

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2024.02.022

基于对称分量法的调相机定子故障特征分析

谷兵¹, 蒋琛¹, 黄思遥², 蔚超², 王伟², 程明²

(1. 江苏方天电力技术有限公司, 江苏 南京 211102;

2. 东南大学电气工程学院, 江苏 南京 210096)

摘要:传统同步调相机定子绕组匝间短路故障机理分析方法通常认为电机定子电流接近三相对称,并以此为基础建立同步调相机故障电流的数学表征。但是,一旦发生定子绕组匝间短路故障,同步调相机三相定子电流的对称性将遭到破坏,使得传统故障机理分析方法所建立的数学表征无法准确反映电机内部电气量的变化。文中通过引入对称分量法,建立故障后同步调相机瞬时有功/无功功率的数学模型,提出利用瞬时有功/无功功率中的2次谐波进行定子绕组匝间短路故障诊断。仿真和实验的结果表明:相较于利用定子电流3次谐波与基波幅值之比诊断故障的传统方法,文中方法在轻微故障状态下能提高至少7倍的诊断灵敏度,更易完成早期故障诊断。同时,所提方法中的故障特征量不受同步调相机工况和故障位置的影响,具有强鲁棒性。

关键词:同步调相机;定子绕组匝间短路;对称分量法;瞬时功率;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(2024)02-0210-08

0 引言

我国发电资源与电力负荷呈逆向分布,因此适用于远距离、大容量输电的特高压直流输电系统近年来得到了大力发展^[1-3]。针对特高压直流送、受端动态无功供给不足和电压支撑能力较弱的技术瓶颈,新型同步调相机能够有效应对高压直流和新能源接入电网带来的无功调节需求,因而其作为一种性能优良的动态无功补偿装置在系统中得以大规模应用^[4-6]。根据文献[7]中的工业调查,定子绕组故障占电机总故障数的37%,而定子绕组匝间短路是其中最为常见的电气故障。同时匝间短路也被视为最坏的故障情况,因为其往往只涉及少数匝,这使得短路路径的阻抗非常低,导致匝间短路形成的故障电流也会非常大。可见,若未能在早期故障时刻识别并处理故障,故障将会在定子绕组上产生极大的热量,并进一步降低绕组和叠片之间的绝缘性,最终导致完全故障^[8-10]。

同步调相机在电力系统中承担着调节电网电压、平衡系统无功功率的作用,需要根据电力系统的无功需求切换自身的运行状态,因此其承受过电流冲击的频率也高于一般电机^[11-12]。同步调相机的这些特点,使之不仅在维护电力系统安全稳定运行方面具有重要作用,也使其需要具备比一般电机更加可靠的故障快速检测系统。因此,分析和研究大型同步调相机在定子绕组匝间短路故障下的运

行特征,对于保证调相机可靠运行、维护电网的安全稳定有着至关重要的意义^[13-14]。

由于同步调相机定子的结构与传统汽轮机、水轮机相似,因此对于这两者定子绕组匝间短路的机理分析值得借鉴^[15-20]。基于此,国内外学者已对同步调相机定子绕组匝间短路故障进行了一些研究。文献[21]详细介绍新型调相机状态监测技术和故障诊断技术的现状;文献[22]综合考虑气隙静偏心和匝间短路对同步调相机定子绕组的影响,提出一种用于分析该电机的数学模型,在该模型基础上研究发现同步调相机发生定子绕组匝间短路故障后,定子绕组内各次谐波电流幅值、相位将不再对称;文献[23]分析发生定子匝间短路故障后,励磁电流的变化对电枢电流产生的影响;文献[24]分析故障后支路电流间相位差的变化;文献[25]利用电阻平衡网络获取同步调相机零序电压的电气量信息,可以诊断出定子匝间短路故障的发生位置;文献[26]基于三相电流对称这一假设条件,对定子匝间短路故障后同步调相机的有功功率进行理论推导,发现以有功功率2次谐波作为定子绕组匝间故障诊断特征量可以获得更好的诊断效果。但是,同步调相机在发生定子匝间短路故障后,其三相电流的对称性遭到破坏。

基于上述考虑,文中突破定子绕组匝间短路故障后同步调相机三相电流对称这一假设条件,通过对称分量法更为准确地揭示定子绕组匝间短路故障同步调相机的功率演变规律,并进行相应的仿真和实验验证。

收稿日期:2023-10-26;修回日期:2023-12-14

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51991384)

1 瞬时有功/无功功率数学模型

我国目前使用的同步调相机,其定子绕组常采用三相两分支结构,如图1所示。

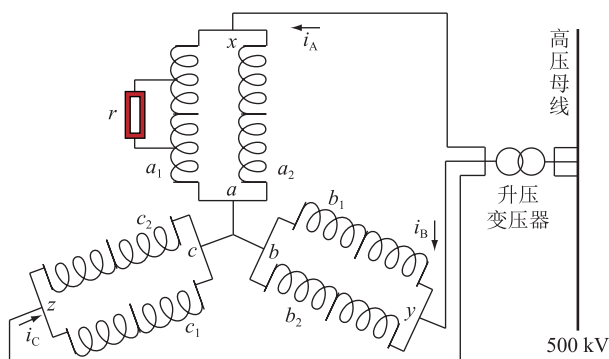


图1 定子绕组匝间短路故障模型

Fig.1 Fault model of stator winding inter turn short-circuit

图1中, i_A 、 i_B 、 i_C 为三相定子电流; r 为过渡电阻; a 、 b 、 c 为三相定子绕组与中性点相连端点; x 、 y 、 z 为三相定子绕组与升压变压器相连端点。未作特殊说明,文中假设定子绕组匝间短路故障发生在调相机A相 a_1 支路。故障将 a_1 支路绕组分为健康和故障两部分。

文献[22]指出,同步调相机定子绕组发生匝间短路故障后,定子电流不再对称,将出现3、5、7等奇次谐波,其中尤以3次谐波幅值较大。考虑到同步调相机组采用三相三线制系统,无零序电流通路。因此在忽略高次谐波后,可将三相定子电流分解为基波、3次谐波的正序与负序分量的加和形式;同时调相机定子侧电压被钳在高压电网上,为对称正弦波。故可将同步调相机在发生定子绕组匝间短路故障下的定子电压和电流表示为式(1)和式(2)。

$$\begin{cases} u_A = U \cos(\omega t - \varphi) \\ u_B = U \cos(\omega t - \varphi - 2\pi/3) \\ u_C = U \cos(\omega t - \varphi + 2\pi/3) \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} i_A = I_{1+} \cos(\omega t - \varphi_{1+}) + I_{1-} \cos(\omega t - \varphi_{1-}) + \\ I_{3+} \cos(3\omega t - \varphi_{3+}) + I_{3-} \cos(3\omega t - \varphi_{3-}) \\ i_B = I_{1+} \cos(\omega t - \varphi_{1+} - 2\pi/3) + I_{1-} \cos(\omega t - \\ \varphi_{1-} + 2\pi/3) + I_{3+} \cos(3\omega t - \varphi_{3+} - 2\pi/3) + \\ I_{3-} \cos(3\omega t - \varphi_{3-} + 2\pi/3) \\ i_C = I_{1+} \cos(\omega t - \varphi_{1+} + 2\pi/3) + I_{1-} \cos(\omega t - \\ \varphi_{1-} - 2\pi/3) + I_{3+} \cos(3\omega t - \varphi_{3+} + 2\pi/3) + \\ I_{3-} \cos(3\omega t - \varphi_{3-} - 2\pi/3) \end{cases} \quad (2)$$

式中: U 为定子A相电压幅值; u_A 、 u_B 、 u_C 为三相定子电压; ω 为角频率; φ 为定子A相电压初始相位角;

I_{1+} 、 I_{1-} 、 I_{3+} 、 I_{3-} 分别为定子A相电流内基波、3次谐波中正序分量和负序分量的幅值; φ_{1+} 、 φ_{1-} 、 φ_{3+} 、 φ_{3-} 分别为定子A相电流内基波、3次谐波中正序分量和负序分量的初始相位角。

根据文献[27]提出的瞬时功率理论,三相瞬时有功功率 $p(t)$ 和无功功率 $q(t)$ 的表达式为:

$$\begin{cases} p(t) = u_A i_A + u_B i_B + u_C i_C \\ q(t) = [(u_B - u_C) i_A + (u_C - u_A) i_B + \\ (u_A - u_B) i_C] / \sqrt{3} \end{cases} \quad (3)$$

联立式(1)一式(3),则在定子绕组匝间短路故障下,同步调相机的瞬时有功、无功功率可表示为:

$$\begin{cases} p(t) = \\ 1.5U(I_{1+} \cos(\varphi - \varphi_{1+}) + I_{1-} \cos(2\omega t - \varphi - \varphi_{1-}) + \\ I_{3+} \cos(2\omega t + \varphi - \varphi_{3+}) + I_{3-} \sin(4\omega t - \varphi - \varphi_{3-})) = \\ 1.5(P_{0+} \cos(\varphi - \varphi_{1+}) + P_{0-} \cos(2\omega t - \varphi - \varphi_{1-}) + \\ P_{2+} \cos(2\omega t + \varphi - \varphi_{3+}) + P_{2-} \sin(4\omega t - \varphi - \varphi_{3-})) \\ q(t) = \\ 1.5(-Q_{0+} \sin(\varphi - \varphi_{1+}) + Q_{0-} \sin(2\omega t - \varphi - \varphi_{1-}) - \\ Q_{2+} \sin(2\omega t + \varphi - \varphi_{3+}) + Q_{2-} \sin(4\omega t - \varphi - \varphi_{3-})) \end{cases} \quad (4)$$

式中: P_{0+} 、 P_{0-} 、 P_{2+} 、 P_{2-} 分别为瞬时有功功率正负序直流分量和2次谐波分量的幅值; Q_{0+} 、 Q_{0-} 、 Q_{2+} 、 Q_{2-} 分别为瞬时无功功率正负序直流分量和2次谐波分量的幅值。当同步调相机正常运行时, $I_{1+} = I_A$ 、 $I_{1-} = I_{3+} = I_{3-} = 0$ 。其中, I_A 为同步调相机正常运行时定子绕组A相电流幅值的有效值。此时调相机发出的有功功率和无功功率中仅含直流分量。由式(4)可见,定子绕组发生匝间短路故障后,在有功功率和无功功率中,除原有的直流分量大小发生改变外,还将出现2次、4次谐波。因此,可以将瞬时有功/无功功率中的2次谐波作为同步调相机定子匝间短路的故障诊断特征量。

2 仿真分析

2.1 二维有限元模型

文中选取江苏某换流站1台TTS-300-2型同步调相机作为研究对象,其结构参数如表1所示。利用ANSYS Electronics Desktop软件构建其二维有限元模型,如图2所示。

a_1 支路绕组连接见图3,其中线圈①—⑧用以模拟同一绕组内不同位置发生匝间短路故障的情况。考虑到目前发生较严重的匝间短路故障时,同步调相机机组会采取继电保护措施,因此对于故障严重程度度的仿真仅选取1匝短路的情况。

表 1 同步调相机模型参数

Table 1 Model parameter of synchronous condenser

参数	数值	参数	数值
额定容量/Mvar	300	定子槽数	48
最大进项运行能力/Mvar	200	转子槽数	32
额定功率因数	0	定子每槽导体数	2
定子额定电压/kV	20	定子绕组支路数	2
额定励磁电压/V	415	横轴同步电抗 $X_d/\%$	148
额定励磁电流/A	1 800	定子铁心长度/mm	6 000
额定频率/Hz	50	转子本体长度/mm	5 950
额定转速/($r \cdot \text{min}^{-1}$)	3 000	气隙(单边)/mm	70

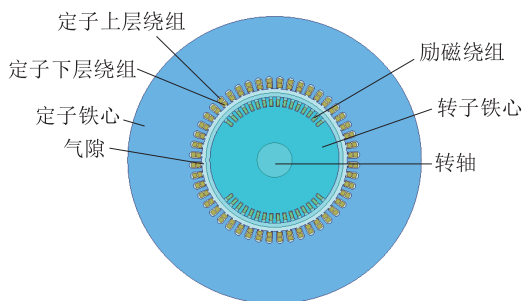


图 2 同步调相机二维有限元模型

Fig.2 Two dimensional finite element model of synchronous condenser

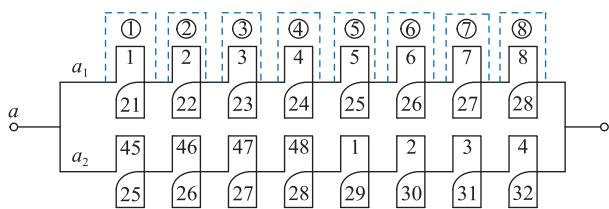


图 3 a_1 支路绕组连接方式

Fig.3 Connection mode of branch winding a_1

图 4 为有限元耦合外电路模型,其中图 4(a) 为定子部分。通过改变短路绕组 a_{11} 可以控制绕组被短路匝数。 r 为过渡电阻,用以模拟不同故障程度下的非金属性短路; k 为开关,用来控制短路故障的发生。图 4(b)为转子部分, I_r 为励磁电流。

2.2 仿真分析

当同步调相机正常运行时,定子电流波形和快速傅里叶变换(fast Fourier transform, FFT)分析结果如图 5 所示,相应瞬时无功功率的 FFT 分析结果如图 6 所示。

由图 5、图 6 可见,三相定子电流基波幅值均为 12.80 kA,无 3 次谐波分量,因此三相定子电流对称。此时同步调相机发出的功率除自身损耗部分为有功功率外,其余均为无功功率,且只有直流量,无高次谐波。

控制开关 k 闭合,使 a_1 支路发生短路故障。设

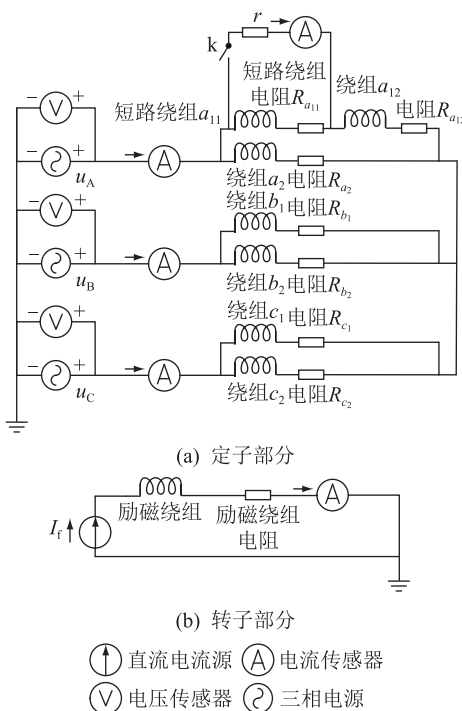


图 4 有限元耦合外电路模型

Fig.4 Finite element coupled external circuit model

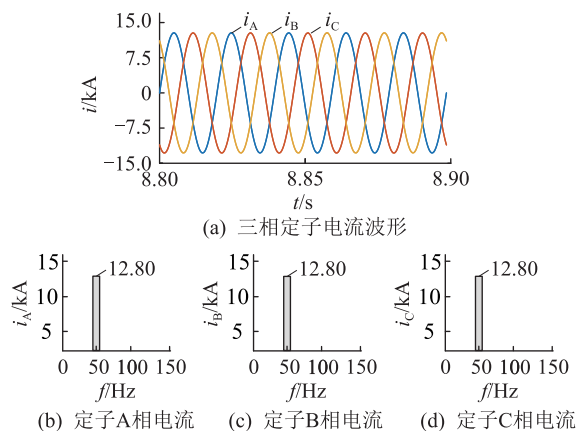


图 5 仿真中健康运行时的定子电流和 FFT 分析结果

Fig.5 Stator current and FFT analysis results under normal operation in simulation

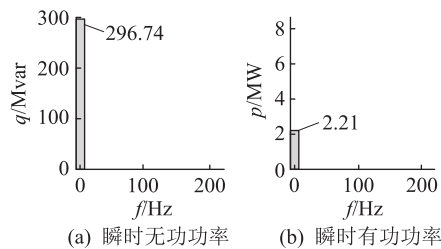


图 6 仿真中健康运行时瞬时无功功率的 FFT 分析结果

Fig.6 FFT analysis results of instantaneous power under normal operation in simulation

过渡电阻 $r=1 \Omega$ 、短路匝数比 $\mu=0.125$,这是程度较轻的匝间短路故障。此时定子三相电流变为不对

称正弦波,如图7所示。图8为此时瞬时无功功率和有功功率的FFT分析结果。

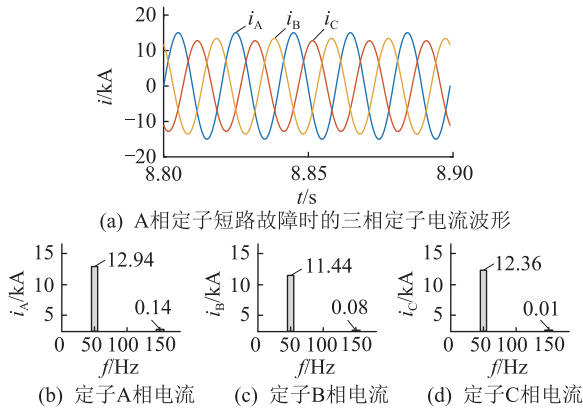


图7 仿真中A相故障时定子电流和FFT分析结果

Fig.7 Stator current and FFT analysis results under phase A fault in simulation

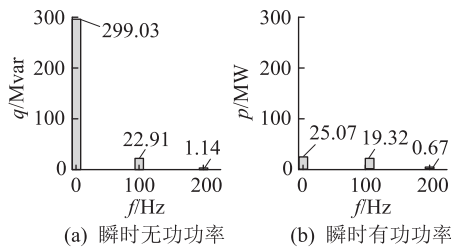


图8 仿真中A相故障时瞬时无功功率的FFT分析结果

Fig.8 FFT analysis results of instantaneous power under phase A fault in simulation

比较图7、图8可见,定子电流中出现的3次谐波幅值相较于基波幅值极小,即使在3次谐波幅值最大的故障相A相中,基波电流幅值为12.94 kA,3次谐波电流幅值为0.14 kA,3次谐波电流幅值仅为基波电流幅值的1.1%;同时考虑到有限元仿真软件并不会计及测量噪声,而在实际工程应用中电流传感器会产生测量噪声,电流真实发生较小波形畸变时,传感器所反馈的信息将无法真实描述实际的电流变化情况。而瞬时有功、无功功率中出现的2次谐波,其幅值分别达到直流分量幅值的77%和7.6%,利用其进行同步调相机早期匝间短路故障诊断,灵敏度至少达到了利用定子电流3次谐波与基波幅值之比作为诊断方法的7倍,明显是更易观测的故障特征量。

分别短接图3中线圈①—⑧来模拟A相绕组不同位置发生相同程度的匝间短路故障,设过渡电阻 $r=1\ \Omega$,短路匝数比 $\mu=0.125$ 。各线圈发生故障时同步调相机瞬时有功/无功功率2次谐波的幅值如图9所示。可见,位置的改变不会使瞬时有功/无功功率2次谐波的幅值发生突变。即故障位置的改变并不会影响文中所述故障特征量的准确性。

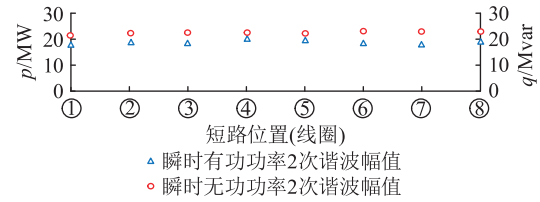


图9 不同短路位置下功率2次谐波的幅值

Fig.9 Second harmonic amplitude of power at different short-circuit fault positions

3 实验验证

为了验证所提故障特征量的有效性和准确性,现搭建如图10所示的同步调相机匝间短路故障实验平台。其中,用小功率电励磁同步电机代替同步调相机。相关参数如表2所示。

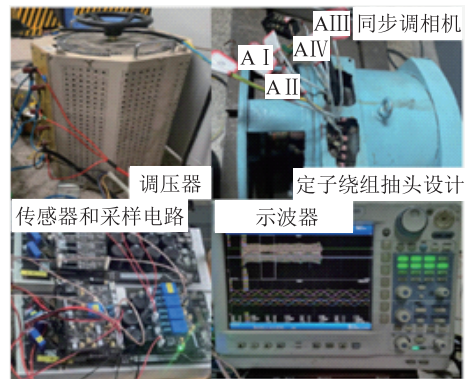


图10 实验平台

Fig.10 Experimental platform

表2 电励磁同步发电机参数

Table 2 Parameters of the electrically excited synchronous generator

参数	数值	参数	数值
额定功率/kW	2	励磁额定电压/V	60
定子额定电流/A	3.6	励磁额定电流/A	2.4
定子额定电压/V	400	额定频率/Hz	50
功率因数	0.6	额定转速/($r \cdot \min^{-1}$)	1 500

3.1 A相绕组发生匝间短路故障

当调相机额定运行时,定子电流波形和FFT分析结果如图11所示,相应的瞬时无功功率FFT分析结果如图12所示。可见,三相定子电流基波幅值均为2.39 A,除基波分量外均无高次谐波,三相定子电流对称;机组发出额定有功功率1.20 kW和无功功率1.60 kvar,两者所含高次谐波极小,均是由测量噪声产生的。

短接图10中A I-A II抽头,即设置过渡电阻 $r=3\ \Omega$,短路匝数比 $\mu=0.125$ 。A相绕组发生匝间短路故障下的三相定子电流和瞬时无功功率FFT分析结果分别如图13和图14所示。可见,发生定子匝

间短路故障后,定子电流与瞬时功率中均会出现高次谐波。定子电流中最大的3次谐波幅值出现在A相和C相,均为0.03 A,仅占基波幅值的1%左右;而瞬时功率中的2次谐波幅值能达到直流分量幅值的7%以上。该结果与理论和仿真分析相符,即瞬时有功/无功功率的2次谐波分量是更易观测的故障特征量。

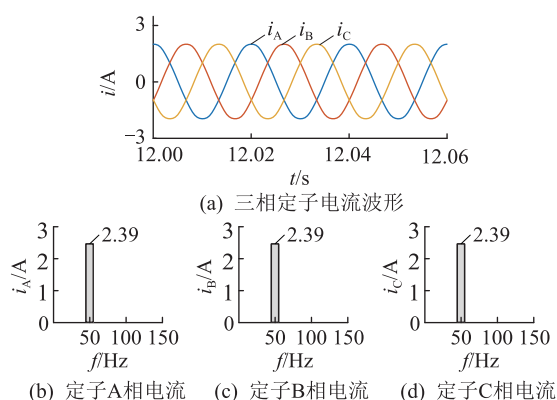


图 11 实验中健康运行时的定子电流和 FFT 分析结果

Fig.11 Stator current and FFT analysis results under normal operation in experiment

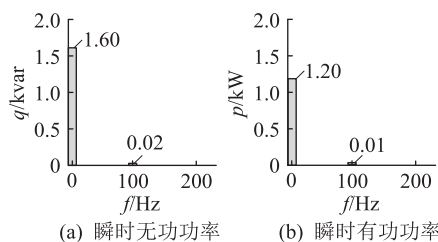


图 12 实验中健康运行时瞬时功率的 FFT 分析结果

Fig.12 FFT analysis results of instantaneous power under normal operation in experiment

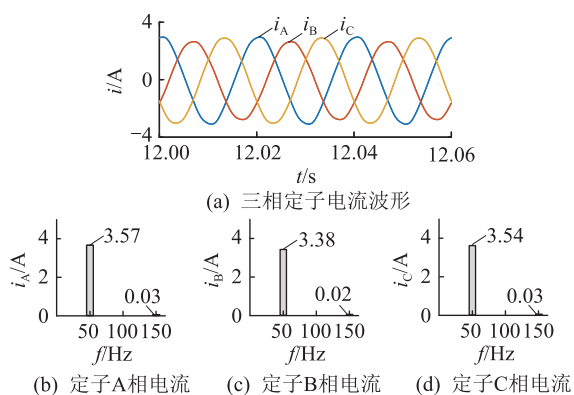


图 13 A |-A-|| 短路时的定子电流和 FFT 分析结果 ($r=3 \Omega$)

Fig.13 Stator current and FFT analysis results under short circuit fault of A |-A-|| ($r=3 \Omega$)

为了保证实验机型与实际同步调相机的相似性,并保证工作环境不对其造成影响,以实验机型

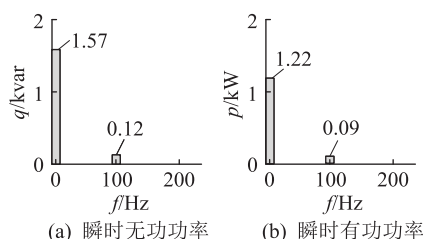


图 14 A |-A-|| 短路时瞬时功率 FFT 分析结果 ($r=3 \Omega$)

Fig.14 FFT analysis results of instantaneous power under short circuit fault of A |-A-|| ($r=3 \Omega$)

数据建立有限元模型并对上述 2 种工况进行仿真。仿真结果中电机的瞬时功率 FFT 分析结果和定子电流波形分别如图 15—图 17 所示。

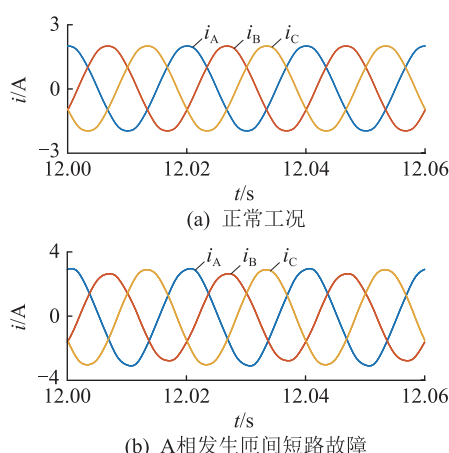


图 15 针对实验数据的定子电流仿真波形

Fig.15 Simulation waveforms of stator current based on experimental data

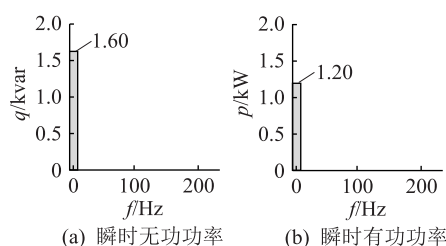


图 16 针对实验数据的健康运行时瞬时功率的 FFT 分析结果

Fig.16 FFT analysis results of instantaneous power under normal operation based on experimental data

对比图 15—图 17,结果表明实验与仿真数据高度一致,仅有微小误差,这可能是由实验平台中的电流传感器产生的。

3.2 改变故障严重程度

保持短路匝数比 μ 不变,改变过渡电阻 r 的大小可以控制匝间短路的故障程度。表 3 为短路匝数比 $\mu=0.125$,过渡电阻 r 分别为 1Ω 、 3Ω 和 10Ω 时三相定子电流和瞬时功率的 FFT 分析结果。

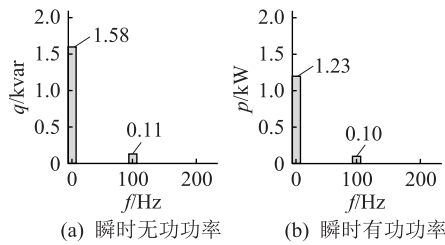


图 17 针对实验数据的 A 相故障时瞬时功率的 FFT 分析结果

Fig.17 FFT analysis results of instantaneous power under phase A fault based on experimental data

表 3 不同故障程度下定子电流与功率的幅值

Table 3 Magnitude of stator current and power under different fault degrees

r/Ω	I_{A1}/A	I_{A3}/A	I_{B1}/A	I_{B3}/A	I_{C1}/A	I_{C3}/A	$Q_0/kvar$	$Q_2/kvar$	P_0/kW	P_2/kW
1	3.61	0.05	3.40	0.04	3.57	3.54	1.61	0.13	1.24	0.10
3	3.57	0.03	3.38	0.03	3.44	0.04	1.57	0.12	1.22	0.09
10	3.48	0.03	3.32	0.02	0.03	0.02	1.53	0.12	1.18	0.08

表 3 中, I_{XY} ($X=A, B, C; Y=1, 3$) 为定子 X 相 Y 次谐波幅值; Q_0 、 Q_2 、 P_0 、 P_2 分别为瞬时无功、有功功率直流和 2 次谐波分量幅值。可见, 即使故障程度发生变化, 瞬时功率中 2 次谐波与直流分量幅值之比依然远高于定子电流中 3 次谐波与基波幅值之比, 表明该故障特征量适用于广泛的故障范围。

3.3 改变故障位置

分别短接图 10 中 A I - A II、A II - A III、A III - A IV 抽头模拟 A 相绕组不同位置发生相同程度的匝间短路, 短路匝数比 μ 和过渡电阻 r 不变。此时定子电流中 3 次谐波与基波幅值之比和瞬时功率中 2 次谐波与直流幅值之比如表 4 所示。可见, 故障位置的变化不会影响文中提出故障特征量的优越性。

表 4 定子电流 3 次谐波与基波幅值之比、瞬时功率 2 次谐波与直流分量幅值之比 (不同故障位置)

Table 4 The ratio of the third harmonic of the stator current to the amplitude of the fundamental wave and the ratio of the second harmonic of the instantaneous power to the amplitude of the DC component (different fault locations)

故障位置	I_{A3}/I_{A1}	I_{B3}/I_{B1}	I_{C3}/I_{C1}	P_2/P_0	Q_2/Q_0
抽头 A I - A II	0.8%	0.6%	0.8%	7.6%	7.3%
抽头 A II - A III	0.7%	0.6%	0.7%	7.5%	7.2%
抽头 A III - A IV	0.8%	0.7%	0.7%	7.5%	7.1%

3.4 改变机组工况

由于在实际工程应用中, 同步调相机发出的无功功率需要满足从感性到容性连续可调, 以维持电网电压稳定, 因此通过改变励磁电流大小, 来实验

同步调相机在不同工况下发生定子绕组匝间短路故障时的情形。表 5 列出了文中实验平台所使用励磁电机分别在励磁电流 I_f 为 3.0 A、2.4 A、1.8 A 和 1.2 A 时定子电流中 3 次谐波与基波幅值之比和瞬时功率中 2 次谐波与直流幅值之比。可见, 工作状态的改变亦不会影响文中提出故障特征量的优越性。

表 5 定子电流 3 次谐波与基波幅值之比、瞬时功率 2 次谐波与直流分量幅值之比 (不同工况)

Table 5 The ratio of the third harmonic of the stator current to the amplitude of the fundamental wave and the ratio of the second harmonic of the instantaneous power to the amplitude of the DC component (different working conditions)

I_f/A	I_{A3}/I_{A1}	I_{B3}/I_{B1}	I_{C3}/I_{C1}	P_2/P_0	Q_2/Q_0
3.0	0.8%	0.7%	0.7%	7.8%	7.4%
2.4	0.8%	0.6%	0.8%	7.6%	7.3%
1.8	0.7%	0.6%	0.7%	7.5%	7.3%
1.2	0.8%	0.7%	0.7%	7.5%	7.2%

4 结论

文中通过对定子绕组发生匝间短路故障后的同步调相机定子电流进行对称分解的基础上, 精确推导调相机瞬时有功/无功功率的数学模型。并通过有限元仿真和实验对不同故障程度、不同故障位置 and 不同工况下发生定子绕组匝间短路故障的同步调相机进行了验证, 所得结论如下:

(1) 同步调相机发生定子绕组匝间短路故障后, 定子绕组内各次谐波电流幅值、相位将不再对称, 同时同步调相机的瞬时有功/无功功率中将出现 2 次、4 次等偶次谐波, 可以利用瞬时有功/无功功率中的 2 次谐波幅值作为故障检测特征量。

(2) 以瞬时有功/无功功率中的 2 次谐波幅值作为故障检测特征量, 在轻微故障状态下, 其灵敏度将比传统方法中利用定子电流内 3 次谐波作为故障检测手段至少高出 7 倍, 更易完成早期故障诊断。

(3) 瞬时有功/无功功率的 2 次谐波幅值不受同步调相机工况和定子绕组匝间短路故障位置的影响, 是稳定的故障检测特征量。

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] 舒印彪, 张文亮. 特高压输电若干关键技术研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(31): 1-6.

SHU Yinbiao, ZHANG Wenliang. Research of key technologies

- for UHV transmission[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(31):1-6.
- [2] 刘振亚. 中国特高压交流输电技术创新[J]. 电网技术, 2013, 37(3):567-574.
LIU Zhenya. Innovation of UHVAC transmission technology in China[J]. Power System Technology, 2013, 37(3):567-574.
- [3] 刘泽洪. ± 1 100 kV 特高压直流输电工程创新实践[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(23):7782-7792.
LIU Zehong. Findings in development of ± 1 100 kV UHVDC transmission[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(23):7782-7792.
- [4] OBEID N H, BOILEAU T, NAHID-MOBARAKEH B. Modeling and diagnostic of incipient interturn faults for a three-phase permanent magnet synchronous motor[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2016, 52(5):4426-4434.
- [5] 伍文俊, 王思佳, 蔡嘉齐. 含网电变压器保护的电动修井机超级电容储能控制[J]. 电气工程学报, 2021, 16(2):122-130.
WU Wenjun, WANG Sijia, CAI Jiaqi. Control strategy for electric workover rig super capacitor energy storage system with grid-connected transformer protected[J]. Journal of Electrical Engineering, 2021, 16(2):122-130.
- [6] 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.
- [7] CHENG M, HANG J, ZHANG J Z. Overview of fault diagnosis theory and method for permanent magnet machine[J]. Chinese Journal of Electrical Engineering, 2015, 1(1):21-36.
- [8] BEN KHADER BOUZID M, CHAMPENOIS G, MAALAOUI A, et al. Efficient simplified physical faulty model of a permanent magnet synchronous generator dedicated to the stator fault diagnosis part I: faulty model conception[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2017, 53(3):2752-2761.
- [9] 桑建斌, 包明磊, 李玉平, 等. 300 Mvar 调相机继电保护的分析与改进[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(6):217-223.
SANG Jianbin, BAO Minglei, LI Yuping, et al. Analysis and improvement of relay protection of 300 Mvar synchronous condenser[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(6):217-223.
- [10] 汤涌, 郭强, 周勤勇, 等. 特高压同步电网安全性论证[J]. 电网技术, 2016, 40(1):97-104.
TANG Yong, GUO Qiang, ZHOU Qinyong, et al. Security evaluation for UHV synchronized power grid[J]. Power System Technology, 2016, 40(1):97-104.
- [11] 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.
- [12] 陶骞, 王庆, 阮聆, 等. 特高压直流工程大型调相机组启动调试及关键技术[J]. 中国电力, 2017, 50(12):51-56.
TAO Qian, WANG Qing, RUAN Ling, et al. Contents and key technical problems in start-up and commissioning of large-scale synchronous condenser in UHVDC project[J]. Electric Power, 2017, 50(12):51-56.
- [13] 宋美红. 同步发电机不同实用模型对暂态稳定极限准确性的影响[J]. 电力工程技术, 2018, 37(5):69-74.
SONG Meihong. Transient stability limit affected by different practical models of synchronous generator[J]. Electric Power Engineering Technology, 2018, 37(5):69-74.
- [14] 朱二夯, 黄浩, 边旭, 等. 大型同步调相机定子压圈涡流损耗计算及降损方法[J]. 电机与控制学报, 2019, 23(10):33-40.
ZHU Erhang, HUANG Hao, BIAN Xu, et al. Research on calculation and decrease of eddy current losses in stator clamping ring for a large synchronous condenser[J]. Electric Machines and Control, 2019, 23(10):33-40.
- [15] 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.
- [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] 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.
- [18] 王潇, 周平, 王洋, 等. 大容量调相机静止变频器起动方式研究[J]. 电气技术, 2016(10):31-35.
WANG Xiao, ZHOU Ping, WANG Yang, et al. Bushing PD analysis and electric field simulation large capacity synchronous compensator[J]. Electrical Engineering, 2016(10):31-35.
- [19] 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.
- [20] 边旭, 梁艳萍, 朱二夯, 等. 多工况下同步调相机端部磁场与结构件涡流损耗分析[J]. 大电机技术, 2018(6):26-31.
BIAN Xu, LIANG Yanping, ZHU Erhang, et al. Analysis of magnetic field and eddy current losses in end structures of synchronous compensators under multiple load conditions[J].

- Large Electric Machine and Hydraulic Turbine, 2018 (6): 26-31.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] 蒋梦瑶,马宏忠,陈洪斐,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.
- [27] 王丽,刘会金,王陈. 瞬时无功功率理论的研究综述[J]. 高电压技术,2006,32(2):98-100,103.
WANG Li, LIU Huijin, WANG Chen. Summary of the instantaneous reactive power theory[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(2):98-100,103.

作者简介:



谷兵

谷兵(1991),男,硕士,工程师,从事特高压换流站调相机运维检修工作(E-mail: hhdr_gb@126.com);

蒋琛(1981),男,学士,高级工程师,从事电力系统继电保护以及电网设备运维与管理工

作;
黄思遥(1994),男,博士在读,研究方向为同步电机可靠性。

Fault feature analysis of stator winding for synchronous condenser based on symmetrical component method

GU Bing¹, JIANG Chen¹, HUANG Siyao², WEI Chao², WANG Wei², CHENG Ming²

(1. Jiangsu Frontier Electric Technology Co., Ltd., Nanjing 211102, China;

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

Abstract: The traditional method for analyzing the mechanism of stator winding inter turn short-circuit faults of synchronous condensers usually assumes that the stator current of the motor is close to three-phase symmetry, and based on this, a mathematical representation of the fault current of synchronous condensers is established. However, once a stator winding inter turn short-circuit fault occurs, the symmetry of the three-phase stator current of the synchronous condenser will be disrupted, making the mathematical representation established by traditional fault mechanism analysis methods unable to accurately reflect the changes in the internal electrical quantities of the motor. A mathematical model is established for the instantaneous active and reactive power of a synchronous condenser after a fault by introducing the symmetrical component method. Using the second harmonic in the instantaneous active and reactive power for stator winding inter turn short-circuit fault diagnosis is proposed. The simulation and experimental results indicate that compared to the traditional method of diagnosing faults using the ratio of the third harmonic of stator current to the amplitude of the fundamental wave, the proposed method can improve the diagnostic sensitivity by at least seven times under mild fault conditions, making it easy to complete early fault diagnosis. At the same time, the fault feature quantities in the proposed method are not affected by the synchronous condenser operating conditions and fault locations, and also have strong robustness.

Keywords: synchronous condenser; stator winding inter turn short-circuit; symmetrical component method; instantaneous power; fault diagnosis; ultra-high voltage direct current transmission system

(编辑 吴昊)