. *电力工程技术*, 2024, 43(2): 210-217.
- GU Bing, JIANG Chen, HUANG Siyao, et al. Fault feature analysis of stator winding for synchronous condenser based on symmetrical component method[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2024, 43(2): 210-217.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 李永刚, 姜猛, 马明晗. 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.
- [12] JIANG M Y, MA H Z, ZHU H, et al. Fault indicator based on stator current under early stage SISC in synchronous condensers[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2023, 145: 107044.
- [13] ZHOU J, RUAN L, ZHOU L B, et al. A method of evaluating the stator inter-turn short circuit fault of synchronous condenser[C]//2018 21st International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS). Jeju, Korea. IEEE, 2018: 520-524.
- [14] JIANG M Y, MA H Z, ZHANG Y L, et al. Reactive power characteristics and vibration properties under SISC in synchronous condensers[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2021, 133: 107318.
- [15] 李俊卿, 张承志, 韩小平, 等. 基于 Hotelling T2-BiLSTM 的同步调相机故障诊断方法[J]. *智慧电力*, 2024, 52(7): 96-102, 127.
- LI Junqing, ZHANG Chengzhi, HAN Xiaoping, et al. Fault diagnosis method of synchronous condenser based on Hotelling T2-BiLSTM[J]. *Smart Power*, 2024, 52(7): 96-102, 127.
- [16] QIAN B Y, HUANG J J, ZHU X X, et al. Research on the fault diagnosis method of a synchronous condenser based on the multi-scale zooming learning framework[J]. *Sustainability*, 2022, 14(22): 14677.
- [17] 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]. *中国电机工程学报*, 2024, 44(3): 1195-1205.
- WANG Wei, LI Chengbo, WANG Xiaohu, et al. Mechanism analysis of inter-turn short circuit fault for new synchronous condenser[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2024, 44(3): 1195-1205.
- [18] SUN C, WANG X H, WEI Z K, et al. Calculation of parallel branch currents of synchronous condenser with stator inter-turn fault[C]//2021 24th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS). Gyeongju, Korea, Republic of. IEEE, 2021: 1636-1640.
- [19] 何玉灵, 刘翔奥, 代德瑞, 等. 双馈异步发电机定子匝间短路对并联支路环流特性的影响[J]. *华北电力大学学报(自然科学版)*, 2025, 52(1): 74-81.
- HE Yuling, LIU Xiangao, DAI Derui, et al. Effect of stator interturn short circuit on circulating current characteristics of parallel branches in doubly fed induction generator[J]. *Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition)*, 2025, 52(1): 74-81.
- [20] 何玉灵, 万书亭, 唐贵基, 等. 定子匝间短路对发电机并联支路环流特性的影响[J]. *电机与控制学报*, 2013, 17(3): 1-7.
- HE Yuling, WAN Shuting, TANG Guiji, et al. Effects of stator interturn short circuit on the circulating current inside the parallel branch loop[J]. *Electric Machines and Control*, 2013, 17(3): 1-7.
- [21] 梁艳萍, 贾国超. 转子偏心对发电机非正规绕组环流损耗的

- 影响[J]. 电机与控制学报, 2017, 21(9): 38-46.
- LIANG Yanping, JIA Guochao. Influence of rotor eccentricity on circulating current losses in irregular winding of generator[J]. *Electric Machines and Control*, 2017, 21(9): 38-46.
- [22] 赵勇, 王路路, 赵祎涵, 等. 双馈风力发电机定子绕组匝间短路故障特征提取[J]. 热力发电, 2016, 45(8): 63-67.
- ZHAO Yong, WANG Lulu, ZHAO Yihan, et al. Feature extraction of stator winding inter-turn short circuit fault in doubly-fed induction generator[J]. *Thermal Power Generation*, 2016, 45(8): 63-67.
- [23] 武玉才, 马冠华. 核电汽轮发电机转子绕组匝间短路的定子环流特征[J]. 电机与控制学报, 2020, 24(3): 45-52, 61.
- WU Yucai, MA Guanhua. Stator circulating current characteristics in nuclear turbine generator after rotor windings inter-turn short circuit fault[J]. *Electric Machines and Control*, 2020, 24(3): 45-52, 61.
- [24] 苟小军, 张玮, 李永刚, 等. 抽水蓄能发电机励磁绕组匝间短路的环流特性分析[J]. 大电机技术, 2023(4): 28-34.
- GOU Xiaojun, ZHANG Wei, LI Yonggang, et al. Analysis of the circulating current characteristics of inter-turn short circuits in the excitation winding of a pumped storage generator[J]. *Large Electric Machine and Hydraulic Turbine*, 2023(4): 28-34.
- [25] 张玉良, 马宏忠, 朱昊, 等. 基于稀疏深度森林的调相机轻微定子匝间短路故障诊断[J]. 高电压技术, 2022, 48(5): 1875-1883.
- ZHANG Yuliang, MA Hongzhong, ZHU Hao, et al. Fault diagnosis of slight stator inter-turn short circuit of synchronous compensator based on sparse deep forest[J]. *High Voltage Engineering*, 2022, 48(5): 1875-1883.

## 作者简介:



李俊卿

李俊卿(1967), 女, 博士, 教授, 研究方向为电机及系统分析、电气设备状态监测与故障诊断、新能源电力系统大数据分析与应用(E-mail: [junqing03@163.com](mailto:junqing03@163.com));

黄涛(2000), 男, 硕士在读, 研究方向为深度学习、电气设备状态监测与故障诊断;

韩小平(1999), 女, 硕士在读, 研究方向为深度学习、电气设备状态监测与故障诊断。

## Fault diagnosis of stator inter-turn short-circuit of different positions in synchronous condenser based on stator circulating currents

LI Junqing<sup>1</sup>, HUANG Tao<sup>1</sup>, HAN Xiaoping<sup>1</sup>, ZHANG Chengzhi<sup>2</sup>, YUAN Hao<sup>1</sup>, HE Yuling<sup>3</sup>

(1. Department of Electrical Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China;

2. State Grid Puyang Power Supply Company of Henan Electric Power Company, Puyang 457000, China;

3. Department of Mechanical Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

**Abstract:** Synchronous condenser is an important equipment to provide reactive power compensation and voltage support in the ultra-high voltage direct current (UHVDC) transmission system. The safety and reliability of its operation are of great significance to UHVDC projects. A fault diagnosis method based on stator branch circulating current to address the challenges of diagnosing minor stator inter-turn short-circuits (SISC) and locating fault slots is proposed in this paper. Firstly, from the perspective of a single coil in the stator branch, the influence of different positions of SISC faults on the armature magnetomotive force and stator branch circulating current is analyzed. Secondly, a field-circuit coupling model for SISC in synchronous condenser is established to simulate the fault characteristics at different positions. Finally, the variation law of the stator branch circulating current is summarized at different positions. The results of simulation and experiment show that when the number of turns of SISC stays the same, the closer the short circuit position is to the axis of the branch winding, the larger the amplitude of the stator circulating current, the further the short circuit position is from the winding axis, the smaller the amplitude of the stator branch circulating current.

**Keywords:** synchronous condenser; stator inter-turn short-circuit; stator branch circulation current; fault localization; fault diagnosis; ultra-high voltage direct current transmission system

(编辑 方晶)