DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2026.8.319 **中图分类号**：TM344.6 **文献标志码**：A

基于共模回路的变频电机定子绕组对地绝缘监测

王 昌[1]，李珊瑚[1]，牛 峰[1](中国电源学会会员)，丁一夫[2]，王 云[2]，刘丽莎[3]
(1.河北工业大学电气工程学院，天津 300401；2.中汽研新能源汽车检验中心(天津)有限公司，天津 300300；3.河北省水利规划设计研究院有限公司，石家庄 050021)

摘要：为实现变频电机定子绕组相端和内部对地绝缘状态监测，提出一种基于共模回路的绝缘监测方法。首先基于电机共模等效模型，分析了电机系统共模回路阻抗MHz高频和kHz中频特性。基于共模阻抗特性，分析了共模电流的主导模态及路径。从理论上推导出中高频共模电流振荡频率与电机端部电容和绕组内部绝缘电容的关系，利用变分模态分解算法，将共模电流的2种模态进行分离，通过高频共模和中频共模电流分别监测电机相端和绕组内部绝缘劣化状况。实验结果表明，所提方法可以灵敏地反映电机相端绝缘和绕组内部绝缘的微弱变化。

关键词：变频电机；共模回路；绕组绝缘；变分模态分解

Monitoring of Stator Winding Ground Insulation of Inverter-fed Machine Based on Common-mode Circuit

WANG Chang[1], LI Shanhu[1], NIU Feng[1], *Member*, *CPSS*, DING Yifu[2], WANG Yun[2], LIU Lisha[3]
(1. School of Electrical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China; 2. CATARC New Energy Vehicle Test Center (Tianjin) Co., Ltd., Tianjin 300300, China; 3. Hebei Water Conservancy Planning & Design Institute Co., Ltd., Shijiazhuang 050021, China)

Abstract: To achieve the monitoring of line-end and internal coil ground insulation of the stator winding for an inverter-fed machine, an insulation monitoring method based on common-mode circuit is proposed. First, based on the common-mode equivalent model of the motor, the impedance characteristics of the common-mode circuit of the motor system at high-frequency in MHz and medium-frequency in kHz were analyzed. Then, based on the common-mode impedance characteristics, the dominant mode and path of common-mode current were analyzed. Theoretically, the relationship among the oscillation frequency of medium- and high-frequency common-mode current, the terminal ground capacitance and the internal ground capacitance of the stator winding was derived. The variational mode decomposition algorithm was used to separate the two modes of common-mode current, and the insulation degradation statuses of the line-end and internal coil of machine stator winding were monitored through high-frequency common-mode current and medium-frequency common-mode current, respectively. Experimental results show that the proposed method can sensitively reflect the slight changes in the insulation at the line-end and internal coil of machine stator winding.

Keywords: Inverter-fed machine; common-mode circuit; winding insulation; variational mode decomposition

收稿日期：2024-10-28；**修回日期**：2024-12-04；**录用日期**：2024-12-21；**网络首发日期**：2025-01-06
基金项目：京津冀基础研究合作专项资助项目(E2024202263)；国家自然科学基金资助项目(52477044)；河北省自然科学基金资助项目(E2024202079)
This work is supported by Beijing Tianjin Hebei Basic Research Cooperation Special Project under the grant E2024202263; National Natural Science Foundation of China under the grant 52477044; Natural Science Foundation of Hebei Province under the grant E2024202079

变频电机广泛应用于各种领域，如工业自动化、新能源汽车等。然而受工作环境和使用条件等

的影响，电机容易出现故障，研究表明，定子绝缘故障在电机故障中占比超过 30%[1]。在变频电机系统中，由于逆变器开关动作产生了高频、高幅值共模电压，进一步加速定子绕组绝缘劣化[2]。定子绝缘初期故障一旦发生便会迅速扩展，将会导致设备停机，造成事故[3]。因此，在早期对电机的绝缘进行监测，从而发现绝缘退化非常有必要。

定子绕组绝缘阻抗频谱特性测量是绝缘监测的一种常用方法，共模阻抗测量的是三相定子绕组相对地的阻抗参数，由于对地主绝缘串联在主回路中，能够很好地反映电机绕组绝缘的老化信息。Neti 等[4]和 Perisse 等[5]提出了一种基于信号注入的技术来测量定子绝缘阻抗谱，可以评估定子匝间绝缘和主绝缘退化状态，然而，该方法具有一定的侵入性，需要额外的高频信号注入源；Zheng 等[6]利用共模阻抗谱在线监测绝缘整体老化状况，建立了不同绝缘老化条件下的阻抗谱数据集，利用阻抗谱中的多个点分别检测匝间和对地绝缘参数的变化，该监测方法在对地绝缘退化的影响下仍能在较高精度下检测出匝间绝缘退化情况。

近年来的研究表明，绝缘电容可以作为表征绝缘状态早期劣化的重要征兆。绝缘劣化下其容值参数会发生明显变化(20%~50%)[7]。基于漏电流与绝缘阻抗的关联性，一些学者利用漏电流监测绝缘状态。文献[8]在时频域方面基于绕组主绝缘对地绝缘电阻电容的并联模型进行深入研究，总结了共模漏电流振荡幅度、振荡周期和衰减时间的变化规律[9]，识别出了对地绝缘劣化的相、位置和严重程度[10]。在频域方面，文献[11-12]得出了漏电流基波倍频、开关频率倍频及其边带频率幅值受绝缘电容和绝缘电阻的影响规律，并以差共模漏电流变化量的比来判断主绝缘退化位置。

文献[13]指出电机系统中振荡电流的 3 种模态，采用高频共模电流振荡频率特征在线监测电机绕组相端的绝缘劣化。为了解耦电缆端的影响，文献[14]以高频差模电流振荡频率为监测特征，避免了电缆状态劣化对监测精度的影响，然而对中频共模电流的建模还有待进一步研究。本文提出一种基于共模回路的电机绕组相端和内部对地绝缘监测方法，在变频器的开关激励下，由于电缆和电机的阻抗特性，在共模回路中将产生不同模态且流经不同路径的共模电流，通过分离共模电流的模态，提取振荡频率特征，实现对绕组相端和内部的绝缘状态监测。

1 绝缘监测建模原理

1.1 电机系统绝缘建模

1.1.1 电机共模模型

图 1 为考虑高频分布参数耦合效应的电机共模等效模型[15-16]。图中：W_1 为定子绕组入线端；W_2 为定子绕组中性点；F 为电机机壳并接地；L_{cm} 为定子绕组共模电感；C_p 为匝间等效电容；C_{g1} 为电机端部与机壳间的杂散电容；C_{g2} 为绕组内部与机壳间的杂散电容；R_e 为涡流造成的铁耗；$U_m(t)$为施加在电机入线端到机壳的共模电压；$I_m(t)$为对应产生的电机共模电流。

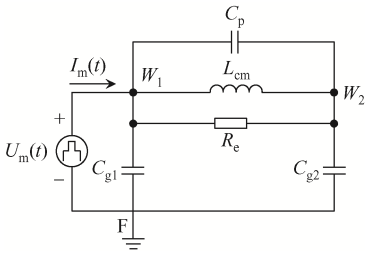


图 1 定子绕组共模等效模型

Fig. 1 Common-mode equivalent model of stator winding

电机入线端到机壳的共模阻抗为

$$Z_{cm}(s)=\frac{L_{cm}(C_{g2}+C_p)s^2+L_{cm}/R_e\cdot s+1}{(C_{g1}+C_{g2})s\left[L_{cm}\left(C_p+\frac{C_{g1}C_{g2}}{C_{g1}+C_{g2}}\right)s^2+\frac{L_{cm}}{R_e}s+1\right]} \tag{1}$$

流经电机共模路径的电流可表示为

$$I_m(s)=\frac{U_m(s)}{Z_{cm}(s)}=\frac{(C_{g1}+C_{g2})s\left[L_{cm}\left(C_p+\frac{C_{g1}C_{g2}}{C_{g1}+C_{g2}}\right)s^2+\frac{L_{cm}}{R_e}s+1\right]U_m(s)}{L_{cm}(C_{g2}+C_p)s^2+L_{cm}/R_e\cdot s+1} \tag{2}$$

根据式(2)，$I_m(s)$表达式中分母存在极点，是共模电流流经电机产生振荡的原因。其振荡频率 f_s 与电机的共模串联谐振频率一致[17]，表达式为

$$f_s=\frac{1}{2\pi\sqrt{L_{cm}(C_{g2}+C_p)}} \tag{3}$$

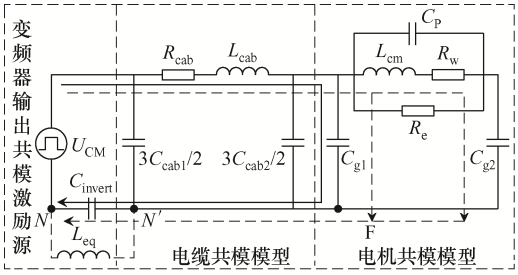
由式(3)可知，电机共模串联谐振频率与绕组内部对地电容 C_{g2} 相关，与电机端部对地电容 C_{g1} 无关。

1.1.2　考虑电缆参数的变频电机系统共模模型

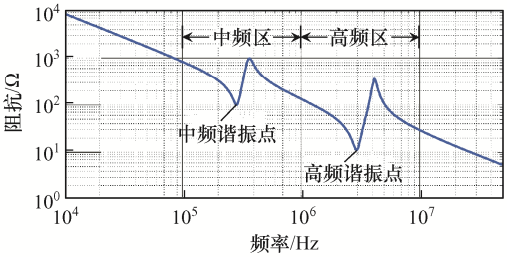
在变频电机系统中，变频器、电缆和电机中存在丰富的寄生参数，为中高频共模电流提供了不同的耦合路径[18]。变频器产生的共模电压施加在电缆和电机上，形成多模态的电流振荡响应。电缆参数也会影响共模电流，图 2(a)为考虑包含电缆杂散参数的变频电机系统共模模型。图中：L_{cab} 为电缆等效电感；R_{cab} 为等效电阻；C_{cab1}、C_{cab2} 为对地电容；N 为激励源段共模激励源的参考点位；N' 为变频器接地点；C_{invert} 为变频器接地电容；L_{eq} 为共模电流流回共模激励源时输入电网端及电缆的等效电感。

图2(b)为考虑电缆参数的变频电机系统共模阻抗，在考虑电缆参数时，变频电机系统的共模阻抗会出现中频、高频 2 个谐振点，其对应于共模电流的中频谐振和高频谐振。电感和电容在不同频率下的阻抗不同，在高频时，L_{cm} 感抗非常大，高频共模电流难以渗透进入电机绕组，此时 C_{g1} 的容抗很小，高频共模电流会经过 C_{g1} 流回激励源。中频时，L_{cm} 感抗与 C_{g1}、C_{g2} 容抗数量级相差不大，因此中频共模电流不仅经 C_{g1} 流回，还可以渗透进入电机绕组，经 C_{g2} 流回电网端[13]。

图 2(a)中，由于 L_{eq} 和 C_{invert} 的存在，使得 $U_{NN'}$ 不为 0，在高频时，C_{invert} 容抗远小于 L_{eq} 感抗，高频共模电流会经 C_{invert} 流回激励源。相应地，在中频时，C_{invert} 容抗远大于 L_{eq} 感抗，中频共模电流会经 L_{eq} 流回激励源。因此，实线路径为高频共模 HFCM(high-frequency common-mode)电流，虚线路径为中频共模 MFCM(medium-frequency common-mode)电流。



(a) 考虑电缆参数的变频电机系统共模模型



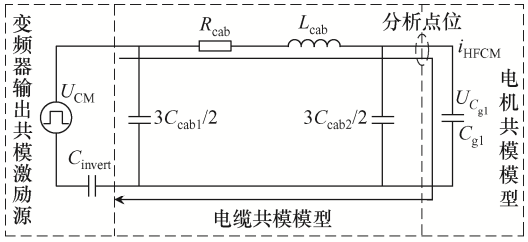
(b) 考虑电缆参数的变频电机系统共模阻抗

图 2　考虑电缆杂散参数的变频电机系统共模模型及阻抗

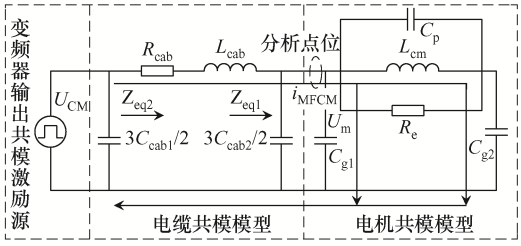
Fig. 2 Common-mode model and impedance of inverter-fed machine system considering stray parameters of cable

1.2　电机系统中高频共模电流路径建模

为计算中高频共模电流的谐振频率，分别绘制高频和中频共模电流的等值电路如图 3 所示，在中频时由于激励源端等效电感 L_{eq} 感抗很小，为简化计算，忽略其对中频共模电流的影响。



(a) 高频共模电流等值电路



(b) 中频共模电流等值电路

图 3　中高频共模电流等值电路

Fig. 3 Equivalent circuits for medium- and high-frequency common-mode current

如图 3(a)所示，电机端部对地电压 $U_{C_{g1}}$ 与变频

器输出共模电压 U_{CM} 的关系为

$$U_{C_{g1}}(s)=r_1\cdot U_{CM}(s) \tag{4}$$

式中，r_1 为激励源电压 U_{CM} 到端部电机对地电压 $U_{C_{g1}}$ 的分压比，其表达式为

$$r_1(s)=\frac{Z_{eq}(s)-\dfrac{1}{C_{invert}s}}{Z_{eq}(s)}\cdot \frac{1\Big/\left(\dfrac{3}{2}C_{cab2}+C_{g1}\right)}{L_{cab}s^2+R_{cab}s+1\Big/\left(\dfrac{3}{2}C_{cab2}+C_{g1}\right)} \tag{5}$$

式中，Z_{eq} 为等效阻抗。

根据式(4)、式(5)和图 3(a)，流入电机端部等效绝缘电容的高频共模电流 $i_{HFCM}(s)$为

$$i_{HFCM}(s)=U_{C_{g1}}(s)\cdot C_{g1}s=r_1(s)\cdot U_{CM}(s)\cdot C_{g1}s \tag{6}$$

式(5)分母存在的极点是高频共模电流振荡的原因，振荡频率为

$$f_{HFCM}=\frac{1}{2\pi\sqrt{L_{cab}\dfrac{(3C_{cab1}+2C_{invert})(3C_{cab2}+2C_{g1})}{6C_{cab1}+4C_{invert}+6C_{cab2}+4C_{g1}}}} \tag{7}$$

由高频共模振荡频率公式可知，振荡频率与 L_{cab}、C_{cab1}、C_{cab2}、C_{invert}、C_{g1} 有关。在电机系统长期稳定工作过程中，电缆杂散参数和变频器接地电容参数在没有出现异常的情况下几乎保持不变，电机相端绝缘状态即端部对地电容将直接影响高频共模振荡频率，因此可以通过高频共模振荡频率监测电机相端绝缘的状态。

图 3(b)为中频共模等值电路，且忽略了共模激励源等效电感 L_{eq} 的影响。Z_{eq1} 和 Z_{eq2} 分别对应于图3(b)中标注的等效阻抗，即Z_{eq1}为电缆对地电容C_{cab2}和电机共模阻抗 Z_{cm} 并联后的等效阻抗，Z_{eq2} 为 Z_{eq1} 与 L_{cab} 和 R_{cab} 串联后的等效阻抗，其表达式分别为

$$Z_{eq1}(s)=\frac{\dfrac{2}{3C_{cab2}s}\cdot Z_{cm}(s)}{\dfrac{2}{3C_{cab2}s}+Z_{cm}(s)} \tag{8}$$

$$Z_{eq2}(s)=R_{cab}+L_{cab}s+Z_{eq1}(s) \tag{9}$$

电机入线端电压 U_m 与变频器输出共模电压 U_{CM} 的关系为

$$U_m(s)=r_2\cdot U_{CM}(s) \tag{10}$$

式中，r_2 为激励源电压 U_{CM} 到电机入线端电压 U_m 的分压比，其表达式为

$$r_2=\frac{Z_{eq1}(s)}{Z_{eq2}(s)} \tag{11}$$

根据式(8)~式(11)和图 3(b)，流入电机的中频共模电流 $i_{MFCM}(s)$可表示为

$$i_{MFCM}(s)=\frac{r_2\cdot U_{CM}(s)}{Z_{cm}(s)} \tag{12}$$

求解 $i_{MFCM}(s)$，在中频范围内，3、4 次方数量级过小，为简化计算，忽略数量级过小的项。其分母的极点是中频共模电流振荡的原因，振荡频率为

$$f_{MFCM}=\frac{1}{2\pi\sqrt{L_{cm}\left[C_{g2}+C_p+\dfrac{R_{cab}}{R_e}\left(\dfrac{3}{2}C_{cab2}+C_{g1}+C_{g2}\right)\right]+L_{cab}\left(\dfrac{3}{2}C_{cab2}+C_{g1}+C_{g2}\right)}} \tag{13}$$

由式(13)可知，中频共模电流振荡频率受电机参数和电缆参数多因素耦合的影响。电缆电阻/电机铁耗(R_{cab}/R_e)数值非常小，其耦合带来的影响可以忽略。一般电缆电感远小于电机共模电感，即 $L_{cab}<<L_{cm}$，此时电缆耦合带来的影响可忽略。中频共模电流振荡频率与电机固有共模串联谐振频率相近，由绕组电感 L_{cm}、匝间电容 C_p 和绕组内部绝缘电容 C_{g2} 决定，因此可通过中频共模电流振荡频率监测电机绕组内部绝缘的状态。

2 电机绝缘状态特征提取和评估

2.1 变分模态分解算法分离频率特征

变分模态分解 VMD(variational modal decomposition)算法[19]是将信号分解为多个本征模态函数 IMF(intrinsic mode function)的算法。每个模态函数可看成围绕相应中心频率的信号，信号分解问题可转化成约束变分问题，表示为

$$\begin{cases}\min\limits_{u_k,\omega_k}\left\{\sum\limits_k\left\|\partial_t\left[\left(\delta(t)+\dfrac{\mathrm{j}}{\pi t}\right)\cdot u_k(t)\right]\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\omega_k t}\right\|_2^2\right\}\\ \text{s.t.}\sum\limits_k u_k=i_{\mathrm{cm}}(t)\end{cases}\tag{14}$$

式中：$\delta(t)$为单位脉冲函数；u_k为第 k 个模态分量；ω_k为第 k 分量的中心频率；i_{cm}为共模电流。

通过引入拉格朗日乘子 λ 和二次惩罚因子 α，转化为无约束变分问题，利用交替方向乘子法，不断更新各模态分量的中心频率和带宽，求取最优解，可表示为

$$\hat{u}_k^{n+1}(\omega)=\frac{0.5\hat{\lambda}(\omega)+\hat{i}_{\mathrm{cm}}(\omega)-\sum\limits_{i>k}\hat{u}_i^n(\omega)-\sum\limits_{i<k}\hat{u}_i^{n+1}(\omega)}{1+2\alpha(\omega-\omega_k)^2}\tag{15}$$

$$\omega_k^{n+1}=\frac{\int_0^\infty\omega|\hat{u}_k^{n+1}(\omega)|^2\,\mathrm{d}\omega}{\int_0^\infty|\hat{u}_k^{n+1}(\omega)|^2\,\mathrm{d}\omega}\tag{16}$$

式中：ω为算子；n 为更新次数。

根据 1.2 节理论分析可知，共模电流为 2 个主导模态构成的非平稳振荡信号，通过 VMD 将共模电流分解为高频共模电流和中频共模电流，提取共模电流振荡频率特征f_{HFCM}、f_{MFCM}。

2.2 变频电机绕组相端和内部对地绝缘状态评估

由 1.2 节分析可知f_{HFCM}和f_{MFCM}的表达式，改写其表达式，使其特征更加明显。仿真得到绝缘劣化下振荡频率变化趋势，对于高频共模振荡频率，可改写为

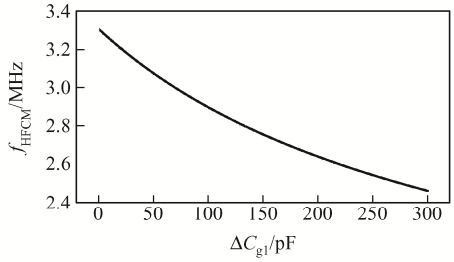
$$\begin{cases}f_{\mathrm{MFCM}}=\sqrt{\dfrac{\alpha_2+\alpha_3+\Delta C_{\mathrm{g1}}}{\alpha_1\alpha_2(\alpha_3+\Delta C_{\mathrm{g1}})}}\\ \alpha_1=\pi^2L_{\mathrm{cab}}\\ \alpha_2=3C_{\mathrm{cab1}}+2C_{\mathrm{in}}\\ \alpha_3=3C_{\mathrm{cab2}}+2C_{\mathrm{g1}}\end{cases}\tag{17}$$

在式(17)中，f_{HFCM}改写为 ΔC_{g1}的多参数非线性函数，其曲线如图 4(a)所示，f_{HFCM}在 ΔC_{g1}增加时呈现非线性下降。在进行系统的参数识别后，可通过系统在线运行时的f_{HFCM}监测 ΔC_{g1}的变化，进而判断电机相端绝缘的劣化程度。

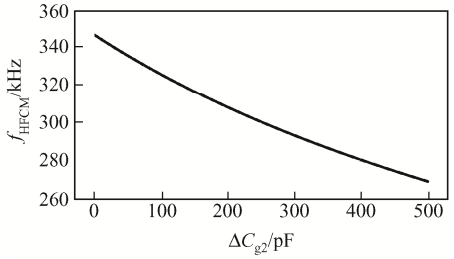
对于中频共模振荡频率，可改写为

$$\begin{cases}f_{\mathrm{MFCM}}=1/\sqrt{\beta_1(\beta_2+\Delta C_{\mathrm{g2}})}\\ \beta_1=4\pi^2L_{\mathrm{cm}}\\ \beta_2=C_{\mathrm{p}}+C_{\mathrm{g2}}\end{cases}\tag{18}$$

如式(18)所示，f_{MFCM}改写为 ΔC_{g2}的多参数非线性函数，其曲线如图 4(b)所示，f_{MFCM}在 ΔC_{g2}增加时呈现非线性下降。因此可通过系统在线运行时的f_{MFCM}监测 ΔC_{g2}的变化，进而判断电机绕组内部绝缘的劣化程度。



(a) 相端绝缘不同程度劣化的f_{HFCM}



(b) 绕组内部绝缘不同程度劣化的f_{HFCM}

图 4　绕组绝缘劣化下共模电流振荡频率

Fig. 4 Oscillation frequency of common-mode current under winding insulation degradation

3　实验研究

3.1 实验系统

为验证本文方法的有效性，搭建如图 5 所示变频电机实验系统，实验电机为永磁同步电机，采用星形连接，额定功率为 3 kW，极对数为 5，调压器设置母线电压为 240 V。将绕组线圈的抽头引出外部端子盒，可用于在端部、中性点与大地之间并联电容来模拟相端绝缘退化和绕组内部绝缘退化。共模电流和三相相电压信号分别通过高频电流互感器(ETA5315，带宽为 50 MHz)及高频电压探头(YOKOGAWA 701938，带宽为 100 MHz)

进行测量，并由高速数字示波器(YOKOGAWA DL850E)观测记录波形，且数据可传输到上位机进行分析处理。

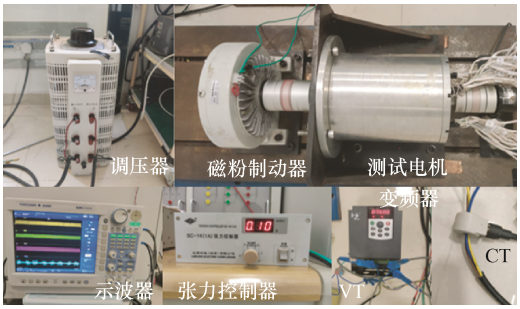


图 5 实验系统

Fig. 5 Experimental system

采用阻抗分析仪(HIKO IM3570)扫频电机的共模阻抗，通过谐振点计算[15]，估算实验电机的共模绕组参数见表 1。通过电缆谐振频率计算电缆模型参数：L_{cab}=10 μH、R_{cab}=0.1 Ω、C_{cab}=150 pF。在电机 C 相端部端子与地并联可变电容 ΔC_{g1} 模拟相端绝缘劣化，在电机绕组中性点端子与地并联可变电容 ΔC_{g2} 模拟绕组内部绝缘劣化。

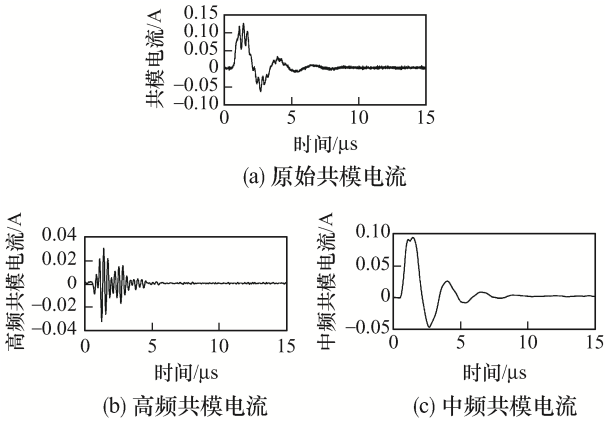
表 1 定子绕组参数估计结果

Tab. 1 Estimation results of stator winding parameters

参数	数值
L_{CM}/mH	0.176
R_e/kΩ	2.40
C_p/pF	280
C_{g1}/pF	358
C_{g2}/pF	853

3.2 开关振荡电流模态分解与特征提取结果

实验电机正常工作时的共模电流如图 6 所示，通过 VMD 算法自适应模态分解(k=2)，分解得到 IMF1 和 IMF2 共 2 个分量，其谐振频率分别为 3.330 MHz 和 346.5 kHz。根据式(7)和式(11)理论计算高频共模电流的振荡频率为 3.305 MHz，中频共模电流的振荡频率为 344.2 kHz，理论计算值与实验值接近。如图 7 所示，对共模电流进行了频谱分析，虚线框中振荡频率与 VMD 结果相近。验证了本文中高频共模电路模型的正确性。



(a) 原始共模电流

(b) 高频共模电流 (c) 中频共模电流

图 6 实验电机共模电流及 VMD 结果

Fig. 6 Common-mode current of experimental motor, and VMD results

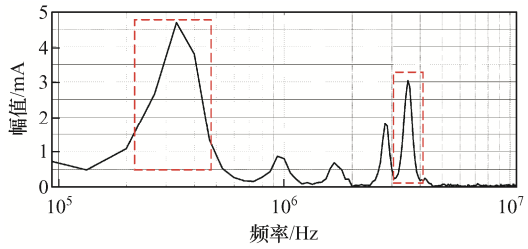
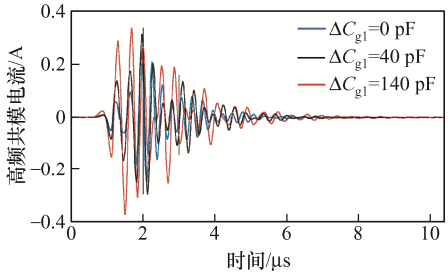


图 7 共模电流频谱分析结果

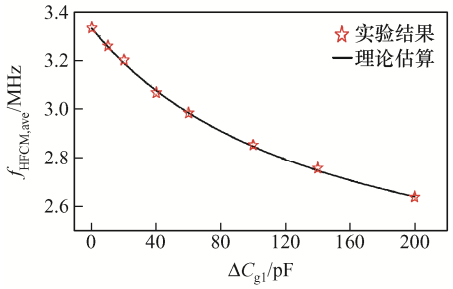
Fig. 7 Analysis results of common-mode current spectrum

3.3 绕组相端绝缘状态在线监测

为模拟不同程度的相端绝缘劣化，在绕组相端引出端子与大地之间并联 10~200 pF 的电容。高频共模电流的实验振荡波形如图 8(a)所示，从时域图可知，高频共模电流的振荡频率随 ΔC_{g1} 的增加而减小，幅值随 ΔC_{g1} 的增加而增大。为减小误差，对多次获得的 f_{HFCM} 取平均值。图 8(b)绘制了其平均值 $f_{HFCM,ave}$ 随 ΔC_{g1} 变化的非线性拟合曲线，随着 ΔC_{g1} 的增加，$f_{HFCM,ave}$ 非线性减小，与 2.2 节理论分析中式(17)相符。验证了本文电机绕组相端对地绝缘状态监测方法的有效性。



(a) 绕组相端绝缘劣化高频共模电流时域图



(b) 绕组相端绝缘劣化下的$f_{MFCM,ave}$

图 8　绕组相端绝缘劣化下电流波形及频率变化

Fig. 8 Changes in current waveform and frequency under line-end coil insulation degradation

绕组相端绝缘不同劣化状态下电容估算见表 2，电容实际值与理论计算值绝对误差较小，ΔC_{g1} 评估准确率 A_{cc1} 超过 99.28%，即相端绝缘状态监测的准确性较高。A_{cc1} 表达式为

$$A_{cc1}=\left(1-\frac{\left|\Delta C_{g1}-\Delta C'_{g1}\right|}{C_{g1}+\Delta C_{g1}}\right)\times 100\% \tag{19}$$

式中，$\Delta C'_{g1}$ 为理论值。

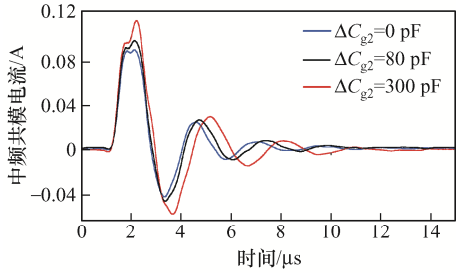
表 2　绕组相端绝缘状态不同程度劣化下电容理论估算

Tab. 2 Theoretical estimation of capacitance under different degradation conditions of line-end coil insulation

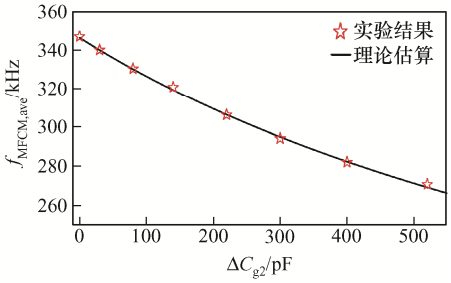
$f_{HFCM,ave}$/MHz	实际 ΔC_{g1}/pF	理论 $\Delta C'_{g1}$ /pF	绝对误差/pF	A_{cc1}/%
3.330	0	0.2	0.2	99.78
3.256	10	9.9	0.1	99.97
3.198	20	18.5	1.5	99.60
3.064	40	42.3	2.3	99.42
2.981	60	60.8	0.8	99.81
2.850	100	98.5	1.5	99.67
2.752	140	136.9	3.1	99.38
2.632	200	204.0	4.0	99.28

3.4　绕组内部绝缘状态在线监测

为模拟不同程度的绕组内部绝缘劣化，在绕组中性点引出端子与大地之间并联 30~520 pF 的电容。中频共模电流的实验振荡波形如图 9(a)所示，从时域图可知，中频共模电流的振荡频率随着 ΔC_{g2} 的增加而变小，幅值随 ΔC_{g2} 的增加而增大。为减小误差，对多次获得的 f_{MFCM} 取平均值。图 9(b)绘制了其平均值 $f_{MFCM,ave}$ 随 ΔC_{g2} 变化的非线性拟合曲线，$f_{MFCM,ave}$ 随 ΔC_{g2} 的增加非线性减小，与 2.2 节理论分析中式(18)相符。验证了本文电机绕组内部对地绝缘状态监测方法的有效性。



(a) 绕组内部绝缘劣化中频共模电流时域图



(b) 绕组内部绝缘劣化下的$f_{MFCM,ave}$

图 9　绕组内部绝缘劣化下电流波形及频率变化

Fig. 9 Changes in current waveform and frequency under winding internal insulation degradation

绕组内部绝缘状态不同劣化状态下电容估算见表 3，电容实际值和理论计算值绝对误差较小，ΔC_{g2} 评估准确率 A_{cc2} 定义形式同式(19)，准确率超过 99.11%，即绕组内部绝缘状态监测的准确性较高。

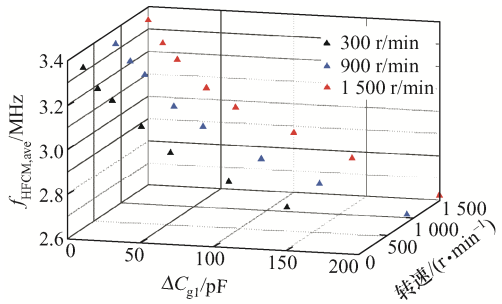
表 3　绕组内部绝缘状态不同程度劣化下电容理论估算

Tab. 3 Theoretical estimation of capacitance under different degradation conditions of winding internal insulation

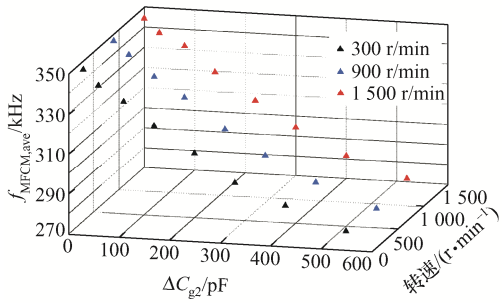
$f_{MFCM,ave}$/kHz	实际 ΔC_{g2}/pF	理论 $\Delta C'_{g2}$ /pF	绝对误差/pF	A_{cc2}/%
346.5	0	−1.5	1.5	99.82
339.6	30	31.2	1.2	99.86
329.8	80	80.8	0.8	99.91
320.3	140	133.3	6.7	99.33
305.7	220	223.7	3.7	99.66
293.8	300	307.5	7.5	99.35
281.5	400	405.6	5.6	99.55
270.2	520	507.8	12.2	99.11

3.5 不同运行工况的影响

为了进一步验证中高频共模电流振荡频率特征的工况鲁棒性，设计电机在转速 300、900、1 500 r/min 运行下的绝缘监测实验，结果如图 10 所示。电机转速几乎不影响中高频共模电流振荡频率特征，因而频率特征能够在不同转速下可靠地监测绕组绝缘状态。



(a) 不同转速下绕组相端绝缘劣化时的$f_{HFCM,ave}$



(b) 不同转速下绕组内部绝缘劣化时的$f_{MFCM,ave}$

图 10 不同转速下绕组绝缘劣化时的 $f_{HFCM,ave}$ 和 $f_{MFCM,ave}$

Fig. 10 $f_{HFCM,ave}$ and $f_{MFCM,ave}$ under insulation degradation of windings at different speeds

4 结语

电机绕组相端绝缘和内部绝缘状态劣化是影响电机可靠运行的关键因素，本文通过理论建模和推导，提出一种基于共模回路的电机绕组相端和内部对地绝缘的监测方法，通过理论与实验结果，得出变频电机系统共模电流包括高频共模和中频共模 2 个主导模态，高频共模和中频共模电流在电机绕组绝缘方面主要分别受 ΔC_{g1} 和 ΔC_{g2} 的影响。利用 VMD 算法能够从多模态共模电流中提取高频共模和中频共模电流，获取振荡频率，实现对绕组绝缘状态的监测。

参考文献：

[1] 郑大勇，张品佳. 交流电机定子绝缘故障诊断与在线监测技术综述[J]. 中国电机工程学报，2019，39(2)：395-406.
Zheng Dayong, Zhang Pinjia. A review of fault diagnosis and online condition monitoring of stator insulation in AC electrical machine [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(2): 395-406. (in Chinese)

[2] 魏金成，朱崇婧，邱晓初，等. 一种可降低共模电压的简化调制方法[J]. 电源学报，2026，24(6)：74-83.
Wei Jincheng, Zhu Chongjing, Qiu Xiaochu, et al. A simplified modulation method that reduces common mode voltage [J]. Journal of Power Supply, 2026, 24(6): 74-83. (in Chinese)

[3] Stone G C. Condition monitoring and diagnostics of motor and stator windings–A review [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2013, 20(6): 2073-2080.

[4] Neti P, Grubic S. Online broadband insulation spectroscopy of induction machines using signal injection [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2017, 53(2): 1054-1062.

[5] Perisse F, Werynski P, Roger D. A new method for AC machine turn insulation diagnostic based on high frequency resonances [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2007, 14(5): 1308-1315.

[6] Zheng Dayong, Lu Geye, Wu Yang, et al. Online detection and classification of interturn and groundwall insulation aging based on broadband common-mode impedance spectrum [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2024, 71(3): 3142-3153.

[7] Sumislawska M, Gyftakis K N, Kavanagh D F, et al. The impact of thermal degradation on properties of electrical machine winding insulation material [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2016, 52(4): 2951-2960.

[8] Niu Feng, Cao Shiran, Huang Xiaoyan, et al. Analysis of EMI in motor system driven by PWM inverter [C]// 2018 1st Workshop on Wide Bandgap Power Devices and Applications in Asia (WiPDA Asia). Xi'an, China, 2019: 66-70.

[9] Cao Shiran, Niu Feng, Huang Xiaoyan, et al. Time-frequency characteristics research of common mode current in PWM motor system [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(2): 1450-1458.

[10] Niu Feng, Wang Yunlong, Huang Shaopo, et al. An

online groundwall insulation monitoring method based on transient characteristics of leakage current for inverter-fed motors [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(8): 9745-9753.

[11] 王云龙, 牛峰, 张健, 等. 基于漏电流频域特性的变频电机对地绝缘在线监测方法[J]. 电机与控制学报, 2022, 26(11): 114-121.
Wang Yunlong, Niu Feng, Zhang Jian, et al. Online monitoring method of groudwall insulation based on frequency domain characteristics of leakage current for inverter-fed motors [J]. Electric Machines and Control, 2022, 26(11): 114-121. (in Chinese)

[12] 张超凡, 牛峰, 孙庆国, 等. 基于漏电流多频率特征的变频电机主绝缘状态在线监测方法[J]. 电机与控制学报, 2023, 27(8): 64-72.
Zhang Chaofan, Niu Feng, Sun Qingguo, et al. Online monitoring of ground-wall insulation condition in inverter-fed motors using multi-frequency characteristics of leakage current [J]. Electric Machines and Control, 2023, 27(8): 64-72. (in Chinese)

[13] Li Hao, Gu Yi, Xiang Dawei, et al. Online condition monitoring of line-end coil insulation for inverter-fed machine by switching oscillation mode decomposition [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69(11): 11697-11708.

[14] 李豪, 刘静宇, 向大为, 等. 基于差模开关振荡的变频电机绕组相端绝缘状态特征提取与解耦[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(4): 1608-1617, I0030.
Li Hao, Liu Jingyu, Xiang Dawei, et al. Feature extraction and decoupling of line-end coil insulation for inverter-fed machine using high-frequency differential mode switching oscillation [J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(4): 1608-1617, I0030. (in Chinese)

[15] 赵秦聪, 杨二乐, 刘瑞芳, 等. 一种变频供电感应电机高频轴电流建模方法[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(23): 8139-8147.
Zhao Qincong, Yang Erle, Liu Ruifang, et al. Modeling of high frequency bearing currents of induction motors powered by frequency converters [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(23): 8139-8147. (in Chinese)

[16] Magdun O, Binder A. High-frequency induction machine modeling for common mode current and bearing voltage calculation [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2014, 50(3): 1780-1790.

[17] 李豪, 李耀, 向大为, 等. 基于中性点对地电压高频开关振荡的变频电机绕组内部绝缘在线监测[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(2): 817-826.
Li Hao, Li Yao, Xiang Dawei, et al. Online condition monitoring of winding internal insulation for inverter-fed machine using neutral-to-ground high-frequency switching oscillation voltage [J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(2): 817-826. (in Chinese)

[18] 李锦, 焦娜娜, 黄敏超, 等. 不同 PWM 调制方式下器件混合型三电平变流器 EMI 特性研究[J]. 电源学报, 2025, 23(5): 306-315.
Li Jin, Jiao Nana, Huang Minchao, et al. Research on EMI characteristics of three-level converter with hybrid devices in different PWM modes [J]. Journal of Power Supply, 2025, 23(5): 306-315. (in Chinese)

[19] Dragomiretskiy K, Zosso D. Variational mode decomposition [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2014, 62(3): 531-544.



王昌

作者简介：

王昌(1997—)，男，硕士研究生。研究方向：变频驱动系统电磁可靠性。E-mail: changwang13279@163.com。

李珊瑚(1985—)，女，通信作者，博士，教授。研究方向：高精度伺服驱动与运动控制，变频驱动系统电磁可靠性，矩阵变换器。E-mail：shanhuli@hebeut.edu.cn。

牛峰(1986—)，男，中国电源学会会员，博士，教授。研究方向：电机系统可靠性，电机控制，电机故障诊断。E-mail：niufeng@hebut.edu.cn。

丁一夫(1977—)，男，硕士，正高级工程师。研究方向：电驱动系统电磁兼容。E-mail：dingyifu@catarc.ac.cn。

王云(1991—)，男，硕士，工程师。研究方向：电驱动系统电磁兼容。E-mail：wangyun@catarc.ac.cn。

刘丽莎(1985—)，女，硕士，高级工程师。研究方向：水利水电工程电气及自动化设计。E-mail：330396457@qq.com。

(责任编辑：郭凯凯)