

SiC 逆变器特性对牵引电机绕组电压分布影响分析

吴有龙, 刘冠芳, 樊洁心, 李 丹

(中车永济电机有限公司 轨道交通牵引电机山西省重点实验室, 山西 永济 044502)

摘 要: 为了研究 SiC 逆变器特性对牵引电机绕组电压分布的影响, 本文首先提出了考虑导体邻近电容效应的电机绕组高频分布参数的等效电路模型; 其次分析了 SiC 逆变器输出单相脉冲和三相脉冲下的绕组电压应力分布特性, 并利用试验测试平台验证了模型分析结果的正确性; 最后分析了 SiC 逆变器的开关频率、 dv/dt 和接地方式对绕组电压应力分布的影响。结果表明: 单相脉冲作用下, 绕组的最大对地电压应力出现在另外两相的接近逆变器绕组上; 三相脉冲作用下, 最大对地电压应力均出现在本相的中间位置绕组上; 开关频率不会影响绕组对地电压应力和匝间电压应力最大值; dv/dt 会严重影响绕组匝间电压应力分布, 当 dv/dt 由 $2.0 \text{ kV}/\mu\text{s}$ 增加到 $15.0 \text{ kV}/\mu\text{s}$ 时, 匝间电压应力最大值会提升 3 倍左右; 不同的接地方式对绕组对地电压应力分布的影响较大, 采用 1/2 接地系统时, 绕组对地电压应力最小。

关键词: SiC 逆变器; 牵引电机; 电压应力; 分布参数; 绝缘

Analysis of influence of SiC inverter characteristics on voltage distribution in traction motor windings

WU Youlong, LIU Guanfang, FAN Jiexin, LI Dan

(Shanxi Key Laboratory of Traction Motor for Rail Transit, CRRC Yongji Electric Co., Ltd.,
Yongji 044502, China)

Abstract: To investigate the influence of SiC inverter characteristics on the voltage distribution in traction motor windings, this paper first proposed an equivalent circuit model for the high-frequency distributed parameters of motor windings that accounted for the proximity capacitance effect of the conductor. Subsequently, the voltage stress distribution characteristics of the winding under single-phase and three-phase pulse output from the SiC inverter were analyzed, and the correctness of the model analysis results was verified using an experimental test platform. Finally, the effects of the switching frequency, dv/dt , and grounding method of the SiC inverter on the winding voltage stress distribution were analyzed. The results show that under single-phase pulse operation, the maximum voltage stress to ground of the windings occurs on the winding near the inverter of the other two phases. Under three-phase pulse operation, the maximum voltage stress to ground appears on the middle-position winding of the respective phase. The switching frequency does not affect the maximum values of either the voltage stress to ground or the interturn voltage stress of the winding. The dv/dt significantly affects the interturn voltage stress distribution, when dv/dt increases from $2.0 \text{ kV}/\mu\text{s}$ to $15.0 \text{ kV}/\mu\text{s}$, the maximum interturn voltage stress increases by about three times. Different grounding methods have a considerable influence on the voltage stress to ground distribution of winding, and the minimum voltage stress to ground is achieved when a 1/2 grounding system is adopted.

Key words: SiC inverter; traction motor; voltage stress; distribution parameters; insulation

0 引言

随着电力机车的高速化、重载化发展, 电驱系统的功率密度逐步增加, 电力机车牵引电机迈向了高速化、高频化、高压化^[1]。由于本征极限, 传统硅基器件的开关频率已经达到上限^[1-2]。第三代宽禁带半导体器件 SiC、GaN 等已经逐步在电驱动系统中使用。基于高开关频率, SiC 器件能有效地降低

电机绕组中的电流谐波和谐波损耗, 从而使电机的效率得到提升^[3]。SiC 器件高的直流母线电压使得电机高效区转向高速区, 从而更符合牵引电机高效、轻量化的需求^[4]。但是, SiC 器件的使用将会导致牵引电机定子绕组长期地处在更大的 dv/dt 脉冲电压作用下, 使绕组承受更高的冲击电压, 严重威胁系统的安全可靠运行^[5-6]。

SiC 器件高速开关动作输出的宽频激励作用在变频牵引电机系统上, 电机系统的高频分布参数会

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2023YFB3507503)。

导致开关动作下的电压振荡响应^[7-8],定子绕组电压应力呈现非均匀、非线性分布^[9-11],大的非均匀、非线性电压应力冲击容易导致局部绝缘变得薄弱^[12],使绝缘击穿的风险大幅增加。

SiC 器件输出的宽频激励作为牵引电机的输入脉冲电压激励源,其输出特性取决于极性、开关频率、dv/dt 和接地方式^[13-16],逆变器输出的相电压和线电压会直接作用在绕组主绝缘和相间绝缘上^[17]。逆变器的这种特性加之绕组高频分布参数,共同导致绕组电压应力分布不均,这种不均匀性会大幅增加绝缘系统匝间和主绝缘的击穿风险^[18-19]。

文献[20]通过有限元方法对一台扁线叠绕组在高频脉冲电压作用下的绕组匝间电压进行了计算。文献[21]提出考虑双导体边耦合效应的 Hairpin 绕组单匝线圈高频等效电路模型,并结合有限元算法分析计算了绕组匝间绝缘的电压应力,为了简化高频等效电路的计算,针对电容只考虑对地电容和本匝的匝间电容,未考虑相邻匝相间电容(如针对第 1 匝,只考虑 1~2 匝间电容,对 1~3 匝间电容不作考虑)。然而关于 SiC 逆变器输出特性对变频电机绕组对地电压应力和匝间电压应力分布的研究尚未报道。

针对上述问题,本文建立考虑邻近匝间电容的高频等效电路模型(全参数模型),分析逆变器特性开关频率、dv/dt 和接地方式对牵引电机绕组电压应力的分布,并结合试验验证计算的准确性,以期 SiC 器件逆变器供电下的牵引电机绝缘系统设计提供有力支撑。

1 模型电机绕组结构及参数

以某扁线绕组异步牵引电机为研究对象。该电机为一台 4 极 60 槽、8 匝绕组结构的异步电动机。电机定子三维结构示意图如图 1 所示,电机详细参数如表 1 所示,绕组导体尺寸为 2.14 mm×3.43 mm,8 匝绕制方式为双根并绕。

2 高频脉冲下的绕组电压计算

SiC 器件相较于传统 Si 器件,上升时间可低至 50 ns,开关频率可达 500 kHz^[20-21],加之 SiC 器件的使用会提供更高的直流母线电压,dv/dt 更是达到 20 kV/μs^[22],电机绕组主绝缘会承受更大的电应力,逆变器的不同接地方式能有效地改善绕组绝缘电应力分布^[23]。高频脉冲电压的作用会导致绕组匝间

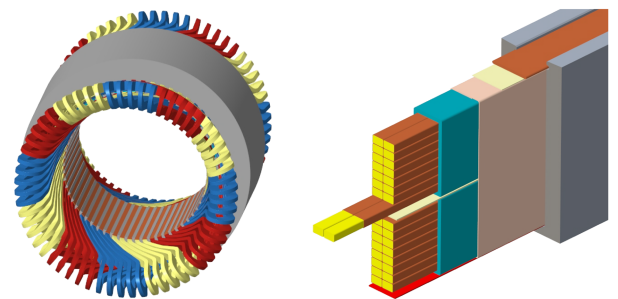


图 1 扁线绕组异步牵引电动机定子结构示意图
Fig.1 Schematic diagram of stator structure of flat wire winding asynchronous traction motor

表 1 电机技术参数	
Table 1 Technical parameters of the motor	
参数	数值
额定功率/kW	650
额定电压/V	2 800
额定电流/A	170
额定转速/(r/min)	4 173
极数	4
绕组接线方式	Y
线圈节距	12

承受不均匀的电压应力,严重时会导致匝间击穿。因此,绕组电压的准确计算是判断绝缘安全的先决条件。

2.1 高频等效电路模型

为了考虑邻近线匝的作用,以匝为单位建立单支线圈的高频等效电路模型,如图 2 所示。其中 R_x 代表第 x 匝的等效交流电阻, L_x 代表第 x 匝的自感, M_{xy} 代表第 x 匝和第 y 匝的互感, C_x 代表第 x 匝的对地电容, C_{xy} 代表第 x 匝和第 y 匝的匝间电容。

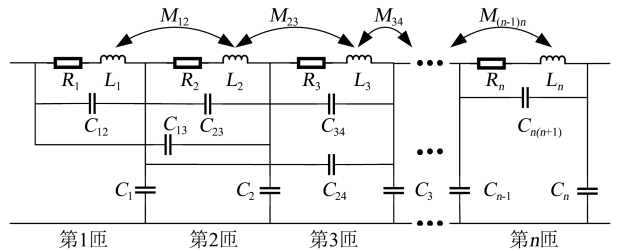


图 2 单支线圈高频等效电路
Fig.2 High-frequency equivalentent circuit of a single coil

若每一个绕组为 n 匝,则包含 $2n$ 个导体边,根据 KLC 和 KLV 定律,可以建立节点 k 的电压和电流方程,如式(1)~(2)所示。

$$u_{j-1} - u_j - R_j i_j - L_{jj} \frac{di_j}{dt} - \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^{2n} M_{ji} \frac{di_i}{dt} = 0 \quad (1)$$

$$i_j - i_{j+1} - C_{j,0} \frac{du_j}{dt} - \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^{2n} C_{j,i} \frac{d(u_j - u_i)}{dt} = 0 \quad (2)$$

式(1)~(2)中: t 为时间; u_i 为节点 i 的对地电压; u_j 为节点 j 的对地电压; u_{j-1} 为第 $j-1$ 个节点的对地电压,当 $j=1$ 时, $u_{j-1}=u_0$; R_j 为第 j 个导体的电阻; $L_{j,j}$ 为第 j 个导体的自感; $M_{j,i}$ 为第 j 个导体和第 i 个导体的互感; i_j 为第 j 个导体的电流; i_{j+1} 为第 $j+1$ 个导体的电流; $C_{j,0}$

为第 j 个导体的对地分布电容; $C_{j,i}$ 为第 j 个导体和第 i 个导体间的分布电容。

由式(1)和式(2)可得(3)~(4)。

$$Y \left(\frac{dU}{dt} \right) = I \quad (3)$$

$$Z \left(\frac{dI}{dt} \right) = U_Z \quad (4)$$

其中, Y 、 I 、 U 、 U_Z 分别如式(5)~(8)所示。

$$Y = \begin{bmatrix} C_{1,0} + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^{2n} C_{1,i} & -C_{1,2} & \cdots & -C_{1,i} & \cdots & -C_{1,2n} \\ -C_{2,1} & C_{2,0} + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^{2n} C_{2,i} & \cdots & -C_{2,i} & \cdots & -C_{2,2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ -C_{j,1} & -C_{j,2} & \cdots & C_{j,0} + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^{2n} C_{j,i} & \cdots & -C_{j,2n} \\ \vdots & \vdots & & -C_{j+1,i} & & \vdots \\ -C_{2n,1} & -C_{2n,2} & \cdots & -C_{2n,i} & \cdots & C_{2n,0} + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^{2n} C_{2n,i} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$I = [i_1 \cdots i_j \cdots i_{2n}] \quad (6)$$

$$U = [u_1 \cdots u_j \cdots u_{2n}] \quad (7)$$

$$U_Z = [u_1 - R_1 i_1 \cdots u_j - R_j i_j \cdots u_{2n} - R_{2n} i_{2n}] \quad (8)$$

式(3)~(8)中: Y 为分布电容矩阵; Z 为绕组电感矩阵; I 为电流矩阵; U 为电压矩阵; U_Z 为阻抗电压矩阵。

高频等效电路中的分布电容通过静电场有限元方法分析求解,分布电容和交流电阻参数见表2。特定频率下的交流电阻通过瞬态电磁场有限元方法分析求解。

计算电感参数时,通过场路耦合有限元方法将高频电路与瞬态电磁场有限元模型进行耦合。有限元模型中,需要考虑铁心饱和和非线性对电感参数的影响,本文在计算过程中的B-H曲线基于宝钢的B20AT1500型硅钢片得到。

模型电机绕组60支线圈连线方式如图3所示,图3中Coil x 代表第 x 支线圈,每一支线圈的高频等效电路按图3进行连接搭建,其中 x 和铁心槽号排列位置一致。

2.2 绕组对地电压的计算

本文选择YGZN2Q281A2型SiC MOSFET功率器件作为牵引模型电机专用变频器,其母线电压为3 600 V,开关频率为800 Hz,dv/dt为3.6 kV/ μ s,逆变

表2 分布电容及交流电阻参数

Tab.2 Distributed capacitance and AC resistance parameters

	参数	数值
分布电容/pF	C10	184.7
	C20,C30,C40,C50,C60,C70	53.1
	C80	79.9
	C12,C23,C34,C45,C56,C67,C78	1429.2
	C13,C24,C35,C57,C68	2.8
交流电阻/mΩ	R1	44.14
	R2	43.69
	R3	43.03
	R4	42.14
	R5	41.03
	R6	39.71
	R7	38.18
	R8	36.41

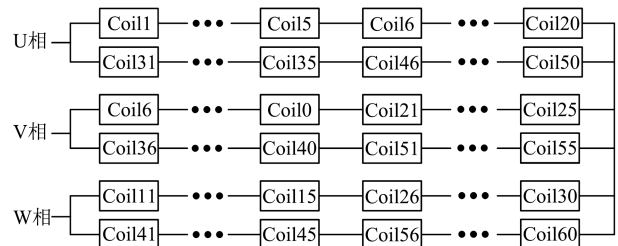


图3 电机绕组线圈连线图

Fig.3 Wiring diagram of motor winding coil

器拓扑输出采用 2/3 接地方式,逆变器输出尖峰对地电压为 2 880 V,上升时间为 0.8 μ s,三电平供电。

2.2.1 单相开关脉冲下的绕组电压分布

单相开关脉冲即在 U/V/W 三相中的某一相仿真模拟输入逆变器一次动作下进行电压应力激励。以 U 相电机绕组进行仿真,模拟输入逆变器开关动作一次输出的脉冲电压,在开关脉冲动作下,U/V/W 三相绕组中对地最大电压应力及其对应线圈位置分布如图 4 所示,匝间最大电压应力及其对应匝间位置分布如图 5 所示。

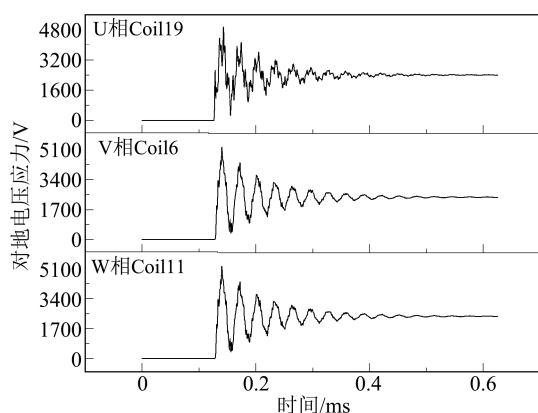


图 4 单脉冲绕组对地最大电压应力波形与线圈位置

Fig.4 Waveform and coil position of the maximum voltage stress to ground of a single-pulse winding

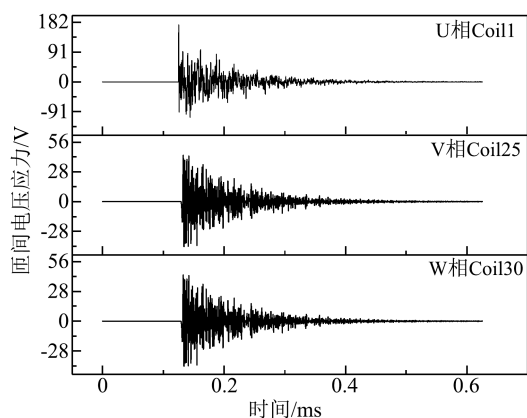


图 5 单脉冲绕组匝间最大电压应力波形与线圈位置

Fig.5 Waveform and coil position of the interturn maximum voltage stress of a single-pulse winding

由图 4 可知,针对绕组 Y 型接法下的绕组对地最大电压应力而言,在单相脉冲开关作用下,脉冲作用相(U 相)的绕组对地最大电压应力在本相靠近中性点的绕组上,其余两相均在距中性点最远的绕组上,即逆变器输出侧的首支绕组上,且其余两相的对地最大电压应力较脉冲作用相的绕组对地最

大电压应力高,并对称分布。由图 5 可知,针对绕组 Y 型接法下的绕组匝间最大电压应力而言,在单相脉冲开关作用下,脉冲作用相(U 相)的最大匝间电压出现在逆变器输出侧首支绕组的第 1~2 匝间,其余两相最大匝间电压出现在靠近中性点的绕组的第 1~2 匝间,且脉冲作用相的最大匝间电压是其余两项的 3 倍左右。

2.2.2 三相开关脉冲下的绕组电压分布

在逆变器三桥臂依次开关动作一次脉冲作用下,U/V/W 三相绕组对地最大电压应力波形及其对应线圈位置如图 6 所示,匝间最大电压应力波形及其对应线圈位置如图 7 所示。

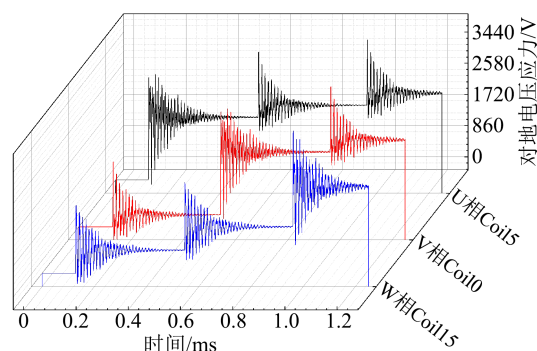


图 6 U/V/W 三相绕组对地最大电压应力波形与线圈位置

Fig.6 Waveform and coil position of the maximum voltage stress to ground of U/V/W three-phase winding

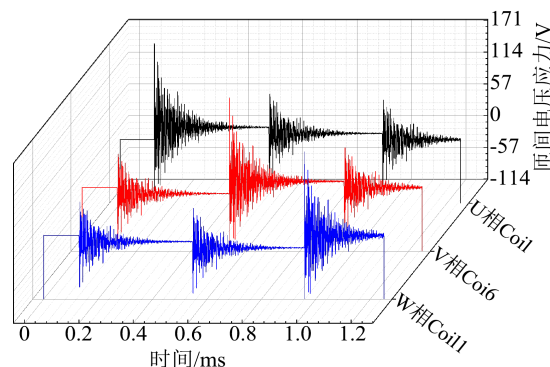


图 7 U/V/W 三相绕组匝间最大电压应力波形与线圈位置

Fig.7 Waveform and coil position of the interturn maximum voltage stress of U/V/W three-phase winding

由图 6 可知,在逆变器三桥臂依次开关动作一次脉冲作用下,U/V/W 三相绕组对地最大电压应力都出现在第 3 个桥臂脉冲沿到来之时,这是由三相脉冲反电压应力的叠加所致;三相绕组对地最大电压应力均位于与逆变器输出相连的一极绕组的最后一支线圈处,且 $U_U > U_V > U_W$ 。由图 7 可知,在逆变器三桥臂依次开关动作一次脉冲作用下,U/V/W 三

相绕组匝间最大电压应力依次出现在第一、二、三桥臂脉冲沿动作时,均位于与逆变器输出相连一极绕组的第一支线圈的第1~2匝间,且 $U_U > U_V > U_W$,这是由开关动作时较高的 dv/dt 与较大的首匝线圈对地电容所致。

2.3 对地电压应力的验证

为了验证高频等效电路绕组电压应力计算模型的正确性,对模型电机每相每级的末支线圈对地电压应力进行了测试,采用图3的连线方式。波形采集设备采用MR6000型波形记录仪,采样频率为50 MHz,测试过程中逆变器、电机机壳和测试设备需共地,产生的高压脉冲电压作为输入电源。电压应力测试平台如图8所示。



图8 电压应力测试平台

Fig.8 Voltage stress test platform

本文将试验测得的线圈对地最大电压应力值与仿真计算结果进行了对比,如图9所示。由图9可知,仿真和测试结果总体上吻合良好,两者的绕组最大电压应力均出现在与逆变器输出相连的一极绕组的最后一支线圈处。以模型样机为例,5、10、15槽和35、40、45槽是电压应力较大位置,其中仿真和试验结果最大误差在第10槽,该槽对地最大电压应力仿真值为3 475.8 V,试验值为3 668.3 V,相对误差为5.2%,整体对比结果证明了模型的可靠性。

3 SiC 逆变器特性对绕组电压分布的影响

逆变器输出受开关频率、 dv/dt 和接地方式的影响^[23-25]。为了进一步研究逆变器关键参数对电机绕组电压分布的影响,以逆变器三桥臂依次开关动作一次脉冲进行绕组电压应力的研究。

3.1 开关频率对绕组电压应力的影响

开关频率主要影响电机损耗和电感^[16]。高频加剧绕组导体集肤效应,导致铜耗较大,本文主要考

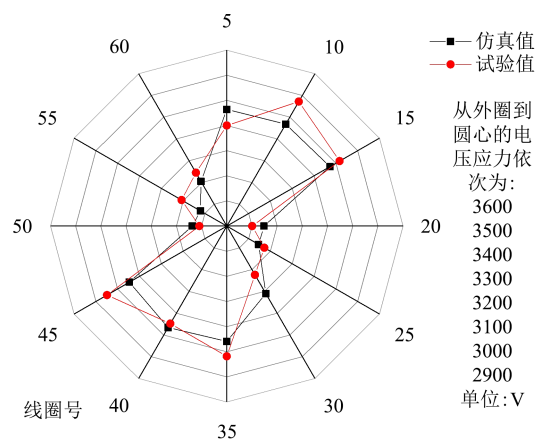


图9 最大电压应力仿真与试验结果对比

Fig.9 Comparison of simulation and test results of the maximum voltage stress

虑开关频率影响下的铜耗对绕组电压应力分布的影响,如频率增大,磁场在铁心中的透入深度减小,导体周围磁场分布的改变会影响电感^[25]。针对模型电机,开关频率对导体交流电阻和绕组每匝电感的影响趋势如图10所示。

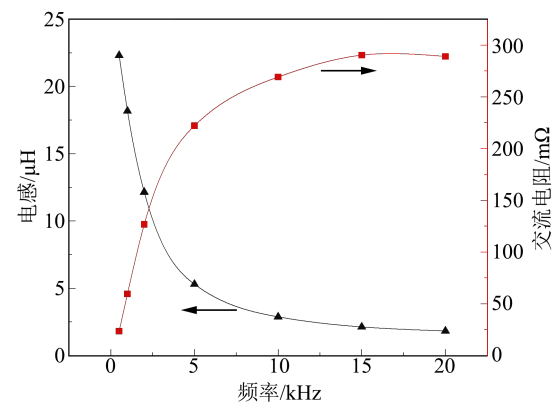


图10 电感和电阻随频率的变化趋势

Fig.10 The trend of inductance and resistance varies with frequency

根据图10将不同的开关频率和频率所对应的电感、交流电阻加载到负载电路,可得对地最大电压应力随开关频率的变化趋势如图11所示,最大匝间电压应力随开关频率的变化趋势如图12所示。

由图11和图12可知,在逆变器的 dv/dt 、接地方式和电平数不变的情况下,开关频率由1 kHz增加到20 kHz时,三相绕组对地电压应力最大值和绕组匝间电压应力最大值基本没有变化。随着开关频率的增加,对地和匝间绕组电压应力波形的振荡收敛程度发生了明显变化,当开关频率增大至20 kHz时,逆变器三个桥臂依次动作带来的三相脉冲上升

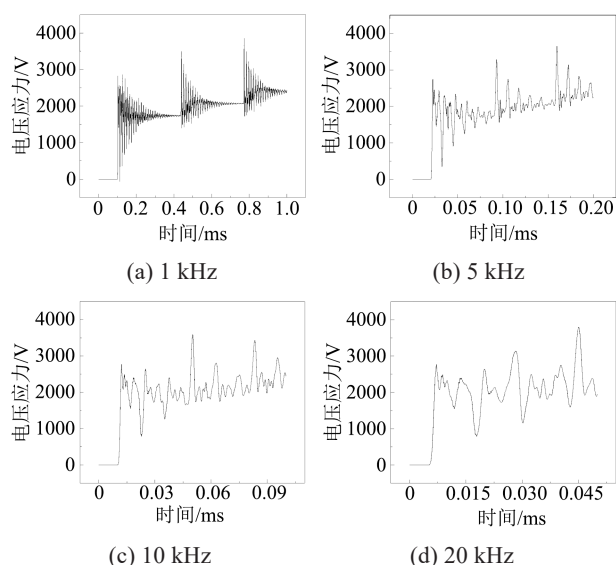


图 11 对地电压应力随开关频率变化

Fig.11 The voltage stress to ground varies with the switching frequency

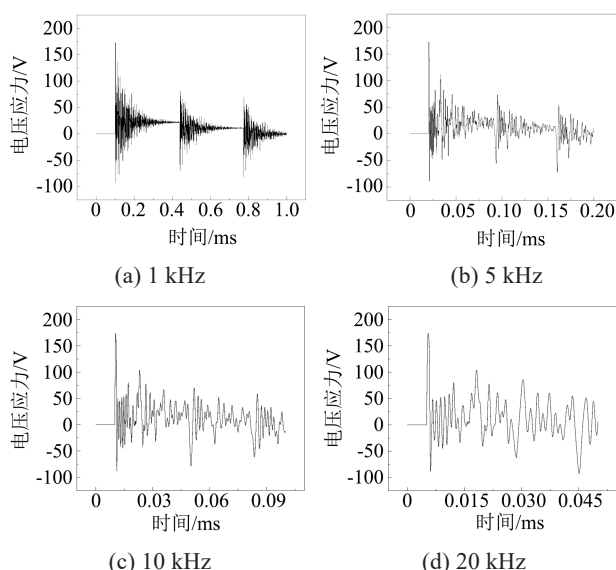


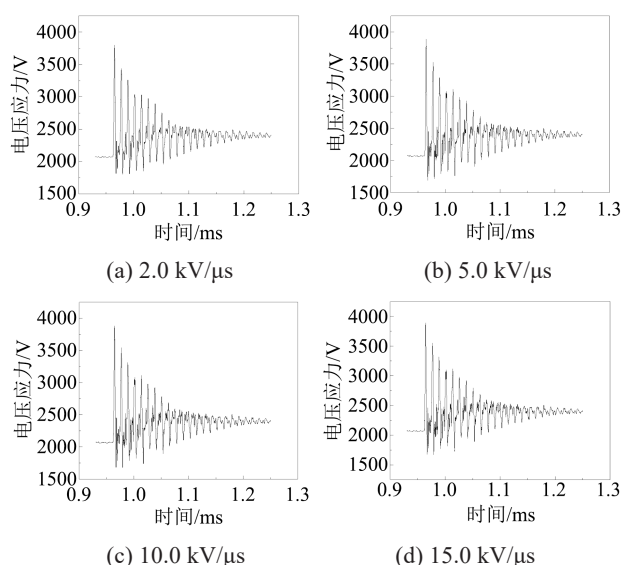
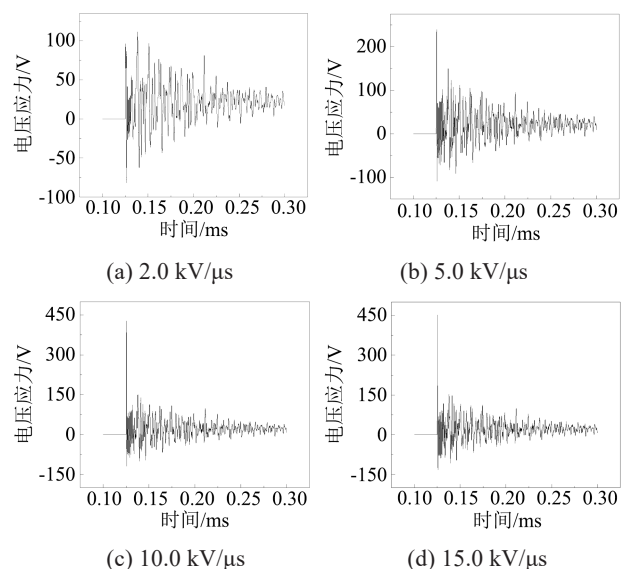
图 12 匝间电压应力随开关频率变化

Fig.12 The interturn voltage stress varies with switching frequency

沿冲击振荡的波形特性已经不那么明显,这是因为随着开关频率的增加,负载等效高频RLC混联电路中的导体交流电阻和电感的变化引起了阻抗的变化。

3.2 dv/dt 对绕组电压应力的影响

目前牵引电机使用的逆变器 dv/dt 最高可达 15 $kV/\mu s$ 。研究 dv/dt 为 2.0~15.0 $kV/\mu s$ 时对电机绕组对地电压应力和匝间电压应力的影响,分别如图 13、图 14 所示。由图 13 和图 14 可知,在逆变器的开关频率、接地方式和电平数不变的情况下, dv/dt 为

图 13 对地电压应力随 dv/dt 变化Fig.13 The voltage stress to ground varies with dv/dt 图 14 匝间电压应力随 dv/dt 变化Fig.14 The interturn voltage stress varies with dv/dt

2.0~15.0 $kV/\mu s$ 时,三相绕组对地电压应力最大值和波形趋势变化不明显;但 dv/dt 的增加会使匝间电压应力发生明显的变化,当 dv/dt 为 15.0 $kV/\mu s$ 时,匝间电压最大值相比 dv/dt 为 2.0 $kV/\mu s$ 时的匝间电压最大值提升了 3.2 倍。

3.3 接地方式对绕组电压应力的影响

在直流母线确定时,逆变器不同的接地方式会直接决定逆变器的相对地输出电压^[25],而电机绕组主绝缘的相对地电压直接决定绕组主绝缘的结构设计。选取合理的主绝缘结构,不仅可以节约成本,更有助于绕组散热,降低电机的温升,增加绝缘

结构的热老化寿命。研究选取逆变器常见的4种接地方式:浮地(不接地)、3/4接地、2/3接地和1/2接地。4种接地方式下的绕组对地最大电压应力和匝间最大电压应力波形图分别如图15、图16所示。

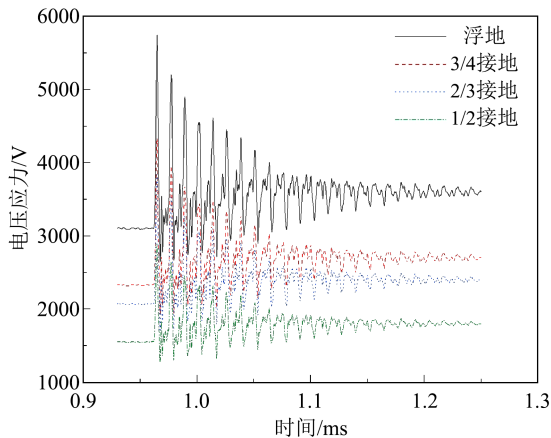


图15 不同接地方式下的对地电压应力

Fig.15 Voltage stress to ground under different grounding methods

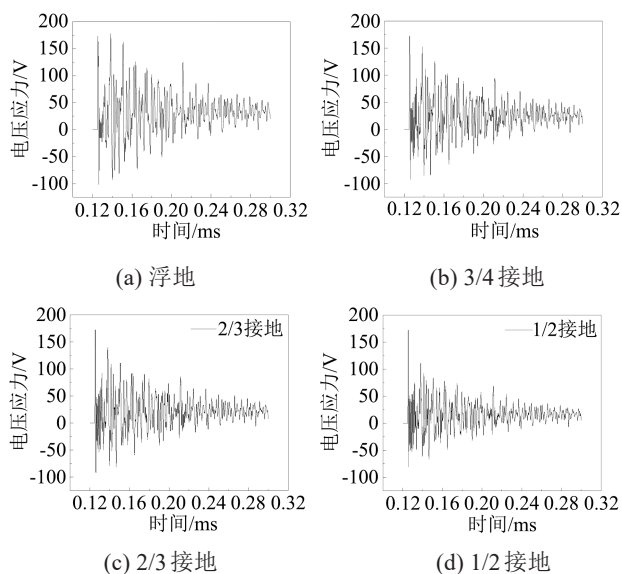


图16 不同接地方式下的匝间电压应力

Fig.16 Interturn voltage stress under different grounding methods

由图15和图16可知,在逆变器的开关频率、 dv/dt 和电平数不变的情况下,不同接地方式下的绕组对地最大电压应力都是出现在第3个桥臂脉冲沿到来之时;匝间最大电压应力都是出现在逆变器三桥臂依次开关动作一次脉冲作用下,其值不随逆变器接地方式的不同而改变。不同的接地方式对绕组对地电压应力的影响明显,采用浮地系统时绕组对地电压应力最大,可达5741.8 V,采用1/2接地系统

时绕组对地电压应力最小,为2907.7 V,相较于浮地系统减少了49.4%。

4 结论

本文提出的牵引电机绕组高频分布参数等效电路模型可准确地评估绕组最大电压应力数值及其所在位置。研究分析可得到以下结论:

(1)单相脉冲作用下,绕组的对地最大电压应力出现在另外两相的接近逆变器绕组处,且另外两相近似呈对称分布;三相脉冲作用下,三相绕组对地最大电压应力均出现在第3个桥臂脉冲沿到来之时,位置均在本相的中间位置绕组处。针对匝间电压应力,不论何种脉冲,最大应力均出现在本相首匝位置。

(2)开关频率基本不会影响绕组对地电压应力和匝间电压应力最大值,但会影响绕组高频等效电路的振荡和收敛程度。

(3) dv/dt 对绕组对地电压应力最大值影响不明显,但是会严重影响绕组匝间电压应力分布,匝间电压应力最大值和振荡收敛均发生变化,其中当 dv/dt 由2.0 kV/ μ s增加到15.0 kV/ μ s时,匝间电压应力最大值会提升3倍左右,因此必须考虑匝间绝缘补强,而 dv/dt 为10.0~15.0 kV/ μ s时,匝间电压应力最大值增长减缓。

(4)不同的接地方式会直接决定绕组对地电压分布,即绕组主绝缘结构设计;采用1/2接地系统的绕组对地电压应力较其他接地方式最优;在其他参数不变的情况下,接地方式不会改变匝间电压分布。

参考文献 References

- [1] 李豪,王宗琪,向大为,等.基于反谐振匹配的变频电机端部高频共模开关振荡模态抑制方法[J].中国电机工程学报,2025,45(23):9437-9447.
LI Hao, WANG Zongqi, XIANG Dawei, et al. Modal-oriented high-frequency common-mode switching oscillation suppression at inverter-fed machine terminal using anti-resonance matching[J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(23): 9437-9447.
- [2] 马世金,王鹏,朱英伟,等.变频电机匝间绝缘故障放电信号电磁辐射特性研究[J].电工技术学报,2023,38(22):5975-5986.
MA Shijin, WANG Peng, ZHU Yingwei, et al. Research on the electromagnetic radiation characteristics of inter-turn insulation fault discharge signals of frequency motors[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(22): 5975-5986.
- [3] CHEN J, XIONG D, LUO Q M, et al. A review of switching

- oscillations of wide bandgap semiconductor devices[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(12): 13182-13199.
- [4] 罗英露, 赵安然, 王鹏, 等. SiC 逆变器供电的牵引电机匝间绝缘性能评估[J]. 绝缘材料, 2024, 57(4): 88-99.
- LUO Yinglu, ZHAO Anran, WANG Peng, et al. Evaluation on performance of turn-to-turn insulation for traction motor powered by SiC inverter[J]. Insulating Materials, 2024, 57(4): 88-99.
- [5] 段卓琳, 张栋, 范涛. SiC 电机驱动系统传导电磁干扰建模及预测[J]. 电工技术学报, 2020, 35(22): 4726-4738.
- DUAN Zhuolin, ZHANG Dong, FAN Tao. Modeling and prediction of electromagnetic interference in SiC motor drive systems[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(22): 4726-4738.
- [6] MORYA A K, GARDNER M, ANVARI B, et al. Wide bandgap devices in AC electric drives: opportunities and challenges[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2019, 5(1): 3-20.
- [7] XIE Y Y, ZHANG J Y, LEONARDI F. et al. Investigation of surge voltage propagation in inverter-driven electric machine windings[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2023, 70(10): 9811-9822.
- [8] LI H, GU Y, XIANG D W, 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.
- [9] 陈立珂, 刘瑞芳, 李知浩, 等. 电缆参数对变频驱动电机轴电压和轴电流的影响[J]. 电工技术学报, 2024, 39(15): 4755-4766, 4793.
- CHEN Like, LIU Ruifang, LI Zhihao, et al. The influence of cable parameters on the shaft voltage and shaft current of the variable frequency drive motor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(15): 4755-4766, 4793.
- [10] 刘冠芳, 李丹, 吴有龙, 等. 电机绝缘结构热机械应力分布研究[J]. 绝缘材料, 2025, 58(1): 56-63.
- LIU Guanfang, LI Dan, WU Youlong, et al. Research on thermal mechanical stress distribution of motor insulation structure[J]. Insulating Materials, 2025, 58(1): 56-63.
- [11] 马世金, 王鹏, 朱英伟, 等. 变频电机绝缘系统局部放电检测柔性传感器设计[J]. 高电压技术, 2023, 49(11): 4798-4807.
- MA Shijin, WANG Peng, ZHU Yingwei, et al. Design of flexible sensor for PD detection of inverter-fed motors insulation system[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(11): 4798-4807.
- [12] TESSAROLO A, CIRIANI C, LLOUMI N, et al. Fast computation method for stator winding skin-effect additional losses in synchronous machines with open slots and arbitrary rotor geometry[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2021, 36(2): 1156-1168.
- [13] 黄文冬, 王鹏, 朱英伟, 等. Hairpin 绕组电机电压分布仿真计算与绝缘优化[J]. 高电压技术, 2023, 49(6): 2458-2465.
- HUANG Wendong, WANG Peng, ZHU Yingwei, et al. Voltage distribution simulation and insulation optimization of hairpin winding motor[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(6): 2458-2465.
- [14] MEYER D R, CAVALLINI A, LUSUARDI L, et al. Influence of impulse voltage repetition frequency on RPDIV in partial vacuum[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2018, 25(3): 873-882.
- [15] RUMI A, MARINELLI J G, BARATER D, et al. The challenges of reliable dielectrics in modern aerospace applications: the hazard of corona resistant materials[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2022, 8(4): 4646-4653.
- [16] 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): 817-827.
- 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): 817-827.
- [17] 陈峻升, 何明鹏, 张跃, 等. 双极性脉冲参数对散绕变频电机绝缘 PDIV 影响研究[J]. 绝缘材料, 2025, 58(5): 89-96.
- CHEN Junshen, HE Mingpeng, ZHANG Yue, et al. Influence of bipolar impulse parameters on PDIV of random wound inverter-fed motor insulation[J]. Insulating Materials, 2025, 58(5): 89-96.
- [18] 李佩宜. 变频电机匝间绝缘起始放电测试及预测技术研究[D]. 成都: 四川大学, 2021.
- LI Peiyi. Study on initial discharge measurement and prediction technique of turn-to-turn insulation for inverter-fed motor[D]. Chendu: Sichuan University, 2021.
- [19] SOUSA FERREIRA R, FERREIRA A C. Analysis of endwindings influence on the transient voltage distribution in machine stator windings by a three-phase model[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2020, 36(3): 2110-2119.
- [20] 鞠孝伟, 程远, 杨明亮, 等. SiC 逆变器高频脉冲电压对 Hairpin 绕组绝缘安全的影响分析[J]. 电工技术学报, 2021, 36(24): 5115-5124.
- JU Xiaowei, CHENG Yuan, YANG Mingliang, et al. Influence analysis of high frequency pulse voltage of SiC inverter on insulation safety of hairpin winding[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(24): 5115-5124.
- [21] 李佩宜, 王鹏, 马世金, 等. 重复脉冲参数对变频电机绝缘 PDIV 测试信噪比影响研究[J]. 高电压技术, 2021, 47(8): 2981-2990.
- LI Peiyi, WANG Peng, MA Shijin, et al. Influence of repetitive impulse voltage parameters on the signal-to-noise ratio of PDIV test for inverter-fed motor[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(8): 2981-2990.
- [22] 边旭, 张果果, 李雪, 等. 逆变器供电系统下扁线电机绕组交流损耗计算[J]. 电机与控制学报, 2025, 29(5): 99-107, 122.
- BIAN Xu, ZHANG Guoguo, LI Xue, et al. Calculation of AC losses in winding of flat wire motor under inverter power supply system[J]. Electric Machines and Control, 2025, 29(5): 99-107, 122.

- [23] 龙齐杰,胡亮灯,鲁斌,等.考虑多相电机高频振动抑制的三电平H桥变频器中性线电流异常增加问题分析及抑制研究[J].中国电机工程学报,2025,45(19):7670-7683.
LONG Qijie, HU Liangdeng, LU Bin, et al. Analysis and suppression of the abnormal increase of neutral current in three-level H-bridge inverter considering high-frequency vibration suppression of multi phase motor[J]. Proceedings of the CSEE, 2025,45(19):7670-7683.
- [24] 胡亮灯,郭城,韩婧,等.基于SVPWM的三电平变频器窄脉冲抑制策略[J].高电压技术,2024,50(12):5495-5504.
HU Liangdeng, GUO Cheng, HAN Jing, et al. Narrow pulse suppression method for three-level inverter based on SVPWM [J]. High Voltage Engineering,2024,50(12):5495-5504.
- [25] NARAYANASAMY B, LUO F. A survey of active EMI filters for conducted EMI noise reduction in power electronic converters[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2019,61(6):2040-2049.

收稿日期:2025-07-30;修回日期:2025-11-06。

作者简介:

吴有龙(1991-),男(汉族),陕西西安人,工程师,研究方向为电机绝缘结构仿真与设计。