

不同功率下发电机绕组绝缘受载及性能分析

何玉灵¹ 杨佳文¹ 吴学伟¹ 孙 凯¹ 安家骏¹ 朱晓光¹ 王晓丹²

(1. 华北电力大学 机械工程系, 保定 071003)

(2. 国能联合动力技术(保定)有限公司, 保定 071003)

摘要:【目的】风力发电机定子绕组绝缘在波动功率复合载荷下易发生热-机械老化损伤,严重危害运行安全。为此,针对定子绕组在变功率工况下的多物理场受载特征及绝缘性能退化规律开展系统研究。【方法】首先,以250 kW永磁同步风力发电机为对象,建立了端部绕组等效动力学与三维常温/瞬态热传导解析模型;其次,利用Ansys软件平台搭建了高保真电磁-热-结构多物理场耦合仿真流,计算了满载、半载、空载下的温度分布与振动频谱;最后,基于仿真边界,设计并搭建了热-机械多场联合的绝缘加速老化试验平台,对历经180 d变功率模拟老化后的绝缘试样进行了宏、微观机械、导热及介电性能测试。【结果】仿真与试验结果表明,随功率增加,铜耗及电磁激励激增,定子最高温度显著上升,且呈中间高、两端低及下层高于上层的非均匀分布。端部绕组振动受低阶电磁力主导,频谱以100 Hz的2倍频等偶数次谐波为主,且幅值随功率单调递增。经历加速老化后,绝缘带基体产生链断裂损伤;随功率增加,微观开裂加剧,弹性模量、导热系数及体积电阻率显著单调下降,而极性游离基滋生导致相对介电常数单调增加。

关键词: 发电机; 绝缘性能; 电磁振动; 温升; 损伤**中图分类号:** TM31 **DOI:** 10.16579/j.issn.1001.9669.2026.06.008

0 引言

随着全球能源危机与低碳化转变问题的日益突出,风电建设对促进能源结构调整和经济发展方式转变具有重要意义^[1]。作为风电机组能量转换的核心设备,风力发电机的性能直接决定了机组的发电效率与运行稳定性。发电机的性能与绕组绝缘性能息息相关^[2]。然而,机组长期运行过程中,振动与温升等因素会不可避免地导致绕组绝缘老化甚至损伤^[3]。同时受风能固有波动性及电网调度策略的影响,不同风力发电机所承受的功率也存在显著差异,进而导致其绕组所受的振动与温升水平各不相同。因此,深入分析不同功率工况下发电机绕组的受载及其对绝缘性能的影响至关重要。

目前,业界专家和学者普遍认为绕组在激励作用下的振动磨损是造成绝缘老化破坏的主要因素^[4-6],并针对绝缘振动磨损破坏机制进行了深入的分析。在电磁力等激励作用下,绕组会产生相应的力学响应,主要包括位移和振动等^[7]。王尔东^[8]对绕组故障下的热应力与机械应力展开研究,分析了绕组绝缘失效的危险

点;冯钜^[9]探究机械冲击损伤深度和广度对定子线棒主绝缘材料绝缘性能的影响,采用估算等式和其他数据图可以为评估此类机械损伤提供参考。同时,还有学者探究了热老化和电老化对绝缘老化性能的影响。李育林等^[10]以抽水蓄能机组发电机真空压力浸渍工艺定子线棒为研究目标,研究了定子绝缘电学性能受热老化特性的影响。杨敏等^[11]、SUMISLAWSKA等^[12]探究了热老化对发电机定子线棒环氧-云母绝缘频域介电特性的影响。陈庆国等^[13]分析了电老化对定子线棒主绝缘频域介电谱特性的影响。ZHANG等^[14]定量研究了多场耦合变频应力作用下电机端绝缘损伤的疲劳扩展特性。然而,以上文献均没有考虑到发电机自身功率对绝缘性能的影响。

发电机受载分析对绕组绝缘性能的研究也至关重要。薛敬业等^[15]依据流体力学和传热学理论知识,建立发电机的流固耦合模型进行热仿真,分析了风冷无刷同步发电机的电枢绕组温升趋势。吴胜男等^[16]采用有限元法对发电机进行热计算,揭示不同运行状态(最大增磁、额定运行和最大去磁)下发电机的温升分布规律。ALBANESE等^[17]提出一种新的数值方法,计算发电机

收稿日期: 2025-06-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(52177042); 河北省自然科学基金项目(E2022502003, E2021502038); 河北省第三批青年拔尖人才支持计划项目([2018]-27)

作者简介: 何玉灵,男,1984年生,福建龙岩人,博士,教授,博士研究生导师; 主要研究方向为电力设备状态检测及其故障诊断等; E-mail: heyuling1@163.com。

吴学伟(通信作者),男,1999年生,安徽宣城人,在读博士研究生; 主要研究方向为电动机特性分析和故障诊断等; E-mail: 120242102038@ncepu.edu.cn。

引用格式: 何玉灵,杨佳文,吴学伟,等. 不同功率下发电机绕组绝缘受载及性能分析[J]. 机械强度,2026,48(6):70-77.

HE Yuling, YANG Jiawen, WU Xuewei, et al. Load and performance analysis of generator winding insulation under variable power conditions[J]. Journal of Mechanical Strength, 2026, 48(6): 70-77.



免费获取

端部绕组力的三维分布随时间的变化。徐明星等^[18]通过理论解析、有限元仿真和动模试验,对发电机故障下端部绕组振动特性进行研究。黄杨森等^[19]根据发电机转子振动统计规律,提出一种转子振动异常动态阈值计算方法。深入分析不同功率工况下发电机绕组的振动和温升及其对绝缘性能的影响刻不容缓。

在现有研究基础上,本研究综合分析了不同功率工况下发电机振动与温升的变化规律,并通过绕组绝缘加速老化试验,揭示了功率变化对绝缘老化特性的影响机制,本文整体研究思路如图 1 所示。

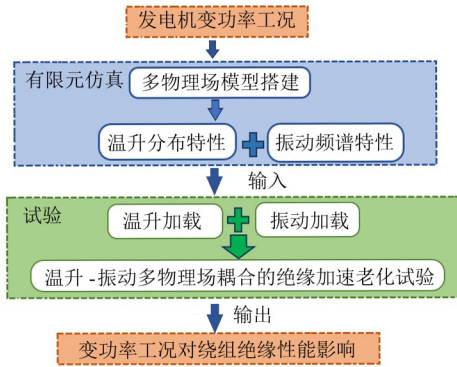


图 1 发电机变功率工况下定子绕组绝缘多场耦合仿真与老化试验研究逻辑框图

Fig. 1 Logic block diagram of multi-field coupling simulation and aging test research on stator winding insulation under variable power operating conditions of generator

1 变功率工况下绕组受载分析

1.1 理论计算

1.1.1 振动

发电机外部负载功率发生变化时,由电磁感应产生的绕组电压基本恒定,相电流会产生明显的变化。不同工况下相电流可表示为

$$\begin{cases} I_{\text{full}}(\alpha_m, t) = I_0 \\ I_{\text{half}}(\alpha_m, t) = I_0/2 \\ I_{\text{no}}(\alpha_m, t) = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中, I_{full} 、 I_{half} 、 I_{no} 分别为满载、半载、空载功率工况下的电流; I_0 为额定电流; α_m 为定子坐标系中气隙周向位置角度; t 为时间。

发电机的气隙合成磁势由定子磁势和转子磁势组成,绕组相电流的变化影响绕组定子磁势,而转子磁势不会受到影响。不同负载情况下转子磁势以及合成磁势的矢量关系如图 2 所示。

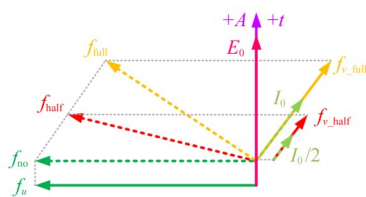


图 2 气隙磁势示意图

Fig. 2 Diagram of air gap magnetomotive force

由图 2 可知,不同负载情况下气隙合成磁势可表示为

$$\begin{cases} f_{\text{full}}(\alpha_m, t) = \sum_{\mu} f_{\mu} \cos(\mu p \alpha_m - \mu \omega t) + \sum_{\nu} f_{\nu, \text{full}} \cos(\nu p \alpha_m - \omega t - \varphi_{\nu}) \\ f_{\text{half}}(\alpha_m, t) = \sum_{\mu} f_{\mu} \cos(\mu p \alpha_m - \mu \omega t) + \sum_{\nu} f_{\nu, \text{half}} \cos(\nu p \alpha_m - \omega t - \varphi_{\nu}) \\ f_{\text{no}}(\alpha_m, t) = \sum_{\mu} f_{\mu} \cos(\mu p \alpha_m - \mu \omega t) \\ f_{\nu, \text{full}} = \frac{1.35 I_{\text{full}} N_s K_{wy}}{p} \\ f_{\nu, \text{half}} = \frac{1.35 I_{\text{half}} N_s K_{wy}}{p} \end{cases} \quad (2)$$

式中, $f_{\text{full}}(\alpha_m, t)$ 、 $f_{\text{half}}(\alpha_m, t)$ 、 $f_{\text{no}}(\alpha_m, t)$ 分别为满载、半载、空载工况下的合成磁势; μ 为转子磁动势阶次; f_{μ} 为永磁体产生的转子磁动势幅值; p 为转子的极对数; ω 为发电机角频率; ν 为定子磁动势阶次; $f_{\nu, \text{full}}$ 、 $f_{\nu, \text{half}}$ 分别为满载、半载电枢绕组定子的磁动势幅值; φ_{ν} 为 ν 次定子磁动势相位角; N_s 为单极绕组匝数; K_{wy} 为 y 次绕组因数。

由永磁体磁场产生的转子磁动势阶次为

$$\mu = (2x + 1)p, \quad x = 0, 1, 2, \dots \quad (3)$$

根据安培定律,定子绕组受到交变径向电磁力的作用,绝缘材料会发生机械变形和应力变化。从宏观角度来看,绝缘材料的周期性机械变形表现为周期性的位移(即振动)。如图 3 所示, L 为转子轴向长度; B_1 为端部绕组磁通密度; 定子绕组端部绕组的电磁力可由安培定理和电磁感应定律求得,即

$$\begin{cases} F_{\text{full}} = \int_0^L B_{\text{end,full}} I_{\text{full}} \cos \alpha_1 \sin \beta_1 dl = \lambda I_{\text{full}} l B_{\text{full}}(\alpha_m, t) = \sum_{\mu} \lambda I_0 \Lambda_0 l F_{\mu} \cos(\mu p \alpha_m - \mu \omega t) + \sum_{\nu} \frac{1.35 \lambda \Lambda_0 I_0^2 N_s K_{wy}}{p} \cos(\nu p \alpha_m - \omega t - \varphi_{\nu}) \\ F_{\text{half}} = \int_0^L B_{\text{end,half}} I_{\text{half}} \cos \alpha_1 \sin \beta_1 dl = \lambda I_{\text{half}} l B_{\text{half}}(\alpha_m, t) = \sum_{\mu} \frac{\lambda I_0 \Lambda_0 l F_{\mu}}{2} \cos(\mu p \alpha_m - \mu \omega t) + \sum_{\nu} \frac{1.35 \lambda \Lambda_0 I_0^2 N_s K_{wy}}{4p} \cos(\nu p \alpha_m - \omega t - \varphi_{\nu}) \\ F_{\text{no}} = \int_0^L B_{\text{end,no}} I_{\text{no}} \cos \alpha_1 \sin \beta_1 dl = 0 \\ B_{\text{full}}(\alpha_m, t) = f_{\text{full}}(\alpha_m, t) \Lambda(\alpha_m) \\ B_{\text{half}}(\alpha_m, t) = f_{\text{half}}(\alpha_m, t) \Lambda(\alpha_m) \\ \Lambda(\alpha_m) = \Lambda_0 \end{cases} \quad (4)$$

式中, F_{full} 、 F_{half} 、 F_{no} 分别为满载、半载、空载工况下电磁力; B_{full} 、 B_{half} 分别为满载、半载工况下的气隙磁密;

$B_{\text{end_full}}$ 、 $B_{\text{end_half}}$ 、 $B_{\text{end_no}}$ 分别为满载、半载、空载工况下端部磁密; α_1 为端部绕组的磁通密度与法向的夹角; A_0 为气隙单位面积磁导率; β_1 为端部绕组法向与转子轴的夹角; l 为端部绕组轴向长; λ 为衰减系数, 为端部磁密和气隙磁密的比值, 其值介于 0 和 1 之间。

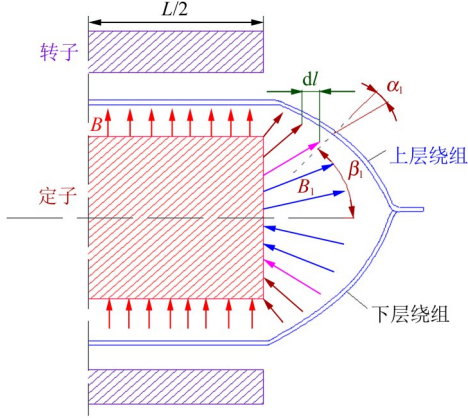


图3 绕组受力数学模型

Fig. 3 Mathematical model of winding force

电磁力频率的表达式为

$$H = \left(\frac{\mu}{p} \pm 1 \right) q \quad (5)$$

式中, q 为发电机的工作频率。

由式(5)可知, 发电机在运行过程中, 电磁力频率为偶次谐波。发电机的实际振动系统存在阻尼和刚度影响, 因此, 需要建立该外转子永磁发电机动力学模型。端部绕组等效力学模型如图4所示。其中对绕组产生影响的主要因素为径向振动。故绕组径向振动的激励和响应的关系可表示为

$$M\ddot{y}(t) + D\dot{y}(t) + Ky(t) = F(t) \quad (6)$$

式中, $y(t)$ 为绕组振动位移; M 为端部绕组的质量矩阵; D 为系统阻尼矩阵; K 为系统刚度矩阵; $F(t)$ 为端部绕组所受径向电磁力。

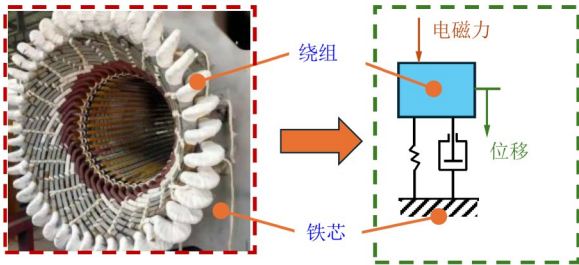


图4 发电机定子端部绕组径向阻尼-弹性等效动力学简图

Fig. 4 Equivalent dynamic schematic diagram of radial damping-elasticity for generator stator end windings

由式(6)可知, 端部绕组的振动表示为 2 阶微分方程, 通过方程求解出的位移为系统的瞬态位移和稳态位移。由于阻尼作用, 端部绕组系统的瞬态位移最终衰减至 0。本文仅求解绕组系统的稳态位移, 因此, 基于特征方程法, 绕组系统的稳态位移可表示为

$$\begin{cases} y_{\text{full}}(t) = \frac{F_{\text{full}}(t - t_0)}{\sqrt{(1 - \eta^2)^2 + (2\xi\eta)^2}} \\ y_{\text{half}}(t) = \frac{F_{\text{half}}(t - t_0)}{\sqrt{(1 - \eta^2)^2 + (2\xi\eta)^2}} \\ y_{\text{no}}(t) = 0 \\ \xi = \frac{D}{2\sqrt{MK}} \end{cases} \quad (7)$$

式中, $y_{\text{full}}(t)$ 、 $y_{\text{half}}(t)$ 、 $y_{\text{no}}(t)$ 分别为满载、半载、空载工况下的稳态位移; t_0 为相位位移; η 为激振频率和固有频率比; ξ 为系统的阻尼比。

由式(7)可知, 等效系统受迫振动的表达式与电磁力的表达式基本相同, 只是幅值和相位发生变化, 因此, 振动频率为偶次谐波。空载工况下, 端部绕组振动幅值基本为 0。随着功率的增加, 端部绕组振动幅值增大。

1.1.2 温度

同步发电机在运行过程中, 定子绝缘内部的绕组和绝缘外部的定子铁芯分别产生了绕组铜耗和铁芯损耗。外部铁芯损耗产生的热量与内部绕组铜耗产生的热量共同作用, 导致了绝缘内部温度分布不均匀。其中, 铁芯损耗和定子绕组铜耗可分别表示为

$$\begin{cases} P_{\text{Fe}} = P_h + P_e + P_a = k_h q B^2 + k_e q^2 B^2 + k_a q^{1.5} B^{1.5} \\ P_{\text{Cu}} = 3Z_p I^2 \end{cases} \quad (8)$$

式中, P_{Fe} 、 P_h 、 P_e 、 P_a 分别为铁芯损耗、磁滞损耗、涡流损耗、附加损耗; B 为磁通密度; k_h 、 k_e 、 k_a 分别为磁滞损耗系数、涡流损耗系数、附加损耗系数; Z_p 为相电阻。

随着功率的增加, 铜耗和铁耗逐渐增大。在空载工况下, 绕组电流为 0, 绕组铜耗趋近于 0。

采用内部热源的三维温度场分析方法, 在三维笛卡尔坐标系中, 热量传递可表示为

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} (\epsilon_x \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (\epsilon_y \frac{\partial T}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (\epsilon_z \frac{\partial T}{\partial z}) + q_v = \\ \rho c \frac{\partial T}{\partial t} - S_n \frac{\partial T}{\partial n} = j(T - T_f) \end{aligned} \quad (9)$$

式中, ϵ_x 、 ϵ_y 、 ϵ_z 、 S_n 分别为物体在 x 、 y 、 z 、 n 方向上的导热系数; T 为物体的温度; q_v 为热源密度; ρ 为物质密度; c 为物体比热容; T_f 为介质的温度; j 为散热系数。

为了方便分析定子-绕组系统升温, 平衡计算进度和计算效率, 如图5所示, 将实际绕组简化为两部分, 定子绕组集中在槽中间, 绕组外部是等效的绝缘材料。

根据图5中的简化模型, 定子绕组等效绝缘的导热系数为单匝绝缘导热系数加权, 表达式为

$$\kappa_{\text{eq}} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{\sum_{i=1}^n (d_i / \kappa_i)} \quad (10)$$

式中, κ_{eq} 为等效绝缘材料的导热系数; d_i 为绝缘材料

的厚度; κ_i 为导线的导热系数。

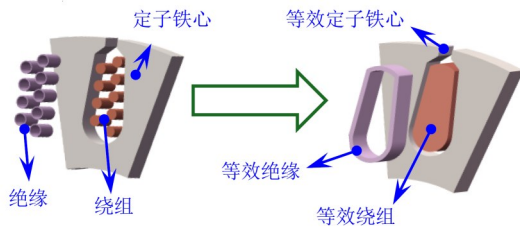


图 5 等效绕组模型

Fig. 5 Equivalent winding model

此外,温度场的边界条件还需要进行考虑。存在对流换热的表面如图 6 所示。相关系数可用经验公式表示为

$$\begin{cases} \alpha_{dzn} = 15 + 6.5v_r^{0.7} \\ \alpha_{dwz} = \pi R^2 g/4 \\ \alpha_{qx} = 28 \times (1 + \sqrt{w_q}) \\ \alpha_{ie} = 6.5 + 2.7v_r^{0.6} \end{cases} \quad (11)$$

式中, v_r 为转子线速度; R 为定子内径; g 为定子内圆表面和轴的热导率; w_q 为气隙处的平均速度。

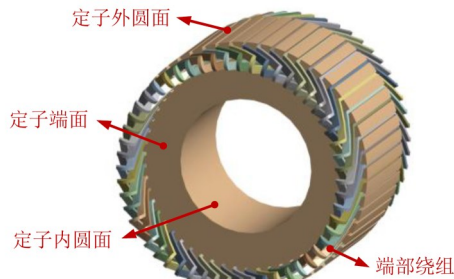


图 6 定子换热系数

Fig. 6 Heat transfer coefficient of the stator

1.2 仿真分析

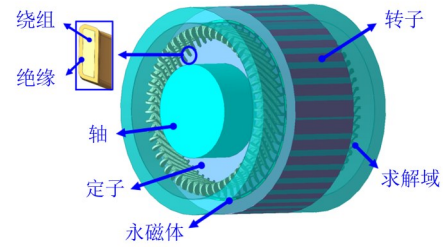
1.2.1 仿真设置

以国能联合动力技术有限公司某风力发电机为研究对象,参数如表 1 所示。基于其关键参数,在 Ansys Electromagnetics Suite 软件中构建了发电机的高保真三维有限元电磁流道模型,如图 7(a)所示。为模拟发电机实际运行功率,研究中通过调节定子绕组耦合电路中的等效电阻实现变功率工况。进一步的,针对该外转子式同步发电机在变功率条件下的绝缘受载特性,采用 Ansys Workbench 软件平台进行多物理场耦合分析,具体利用其瞬态热分析模块评估绕组绝缘的温升分布,并借助瞬态结构分析模块计算相应的振动,分析流程如图 7(b)所示。

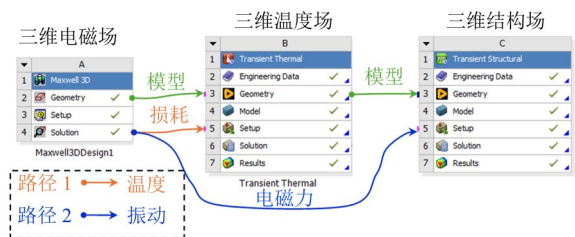
表 1 250 kW 外转子永磁同步风力发电机核心额定电磁参数与结构几何参数

Tab. 1 Key rated electromagnetic parameters and structural geometric parameters of 250 kW outer rotor permanent magnet synchronous wind generator

参数	值	参数	值
额定容量/kW	250	定子长度/mm	400
额定电压/V	250	定子外径/mm	868
功率因数	0.8	转子外径/mm	1 032
极对数	12	定子槽数	54
额定转速/(r/min)	250	转子内径/mm	880



(a) 三维模型



(b) 分析流程

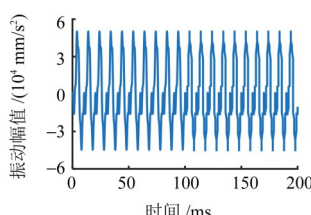
图 7 有限元仿真模型

Fig. 7 Finite element simulation model

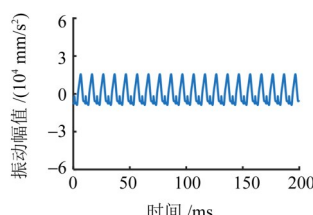
1.2.2 结果分析

为了分析不同功率工况下的绝缘机械载荷变化情况,在绕组中选择了绝缘变形幅值最大处^[20]的鼻端对绝缘振动进行分析。不同工况下的端部绕组径向振动的时域、频域曲线如图 8 所示。

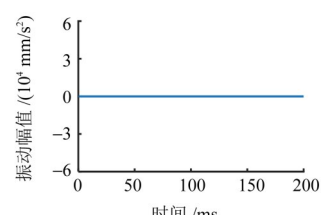
由图 8(a)可知,发电机端部绕组振动在满载工况下振动幅值最大,空载时幅值则显著衰减接近 0(残余振动源于仿真误差)。该现象与电磁理论一致,空载电流为零,导致电磁激励消除。由图 8(b)可知,仅存在偶数次谐波分量,这与前文分析结果相同,发电机工作频率为 50 Hz,振动频率和电磁力频率相同,均为偶次谐波。电磁振动主要受低阶电磁力影响,因此二倍频(100 Hz)振动幅值在除空载外的各工况下均占主导。振动幅值随功率增加呈增长趋势。



(a) 满载时域



(b) 半载时域



(c) 空载时域

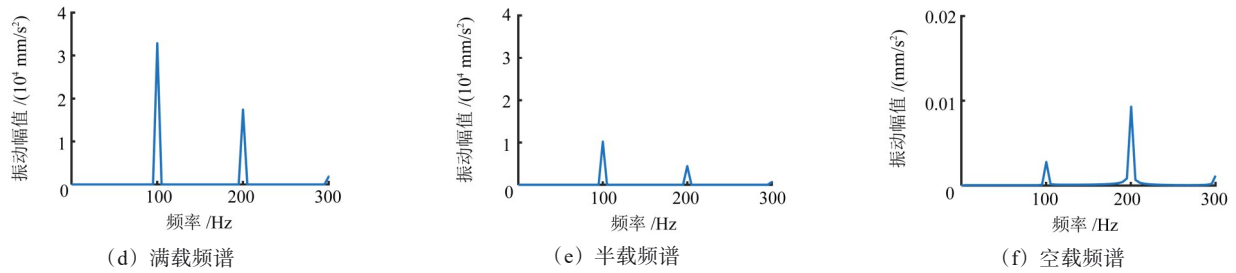


图 8 3 种典型功率工况下定子端部绕组最大变形处(鼻端)径向振动时域与频域响应曲线对照图

Fig. 8 Comparison diagram of time-domain and frequency-domain radial vibration response curves at the maximum deformation position (nose end) of stator end windings under three typical power operating conditions

不同工况下的定子铁芯-绕组系统温度分布如图 9 所示。由图 9 可知,不同工况下系统温度均呈周期性周向对称分布,最低温度位于铁芯内表面,最高温度则出现在定子齿部及绝缘中段。单根绕组绝缘的上、下层直线段存在温差,下层温度高于上层。温度分布

结果表明了绕组绝缘承受温升的非均匀性。将 3 种工况下的温度进行比较可知,满载工况温度最高,空载工况最低;随功率增加,定子系统最高温度显著上升。此现象源于功率变化直接导致的绕组电流变化及其相应的铜耗增加,与前文损耗分析结果一致。

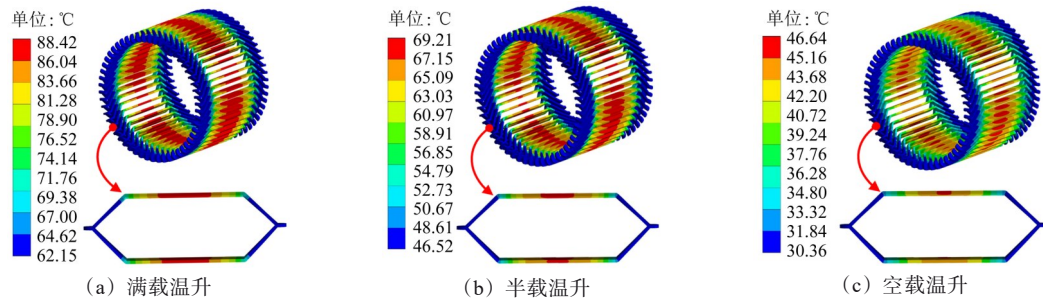


图 9 定子铁芯-绕组系统稳态温度分布

Fig. 9 Distribution of the stator core-winding system steady-state temperature

2 绝缘性能分析

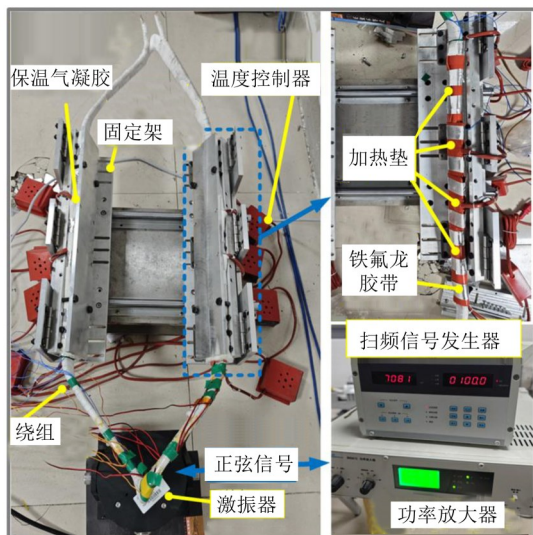
2.1 试验设置与性能测试

为研究定子绕组绝缘在运行工况下的老化特性与性能演变,搭建了温升-振动多物理场耦合的绝缘加速老化试验平台[图 10(a)]。采用模块化设计,核心为振动加载和温升加载模块。

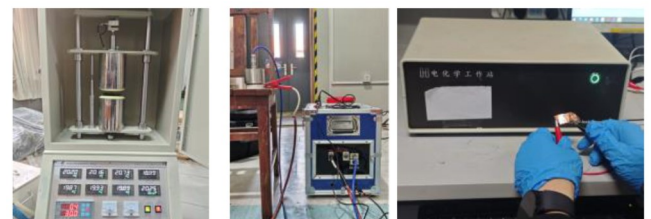


(b) 电子显微镜

(c) 万能试验机



(a) 试验平台



(d) 导热系数测试仪

(e) 介电测试仪

(f) 电化学工作站

图 10 绝缘老化试验装置及测试

Fig. 10 Insulation aging test equipment and testing

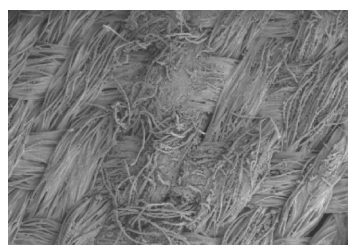
1) 振动加载。采用大功率电磁激振系统对绕组端部实施动态激励加载。基于前文仿真数据,绕组端部振动载荷主要表现为 100 Hz 正弦振动特性。根据满载与半载工况下的 100 Hz 振动分析结果,分别对绕组端部输入等效幅值为 30 N 和 9.4 N 的高精度正弦波

激励,作为对应工况下的机械老化激励载荷。由于空载工况下振动载荷可忽略不计,故不施加激励。

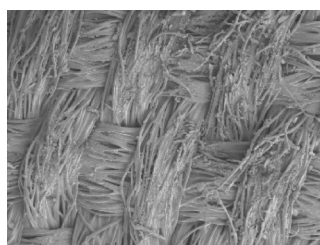
2)温升加载。采用梯度加热方案。绕组 2 个直线段各分 4 区,共设 8 个独立控温单元(硅胶加热垫)。基于仿真温度场数据,将仿真温度数据按照试验方案分为 8 段,每段求出平均温度,将各温度均增加 80°C 作为各段老化温度。精确复现绕组轴向非均匀温度场,表征实际运行的温度梯度效应,对绝缘绕组进行加速热老化。

加速老化时间为 180 d。由文献[20]¹³可知,绕组直线段和端部的连接处为绝缘关键薄弱区域,由于篇幅有限,本文只对连接处进行测试。对发电机定子绕组绝缘试样开展机械性能、热性能及电气性能测试。

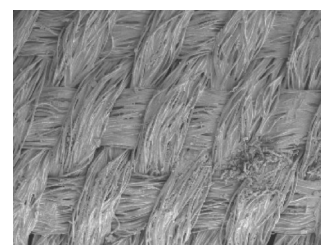
1)机械性能:利用 JSM-IT500 扫描电子显微镜[图



(a) 满载电镜图



(b) 半载电镜图



(c) 空载电镜图

图 11 不同工况下绝缘损伤 SEM 图像

Fig. 11 SEM images of insulation damage under different working conditions

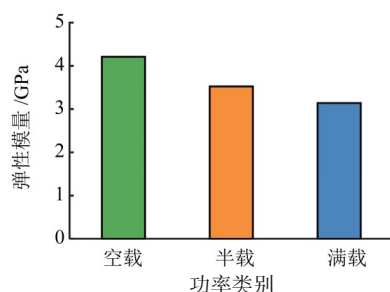


图 12 弹性模量测试结果

Fig. 12 Elastic modulus test results

由图 11 可知,经历机械-热联合加速老化后,各功率工况下绕组绝缘均出现损伤。空载工况下仅见纤维局部轻微断裂,随功率的增加,断裂形貌显著加剧并扩展。这是由于高温导致环氧树脂分子链断裂。多物理场数值计算结果表明,随着发电机工作功率的提升,电枢端部受到的交变电磁力幅值显著升高,导致绕组交变往复振幅变大,使绕组结构产生更大的变形,破坏绝缘材料间的黏合界面,使得裂缝扩展。空载时振动激励可忽略,仅受高温对绕组机械性能的影响。由图 12 可知,弹性模量随功率增加呈单调下降趋势,进一步佐证了不同功率工况下绝缘损伤累积加剧及材料刚度退化。

2.2.2 导热性能

导热系数作为绝缘云母带热性能的核心参数,直接表征材料在热载荷下的能量传递效率。图 13 为 3 种

10(b)]观察微观结构,通过 MTS 微机控制电子万能试验机[图 10(c)]测定弹性模量。

2)热性能:利用 DRL-Ⅲ 导热系数测试仪[图 10(d)]测定导热系数。

3)电气性能:使用新能源电力系统国家重点实验室介电常数测量仪[图 10(e)]测定相对介电常数,并借助电化学工作站[图 10(f)]测量体积电阻率。

2.2 结果分析

2.2.1 机械性能

扫描电镜(Scanning Electron Microscope, SEM)和弹性模量作为绝缘云母带机械性能的核心参数,可直接反映材料在热-机械应力耦合作用下的微观变化与刚度。图 11 为 3 种工况下样品扫描电镜图,图 12 为 3 种工况下绝缘弹性模量柱状图。

不同工况下,导热系数随着测试温度变化的折线图。

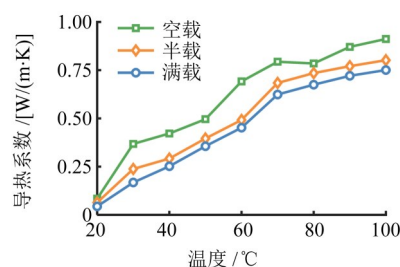


图 13 导热系数测试结果

Fig. 13 Thermal conductivity test results

由图 13 可知,绝缘材料导热系数随测试温度的增加而单调升高。这是由于热传导的主要载体(声子、辐射、气体分子)的活动都随着测试温度的升高而增强,导致导热系数升高。且随着功率的增加,导致绕组受载温度升高,发电机绕组绝缘极性基团增加,导致分子链的排列杂乱,增加声子散射的机率。同时激振力的振动幅值随着功率的增加而升高会导致分子链发生断裂更严重。这种微观结构的破坏会增加热量传导的阻力。在同一测试温度下,空载运行后绝缘导热系数最大,满载运行后导热系数最小,随功率增加呈单调递减趋势。

2.2.3 电气性能

介电常数取决于试样在外电场下的偶极矩大小,决定了试样对于外电场的响应能力,图 14(a)为 3 种工

况下相对介电常数随着测试频率的曲线图。体积电阻率是衡量绕组绝缘材料阻止电流泄漏能力的关键指标,图14(b)为3种工况下体积电阻率的柱状图。

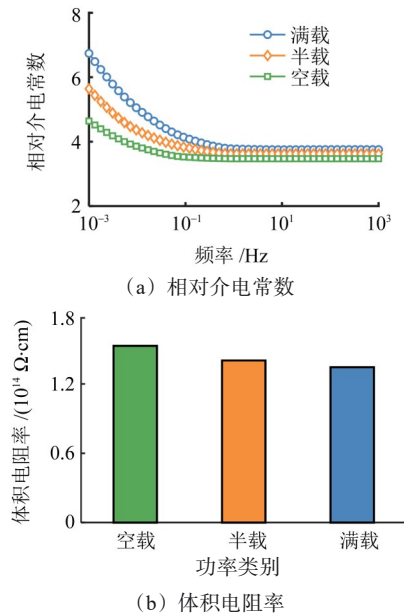


图14 电气性能测试结果

Fig. 14 Electrical performance test results

由图14(a)可知,绝缘材料相对介电常数随频率升高极化响应滞后效应衰减并渐趋稳定。同频条件下,空载运行下的相对介电常数最小,满载时的相对介电常数最大。随功率增加呈单调递增趋势,这是由于在高温下,绝缘内部发生侧链氧化过程,分解产生大量的极性基团,会使得绝缘材料内部偶极子数量变多,进而使转向极化增大,同时在激振力作用下,分子链间作用力超过极限就会导致断裂,产生更多的游离基,大量的游离基团使得材料内部出现更多偶极子,并且加速了偶极子的转向极化。这种程度会随着功率的增加而增加。进而导致相对介电常数随着功率的增加呈现单调递增趋势。同时,这些游离基也会导致绝缘电导率增加,随着功率增加,会产生更多游离基。如图14(b)所示,体积电阻率随功率增加显著下降。

3 结论

综合运用理论分析、有限元仿真及绕组绝缘加速老化试验,系统探究了不同工况下发电机定子绕组的振动与温升响应特性,并评估了变功率工况对绕组绝缘性能的影响。揭示了功率变化驱动绝缘老化的内在机制,为绕组绝缘优化提供了有效依据。主要结论如下:

- 1) 发电机绕组温升及振动幅值随负载增加而显著增大。在空载工况下,绕组振动可忽略不计。
- 2) 绕组绝缘温升呈非均匀分布特征,表现为中间高、两端低,且下层绕组温度普遍高于上层。端部绕组振动频谱以偶数次谐波分量为主导。
- 3) 负载工况显著影响绝缘老化行为。随负载增

加,绕组绝缘微观结构发生损伤,表现为弹性模量、导热系数及体积电阻率下降,而相对介电常数上升。

参考文献(References)

- [1] 康重庆,杜尔顺,郭鸿业,等. 新型电力系统的六要素分析[J]. 电网技术,2023,47(5):1741-1750.
KANG Chongqing, DU Ershun, GUO Hongye, et al. Primary exploration of six essential factors in new power system[J]. Power System Technology, 2023, 47(5): 1741-1750. (In Chinese)
- [2] 高俊国,孟睿潇,胡海涛,等. 电机定子绝缘老化寿命预测研究进展[J]. 电工技术学报,2020,35(14):3065-3074.
GAO Junguo, MENG Ruixiao, HU Haitao, et al. Research progress on prediction of aging life of motor stator insulation [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35 (14) : 3065-3074. (In Chinese)
- [3] PARK C H, ORVIZ ZAPICO M, SALCEDO BOLANOS A, et al. Inverter-embedded DFIG rotor winding insulation testing for wind energy applications[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2024, 60(6):9195-9205.
- [4] LETAL J, SATMOKO B, MANIK N, et al. Stator end-winding vibration in two-pole machines: avoiding generator failure [J]. IEEE Industry Applications Magazine, 2020, 26(6):29-39.
- [5] TANG G J, JIANG H C, HE Y L, et al. Electromagnetic forces and mechanical responses of stator windings before and after rotor interturn short circuit in synchronous generators[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2020, 2020:5892312.
- [6] XU M X, HE Y L, ZHANG W, et al. Impact of radial air-gap eccentricity on stator end winding vibration characteristics in DFIG [J]. Energies, 2022, 15(17):6426.
- [7] HAN J C, DONG J C, WANG Y, et al. Coupled electromagnetic-fluid-thermal analysis for end zone with electric screen in large water-hydrogen-hydrogen cooled turbine generator under different end winding extensions[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2021, 36(4):2703-2713.
- [8] 王尔东. 干式变压器的应力分析及绕组故障研究[D]. 济南:山东大学,2021:7-34
WANG Erdong. Stress analysis and research on winding faults of dry-type transformer[D]. Jinan:Shandong University, 2021: 7-34. (In Chinese)
- [9] 冯钜. 发电机定子线棒主绝缘机械冲击损伤失效诊断研究[D]. 成都:西华大学,2022:11-49.
FENG Ju. Research on failure diagnosis of mechanical impact damage of generator stator bar main insulation [D]. Chengdu: Xihua University, 2022: 11-49. (In Chinese)
- [10] 李育林,刘向东,韩佳轩,等. 基于电学性能的发电机线棒主绝缘热老化特性研究[J]. 绝缘材料,2023,56(8):45-50.
LI Yulin, LIU Xiangdong, HAN Jiaxuan, et al. Thermal ageing characteristics of main insulation for generator bar based on electrical properties[J]. Insulating Materials, 2023, 56(8): 45-50. (In Chinese)
- [11] 杨敏,王新,童小忠,等. 热老化对发电机定子线棒用环氧-云母绝缘频域介电特性的影响[J]. 高压电器,2021,57(1):94-99.
YANG Min, WANG Xin, TONG Xiaozhong, et al. Effect of thermal aging on frequency domain dielectric properties of epoxy-mica insulation for generator stator bars [J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(1):94-99. (In Chinese)

- [12] 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.
- [13] 陈庆国, 赵寒, 付强. 电老化对大型电机定子线棒主绝缘频域介电谱特性的影响[J]. 高电压技术, 2022, 48(11): 4255-4263. CHEN Qingguo, ZHAO Han, FU Qiang. Effect of electric aging on frequency domain dielectric properties of main insulation of generator stator [J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(11): 4255-4263. (In Chinese)
- [14] ZHANG H J, ZHANG B W, WANG J S, et al. Propagation characteristics of end-winding insulation fatigue damage in variable frequency motor under multi-field coupling[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2025, 61(1): 8200104.
- [15] 薛敬业, 陈志辉. 基于分步迭代法的无刷同步发电机电枢绕组瞬态温度分析[J]. 电气工程学报, 2026, 21(1): 170-178. XUE Jingye, CHEN Zhihui. Transient temperature analysis of brushless synchronous generator armature winding based on step-by-step iterative method [J]. Journal of Electrical Engineering, 2026, 21(1): 170-178. (In Chinese)
- [16] 吴胜男, 李文杰, 安忠良, 等. 变速恒压混合励磁风力发电机的热分析[J]. 电工技术学报, 2019, 34(9): 1857-1864. WU Shengnan, LI Wenjie, AN Zhongliang, et al. Thermal analysis of variable-speed constant-voltage hybrid excited wind generators [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(9): 1857-1864. (In Chinese)
- [17] ALBANESE R, CALVANO F, DAL MUT G, et al. Coupled three dimensional numerical calculation of forces and stresses on the end windings of large turbo generators via integral formulation [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2012, 48(2): 875-878.
- [18] 徐明星, 何玉灵, 张文, 等. 考虑气隙偏心时短路因素对发电机端部绕组振动的影响[J]. 振动与冲击, 2024, 43(14): 112-121. XU Mingxing, HE Yuling, ZHANG Wen, et al. Impact of short circuit factors on end winding vibrations in generators considering air-gap eccentricity [J]. Journal of Vibration and Shock, 2024, 43(14): 112-121. (In Chinese)
- [19] 黄杨森, 刘云平, 王勇, 等. 汽轮发电机组转子振动预警方法研究[J]. 机械强度, 2023, 45(3): 541-547. HUANG Yangsen, LIU Yunping, WANG Yong, et al. Research on early warning method of rotor vibration of turbogenerator unit [J]. Journal of Mechanical Strength, 2023, 45(3): 541-547. (In Chinese)
- [20] SUN K, HE Y L, CHEN H C, et al. Comprehensive investigation of thermal and mechanical loads on stator winding insulation in nonsalient synchronous generator under RISC fault [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2025, 74: 1502017: 13-15.

Load and performance analysis of generator winding insulation under variable power conditions

HE Yuling¹ YANG Jiawen¹ WU Xuwei¹ SUN Kai¹ AN Jiajun¹ ZHU Xiaoguang¹ WANG Xiaodan²

(1. Department of Mechanical Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

(2. Guoneng United Power Technology (Baoding) Co., Ltd., Baoding 071003, China)

Abstract: [Objective] Winding insulation of wind generators suffers severe electro-thermal-mechanical degradation under fluctuating power profiles, endangering system reliability. This study systematically investigates the non-uniform load distributions and multi-property insulation evolution under variable operations. [Methods] Firstly, taking a 250 kW permanent magnet synchronous wind generator as the prototype, the electromechanical transient and three-dimensional heat transfer mathematical models were established. Secondly, high-fidelity electromagnetic-thermal-structural coupled finite element workflows were constructed via Ansys software platform to extract the spatiotemporal temperature matrices and vibration spectrums under full-power, half-power, and no-power conditions. Finally, guided by numerical boundaries, an test aging rig applying a 100 Hz sinusoidal mechanical preload (30 N for full-power, 9.4 N for half-power) paired with prioritized gradient thermal units was customized to execute an accelerated electro-mechanical coupling aging process lasting 180 d. Microstructural, thermal, and dielectric characterizations were implemented to quantify the property degradation. [Results] Numerical diagnostics indicate that structural temperature fields display a highly non-uniform pattern (parabolic axially and hotter at lower layers), with the peak equivalent temperature climbing steeply at full power due to intensified copper thermal dissipation. The end-winding vibration profiles are strictly governed by even-order harmonics dominated by the 2-fold frequency component (100 Hz), where the peak amplitude scales up proportionally with output power. Empirical data verify that the accelerated aging breaks epoxy macromolecular chains; as the modeled power increases, microstructural fracturing accelerates, triggering monotonic reductions in the elastic modulus, thermal conductivity, and volume resistivity, whereas the multiplication of polar free radicals promotes the orientation polarization, thereby inducing a steady inflation in the relative dielectric constant.

Key words: Generator; Insulation performance; Electromagnetic vibration; Temperature rise; Damage

Corresponding author: WU Xuwei, E-mail: 120242102038@ncepu.edu.cn

Fund: National Natural Science Foundation of China (52177042); Natural Science Foundation of Hebei Province (E2022502003, E2021502038); The Third Batch of Youth Top Talent Support Plan Program of Hebei Province ([2018]-27)

Received: 2025-06-28

(编辑: 李立)