



# 变频电机绝缘潜在故障对电压波形的影响研究

刘冠芳<sup>1,2</sup>, 李丹<sup>1,2</sup>, 吴有龙<sup>1,2</sup>, 王清<sup>1,2</sup>, 樊洁心<sup>1,2</sup>

(1. 中车永济电机有限公司, 山西 永济 044502;

2. 轨道交通牵引电机山西省重点实验室, 山西 永济 044502)

**摘要:** 为探究变频电机潜在故障的预测方法, 文章以两电平变频器驱动的牵引电机为研究对象, 采用仿真分析与试验相结合的方法, 系统研究了不同绝缘电阻值和不同故障位置对相对地电压与中性点对地电压的影响规律。结果表明: 相对地电压开始畸变的临界绝缘电阻值取决于电机绕组对地电容和变频器频率; 当故障点位于绕组首端线圈时, 故障点相对地电压波形与其余两相波形的振荡状态差异最为显著, 此时中性点对地峰值电压较正常值升高约60%; 随着故障点向中性点方向移动, 三相对地电压波形逐渐趋于一致, 中性点电压畸变峰值也接近正常峰值电压。上述规律可为变频电机绝缘故障的电压特征提取与早期预测提供理论依据。

**关键词:** 变频电机; 绝缘故障; 中性点对地电压; 相对地电压

**中图分类号:** U264.1; TM34

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-128X(2026)01-0029-07

## 0 引言

随着变频控制技术的发展, 脉宽调制技术(PWM)在风力发电、新能源汽车、牵引电机等领域得到广泛应用。PWM技术具有高 $du/dt$ 及快速高频开关特性, 使绕组承受重复性过电压冲击, 加剧绝缘系统劣化, 降低电机运行可靠性。绕组绝缘作为变频电机中最薄弱的环节之一, 其故障率高达约40%<sup>[1-2]</sup>。一旦发生绝缘故障, 将导致电机停机且故障易扩展, 造成重大经济损失。因此, 开展绝缘故障发生前的在线诊断和早期预警研究, 对提升电机运行可靠性、降低故障风险具有重要意义。当前, 研究电机绝缘潜在故障对绕组特性的影响机理, 已成为在线监测与故障诊断领域的核心研究内容之一, 可为电机绝缘在线监测提供理论基础。

在电机老化过程中, 绝缘电阻逐渐降低, 电容与介质损耗增大, 起始放电电压下降, 局部放电量上升。

当电机存在绝缘潜在故障(如缺陷)时, 共模电流增大, 差分电流特征明显, 同时由缺陷形成的气隙会进一步加剧局部放电, 降低起始放电电压。针对老化及故障状态下的特征参量变化, 国内外学者围绕在线监测技术开展了不同方向的研究。国内方面, 中高压电机的在线监测主要基于局部放电, 通过分析缺陷对放电频谱的影响建立PD指纹库, 并利用支持向量机、BP神经网络等工具构建特征参量训练模型, 对绝缘的在线局部放电数据进行识别<sup>[3-4]</sup>。对于低压电机, 影响绝缘故障的主要参数为对地电容和绝缘电阻值, 匝间短路则影响电感参数。基于这些参数变化对电信号的影响, 国内研究者采用高频电源信号注入法识别故障模式<sup>[5-7]</sup>。

文献[8-9]根据电参数变化对自身特征电信号的影响, 通过算法提取特征频率下的电信号参数以识别逆变器故障。此外, 还有研究基于电机三相电流、共模电压/电流及差分电流开展绝缘状态特征参数分析<sup>[10]</sup>。文献[11]利用逆变器自激励的高频开关电源提取中性点

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFB3507503)

通信作者: 李丹, 女, 硕士, 高级工程师, 主要从事电机绝缘仿真技术方面的研究; E-mail: 76696582@qq.com

引用格式: 刘冠芳, 李丹, 吴有龙, 等. 变频电机绝缘潜在故障对电压波形的影响研究[J]. 机车电传动, 2026(1): 29-35.DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2026.01.004.

Citation: LIU Guanfang, LI Dan, WU Youlong, et al. Research on impact of potential insulation faults in variable frequency motors on voltage waveforms[J]. Electric drive for locomotives, 2026(1): 29-35.DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2026.01.004.

对地电压的谐振频率点,从而确定谐振频率下的电容值,根据电机绝缘电容值判断老化状态。文献[12]针对接地系统的双馈风力发电机,通过泄漏电流与共模电压确定电机绝缘的共模阻抗,实现绝缘状态在线监测。国外研究多基于漏电流和差模电流实现电机绝缘状态的在线监测<sup>[13-19]</sup>。值得注意的是,关于电机绝缘电阻降低对电压时域波形的影响,目前尚缺乏系统的分析。本文将提出一种新方法,该方法可直接反映由对地绝缘电阻变化导致的共模阻抗失衡,并结合故障位置对电压波形的影响规律,为非侵入式在线监测提供一种新的特征提取方法。与现有的局部放电、阻抗或电流监测方法相比,该方法无需大量前期数据分析和故障模式训练,可直接根据对地电压波形变化识别绝缘状态。

本文以电机绕组潜在故障为研究对象,基于故障点绝缘电阻变化及故障位置对相对地电压的影响,并结合电信号采集的工程可行性,系统分析了故障状态下相对地电压与中性点对地电压的变化规律,为电机在线监测方法提供理论依据与技术参考。

## 1 等效模型的建立

### 1.1 逆变系统等效模型的搭建

变频器内部高功率器件 IGBT 的频繁开断会产生高频信号,表现为过冲共模电压与共模电流。在电机绝缘正常时,变频器开关频率通常为几百赫兹至几千赫兹,该频率段下对地容性漏电流远大于绝缘电阻漏电流,因此分析共模泄漏电流时可忽略绝缘电阻值的影响。当绝缘电阻降低时,阻性漏电流显著增大,进而改变共模电压分布。为准确分析变频器脉宽调制(PWM)控制的方波脉冲及高频谐波对电机绕组电压的影响,本文以两电平变频器为研究对象,采用 1/2 接地方式,中间直流母线电压  $V_{dc}$  为 1 kV。逆变器与电机通过 3 m 长的电缆连接,电机绕组为星形连接。电机及逆变系统模型如图 1 所示。

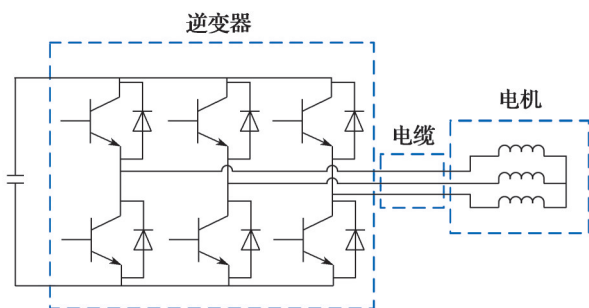


图1 电机及逆变系统模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of motor and inverter system model

### 1.2 电机绕组等效模型

以某型变频电机为例,其主要参数为:额定功率

360 kW,额定电压 2 kV,铁心长度 130 mm。电机共包含 36 支线圈,每相 12 支线圈。以单支线圈为基本建模单元,其等效电路模型如图 2 所示。各线圈按实际接线方式串联后构成三相星形连接,并通过电阻和接地电容接地。

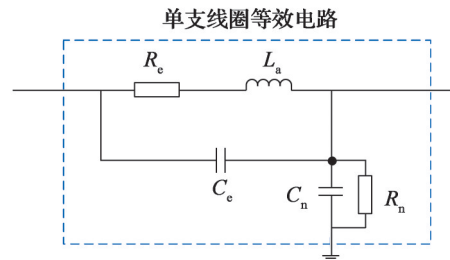


图2 单支线圈等效电路模型

Fig. 2 Equivalent circuit diagram of a single coil

图 2 中,  $R_e$  为电机绕组的等效铁损和铜损之和,  $L_a$  为线圈电感,  $C_e$  为等效匝间电容,  $C_n$  为线圈对地电容,  $R_n$  为绝缘电阻。

在考虑集肤效应和邻近效应的情况下,绕组等效铜损电阻可通过如下解析公式计算:

$$R_{Cu} = \frac{2l_d}{\alpha(\pi\mu_0\mu_r\sigma f)^{-1/2}\sigma} \quad (1)$$

式中:  $l_d$  为导体长度;  $\alpha$  为导体截面周长;  $\sigma$  为铜的电导率;  $\mu_0$ 、 $\mu_r$  分别为真空磁导率和导体相对磁导率,其值分别为  $4\pi \times 10^{-7} \text{H/m}$  和  $1 \text{H/m}$ ;  $f$  为频率,取值 1 MHz。

等效铁损电阻可由式(2)计算得出。

$$R_{Fe} = \frac{3U_0^2}{P_0} - \frac{P_0}{3I_0^2} \quad (2)$$

式中:  $P_0$  为电机空载损耗;  $I_0$  为电机空载电流。

根据式(1)和式(2)可得电机绕组的等效铁损和铜损之和  $R_e$ , 如(3)式所示。

$$R_e = R_{Cu} + R_{Fe} \quad (3)$$

涡流效应使定子铁芯对磁通具有良好的屏蔽作用,因此相邻槽中各线圈之间的耦合可忽略<sup>[11-13]</sup>。对地电容及匝间电容可由式(4)计算。

$$C = \frac{\epsilon S}{4\pi k d} \quad (4)$$

式中:  $\epsilon$  为极板间介电常数;  $S$  为极板正对面积;  $k$  为静电力常量;  $d$  为极板间距离。

线圈间电感可由式(5)计算。

$$L = \frac{\mu \kappa N^2 S}{I} \quad (5)$$

式中:  $\mu$  为磁导率;  $\kappa$  为长冈系数;  $N$  为绕线匝数;  $S$  为线圈的横截面积;  $I$  为线圈轴长。

电感与电容的取值取决于线圈自身参数,可通过有限元法对静态磁场和静态电场进行分析获得,结合角频率  $\omega$  可求得容抗与感抗,两者共同作用在电路中激发电磁振荡响应。

计算得到该电机单支线圈的分布参数为:  $R_e = 18.56 \Omega$ ,  $L_a = 33.5 \mu\text{H}$ ,  $C_e = 288.72 \text{pF}$ ,  $C_n = 333.53 \text{pF}$ ,

$R_n=10^6 \Omega$ 。本文仿真计算基于上述参数对电机绕组参数进行赋值, 并在故障点处并联一个小电阻以模拟绝缘电阻低的状态。

## 2 绝缘电阻对电压波形的影响

电机绕组绝缘电阻降低的故障通常源于某一线圈的绝缘薄弱点。各线圈对地绝缘电阻呈并联关系, 因此整机绝缘电阻随之下降。基于三相电压对称, 本文以U相绕组绝缘电阻降低为例, 分析其对电机绕组相对地电压、中性点对地电压的影响。

### 2.1 对地电压影响分析

电机绕组的共模信号是指通过绕组绝缘与地之间的寄生电容及绝缘电阻所形成的电压和电流信号, 如图3所示。图3中,  $U_1$ 为变频器端对地电压,  $U_2$ 为电机端对地电压,  $I_1$ 为共模电流。  $C_1$ 、 $R_1$ 分别为变频器接地电容和接地电阻,  $C_2$ 、 $R_2$ 分别为电机绕组绝缘对地等效电容与绝缘电阻。

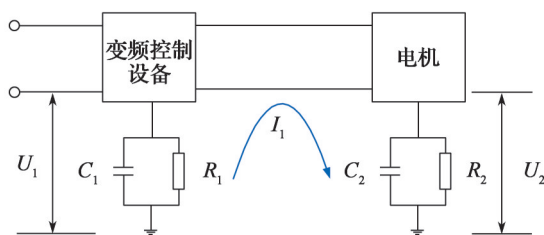


图3 共模电压电流示意图

Fig. 3 Schematic diagram of common mode voltage and current

当 $R_2$ 降低时, 系统对地阻抗减小。在 $C_1$ 、 $C_2$ 及直流母线电压不变的情况下, 绕组对地共模电流增大, 导致 $C_1$ 两端电压的高频分量产生暂态过冲, 进一步抬高电压上升沿或下降沿的峰值; 同时,  $R_2$ 的降低也会使电机绕组对地电压的稳定幅值下降。

当 $R_2$ 足够大时, 主要的漏电流为容性漏电流, 电阻性漏电流可忽略不计。当绝缘电阻值降低至接近或低于电容容抗时, 该处漏电流逐渐转变为电阻性漏电流。该电机对地电容 $C_2$ 约为30 nF, 变频器开关频率为450 Hz, 由此可得电机绕组对地容抗为

$$R_c = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C} = 10.615 \text{ k}\Omega \quad (6)$$

当电机绕组绝缘电阻降至接近10 k $\Omega$ 时, 绕组共模电压开始出现明显变化。该结论与仿真分析结果完全吻合: 绝缘电阻为10 k $\Omega$ 时, 共模电压波形发生畸变。仿真与理论分析表明, 变频电机共模电压的畸变临界点取决于绕组对地电容和变频器开关频率, 只有当绝缘电阻值降低至接近或低于该容抗值时, 共模电压波形才会产生畸变。

### 2.2 相对地电压仿真

设定U相绝缘电阻降低(由M $\Omega$ 级降至k $\Omega$ 级), 计算相对地电压的变化规律。为进一步准确确定波形发生变化的临界电阻值, 计算绝缘电阻在约0.2 s时由1 M $\Omega$ 分别降至10 k $\Omega$ 、1 k $\Omega$ 的U相对地电压, 并分析其波形变化, 结果如图4、图5所示。

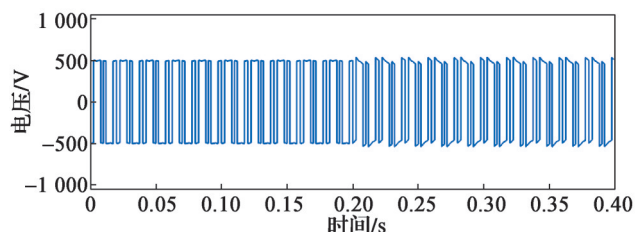


图4 U相对地电压波形(10 k $\Omega$ )

Fig. 4 U-phase-to-ground voltage waveform (10 k $\Omega$ )

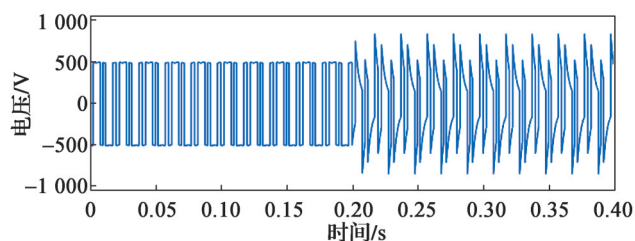


图5 U相对地电压波形(1 k $\Omega$ )

Fig. 5 U-phase-to-ground voltage waveform (1 k $\Omega$ )

由图4和图5可知, 当绝缘电阻为M $\Omega$ 级及以上时, 相对地电压呈现为 $+V_{dc}/2$ 与 $-V_{dc}/2$ 两个电平的脉冲波形; 当绝缘电阻由1 M $\Omega$ 级降至10 k $\Omega$ 时, 对地电压峰值增加约50 V, 稳态幅值降低约为30 V; 当绝缘电阻进一步降至1 k $\Omega$ 时, 相对地电压波形由方波变为具有尖锐峰值的不规则脉冲波, 峰值电压由原来的500 V急剧上升至900 V, 畸变率达80%; 电压电平幅值由500 V下降至约250 V, 降幅为50%。需说明的是, 本文中所有峰值电压的变化百分比均以正常状态下的峰值电压为基准, 对于方波脉冲则以脉冲幅值为基准。

### 2.3 中性点对地电压仿真

逆变器输出的陡沿阶跃波作用于电机绕组分布参数, 导致中性点对地电压产生开关振荡。此外, 在中频段, 绕组内部各线圈处产生开关瞬态电压振荡, 进一步引起中性点对地电压出现暂态过冲。在相对地电压波形发生变化的同时, 中性点对地电压的振荡特性也受到相应影响。

当对地绝缘电阻为10 k $\Omega$ 时, 中性点处因三相电压变化不明显, 其电压波形畸变较小; 而当绝缘电阻在约0.2 s降至1 k $\Omega$ 时, 中性点对地电压出现明显畸变, 具体波形如图6所示。

由图6可知, 当绝缘电阻处于正常范围(M $\Omega$ 级以

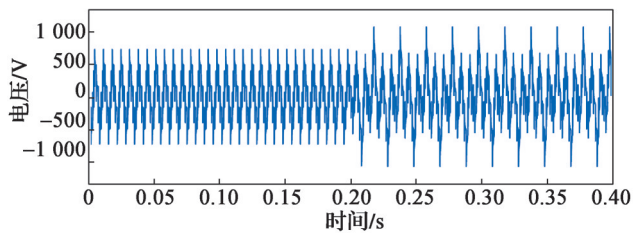


图6 中性点对地电压波形图

Fig. 6 Neutral-point-to-ground voltage waveform

上) 时, 中性点对地电压呈现为 $+V_{dc}/2$ 、 $-V_{dc}/2$ 、 $+V_{dc}/6$ 、 $-V_{dc}/6$ 这4个电平的脉冲波形, 且在电压上升沿与下降处伴有高频冲击电压, 最大峰值电压为750 V。当U相绝缘电阻降至1 k $\Omega$ 时, 三相分布参数失去对称性, 中性点对地电压波形的振荡不再保持规律性对称, 4个电平的幅值下降, 上升沿与下降沿的过冲电压较正常值增大25%, 最大峰值电压达到约1 000 V。

### 3 故障点位置对电压波形的影响

研究对象电机共包含36支线圈, 每相12支线圈。为探讨后续在线监测中故障定位的可行性, 分析了不同位置线圈故障对相对地电压、中性点对地电压的影响。故障点分别设置于U相的第1支线圈(故障点1)、第7支线圈(故障点2)及第12支线圈(故障点3), 具体如图7所示。为便于观察故障位置对电压的影响, 将故障点线圈对地绝缘电阻统一设为1 k $\Omega$ 。



图7 故障点位置示意图

Fig. 7 Schematic diagram of fault point locations

#### 3.1 故障点位置对相对地电压的影响

故障点1、故障点2、故障点3对应的三相对地电压波形分别如图8~图10所示。

由图8可知, 当故障点位于U相第1支线圈时, 三相对地电压波形变化各异。故障相(U相)的相对地电压波形明显区别于其余两相, 各相峰值均在绝缘电阻降低后出现电压畸变: 波形由原来的方波演变为不规则波形, 峰值电压增大, 正、负电平幅值由原来的500 V急剧下降, 无稳定电平。由于U相首支线圈接地, U相对地电压的峰值畸变更陡, 电平幅值被拉至最低。

当故障点位于第7支线圈时, 如图9所示, 三相电压波形差异逐渐减小。当故障点接近中性点时, 如图10所示, 三相电压波形畸变状态基本趋于一致。因此,

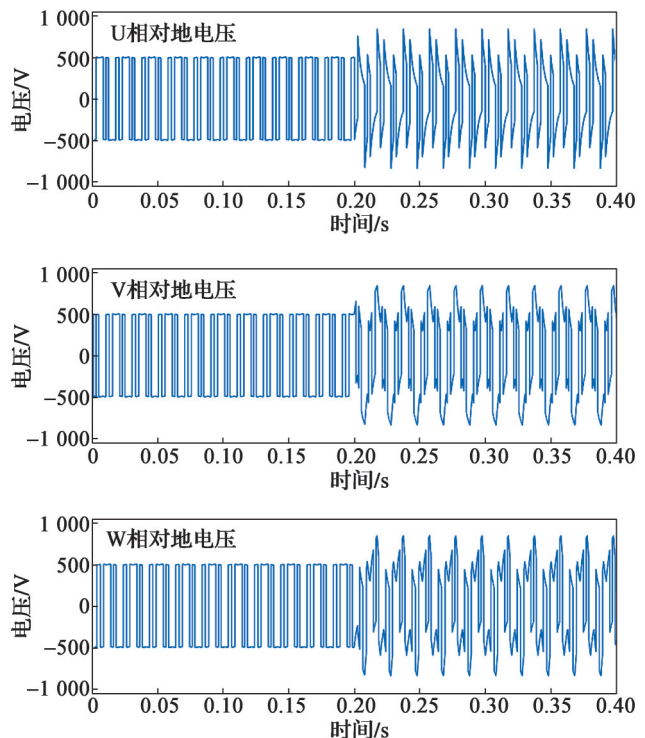


图8 三相对地电压波形图(故障点1)

Fig. 8 Three-phase-to-ground voltage waveform (fault point 1)

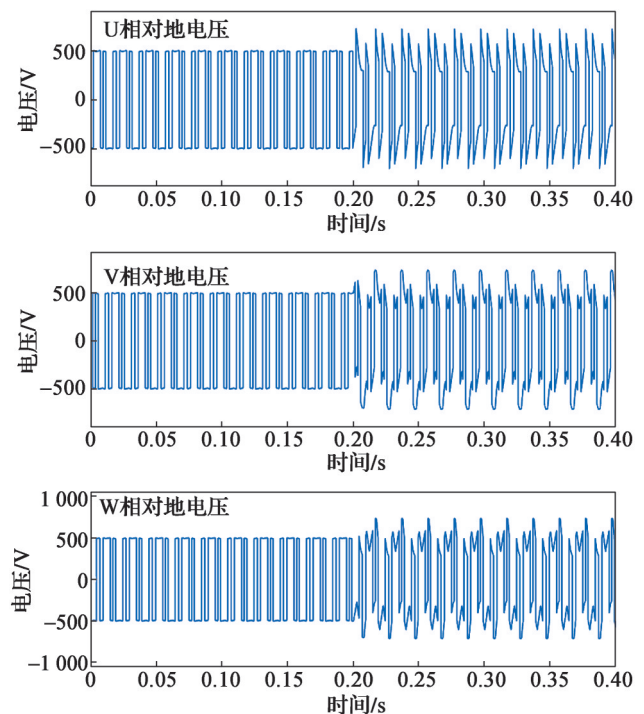


图9 三相对地电压波形图(故障点2)

Fig. 9 Three-phase-to-ground voltage waveform (fault point 2)

根据相对地电压波形的畸变特征, 可大致判断故障线圈的位置。

#### 3.2 故障点位置对中性点对地电压的影响

故障点分别位于U相第1支线圈、第7支线圈和第12支线圈时, 其中性点对地电压波形变化如图11所示。

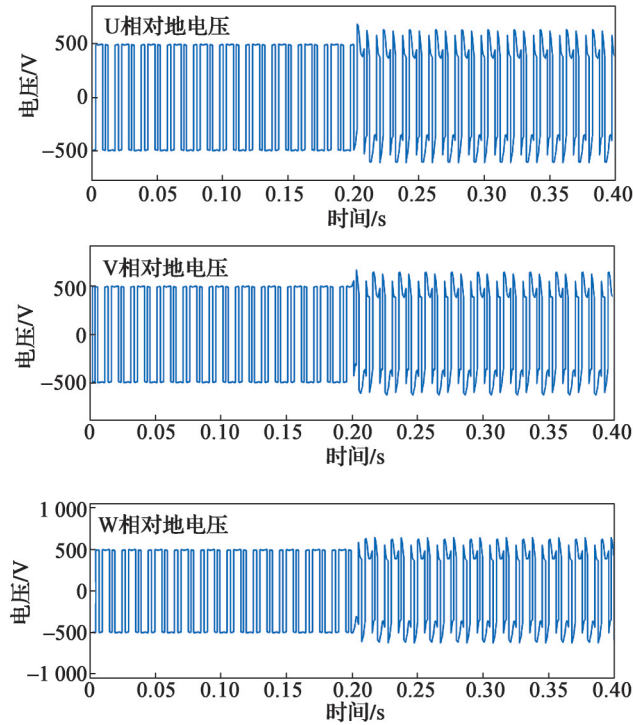


图10 三相对地电压波形图(故障点3)

Fig. 10 Three-phase-to-ground voltage waveform (fault point 3)

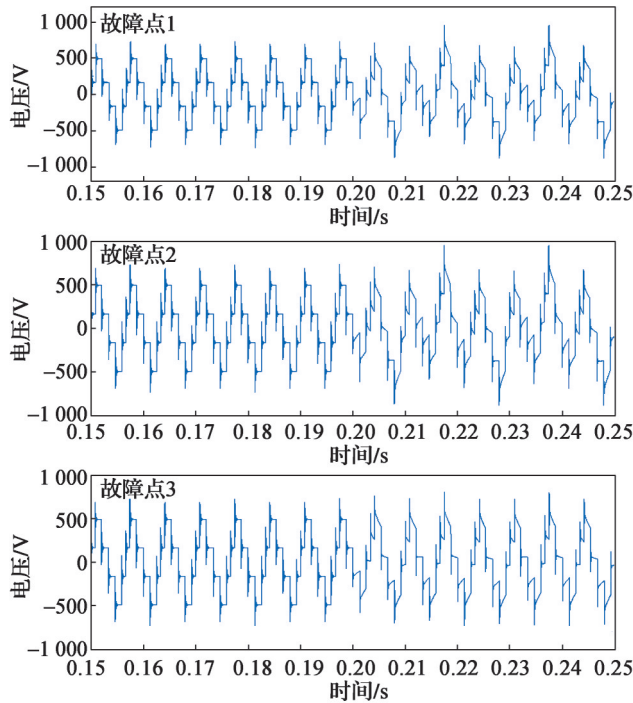


图11 中性点对地电压波形图

Fig. 11 Neutral-point-to-ground voltage waveform

由图11可知,当故障点位于首支线圈时,中性点对地电压出现突变,峰值由正常值750 V增加至1 081 V;故障点位于中间线圈时,突变电压峰值为986 V;故障点后移至接近中性点时,突变电压峰值约为800 V。随着故障点的后移,突变电压峰值逐渐降低,最大电平幅值也有所下降,这表明故障点位置对中性点对

地电压的影响程度逐渐减弱。此外,故障点的存在导致中性点对地电压波形的电平幅值无法稳定在 $+V_{dc}/2$ 、 $-V_{dc}/2$ 、 $+V_{dc}/6$ 、 $-V_{dc}/6$ 这4个电平上,而是呈现出不同程度的上升或下降趋势。

#### 4 试验验证

为验证绝缘电阻降低对电压波形的影响规律,以360 kW/2 kV变频牵引电机为研究对象,对线圈1的绝缘进行破坏,并外接1 k $\Omega$ 电阻以模拟该线圈的绝缘故障。分别采集电机正常状态和并接1 k $\Omega$ 电阻状态下的相对地电压波形。试验中,该电机连接变频器的直流母线电压 $U_{dc}$ 为1 kV,开关频率为450 Hz,电压上升沿历时为1  $\mu$ s。采用高压探头(Tektronix P6015A)测试U相和V相对地电压,信号采集器为Tektronix DPO 3014示波器(采样率2.5 GS/s,带宽100 MHz),电压变化结果如图12~图15所示。

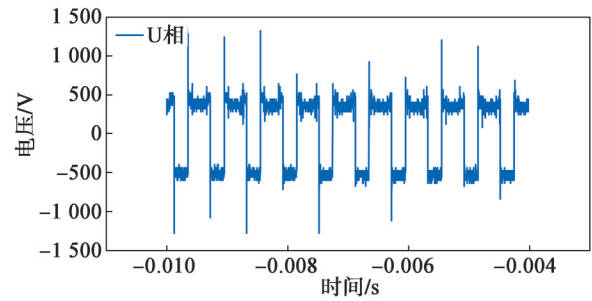


图12 U相正常电压波形

Fig. 12 Normal voltage waveform of U-phase

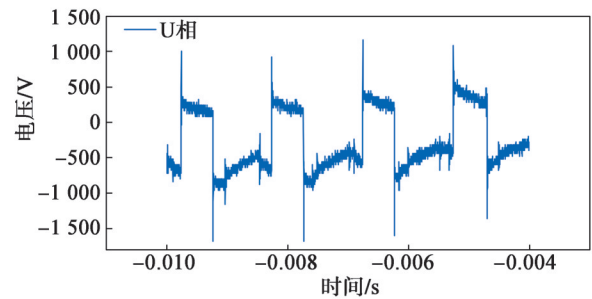


图13 U相故障下的电压波形

Fig. 13 Voltage waveform under U-phase fault

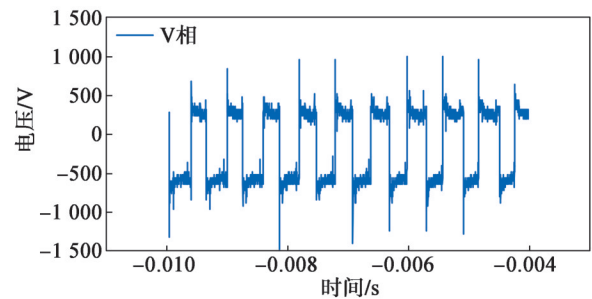


图14 V相正常电压波形

Fig. 14 Normal voltage waveform of V-phase

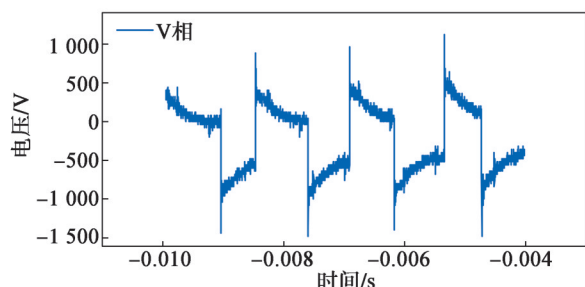


图 15 V相故障下的电压波形

Fig. 15 Voltage waveform under V-phase fault

由图 12 可知, 正常状态下的波形也存在较高的峰值电压, 与仿真所得标准方波存在较大差异。其原因可能包括: 实际测量中连接电缆的存在导致电机与电缆阻抗特性不匹配, 从而在电机端产生过电压; 电缆的分布电感以及测试引入的寄生电容、寄生电感也会影响波形形态; 此外, IGBT 关断瞬间电流急剧变化, 在电机绕组电感等寄生电感上产生较高的过冲电压, 进一步使波形出现较大的峰值电压。上述峰值电压可能掩盖接地故障对峰值电压的畸变影响。

在实际电机运行中, 除关注峰值电压外, 还可通过观察电平幅值的分布, 或对采集波形进行数据清洗, 滤除系统本身产生的高频峰值电压, 从而保留由接地故障引起的峰值电压成分。正常状态下, U、V 两相对地电压波形为  $+V_{dc}/2$ 、 $-V_{dc}/2$  两个电平的方波脉冲波形, 其中 V 相电压受电缆等因素影响, 整体波形略有下移, 但正、负电平之间的差值仍为  $V_{dc}$ 。当接入 1 k $\Omega$  电阻后, 由图 13 和图 15 可明显看出, U 相和 V 相的电平幅值急剧下降, 两电平间的幅值差远低于  $V_{dc}$ 。实际电机测试受背景电磁干扰影响, 由高次谐波产生的上升沿/下降沿峰值电压持续波动, 但故障状态下的峰值电压仍高于正常波形电压。试验数据在电平幅值变化趋势及峰值电压的变化方面与仿真分析基本吻合, 从而验证了仿真结果的参考价值。

## 5 结论

本文以绝缘电阻对中性点对地电压及相对地电压信号的影响为研究内容, 通过仿真和试验相结合的方法, 分析了绝缘电阻降低及故障点位置对上述电压波形的影响规律, 得出以下结论:

①相对地电压开始发生畸变的临界对地绝缘电阻值为 10 k $\Omega$ 。该畸变电阻值取决于电机绕组对地电容和变频器频率; 不同电机的对应值存在差异。当绝缘电阻降至 1 k $\Omega$  时, 相对地电压电平幅值最大可降低 50%, 峰值电压最高可增大 80%。

②故障点位置不同, 三相对地电压波形各异。故障点越靠近首支线圈, 故障相的相对地电压波形峰值畸变越陡峭, 且电平被拉得越低, 与其余两相的波形

差异越大; 随着故障点向中性点方向移动, 三相对地电压的畸变差异逐渐减小, 波形趋近一致。

③故障点位于首端线圈时, 中性点对地电压峰值增大, 电平幅值出现振荡; 故障点越接近中性点, 中性点对地电压峰值越接近正常值, 但电平幅值存在明显振荡(上升或下降)。依据三相电压畸变波形的相似性及中性点峰值电压的大小, 可大致判断故障点的位置。

④试验结果显示, 故障点的低绝缘电阻能够显著降低相对地电压的电平幅值, 与仿真分析结论吻合, 但实测波形受高频谐波影响, 故障对峰值电压的影响在实测结果中表现不够显著。

## 参考文献:

- [1] 李豪, 赵孟, 向大为, 等. 基于开关瞬态频率响应的伺服电机早期匝绝缘劣化在线监测[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(10): 3359-3367.  
LI Hao, ZHAO Meng, XIANG Dawei, et al. On-line monitoring of incipient turn insulation deterioration of servo motor using switching transient frequency response[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(10): 3359-3367.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 李志鹏. 动车牵引电机定子绝缘在线监测与可靠性评估方案研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2020.  
LI Zhipeng. Research on the scheme of on-line monitoring and reliability evaluation for the stator insulation of traction motor of motor EMU[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2020.
- [5] 李政达, 张旭浩, 江周余, 等. 基于开关振荡电流的交流电机主绝缘在线监测[J]. 机车电传动, 2024(2): 126-131.  
LI Zhengda, ZHANG Xuhao, JIANG Zhouyu, et al. Online monitoring of AC motor grounding insulation based on switch oscillating current[J]. Electric drive for locomotives, 2024(2): 126-131.
- [6] 王鑫, 牛志钧, 李静. 基于 MCA 技术的电机故障诊断[J]. 机车电传动, 2020(4): 85-89.  
WANG Xin, NIU Zhijun, LI Jing. Motor fault diagnosis based on MCA technology[J]. Electric drive for locomotives, 2020(4): 85-89.
- [7] 耿民, 秦嘉翼, 刘明杰, 等. 基于阶跃激励响应的牵引电机定子早期匝间短路故障诊断方法[J]. 机车电传动, 2024(2): 158-164.  
GENG Min, QIN Jiayi, LIU Mingjie, et al. Diagnosis of early turn-to-turn short-circuit faults of traction motor stators

- based on step excitation response[J]. Electric drive for locomotives, 2024(2): 158-164.
- [8] 施以旋, 毛庆洲, 戴焕云, 等. 基于电机振动的动车组牵引逆变器故障诊断研究[J]. 机车电传动, 2024(2): 151-157.  
SHI Yixuan, MAO Qingzhou, DAI Huanyun, et al. Research on fault diagnosis of EMU traction inverter based on motor vibration[J]. Electric drive for locomotives, 2024(2): 151-157.
- [9] 曹瑞钧, 郭其一. 基于ICEEMDAN-FE和支持向量机的三电平逆变器的故障诊断技术[J]. 机车电传动, 2023(1): 97-103.  
CAO Ruijun, GUO Qiyi. Fault diagnosis technology for three-level inverter based on ICEEMDAN-FE and SVM[J]. Electric drive for locomotives, 2023(1): 97-103.
- [10] 车向中, 孙佳伟, 姜涛. 一种智能在线监测牵引电机绝缘故障的方法: CN202111100857.7[P]. 2021-09-18.  
CHE Xiangzhong, SUN Jiawei, JIANG Tao. A method for intelligently monitoring insulation faults of traction motors online: CN202111100857.7[P]. 2021-09-18.
- [13] 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.
- [14] 郑大勇, 乐振春, 常玉红, 等. 基于共模阻抗的双馈异步发电机转子绕组绝缘在线监测[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(7): 2791-2799.  
ZHENG Dayong, YUE Zhenchun, CHANG Yuhong, et al. Online monitoring for rotor winding insulation of doubly-fed induction generator using common-mode impedance[J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(7): 2791-2799.
- [15] ZOELLER C, VOGELBERGER M A, FASCHING R, et al. Evaluation and current-response-based identification of insulation degradation for high utilized electrical machines in railway application[J]. IEEE transactions on industry applications, 2017, 53(3): 2679-2689.
- [16] PANAGIOTOU P A, GYFTAKIS K N, LOPHITIS N, et al. Investigation of traction motor windings' insulation capacitance at switching frequencies under accelerated thermal stress[C]//IEEE. 2017 IEEE 11th International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives. Tinos, Greece: IEEE, 2017: 537-543.
- [17] LEE S B, YANG J, YOUNSI K, et al. An online groundwall and phase-to-phase insulation quality assessment technique for AC-machine stator windings[J]. IEEE transactions on industry applications, 2006, 42(4): 946-957.
- [18] YOUNSI K, NETI P, SHAH M, et al. On-line capacitance and dissipation factor monitoring of AC stator insulation[J]. IEEE transactions on dielectrics and electrical insulation, 2010, 17(5): 1441-1452.
- [19] ZHANG P J, YOUNSI K, NETI P. A novel online stator ground-wall insulation monitoring scheme for inverter-fed AC motors[C]//IEEE. 2013 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. Denver: IEEE, 2013: 3541-3547.

## Research on impact of potential insulation faults in variable frequency motors on voltage waveforms

LIU Guanfang<sup>1,2</sup>, LI Dan<sup>1,2</sup>, WU Youlong<sup>1,2</sup>, WANG Qing<sup>1,2</sup>, FAN Jiexin<sup>1,2</sup>

(1. CRRC Yongji Electric Co., Ltd., Yongji, Shanxi 044502, China;

2. Shanxi Key Laboratory of Traction Motor for Rail Transit, Yongji, Shanxi 044502, China)

**Abstract:** To investigate potential fault prediction methods for variable frequency motors, this paper takes a traction motor driven by a two-level frequency converter as the research object, and studies the influence rule of different insulation resistance values and fault locations on the phase-to-ground voltage and neutral-point-to-ground voltage through a combination of simulation analysis and test. The results are as follows: the critical insulation resistance value at which the phase-to-ground voltage starts to distort depends on the ground capacitance and converter frequency of the motor windings; when the fault point is located at the starting coil, the difference in oscillation characteristics between the phase-to-ground voltage waveform of the faulty phase and that of the other two phases is the most pronounced, at which the neutral-point-to-ground peak voltage increases by about 60% compared to the normal value. As the fault point approaches the neutral point, the three-phase-to-ground voltage waveforms become more similar, and the distorted peak value of the neutral-point voltage gradually approaches the normal peak voltage. The above rule provides a theoretical basis for voltage feature extraction and early prediction of insulation faults in variable frequency motors.

**Keywords:** variable frequency motor; insulation fault; neutral-point-to-ground voltage; phase-to-ground voltage