

变频电机绝缘失效机理及延缓措施研究进展

袁树楠, 高波, 白长山, 刘凯, 吴广宁

(西南交通大学 电气工程学院, 四川 成都 611756)

摘要:变频功率器件频繁开断与电机负载特性可导致高频脉冲过电压,进而引发电机绝缘过早失效,给系统稳定性和可靠性带来挑战。本文从变频电机绝缘失效机理出发,首先调研了变频电机绝缘的不同应力失效形式,梳理了绝缘系统失效的主要影响因素,然后对变频电机绝缘状态检测方法及时延缓失效应对措施进行了全面综述,最后强调了变频电机绝缘目前面临的重大挑战及未来研究方向。

关键词:变频电机;逆变器;高频脉冲过电压;绝缘失效

Research progress on failure mechanism and delay measures of inverter motors insulation

YUAN Shunan, GAO Bo, BAI Changshan, LIU Kai, WU Guangning

(School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China)

Abstract: The frequent disconnection of inverter power devices and load characteristics of motor can lead to high-frequency pulse overvoltage, which would lead to premature failure of generator insulation and bring challenges to the stability and reliability of system. From the failure mechanism of inverter motor insulation, the different stress failure forms of inverter motor insulation were investigated firstly, and the main factors affecting the failure of the insulation system were sorted out. Then the state detection methods of inverter motor insulation and the delay measures were comprehensively reviewed. Finally, the major challenges and future research direction currently faced by inverter motor insulation were emphasized.

Key words: inverter motor; inverter; high-frequency pulse overvoltage; insulation failure

0 引言

以硅碳化物(SiC)为代表的新型宽禁带功率器件因其在高温、高效率和高频操作等方面的卓越性能^[1-3],在逆变器系统中得到广泛应用。这种器件提供了更广泛的电压和频率范围,然而,它所引入的高压应力可能超出电机绝缘的承受范围,从而面临着比传统的绝缘栅双极型晶体管(IGBT)逆变器更为严重的击穿等问题。在交流变频牵引系统中,基于工频电压的传统绝缘设计方法已经不再适用^[4-5]。为此,有必要对交流变频电机的绝缘破坏机制进行深入研究,从而为其绝缘设计提供基础理论依据。目前,关于牵引电机系统的研究主要集中于IGBT逆变器方面,而关于SiC、GaN等宽禁带逆变器的研究相对较少。

本文调研了20多年来国内外学者对交流变频电机绝缘失效的研究,旨在回顾逆变器驱动下电机绝缘失效机理的研究进展,并探讨相关的防护措施,以期对宽禁带驱动电机系统绝缘失效的后续研

究提供参考。通过系统地梳理文献,主要深入探讨高频脉冲过电压引起的电机绝缘失效机理、寿命预测方法和防护策略,为更全面地评估电机绝缘失效带来的风险提供基础预防和解决方案。

1 变频电机牵引系统绝缘面临的极端条件

变频牵引调速系统的运行模式并不单一,且其运行环境多变,导致电机绝缘处于高频高压^[6-7]、交热变化^[8-10]、轴承电磁力转矩分布不均^[11]以及恶劣环境^[12-13]等极端工况,严重影响变频电机的运行寿命。

变频电机与逆变器之间通过电缆连接,容易在电机端子处引起浪涌过电压^[5,14],K B LEE等^[15]通过试验研究表明,变频器输出的重复脉冲信号会在变频电机端子处产生高压过冲及振荡,如图1所示。该浪涌冲击又极易引起连接处电缆爆裂以及电机定子绕组匝间绝缘击穿或相间绝缘失效等问题^[16],如图2所示。其主要原因在于电缆或电机绕组绝缘长期遭受过电压侵袭^[17],在重复脉冲冲击下最终引

发绝缘缺陷,使其性能迅速劣化。其次,变频电机高负载运行、频繁启停及变频器引入的高频电流和磁效应等导致电机内部形成高温环境,进而使绝缘材料性能及稳定性下降。此外,逆变器功率器件高频切换导致电机内部和机械传动系统中的高频振动,会引起绝缘材料疲劳、增加电机内部机械磨损,例如绝缘材料的剥离或裂纹等。

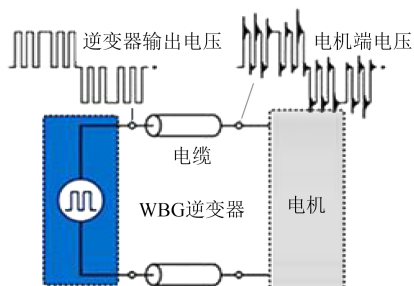


图1 变频电机的线电压过冲及振荡

Fig.1 Line voltage overshoot and oscillation of inverter motor

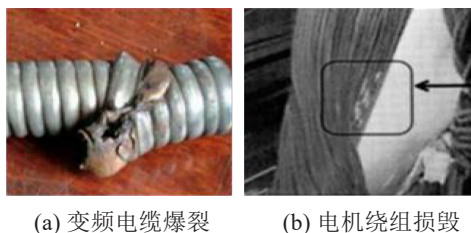


图2 系统绝缘失效实物图

Fig.2 Physical diagram of system insulation failure

据统计,约四分之一的变频电机轴承损坏是由变频器造成的^[16]。同时,牵引电机常用于电力机车等大型交通工具,在不同的季节和气候条件下运行,面临较大的温、湿度差异,电机绝缘系统处于受潮、腐蚀降解等威胁中^[18-19]。随着新型电力电子逆变器的应用,逆变器供电电机绝缘系统运行条件更为复杂。因此,其工程设计、绝缘失效风险评估以及绝缘安全防御面临巨大挑战,在构建新型机车牵引系统的背景下,发生故障对电力机车系统造成的冲击和产生的后果将更加严重。

2 变频电机绝缘材料失效研究现状

2.1 变频电机绝缘失效的应力形式

变频电机端绝缘承受多种应力,具体见表1。深入研究引起变频电机绝缘失效的不同应力形式及绝缘老化影响因素对于改善变频驱动电机系统的绝缘设计具有重要意义。

2.1.1 电应力失效

变频功率器件长期频繁开断,导致电机绕组端

表1 各种老化应力对绝缘性能的影响
Table 1 Influence of various ageing factors on insulation performance

应力形式	老化因子	老化现象
电应力	局部放电,空间电荷	漏电灼烧
热应力	高次谐波、集肤效应热应力	绝缘材料变质
机械应力	机械振动、绕组端部电磁力	分层、龟裂
环境应力	湿度、温度、压力	形成表面漏电通道和碳化灼痕

出现尖峰过电压,使得变频电机处于过冲电应力的作用下。为了研究电机绕组的高频特性,R LEUZZI等^[5]分别对逆变器端和电机端的电压波形进行测试,结果如图3所示,发现相较于逆变器端,电机端存在严重的高频振荡过电压。为探究该过电压对电机寿命的实际影响,王鹏^[20]通过对不同上升时间下接触试样的局部放电测试结果进行Weibull计算,得到的寿命测试结果如图4所示。结果表明,电机试样寿命与脉冲电压上升沿时间成正比,与电压频率成反比,这一结果强调了电机在面对高频振荡过电压时的脆弱性。

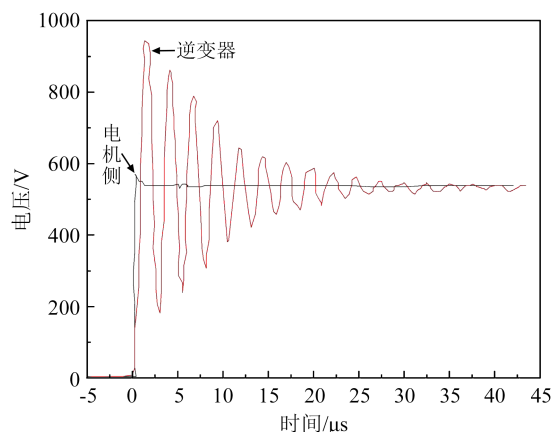


图3 老化过程中逆变器和电机侧的电压波形

Fig.3 Voltage waveforms on the inverter side and motor side during ageing

变频电机绝缘电应力失效的宏观表现为局部放电(PD),该现象可导致绕组绝缘的逐步劣化。为了评估脉冲宽度调制(PWM)电压波对交流电机绕组绝缘造成的冲击,国内外学者针对宽禁带半导体(WBG)转换器的电气参数做了大量研究,包括波形^[21]、极性^[6,22-24]、频率^[6-7]、上升时间^[6,22,25]和脉冲宽度^[26],为保护电机绝缘免受WBG转换器带来的弊端提供解决思路。

在微观电场方面,空间电荷在绝缘内部和表面累积,并在绕组绝缘内部和相邻绕组匝间气隙中引

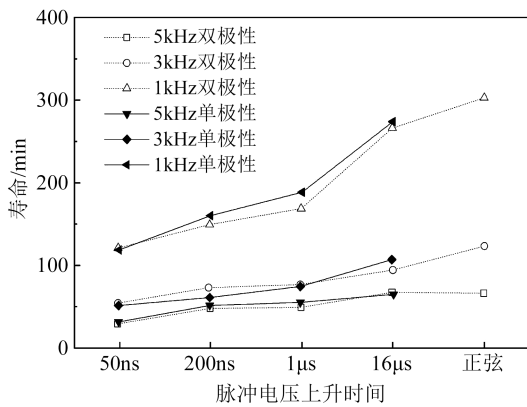


图4 不同上升时间下的寿命测试结果

Fig.4 Life test results at different rise time

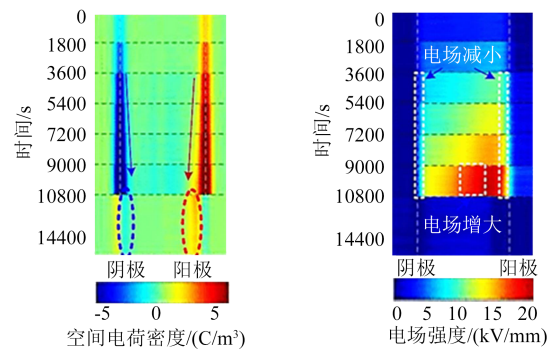
发电场畸变^[24,27-28],也会导致绝缘失效。研究表明,绝缘界面累积电荷的性质、陷阱密度和陷阱深度与绝缘材料的特性密切相关^[28]。为了更好地量化材料陷阱深度,G MAZZANTI等^[29]采用条约模型,以解释迁移率的变化,并提出了寻找相关聚合物材料中电荷极化/去极化过程信息的方法。

然而,当前关于变频电机系统中空间电荷积累的研究大多集中在基于Si器件的系统上,而SiC器件在转换器中的应用将在电机绕组上引起更为严峻的电气应力。因此,有必要确定基于WGB转换器的机车牵引系统中影响空间电荷的主要参数。WANG Y L等^[30]对相关问题进行了具体的研究,通过仿真一种紧凑型高压SiC模块,探讨了模块封装绝缘中的空间电荷动力学,计算得到的电场分布如图5所示,研究表明电荷容易在有机硅封装胶中累积并致使局部电场畸变,对绝缘可靠性构成威胁。然而,上述研究只考虑了变频电机应力的单独作用,缺乏对其他应力作用的影响机制研究。同时,目前空间电荷累积对电机绕组PD特性的影响尚不明确,还需进行深入研究。

2.1.2 热应力失效

变频器输出的高次谐波在电机绕组中感应出谐波电流,导致铁损、铜损和介质损耗增加,并以热能形式消散,致使变频电机本体温升过高。TONG W M^[31]对变频器电源条件下的永磁同步电机进行了热场仿真,结果如图6所示,直观展示了电机在运行中的温度分布。与此同时,在频繁的变频启停及过载工作下,由热裂解形成的小分子更容易在介质中迁移,最终导致绝缘热应力失效。

此外,PWM调控方式引起的趋肤效应也加重



(a) 空间电荷分布

(b) 电场分布

图5 空间电荷测量结果

Fig.5 Measurement results of space charge

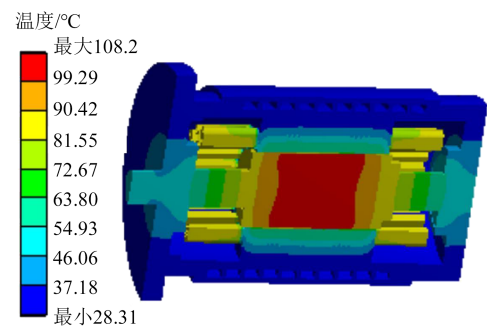


图6 永磁电机热场仿真

Fig.6 Simulation of the thermal field of permanent magnet motor

了电机的热应力。李世杰等^[11]提出,在长期交变热作用下,牵引电机轴承涂层的绝缘性能可能受到破坏,严重情况下将导致绝缘层剥落。为了探究绝缘热应力失效与局部放电的内在联系,F GUASTAVINO等^[32]进行了重复局部放电起始电压(RPDIV)测试,发现RPDIV值与温度呈负相关,如图7所示。此外,有机物的离解热在高电场下可引起空间电荷积累,从而导致电机绕组局部过热^[33]。热刺激电流法(TSC)是观察绝缘材料微观特性的重要研究方法,为深入研究变频电机微观绝缘领域提供了基础。周凯^[34]研究发现,温度升高有利于电荷注入,记录的TSC电流曲线如图8所示。

随着变频器开关频率的提高,绝缘材料的热效应变得愈发严重。虽然已有研究集中测量和分析电机绝缘材料的温度分布,但对于热应力失效的诊断方法尚需更多的研究来发展先进的故障预测算法,以提前识别电机绝缘热应力失效的迹象。同时,可以进一步研究和改进电机的热管理技术,以降低电机工作温度并提高其可靠性。

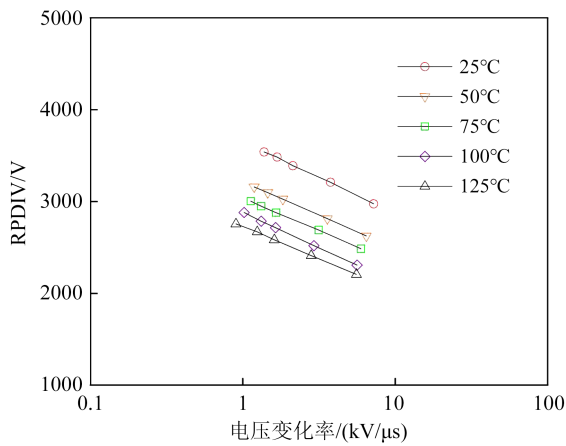


图7 不同温度下RPDIV与电压变化率趋势的比较
Fig.7 Comparison of RPDIV and voltage change rate trends at different temperatures

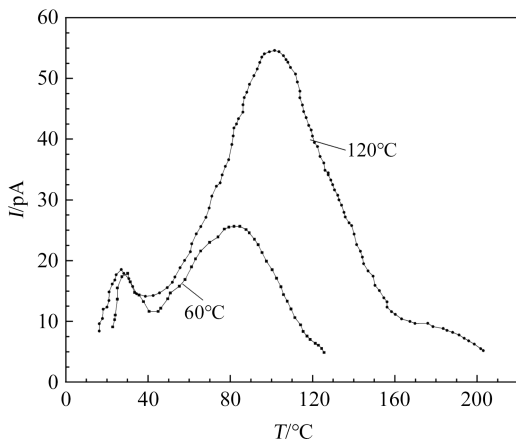


图8 不同极化温度下的TSC曲线
Fig.8 TSC curves at different polarization temperatures

2.1.3 机械应力失效

电机运行时的机械振动会导致交变机械负荷,对绝缘的槽部和端部施加挤压或拉伸力,在电场的协同作用下,这些机械振动应力可能使绝缘出现缺陷,产生新的局部放电,由此引起绝缘的不同程度损伤如磨损、裂纹、分层、断裂等。同时,电磁线在加工、浸漆等工序中可能引入固体缺陷^[35],进一步增加绝缘的复杂性。在变频电源中,各次谐波与牵引电机机械振动谐波相互干涉,形成各种电磁激振力。当电磁频率和电动机机体的固有振动频率一致或接近时,将产生共振现象^[36],引起绕组端部振动、位移、绝缘磨损,加速电机机械应力带来的疲劳老化。为了合理设计定子端部结构,乔长帅等^[37]对定子端部绕组电磁力进行了分析,研究表明电磁力在线圈出槽口处和线圈两端集中,因此应对此处进行加固来提高绕组整体刚度。

综合上述分析,当前关于变频电机绝缘机械应力失效的研究较为充分,主要侧重于电机、电磁线的绝缘性能分析。相比之下,对电机振动水平的研究相对较少,然而持续的电机振动可能导致机械部件的疲劳和绝缘材料的破损。在未来的研究中,应更加关注电机振动对绝缘薄弱点的影响,特别是在使用WBG逆变器的情况下。应进一步研究其对绝缘材料和机械部件所带来的挑战和潜在危害,发展实时振动监测技术。

2.1.4 环境应力失效

环境应力,如湿度、温度及压力等,对变频电机绝缘重复脉冲老化寿命产生显著影响:①环境湿度决定绝缘表面状态和空气击穿场强,影响其表面电位分布以及空间电荷传导。②环境温度会改变空间电荷的累积特性^[13,38],温度升高将增大后续放电的概率。其次环境温度还直接影响电机散热性能,在牵引电机中,空气的体积比热随环境温度的变化而变化。此外,某些地区恶劣的高温或低温环境将对电机绝缘造成严重影响。高温干燥条件可能导致绝缘胶水流失、干燥、变形及开裂,而极端低温则使橡胶绝缘硬化、脆化,也会影响润滑脂和冷却液等的性能。③环境气压会对RPDIV测试产生影响。文献[38]中定义RPDIV_n是RPDIV在100 kPa下的归算值,得到RPDIV_n的压力依赖性对比如图9所示,结果表明RPDIV_n与气压近似线性相关。这说明气压的变化会直接影响RPDIV测试值,尤其在海拔较高地区,空气密度较低,有利于在较低电压下产生局部放电。因此,在进行相关实验和测试时,需要充分考虑并控制环境条件的变化,以确保实验结果的可靠性和准确性。

综上,局部放电导致的电应力失效与绝缘材料

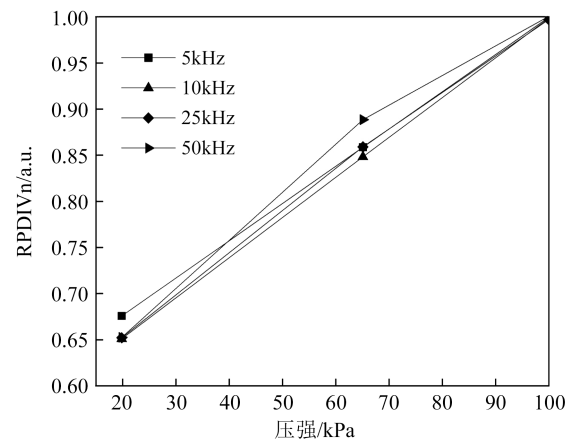


图9 RPDIV_n的压力依赖性对比
Fig.9 Comparison of the pressure dependence of RPDIV_n

过热导致的热应力失效是电机绝缘失效的主要原因,而存在的环境应力和机械振动等多种因素均加速了绝缘材料的老化过程。机械应力及环境应力作用使绝缘出现缺陷,为电应力发挥主导作用创造了条件,同时热应力导致的温度变化又显著影响局部放电特性。此外,环境应力和热应力会增强绝缘内部自由电子对材料分子链的撞击作用,加速绝缘内部分子链的断裂,致使绝缘内部陷阱密度和陷阱深度增加,从而缩短绝缘寿命^[40-42]。针对实际应用中变频电机绝缘材料承受电热应力、机械应力、环境应力的综合作用,可构建电-热-机械-环境应力协同作用寿命模型,如式(1)所示。

$$l(A,B,C,D) = l_0 \exp\left(- \sum_{\substack{i=A,B,C,D \\ j=a,b,c,d}} ij + \sum_{\substack{ij=A,B,C,D \\ i \neq j}} b_{ij}ij - \sum_{\substack{ijk=A,B,C,D \\ i \neq j \neq k}} b_{ijk}ijk + b_{ABCD}ABCD\right) \quad (1)$$

式(1)中: $l(A, B, C, D)$ 为变频电机电-热-机械-环境应力联合老化寿命参数; l_0 为基准寿命,其数值取决于绝缘材料的属性参数; A 为电应力尺度参数; B 为热应力尺度参数; C 为机械应力尺度参数; D 为环境应力尺度参数; a 为参考温度 T_0 下绝缘材料的耐压系数; b 为参考场强 E_0 下变频电机绝缘材料的耐热系数; c 为基准温度 T_0 和基准场强 E_0 下的机械寿命系数, d 为基准温度 T_0 、基准场强 E_0 和基准机械应力 M_0 下的环境应力寿命系数; b_{ij} 、 b_{ijk} 、 b_{ABCD} 分别是电-热-机械-环境应力双因子、三因子、四因子的协同作用系数。

然而,对于这些因素如何影响新一代WBG牵引系统电机的绝缘失效情况,往往缺乏充分的实验数据和案例研究。因此,有必要深入研究不同环境条件,包括现场不同温度、湿度、气压范围运行条件下电机绝缘承受的各种应力性能。了解这些条件下绝缘的响应机制,有助于更好地设计和维护电机系统,提高其稳定性和寿命。

2.2 变频电机绝缘失效的主要影响因素

变频电机绝缘失效主要受到两个关键因素的影响:①机端绝缘长期承受超过额定电压的高频电压应力冲击;②逆变器输出高频脉冲具有陡峭的上升沿,在定子绕组内形成谐波过电压,导致绝缘系统内电磁场分布严重畸变,定子绕组电压分布不均。深入研究这些因素对逆变器牵引电机系统绝缘设计的影响对于提高系统可靠性具有重要意义。

2.2.1 变频电机端过电压

局部放电是导致绝缘过早击穿的主要原因^[43-44],目前已经有许多学者对变频电机端过电压特性进行了研究。万健如^[45]和马洪飞等^[46]建立了适用于电机端电压的高频系统仿真模型,如图10所示^[45],并探讨了电缆中重复电压的反射过程,发现在施加单脉冲时,电机端过电压较逆变器侧的过电压近似加倍,导致绝缘迅速老化甚至击穿。D B HYYPIO^[47]计算了电机绝缘系统的瞬间电晕能量,精确拟合了每个瞬态脉冲相对电晕能量与绝缘破坏度之间的函数关系,发现绝缘寿命与过电压瞬态能量成反比,这表明电机端剧烈的过电压对绝缘寿命存在严重威胁。上述研究均表明电机端过电压确实存在,且对绝缘性能有着显著的影响。变频电机牵引系统中,电机端过电压对绝缘的影响程度主要取决于变频器输出电压脉冲特性、电缆传输特性和电机输入特性。

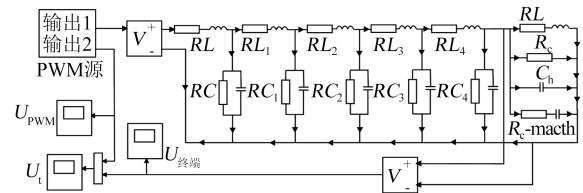


图10 逆变器-电缆-电机系统仿真模型

Fig.10 Simulation model of inverter-cable-motor system

脉宽调制电压相较于工频正弦电压更严重地威胁电缆和牵引电机的绝缘,李金泉等^[48]通过试验表明,重复脉冲电压波形对变频电机绝缘系统的运行可靠性构成威胁。有关研究主要集中在重复方波电压参数方面的探讨,如上升时间^[49-50]、占空比^[51-52]、死区时间^[53]、极性^[54]、方波脉冲频率^[55]等。关于变频器输出电压脉冲特性对牵引电机端过电压的影响,王剑等^[49]指出,上升时间越短,过电压幅值越大。郑昌江等^[50]则利用局部放电紫外光子辐射量与重复脉冲上升时间的关系,得到了4种上升时间下局部放电幅值的数据,如图11所示。然而,现有研究成果仍是侧重于重复方波脉冲对绝缘放电特性的影响,而逆变器调制输出方波的占空比及形状并非固定。因此,现场逆变器输出波形特性对变频电机绝缘放电特性的影响仍存在不明确之处。

除了逆变器的影响,电缆和电机的高频特性也对牵引电机浪涌电压产生影响。WANG L W等^[56]进行了关于电机过电压瞬变的研究,其测量结果显

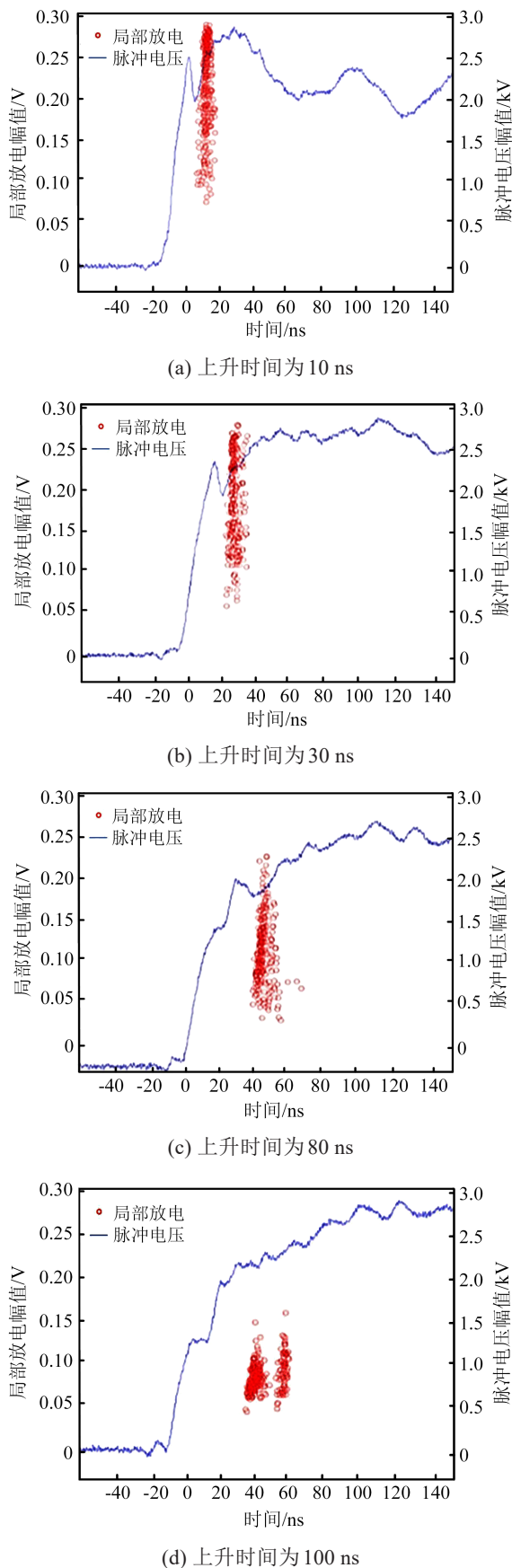


图 11 不同上升时间下的局部放电幅值

Fig.11 Partial discharge amplitude at different rise time

示,随着电缆长度的增加,过电压振荡频率减小,线间过电压峰值呈波动趋势。黎燕^[57]研究发现,长电缆波反射效应导致电机端出现2倍甚至2倍以上的过电压,从而导致电机绝缘损坏。电压反射系数由电缆和电机阻抗决定,精确提取电机阻抗能够高精度地拟合电机端的电压尖峰。然而,在目前针对电缆电机的特性阻抗参数研究中,很难实现和现场测试的一比一还原。国内外各研究团队针对电缆电机高频特性行为展开了大量实验和仿真测试,对电缆长度特性与电机端过电压的关联关系进行了研究。相比之下,对于不同电缆线径,不同屏蔽接地状态等因素共同作用下传播的脉冲过电压特性,其现有研究成果的适用性还有待验证,特别是对于新一代牵引电机——永磁同步电机的高频响应,研究尚不足。

2.2.2 变频电机绕组电压分布不均

变频电机内部绝缘线圈在高频脉冲电压作用下,由于线圈匝电压分布不均,可能诱发局部放电^[58],导致电机绝缘性能劣化。经过多次重复实验表明,电机绕组首端第一匝承受最大过电压幅值。DH HWANG等^[59]构建并分析了一相五匝感应牵引电机同相线圈电压分布的模型,如图12所示,该图展示了用于测量电压分布的抽头,并通过仿真和试验得出了电压分布特点:第一匝线圈的电压通常比其他匝高,且上升时间越短,其电压越大。

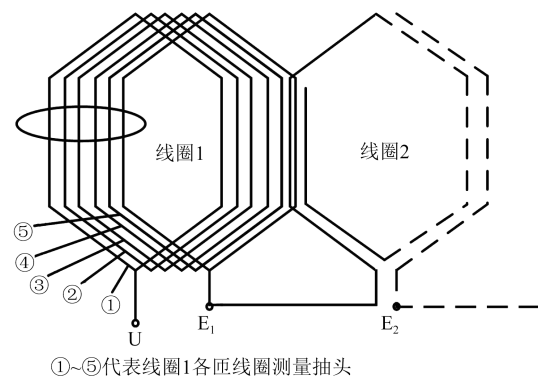


图 12 用于测量电压分布的抽头

Fig.12 Taps used to measure voltage distribution

为确定绕组中匝电压分布,需获取绕组的特性参数,通常使用有限元方法计算每匝的集总参数值^[60-61],并通过施加低频解析的限制条件计算感应电机的每个线圈电阻、电感和电容值。基于计算得到的线圈特性参数,构建牵引电机线圈集总参数的等效电路^[62]。S SUNDEEP等^[63]认为绕组内线圈的

相对位置也是确定线圈绝缘两端电压应力的重要因素,并提出了包含时域受控电压源且线圈之间相互耦合的多导线传输线(MCTL)模型。同时,传统的绞合随机绕组导线分布也会对寄生参数值产生重大影响。为研究线圈随机绕组电压应力,XIE Y Y等^[64]提出采用特制的随机三相绕组进行电压传导和电压应力仿真及测试,研究结果表明,无论是无转子的单相绕组还是三相绕组,亦或是带转子的三相绕组,其端绕组绝缘的最大电压应力存在于任意两相的第一个线圈之间,最高幅值可达到直流母线电压的1.25倍。

总体而言,针对变频电机绕组电压分布不均的问题,已开展了较多研究,并初步构建了变频电机匝间电应力评估等效模型。然而,目前的研究主要是对集总参数模型施加外部脉冲方波激励,无法充分模拟宽禁带器件生成的脉冲激励。得到的仿真只能定性确定各匝线圈承受电压的程度,无法为分析匝间绝缘材料的设计等提供定量数据支撑。因此,有必要进一步研究如何模拟宽禁带器件生成的脉冲激励,并提供更为精确的定量数据,以支持匝间绝缘材料设计等方面的分析。

3 变频电机绝缘状态检测及绝缘失效延缓措施

现有研究普遍认为,绝缘缺陷引起的局部放电及空间电荷累积是导致变频电机绝缘破坏的主要原因^[5,14,21-30]。高频方波脉冲电源具有极陡的上升沿,传感器耦合得到的局部放电信号中包含大量低频干扰成分,且变频电机在方波脉冲条件下运行,其空间电荷作用机理极为复杂。因此,国内外学者为探寻适用于变频电机绝缘检测的高频测试方法进行了广泛研究。

3.1 牵引电机绝缘状态检测方法

在检查和维修期间,对绕组绝缘系统进行诊断测试是确保电机运行可靠性的关键手段之一。IEC 60034-18-41:2014^[65]和 IEC 60034-18-42:2017^[66]详细讨论了I型和II型变频电机绕组的鉴定和验收测试,表2列出了I型相对地绝缘系统的应力类别。

尽管脉冲多普勒信号可以作为绝缘击穿的前兆,但其隐藏于波前陡峭的逆变器浪涌脉冲中。因此在具有高频振荡的重复电压脉冲下,脉冲多普勒信号的检测变得更具挑战性,成为当前变频电机绝

表2 I型绝缘系统相对地的应力类别

Table 2 Relative stress categories of Type I insulation systems

应力类别	过冲因数 V_{peak}/V_{dc}	脉冲上升时间 t_r / μs	定子额定局部放电 起始电压 V_{L-G}/V
A-良性	≤ 1.1	≥ 1.00	1 240
B-中等	≤ 1.5	≥ 0.30	1 691
C-中等	≤ 2.0	≥ 0.10	2 255
D-严重	< 2.5	≥ 0.05	2 818

缘问题的研究热点。现有的局部放电检测技术主要有特高频天线(UHF)法、高频电流耦合(HFCT)法、耦合电容器法和光测法^[67-70],这几种方法的优劣势对比详见表3。UHF法和HFCT法是目前用于电机绕组绝缘局部放电测试的两种主流方法,其中,UHF法可测量的频段范围一般在几百兆赫兹到几千兆赫兹之间^[71],HFCT法可测量数百千赫兹到几兆赫兹之间;从频段范围的角度来看,UHF测量的频段范围比HFCT大,但HFCT更专注于高频电流的测量,通常用于某些特定应用场景^[72]。王鹏等^[21,54]通过搭建包含法拉第屏蔽技术的局部放电测试平台,利用天线对绕组线圈进行局部放电测试,图13为该平台示意图。为解决传统无源外置传感器天线信噪比不理想、测试位置限制大等问题,马世金等^[68]设计了一款柔性天线,其弧度与电机定子内外壁拱形吻合度较高,且具有较高检测灵敏度,成功实现了电机局部放电的近场耦合。

表3 变频电机绕组绝缘检测方法对比

Table 3 Comparison of insulation detection methods for windings of inverter motor

方法	优点	缺点
HFCT法	宽频带、抵制低频干扰效果好、与高压测试电路隔离	无法分离陡脉冲耦合的强干扰
UHF法	使用方便,信噪比高	天线布置受限于电机结构,需结合HFCT法一起使用
耦合电容器法	可将PD信号与电磁干扰噪声分离	可能滤除截止频率下频率范围内大部分的PD特征
光测法	信噪比较高	需抑制可见光干扰,在暗室进行

聚合物绝缘材料容易受到空间电荷积累的影响,许多研究者认为,空间电荷是绕组绝缘失效的关键因素^[73-78]。目前,对空间电荷的测量主要采用电声脉冲法(PEA)和热刺激电流法(TSC)。刘洋等^[74]对扁平样品施加高压,利用PEA技术测试了样品表面积累的空间电荷,其测量装置如图14所示。

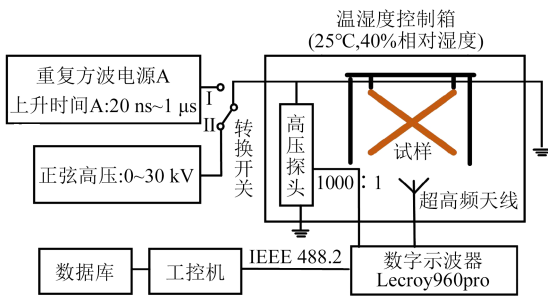


图 13 重复方波电压下局部放电测试系统

Fig.13 Partial discharge test system under repetitive square wave voltage

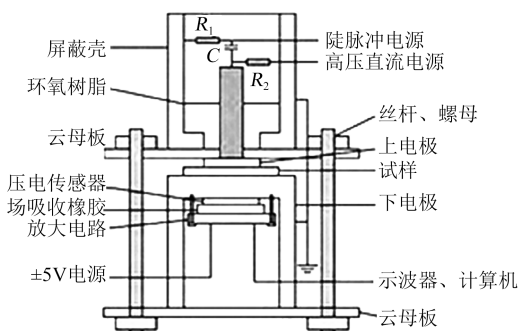


图 14 PEA 空间电荷测量装置

Fig.14 PEA space charge measurement device

K LAU 等^[75]对缠绕在绝缘棒上的两层绝缘电磁线进行 TSC 测量,证明了随机绕线电机绝缘在 PWM 快速电压脉冲老化时有明显的电荷注入。然而,在复杂的聚合物分子中,陷阱能量分布可能形成了一个错综复杂的能量谱。为了直接确定高场电荷注入后电介质中的陷阱能量分布,G MAZZANTI 等^[76]引入迭代算法简化了陷阱能量分布问题,并通过对聚二甲酸乙二醇酯的 TSC 实验结果进行验证,证明了所改进算法的可行性。

3.2 变频电机绝缘材料延缓失效应对策略

3.2.1 降低机端过电压波前陡度及幅值

在高电压变化率环境下,电机系统产生电磁干扰和高噪声,同时伴随着轴承电流增加、绕组端处的电压波反射以及绕组匝间电压分布不均^[49-50]等问题,降低功率器件波前陡度及电机端过电压峰值可有效降低变频系统绝缘材料承受的电热应力。在变频电机牵引驱动系统中,目前采用的措施有以下 3 类。

(1)改变功率器件驱动方式,通过有源栅极驱动增加半导体器件的开关时间,如 ZHAO S 等^[79]提出通过在栅极添加可变输入电容器 C_{gs-ext} 的方式,其结构图如图 15 所示。但由于目前栅极电容无法实

现实时控制,这类方法在应用中并不灵活。LI X 等^[80]提出通过开关瞬变时插入带延迟时间的子模块及使用冗余子模块向变频器的输出端注入反向电压变化率的方法,将逆变器模块电压变化率限制在 50% 左右。然而,在某些情况下,降低电压变化率的同时需平衡调整开关的速度及开关引起的功率损耗等副作用。

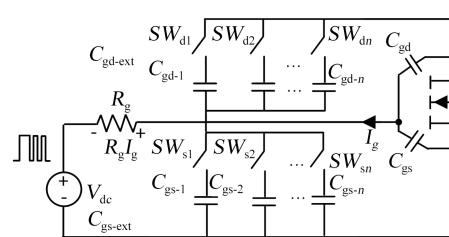


图 15 可变输入电容法

Fig.15 Variable input capacitance method

(2)改变逆变器调制策略,如使用分离输出混合有源中性点钳位(S-HANPC)转换器拓扑,可成功限制 SiC 逆变器的过压峰值^[81-82]。

(3)在变频器输出端或电机端外添加无源^[83-84]或有源滤波器,其中无源滤波器滤波效果如图 16 所示。

3.2.2 抗高频脉冲过电压损伤的绝缘材料研究与开发

为增强变频电机绝缘性能以抵抗电晕损伤,许多学者专注于研究具有出色热稳定性和高电气强度的绝缘高分子材料。一方面,掺杂氧化锌或碳同位素异形体等填料的复合材料成为研究的焦点。在此领域中,文献[85-87]报道了 TiO₂ 等纳米复合填料有助于改善绝缘材料的抗电晕特性。然而,上述研究未涉及高频传导与纳米颗粒含量之间的关系,也未考察微观结构对高频传导的影响。另一方面,为更有效地抵御脉冲电压波的影响,需提高绝缘材料抗热熔、抗振动和抗电磁激振力性能。此外,有必要增强绝缘系统的整体机械强度,以减缓电机使用过程中机械振动的影响,同时提升电机绝缘材料对各种热效应的适应能力。

为了克服未来绝缘材料面临的挑战,解决关键技术及瓶颈^[88],需要开发耐高温、耐电晕、具备良好的化学稳定性及足够的机械强度、可添加无机高导热环保填料的新型绝缘材料,以及制造适用于高频条件下的绝缘材料测试设备和建立试验标准。

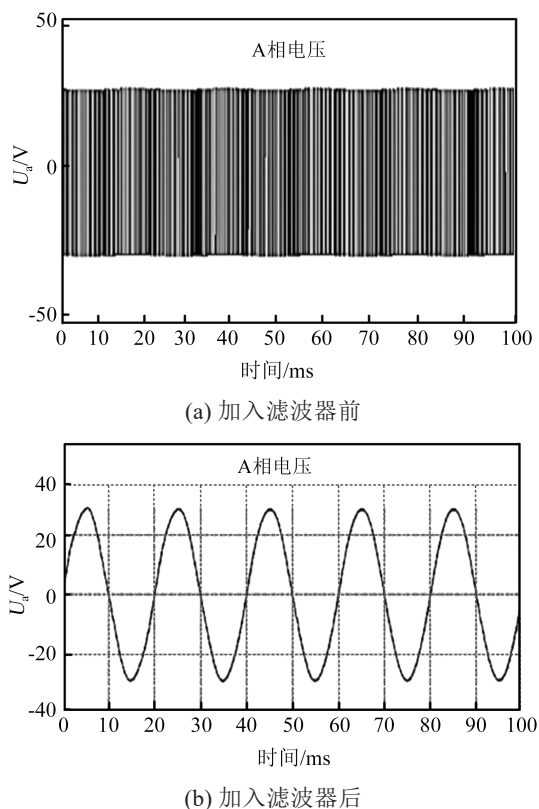


图16 外施无源滤波器前后的差模电压

Fig.16 Differential mode voltage before and after adding passive filter

4 挑战及未来研究方向

4.1 挑战

当前关于变频电机绝缘材料损伤的研究面临多重挑战。首要问题在于未来宽带隙电力电子器件在逆变器中的潜在应用及其要求,将导致变频电机绝缘面临更为严峻的电应力与热应力。其次,对于电机振动水平的研究相对有限,特别是在WBG功率器件驱动下,使得电机绝缘的潜在机械损伤更为显著,需要深入研究。此外,目前国内外对于变频电机环境应力失效研究多基于额定工况,缺乏对高海拔,复杂温湿度等不同环境条件下的绝缘失效风险评估和综合防御数据支撑。最后,现有的绝缘失效研究大多只考虑单因子失效,无法准确模拟实际工况,无法确切解释老化过程中的相关机理,只能实现对绝缘寿命的粗略估计,限制了材料实际应用价值。

在复杂绝缘结构中,局部放电及空间电荷测试技术对特定材料和结构存在一定依赖性,难以实现成熟可靠的应用。同时统一的标准化测试方法的缺失,导致其在实际工程中的可靠性和实用性还有

待进一步验证和提升。一般地,高频条件下,电磁效应、电缆与绕组间的传输线效应、逆变器高频谐波成分等对变频电机电气参数会产生显著的影响。当前提出的高频模型主要基于电机单个对象,将变频器、电缆元件与电机割裂化,无法全面模拟即将成为主流的宽禁带器件生成的脉冲激励对变频电机绝缘的冲击。

4.2 未来研究方向

在未来的研究中,为更全面地理解变频电机绝缘材料损伤的复杂机制,需要整合各方面的实验数据和理论研究,为电机绝缘的设计和防护提供更可靠的指导。对新一代变频电机牵引系统绝缘失效的研究,应关注以下4点:

(1)发展实时故障预测技术,建立电-热-机械-环境应力联合老化模型以估算绝缘材料在多重应力的老化降解程度。研究可从微观角度切入,考虑引入自由能势垒概念,将绝缘材料受各种应力影响的情况进行参数化,从而使寿命预测更能适应复杂多变的环境。

(2)采用数字孪生技术,通过提供物理实体与虚拟体的全息特征映射,构建一个宽禁带逆变器-电缆-变频电机整体仿真测试平台,实现变频电机牵引系统绝缘状态的综合评估。

(3)通过改进逆变器拓扑设计、优化电缆排布方式和接地拓扑形式,以及使用滤波器降低输出谐波等措施,解决系统电路固有缺陷引起过压电应力的关键技术问题。

(4)针对变频电机,积极推动新型电磁线和绝缘材料的研发,加速适用于高频条件下的绝缘材料性能测试设备的开发,以解决新型机车牵引动力系统绝缘在承受逆变器引起的浪涌电压应力时的薄弱问题。

5 结束语

本文综述了变频电机端绝缘的失效机理,概括了引起变频电机绝缘失效的应力表现包括局部放电及空间电荷积聚所致的电应力、绝缘本体过热的热应力、不可逆的机械应力如磨损、振动、位移等,以及恶劣环境应力如腐蚀、降解、冷冻等。其中,电应力及热应力是变频电机绝缘材料失效的主要应力形式。外部环境和机械振动等多重应力在绝缘表面形成缺口,当绝缘局部场强达到临界场值时,最终导致绝缘性能失效。在影响变频电机绝缘失

效的关键因素中,高频电压过冲以及绕组电压分布的不均匀性占据着主要地位,二者均可能引发电机绕组绝缘内部的局部放电现象,导致绝缘逐渐劣化,从而降低电机的寿命。

采用变频电机牵引系统整体综合建模,考虑逆变器、电缆及电机各个模块参数的优化及协调工作,可降低电机端受到的高频过冲电压。其次,使用自身抗电晕性能好、耐压耐高温的新型材料有助于增强材料本身抗外界应力的屏障效果。

参考文献 References

- [1] SCOTT M J, FU L X, YAO C C, et al. Design considerations for wide bandgap based motor drive systems[C]//2014 IEEE International Electric Vehicle Conference. Florence, Italy: IEEE, 2014: 1-6.
- [2] BALCELLS J, BOGONEZ-FRANCO P. Effect of drive to gate coupling circuits on EMI produced by SiC MOSFETs[C]//2013 International Symposium on Electromagnetic Compatibility. Brugge, Belgium: IEEE, 2013: 209-214.
- [3] GONG X, FERREIRA J A. Comparison and reduction of conducted EMI in SiC JFET and Si IGBT-based motor drives[J]. IEEE Transaction on Power Electronics, 2014, 29(4): 1757-1767.
- [4] GERADA D, MEBARKI A, BROWN N L, et al. High-speed electrical machines: technologies, trends, and developments[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(6): 2946-2959.
- [5] LEUZZI R, MONOPOLI V G, ROVERE L, et al. Effects of electrical ageing on winding insulation in high-speed motors: analysis and modelling[C]//2018 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, Portland, USA: IEEE, 2018: 6886-6892.
- [6] MONTANARI G C, SERI P. About the definition of PDIV and RPDIV in designing insulation systems for rotating machines controlled by inverters[C]//2018 IEEE Electrical Insulation Conference, San Antonio, USA: IEEE, 2018: 554-557.
- [7] LUSUARDI L, RUMI A, CAVALLINI A, et al. Partial discharge phenomena in electrical machines for the more electrical aircraft. part II: impact of reduced pressures and wide bandgap devices[J]. IEEE Access, 2021, 9: 27485-27495.
- [8] 谢一琿, 党存禄. 变频电机绝缘失效分析及解决措施[J]. 甘肃电力技术, 2008(3): 4-8.
XIE Y H, DANG C L. Analysis and solutions of insulation failure of inverter motor[J]. Gansu Electric Power Technology, 2008(3): 4-8.
- [9] 于钦学, 任文娥, 钟力生, 等. 热老化对变频牵引电机电磁线绝缘电性能影响的研究[J]. 绝缘材料, 2014, 47(1): 93-96.
YU Q X, REN W E, ZHONG L S, et al. Effects of thermal aging on the electrical properties of magnetic wire insulation in inverter-fed traction motor[J]. Insulating Materials, 2014, 47(1): 93-96.
- [10] DANG C, PARPAL J L, CRINE J P. Electrical aging of extruded cable: review of existing theories and data[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1996, 3(2): 237-247.
- [11] 李世杰, 田泽鹏. 动车组牵引电机用绝缘轴承涂层热失效机理研究[J]. 现代工业经济和信息化, 2017, 7(10): 60-62.
LI S J, TIAN Z P. Research on the thermal failure mechanism of insulated bearing coating for EMU traction motor [J]. Modern Industrial Economy and Informationization, 2017, 7(10): 60-62.
- [12] LINDELL E, BENGTTSSON T, BLENNOW J, et al. Measurement of partial discharges at rapidly changing voltages[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2008, 15(3): 823-831.
- [13] TANG C, CHEN G, FU M, et al. Space charge behavior in multi-layer oil-paper insulation under different DC voltages and temperatures[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2010, 17(3): 775-784.
- [14] LUSUARDI L, RUMI A, CAVALLINI A, et al. Can low voltage inverter-fed induction motors be designed allowing partial discharge activity[C]//2019 IEEE Electrical Insulation Conference. Calgary, Canada: IEEE, 2019: 79-82.
- [15] LEE K B, NIA M S S, LEE W. Frequency spectrum analysis of partial discharge activities in WBG-based AC machine drives [C]//2023 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition. Orlando, USA: IEEE, 2023: 715-720.
- [16] 宗晓. 基于电流源型变频器长距离传输系统研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2015.
ZONG X. Study on current source converter-long cable transmission system[D]. Xuzhou: China, University of Mining and Technology, 2015.
- [17] BHATTACHARYA S, RESTA L, DIVAN D M, et al. Experimental comparison of motor bearing currents with PWM hard and soft-switched voltage-source inverters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1999, 14(3): 552-562.
- [18] 张依强. 热效应对变频牵引电机绝缘特性的影响机理研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2013.
ZHANG Y Q. Study on the thermal effect on insulation performance of inverter-fed traction motor[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2013.
- [19] ABADIE C, BILLARD T, LEBEY T. Partial discharges in motor fed by inverter: from detection to winding configuration[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2019, 55(2): 1332-1341.
- [20] 王鹏. 方波脉冲电压对局部放电特性及电机绝缘寿命影响机理研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2013.
WANG P. Influence and mechanism of square wave voltage on partial discharge and motor insulation life[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2013.
- [21] 王鹏, 周婉亚, 王科镜, 等. 正弦和重复方波电压下变频电机绝

- 缘局部放电特性对比[J]. 高电压技术,2016,42(12):3895-3900.
- WANG P, ZHOU W Y, WANG K J, et al. Comparison of PD characteristics for inverter-fed motor insulation under inusoidal and repetitive square wave voltage conditions[J]. High Voltage Engineering,2016,42(12):3895-3900.
- [22] ELORZA A, ALMANDOZ G, EGEE A, et al. Study of partial discharge inception voltage in inverter fed electric motor insulation systems[J]. Applied Sciences,2023,13(4):2417.
- [23] WANG P, WANG J, XU H Y, et al. Comparison of PD characteristics for inverter-fed motor insulation under inusoidal and repetitive square wave voltage conditions[C]//2016 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application. Chengdu, China:IEEE.
- [24] FABIANI D, MONTANARI G C, CAVALLINI A, et al. Relation between space charge accumulation and partial discharge activity in enameled wires under PWM-like voltage waveforms [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electric Insulation, 2004,11(3):393-405.
- [25] RUMI A, CAVALLINI A, LUSUARDI L. Impact of WBG converter voltage rise-time and switching frequency on the PDIV of twisted pairs[C]//2020 IEEE 3rd International Conference on Dielectrics. Valencia,Spain:IEEE,2020:902-905.
- [26] WANG P, CAVALLINI A, MONTANARI G C. The influence of square wave voltage duty cycle on PD behavior[C]//2015 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. Ann Arbor,USA:IEEE,2015:338-341.
- [27] BHSCH R, POHLMANN F, MULLER K. The influence of several environmental conditions on the partial discharge characteristics and on the lifetime of magnet wires under inverter pulse operation[C]//2001 International Symposium on Electrical Insulating Materials. Himeji, Japan:IEEE,2001:645-648.
- [28] TAKASHIMA M, SODA K, TAKADA T. Measurement of electric charges at the interface between two dielectric layers using an electro-acoustic transducer technique[J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation,1988,23(2):287-295.
- [29] MAZZANTI G, MONTANARI G C, ALISON J M. A space-charge based method for the estimation of apparent mobility and trap depth as markers for insulation degradation-theoretical basis and experimental validation[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2003,10(2):187-197.
- [30] WANG Y L, DING Y, YUAN Z, et al. Space-charge accumulation and its impact on high-voltage power module partial discharge under DC and PWM waves: testing and modeling[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(10): 11097-11108.
- [31] TONG W M, SUN R, LI S Q, et al. Loss and thermal analysis for high-speed amorphous metal PMSMs using 3-D electromagnetic-thermal bi-directional coupling[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion,2021,36(4):2839-2849.
- [32] GUASTAVINO F, COTELLA G, DARDANO A, et al. Influence of the rise time and of the temperature on the PD inception voltage of enameled wires[C]//2010 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. Lafayette, USA: 2010.
- [33] FRUTH B, LIPTAK G, ULLRICH L, et al. Aging of rotating machines insulation Mechanisms measurement techniques[C]//The 3rd International Conference on Conduction Breakdown in Solid Dielectrics. Trondheim,Norway:IEEE,1989.
- [34] 周凯.脉冲电压对变频牵引电机绝缘老化的影响机理研究[D].成都:西南交通大学,2009.
- ZHOU K. Effect of pulse waveform on ageing of inverter-fed traction motor insulation[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University,2009.
- [35] 张丽丽.PWM变频调速牵引电机绝缘破坏机理的初步研究[D].成都:西南交通大学,2004.
- ZHANG L L. Study on premature failure mechenism of PWM inverter-fed traction motor[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University,2004.
- [36] 陆宝琦.交流变频电机的绝缘[J].绝缘材料,2001,34(3):29-34.
- LU B Q. Test and application of insulation for AC inverter-fed motors[J]. Insulating Materials,2001,34(3):29-34.
- [37] 乔长帅,唐赢武,钟博.牵引电机定子端部绕组电磁力计算分析[J].电机技术,2020(5):15-18,22.
- QIAO C S, TANG Y W, ZHONG B. Calculation and analysis on electromagnetic force of the stator end winding in traction motors[J]. Electrical Machinery Technology,2020(5):15-18,22.
- [38] MIYATAKE K, TATEHANA K, TANAKA Y, et al. Space charge accumulation in PET film under process of rising and falling temperature[C]//The 6th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials. Xi'an,China: IEEE,2000:42-45.
- [39] MEYER D R, CAVALLINI A, LUSUARDI L, et al. Influence of impulse voltage repetition frequency on RPDIV in partial vacuum[J]. IEEE Trans. Dielectric Electrical Insulation,2018,25: 873-882.
- [40] CHONG Y L, CHEN G, HO Y F F. Temperature effect on space charge dynamics in XLPE insulation[C]//2003 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. Albuquerque, USA:2003:65-76.
- [41] BOUDOU L, GRISERIL V, GUASTAVINOL I, et al. Effect of temperature on space charge formation in low density polyethylene of antioxidant[C]//2004 IEEE International Conference on Solid Dielectrics. Toulouse, France:IEEE,2004:252-255.
- [42] ZHOU K, WU G N, DENG T, et al Aging time effect on PD and space charge behavior in magenet wire under high PWM voltage

- [C]//Conference Record of the 2006 IEEE International Symposium on Electrical Insulation. Toronto, Canada: IEEE, 2006: 159-162.
- [43] MELFI M. Low-voltage PWM inverter-fed motor insulation issues[J]. IEEE Transactions Industry Applications, 2006, 42(1): 128-133.
- [44] CAVALLINI A, FABIANI D, MONTANARI G C. Power electronics and electrical insulation systems-Part 1: phenomenology overview[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2010, 26(3): 7-15.
- [45] 万健如,林志强,禹华军. 电缆长度对PWM逆变器驱动电机端电压的影响[J]. 电力电子技术,2001(6):26-29.
WAN J R, LIN Z Q, YU H J. Effects of cable distance on the terminal voltage of motor fed by PWM inverter[J]. Power Electronics, 2001(06):26-29.
- [46] 马洪飞,徐殿国,陈希有,等. PWM逆变器驱动异步电动机采用长线电缆时电压反射现象的研究[J]. 中国电机工程学报, (11):110-114.
MA H F, XU D G, CHEN X Y, et al. Research of voltage reflection of PWM inverter-fed induction motor with long motor leads [J]. Proceedings of the CSEE,2001,(11):110-114.
- [47] HYYPIO D B. Effects of risetime and cable length on motor insulation degradation resulting from operation on PWM voltage source inverters[C]//1997 IEEE International Electric Machines and Drives Conference Record. Milwaukee,USA:IEEE,1997.
- [48] 李金泉,王鹏,吴琦,等. 重复脉冲过电压对变频电机绝缘局部放电起始电压及熄灭电压的影响研究[J]. 中国电机工程学报, 2019,39(15):4541-4550.
LI J Q, WANG P, WU Q, et al. The influence of overvoltage from repetitive impulsive voltages on PDIV and PDEV of inverter-fed motor insulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39 (15):4541-4550.
- [49] 王剑,周凯,王鹏,等. 重复脉冲电压上升时间对变频电机绝缘局部放电起始电压影响研究[J]. 绝缘材料,2018,51(8):37-42.
WANG J, ZHOU K, WANG P, et al. Influence of repetitive impulse voltage rise time on partial discharge inception voltage of inverter-fed motors insulation[J]. Insulating Materials, 2018, 51 (8):37-42.
- [50] 郑昌江,雷勇,王鹏,等. 重复短脉冲上升时间对变频电机绝缘局部放电统计特性的影响[J]. 绝缘材料,2018,51(10):50-56.
ZHENG C J, LEI Y, WANG P, et al. Influence of repetitive short impulsive voltage rise time on partial discharge statistical properties of inverter-fed motor insulation[J]. Insulating Materials, 2018,51(10):50-56.
- [51] 王鹏,陈波,徐洪英,等. 重复脉冲占空比对变频电机匝间绝缘耐电晕寿命影响研究[J]. 绝缘材料,2020,53(1):64-69.
WANG P, CHEN B, XU H Y, et al. Effect of duty cycle of repetitive impulsive voltage on corona-resistant lifetime of turn-to-turn insulation for inverter-fed motors[J]. Insulating Materials, 2020,53(1):64-69.
- [52] 赵明,周群,王鹏,等. 正弦脉宽调制电压下聚酰亚胺绝缘寿命研究[J]. 绝缘材料,2020,53(8):55-61.
ZHAO M, ZHOU Q, WANG P, et al. Lifetime of polyimide insulation under sinusoidal pulse width modulated voltage[J]. Insulating Materials,2020,53(8):55-61.
- [53] 顾洋豪,王鹏,董涵,等. 重复方波死区时间对变频电机绝缘性能影响研究[J]. 绝缘材料,2021,54(4):41-49.
GU Y H, WANG P, DONG H, et al. Effects of deadtime of repetitive square wave voltage on performance of insulation for inverter-fed motors[J]. Insulating Materials, 2021,54(4):41-49.
- [54] 陈君强,王鹏,黄寅,等. 重复方波极性对聚酰亚胺耐电晕性能影响研究[J]. 绝缘材料,2020,53(7):45-50.
CHEN J Q, WANG P, HUANG Y, et al. Influence of polarity of repetitive square wave voltage on corona resistance of polyimide [J]. Insulating Materials,2020,53(7):45-50.
- [55] 杨能,王鹏,赵政嘉,等. 重复短脉冲及方波电压频率对变频电机绝缘局部放电统计特性影响[J]. 绝缘材料,2018,51(11): 56-63.
YANG N, WANG P, ZHAO Z J, et al. Effect of repetitive short impulse and square wave voltage frequency on partial discharge statistical properties of inverter-fed motor insulation[J]. Insulating Materials,2018,51(11):56-63.
- [56] WANG L W, HO C N M, CANALES F, et al. High-frequency cable and motor modeling of long-cable-fed induction motor drive systems[C]//2010 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. Atlanta, USA:IEEE,2010:846-852.
- [57] 黎燕. 高压变频器长线电缆驱动系统负面效应分析及其对策[D]. 成都:西南交通大学,2016.
LI Y. Analysis on adverse effects of high voltage inverter drive system with long cable and the associated countermeasures[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University,2016.
- [58] FLORKOWSKA B, ZYDRON P, FLORKOWSKI M. Effects of inverter pulses on the electrical insulation system of motors[C]// 2011 IEEE International Symposium on Industrial Electronics. Gdansk, Poland: IEEE,2011:573-578.
- [59] HWANG D H, KIM Y J, BAE S W, et al. Analysis of voltage stress in stator winding of IGBT PWM inverter-fed induction motor systems[C]//Sixth International Conference on Electrical Machines and Systems. Beijing, China:IEEE,2003,945-950.
- [60] TOUDJI M, PARENT G, DUCHESNE S, et al. Determination of winding lumped parameter equivalent circuit by means of finite element method[C]//2018 IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation. Miami, USA:IEEE,2016;1-4.
- [61] MAGDUN O, BLATT S, BINDER A. Calculation of stator winding parameters to predict the voltage distributions in inverter fed AC machines[C]//2013 9th IEEE International Sympos-

- sium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives. Valencia, Spain: IEEE,2013:447-453.
- [62] MIHAILA V, DUCHESNE S, ROGER D. A simulation method to predict the turn-to-turn voltage spikes in a PWM fed motor winding[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2011,18(5):1609-1615.
- [63] SUNDEEP S, WANG J, GRIFFO A. Prediction of transient voltage distribution in inverter-fed stator winding, considering mutual couplings in time domain[C]//2020 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. Detroit, USA:IEEE,2020:517-524.
- [64] XIE Y Y, ZHANG T T, LEONARDI F, et al. Voltage stress modeling and measurement for random-wound machine windings driven by inverters[J]. IEEE Transactions on Industry Applications,2020,56(4):3536-3548.
- [65] STRANGES M K W, STONE G. C, BOGH D L, et al. IEC 60034-18-41: a new draft technical specification for qualification and acceptance tests of inverter duty motor insulation[C]//Record of Conference Papers Industry Applications Society 52nd Annual Petroleum and Chemical Industry Conference, Denver, USA: IEEE,2005:297-302.
- [66] STRANGES M K W, STONE G C, BOGH D L. Progress on IEC 60034-18-42 for qualification of stator insulation for medium-voltage inverter duty applications[C]//2007 IEEE Petroleum and Chemical Industry Technical Conference. Calgary, Canada: IEEE,2007:1-7.
- [67] HU B, WEI Z, YOU H Y, et al. A partial discharge study of medium-voltage motor winding insulation under two-level voltage pulses with high dv/dt [J]. IEEE Open Journal of Power Electronics,2021,2:225-235.
- [68] 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 S J, WANG P, ZHU Y W, et al. Design of flexible sensor for PD detection of inverter-fed motors insulation system[J]. High Voltage Engineering,2023,49(11):4798-4807.
- [69] OKUBO H, HAYAKAWA N, MONTANARI G C. Technical development on partial discharge measurement and electrical insulation techniques for low voltage machines driven by voltage inverters[J]. IEEE Transactions Dielectrics and Electrical Insulation,2007,14(6):1516-1530.
- [70] HAYAKAWA N, INANO H, OKUBO H. Partial discharge inception characteristics by different measuring methods in magnet wire under surge voltage application[C]//2007 Annual Report-Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. IEEE, Vancouver, Anada:IEEE,2007:1-7.
- [71] 耿伊雯,芮逸凡,范路,等. 基于D-S证据多源信息融合与固态光电倍增-UHF联合检测的GIS局部放电模式识别[J]. 绝缘材料, 2022,55(11):109-117.
- GENG Y W, RUI Y F, FAN L, et al. GIS partial discharge pattern recognition based on D-S evidence multi-source information fusion and solid state photomultiplier-UHF combined detection[J]. Insulating Materials,2022,55(11):109-117.
- [72] 孟飞,邵满智,牛越,等. PP电树枝起始电压测试方法及电压稳定剂作用效果研究[J]. 绝缘材料,2022,55(7):41-49.
- MENG F, SHAO M Z, NIU Y, et al. Electrical tree initiation voltage test method of polypropylene and effects of voltage stabilizers[J]. Insulating Materials,2022,55(7):41-49.
- [73] MAZZANTI G, MONTANARI G C. Electrical aging and life models: the role of space charge[J]. IEEE Transactions on Dielectrics Electrical Insulation,2005,12(5):876-890.
- [74] 刘洋,吴广宁,高国强,等. 方波脉冲下聚酰亚胺绝缘破坏机理研究进展[J]. 高压电器,2016,52(7):10-18.
- LIU Y, WU G N, GAO G Q, et al. Progress of research into the Polyimide insulation failure mechanism under square impulse stress[J]. High Voltage Apparatus,2016,52(7):10-18.
- [75] LAU K, VAUGHAN A, CHEN G, et al. On the space charge and DC breakdown behavior of polyethylene/silica nanocomposites[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2014,21(1):340-351.
- [76] MAZZANTI G, MONTANARI G C, DISSADO L A. Elemental strain and trapped space charge in thermoelectrical aging of insulating materials: life modeling[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2001,8(6):966-971.
- [77] HUDON C, AMYOT N, KANDEV N. Evidence of charge injection resulting from fast pulse operation of inverter drives[C]//1998 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. Atlanta,USA:IEEE,1998:714-718.
- [78] WANG Y, WU J, YIN Y. A modified thermally stimulated current analysis method for direct determination of trap energy distribution[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2017,24(5):3138-3143.
- [79] ZHAO S, ZHAO X C, WEI Y Q, et al. A review of switching slew rate control for silicon carbide devices using active gate drivers[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics,2021,9(4):4096-4114.
- [80] LI X, LIU R, KE Z W, et al. Simple switching strategies for dv/dt reduction in SiC-device-based modular multilevel converters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2023,38(2):1485-1493.
- [81] BELKHODE S, SHUKLA A, DOOLLA S. Split-output hybrid active neutral-point-clamped converter for MV applications[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Industrial Electronics,2021,2(2):184-195.
- [82] SHAHANE R, BELKHODE S, SHUKLA A, et al. A highly efficient hybrid devices-based mmc with a novel modulation scheme using hardware-in-loop system[C]//2022 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition. Houston, USA:

- IEEE,2022:675-680.
- [83] 杨玉岗,孙鹤鸣. CLC型PWM逆变器端无源滤波器的设计[J]. 电源学报,2021,19(3):33-39.
- YANG Y G, SUN H M. Design of CLC-type PWM inverter passive filter[J]. Journal of Power Supply, 2021,19(3):33-39.
- [84] 姜艳姝,徐殿国,刘宇,等. 新型PWM逆变器输出无源滤波器的研究[J]. 电机与控制学报,2005(1):5-10.
- JIANG Y S, XU D G, LIU Y, et al. Research on a novel PWM inverter output passive filter[J]. Electric Machines and Control, 2005(1):5-10.
- [85] ZHA J W, SONG H T, DANG Z M, et al. Mechanism analysis of improved corona-resistant characteristic in polyimide/TiO₂ nanohybrid films[J]. Applied Physics Letters,2008,93(19):192911.
- [86] CAO Y, IRWIN P C, YOUNSI K. The future of nanodielectrics in the electrical power industry[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2004,11(5):797-807.
- [87] YIN Y, DONG X, CHEN J, et al. High field electrical conduction in the nanocomposite of low-density polyethylene and Nano-SiO_x[J]. IEEJ Transactions on Fundamentals & Materials, 2007,126(11):1064-1071.
- [88] 马林泉,周成,黄苏融,等. 电动汽车驱动电机用绝缘材料现状与发展趋势[J]. 电器工业,2020(4):52-57.
- MA L Q, ZHOU C, HUANG S R, et al. Current situation and development trend of insulating materials for electric vehicle drive motors[J]. China Electrical Equipment Industry,2020(4):52-57.

收稿日期:2023-12-06;修回日期:2024-03-19。

作者简介:

袁树楠(2000—),女(汉族),江西赣州人,硕士生,主要从事高电压与绝缘技术的研究。