[绝缘结构]

应用于非线性负载的高性能绝缘结构优化设计与分析

文/徐文洁
上海马拉松·革新电气有限公司

变频驱动中的非线性负载在线路上产生高次谐波，造成发电机的电压出现非正弦波形畸变，形成很高的尖峰电压，造成绝缘击穿。同时造成发电机本身的附加损耗增加，温升升高，进一步加速绝缘老化。因此提高690 V发电机的绝缘强度具有非常重要的意义。通过优化电磁设计降低匝间电压，通过对不同结构的绝缘样本测试分析，选取最优绝缘方案，用于实际生产中取得了良好效果。

目前在电力推进、电力拖动及石油钻井平台等领域广泛采用变频驱动，改善异步电动机平滑调速的性能，以达到节能节电的目的。但是变频驱动中的非线性负载在线路上产生高次谐波，并随着输电线路的延长而增大，造成柴油发电机组用发电机的电压出现非正弦波形畸变，虽然占比不高，但所形成的尖峰电压值很高。据测试，在690 V的电路系统中，尖峰电压值可达1.6～1.8 kV。在这样的电压下，匝间存在局部放电，造成绝缘击穿。同时高次谐波造成发电机本身的附加损耗增加，效率下降，温升升高，进一步加速绝缘老化。

在产品实际应用过程中发现了多起相应的案例。如在高频加热炉生产现场，使用1 000 kW/690 V同步发电机为窑炉供电，给发电机施加200 kW厂内实际负载时，工厂内仪表显示U_a相电压升高，触发过电压报警，U_b、U_c显示正常。为了筛查故障原因，改为电网供电，用 CA8230 型波形分析仪分别检测电网进线侧和窑炉变频器前端电参数。电网侧电流波形畸变率为7.3%，电压波形畸变率为0.7%，电压稳定，由于电流仅钳取1/3，所以实际电流应为210 A以上。窑炉变频器前端波形如图1所示，其中电流波形畸变率达47%，主要为5次谐波，其他各高次谐波含量也很大，受电流影响，前端电压波形畸变达4.8%。从检测数据可以看出，负载端非常大的电流畸变影响到供电端的线电压波形畸变，当电源由电网切换成发电机组时，这种影响更大。再如某船用项目中使用的150 kW/690 V船用发电机，在施加变频器负载后，发电机呈现电压上升趋势，与发电机并车所需求的下垂特性不符。对带有变频器负载的发电机电流、电压进行波形畸变率测定，发现主线系统内负载电流有较大程度的波形失真，如图2所示。电流波形畸变率为32.8%，电压波形畸变率虽仅为2.9%，但由于存在较大的电流失真，导致电流采样信号畸变，为典型的非线性负载特性。在这两个案例中，最终均通过在设备电源端加装适当容量的隔离变压器改善检测电压的畸变率，但由于非线

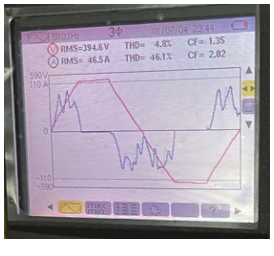

图1　窑炉变频器负载参数

图2　船用发电机变频负载参数

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

性负载导致的谐波分量始终存在于主线路内，从而对发电机的绝缘系统造成不可逆的损伤。因此优化现有的绝缘结构，提高690 V发电机的绝缘强度具有非常重要的意义。

690 V发电机绝缘结构优化方向

由于同步发电机的转子绕组所承受的是较低的直流电压，高次谐波对于直流电压的影响非常小，因此对于690 V发电机的绝缘优化聚焦在定子绝缘系统的优化上。

1. 采用成型绕组绝缘结构

采用云母绕包和薄膜绕包相结合的成型绕组，具有较好的工频耐压和高频电老化性能，线圈端部具有更好的机械强度，可承受更强的冲击负载，通过VPI浸渍处理后，绝缘具有较好的耐重复高频电脉冲冲击性能和耐电晕能力，并经过热高频电脉冲寿命试验，具备充分的数据支持。成型绕组结构由于工艺复杂，线圈端部尺寸远大于散嵌绕组，制造成本远高于散嵌绕组结构，除了在沙尘、高湿度及高盐度等恶劣环境中应用外，在各类变频驱动应用场合的常规低压发电机中使用性价比较低。

2. 通过电磁设计优化散嵌绕组的匝间绝缘

在400 V/380 V同步发电机中常规使用的散嵌绕组结构具有结构紧凑、工艺成熟及制造成本低的优势。散嵌绕组的槽形有较大的形状自由度，可按照最有利于电磁性能的方式设计，寻求性能与经济性的平衡点。

690 V定子线圈设计时应充分考虑成熟的400 V电动机匝间绝缘的设计经验，通过电磁设计维持匝间电压与400 V电动机相近。

圈式线圈每匝电压峰值计算以美国WH公司匝间电压峰值计算方法为准，计算公式为

$$PVT=0.816p.u.en/TPC \tag{1}$$

式中，PVT为线圈每匝冲击电压峰值（V）；pu为每单位值，对于标准型线圈匝间绝缘为2；e为标准线圈为1；n为电动机额定电压（V）；TPC为线圈匝数。

PVT与线圈匝数成反比，通过优化定子电磁设计，增加每相串联线圈匝数$Z_{\phi 1}$，降低匝间电压峰值，从而降低绝缘结构损伤。每相串联线圈匝数的计算公式为

$$Z_{\phi 1}=\frac{Q_1 Z_1}{ma_1} \tag{2}$$

式中，Q_1为定子槽数；Z_1为每槽导体数；m为相数；a_1为绕组并联支路数。

从式（2）可以看出，增加匝数与定子槽数Q_1和每槽导体数Z_1直接相关。以1 200 kW、50 Hz三相同步发电机设计为例，通过维持相似的匝间电压，计算得出690 V时的电磁数据见表1。

表1　400 V与690 V同功率发电机电磁数据对比

额定电压/V	Q_1	Z_1	a_1	PVT/V
400	54	2	2	36.27
690	60	6	4	37.54

由于散嵌绕组通常采用梨形槽设计，槽口较小，在嵌线过程中可能造成漆包圆线表面漆膜损伤。从气隙磁压降$F_\delta=\frac{B_\delta K_\delta \delta}{\mu_0}$，$k_\delta=\frac{t(4.4\delta+0.75b_0)}{t(4.4\delta+0.75b_0)-b_0^2}$可以看出，槽口宽度$b_0$影响气隙磁压降，过大的槽口宽度会增加气隙磁阻，降低发电机功率。在上述定子设计参数的基础上，通过电磁仿真设计确定最合适的槽口尺寸为7.2 mm。不同槽口宽度对发电机性能的影响如图3所示。

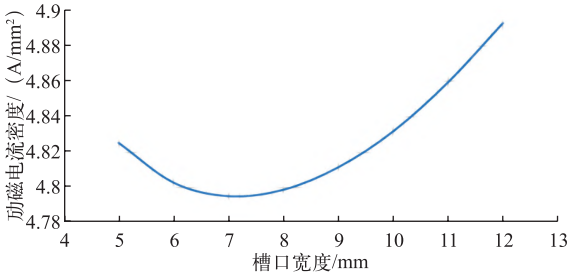

图3　不同槽口宽度对发电机性能的影响

3. 选用耐电晕漆包线和绝缘纸

虽然从设计上维持了匝间电压一致，但考虑到受负载高次谐波的影响，定子线圈内存在电压高次谐波分量，仍需选用适用于变频负载的复合型电磁线。随着现代科技的发展，纳米分子材料在绝缘领域的应用日趋成熟，将纳米粒子填充到漆中制成耐电晕漆包线，耐电晕性能提高5～100倍。设计选用的某品牌Q（ZY/XY）-2/200聚酰胺酰亚胺复合聚酯亚胺漆包铜圆线具备良好的耐电晕性能，热态击穿电压最低为9 300 V。

所选用的D公司的NMN绝缘纸无论在工频或冲击下均具有较高的耐压强度，短时击穿场强0.18 mm

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

时耐压强度大于10 kV/mm，0.25 mm时大于17 kV/mm。NMN纸的介电强度ε值较低，更接近于空气，避免了电场的过分集中，使整个绝缘结构体系更加合理，降低了局部放电量，具有很高的抗张强度与抗撕裂强度，可以防止制造过程中出现问题，提高了长期运行中的可靠性。

4. 调整对地及相间绝缘尺寸

对于槽内绝缘及端部相间绝缘，材料的宽度和长度非常关键，宽度部分与铁心槽口的绝缘盖条（槽楔）共同包络槽内的电磁线，保证绕组与铁心、双层绕组层间通过绝缘纸隔离；绝缘纸必须伸出铁心槽口，保证绕组与地，以及与异相绕组的电气间隙和爬电距离符合要求。根据起晕电压U_k和绝缘单面厚度d_i的关系$U_k=3.4\left(\frac{d_i}{\varepsilon_{ri}}\right)^{0.45}$可以看出，通过增加每根导体的绝缘厚度、绝缘纸厚度及绝缘纸伸出铁心槽口的长度来增加相出线端线圈相邻匝间和它与各线圈及各相之间的距离以提高起晕电压。

5. 首尾匝和槽口绝缘加强

部分论述中表明，在工频情况下一个线圈中的每个相邻线匝间的电压是相等的，然而当一个很高频率的电压施加到定子绕组上时，电压分布是非线性的，与相出线端连接的第一个线圈各匝上将承受较多的电压，达到所施加电压的40%，冲击电压上升越快，第一匝绝缘上承受的电压越高。试验表明，定子槽口的绝缘强度远低于槽内和端部，大约仅有1/2。在线圈首尾匝端部半叠包绝缘带至槽口内10 mm，可有效补强绝缘，同时在采用真空浸漆工艺时，能够显著减少在导体股线间的气隙大小和数量。

6. 改变散嵌绕组线圈尺寸

设计上线圈尺寸的大小与定子铁心尺寸直接相关，不影响绝缘性能，线圈端部不参与电枢反应，过大的端部尺寸降低了材料利用率。但是实际嵌线过程中，线圈伸出槽口的直线长度（d）决定了散嵌绕组的柔性，特别在手工嵌线的过程中，由于线圈柔性不足容易造成导体漆膜以及槽口绝缘纸破损，导致匝间或对地击穿。在电机设计手册中，推荐的d值为10～30 mm，通过实际生产经验确定合适长度。

7. 采用真空浸漆（VPI）工艺

散嵌绕组的定子通常按工艺规定的时间浸泡环氧漆后，经过滴漆，送入烘箱烘烤，即沉浸工艺将各匝电磁线黏合在一起进行最终的绝缘处理。目前最好的浸漆工艺是采用环氧树脂浸渍的整体真空浸漆（VPI）工艺，使经过浸漆的绕组被环氧树脂密封，更好地减少槽内气隙（气泡）的数量，抑制局部放电。为应对高次谐波的影响，690 V绝缘系统采用1次VPI烘焙后再次沉浸的工艺处理方案。

绝缘系统样本准备

由于导体的漆膜厚度对槽满率影响不大，同时从发电机设计、制造和环保方面考虑，在样本选取中统一选用适用于变频负载的复合型电磁线及同样牌号的绝缘材料。通过对比增加绝缘纸厚度、定子线圈伸出槽口的直线长度、绝缘纸伸出槽口的长度的击穿电压，以及对比不同的线圈端部绝缘方式及浸漆方式验证不同绝缘系统组成部分的变动对绝缘强度的影响大小。

为了模拟定子实际绝缘情况，将多种不同绝缘结构的定子绕组及铁心组成多个样本，采用不同的浸漆烘焙工艺，与我司已成熟使用多年的400 V标准绝缘结构进行对比测试，其中400 V标准绝缘结构的具体数据见表2。

表2　400 V标准绝缘结构

槽绝缘厚度/mm	槽绝缘伸出槽口长度/mm	线圈伸出槽口的直线长度/mm	端部包扎	浸漆方式
0.25+0.18，两层绝缘纸	8	23	无	两次沉浸

所有样本槽内为单层绕组。为了保证绝缘机械强度，槽楔需要完全覆盖槽绝缘纸，长度与槽绝缘纸长度一致。不同绝缘结构样本如图4所示。

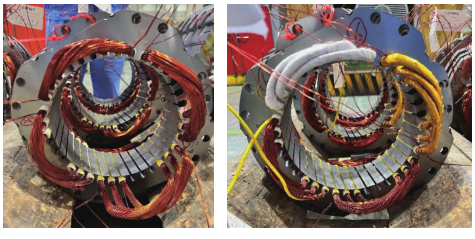

图4　不同绝缘结构样本

绝缘性能测试

1. 测试方法

击穿试验是一种绝缘加速寿命试验，击穿电压

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

的高低在一定程度上反映了绝缘系统的强度，逻辑电路如图5所示。

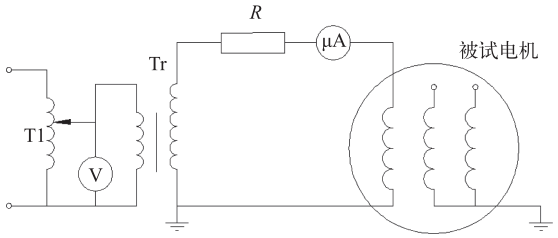

图5　击穿试验逻辑电路

T1—调压器　Tr—高压变压器　*R*—保护电阻　V—电压表　μA—微安表

测试时被试样本加热至150 ℃模拟发电机运行过程中高温对绝缘的影响，以稳定速度升压直至被试样本出现闪络（击穿）为止。

2. 绝缘样本测试结果

如图6所示，通过不同绝缘方式样本之间击穿电压数值的对比可以看出，几种改善方式都能在一定程度上提高了绝缘强度，其中增加线圈伸出槽口的直线长度对绝缘强度的改善仅提升了11%左右，增加绝缘纸伸出槽口长度和增加绝缘纸厚度对绝缘强度都有非常显著的提升。对比不同沉浸工艺下的击穿电压可知，沉浸工艺对于槽内绝缘系统影响没有显著区别。

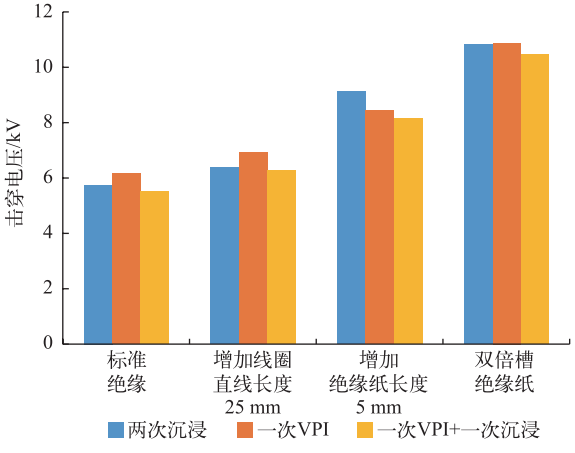

图6　不同绝缘结构的绝缘强度

由于加厚绝缘纸会大幅降低槽内利用率并提高绕组温升，因此对于槽内绝缘的优化方向更应关注绝缘纸的长度尺寸对于绝缘强度的影响。如图7所示，通过对比绝缘纸伸出槽口不同长度的击穿电压可以看出，绝缘纸越长，绝缘强度越大。

通过端部绕包绝缘材料加强端部及槽口的绝缘强度。如图8所示，对不同端部绝缘材料的试验数据进行分析可以看出，在两次沉浸工艺中，不同材料对绝缘强度的加强幅度呈阶梯上升，云母带的绝缘效果最好，玻璃胶无纬带次之；使用VPI沉浸工艺时，云母带的绝缘效果出现了显著提升，体现了真空环境下膜基云母带良好的渗透性，这一优势使其广泛应用于中高压发电机的绝缘应用中。

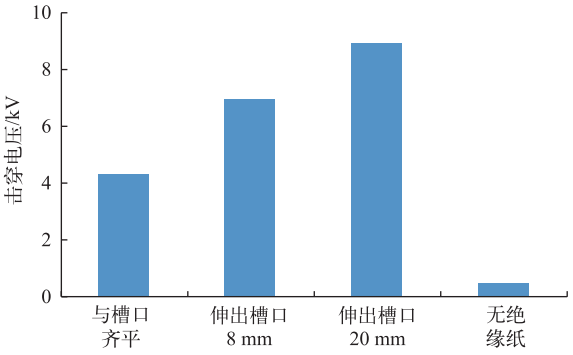

图7　不同绝缘纸伸出槽口长度的绝缘强度

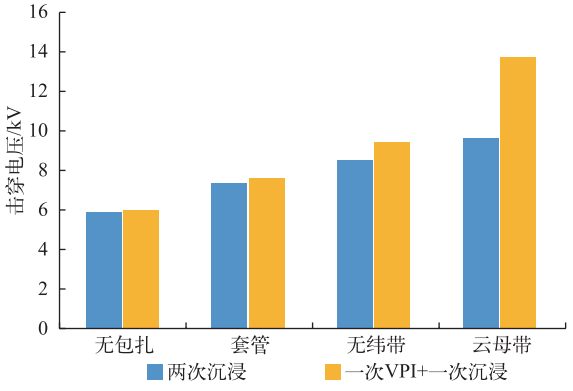

图8　不同端部包扎材料的绝缘强度

绝缘优化方案的应用

综合上述绝缘对比数据分析和制造成本因素，选择增加槽绝缘纸的长度至槽口外20 mm，端部半叠包云母带至槽口内10 mm，采用VPI+沉浸工艺作为优化后的定子绝缘系统。为了进一步确定优化后的绝缘系统对于发电机性能，特别是温升性能的影响，对比绝缘系统优化前后的1 200 kW、690 V、50 Hz发电机的直流绝缘电阻，2 U_n+1 000 V下的泄漏电流以及额定功率下的定子温升数据，见表3。从表3可以看出，优化后的发电机绝缘性能显著提升，温升略有提高。与同功率成型绕组相比绝缘强度较低。优化的绝缘系统实际应用的热成像仪图像

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

如图9所示。

表3　绝缘系统实际应用对比

	铁心长/mm	绝缘电阻/MΩ	泄漏电流/mA	定子最高温度/℃
散嵌绕组标准绝缘系统	572	610	1.84	105.4
散嵌绕组优化绝缘系统	572	930	1.60	109.2
成型绕组绝缘	630	1 000	1.21	104.7

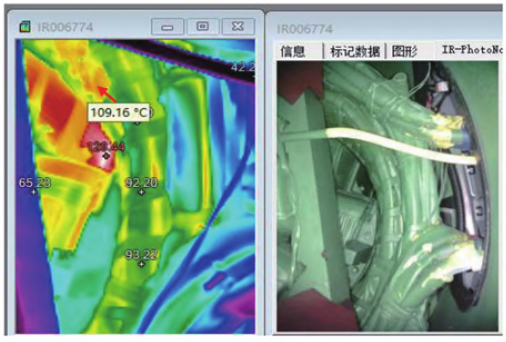

图9　优化的绝缘系统实际应用的热成像仪图像

结束语

在690 V发电机定子散嵌绕组的绝缘系统中，加长绝缘纸伸出槽口长度和端部包扎可有效提高绝缘强度且不影响发电机的温升性能，沉浸工艺和VPI工艺均适用，但在实际应用中应考虑制造成本和应用环境的恶劣程度。成型绕组结构能有效提升绝缘强度，但从设计经验来看，由于绝缘厚度对槽内利用率的影响，同功率发电机成型绕组的铁心长度要大于散嵌绕组，在船用中推荐使用。

新的690 V发电机散嵌绕组绝缘系统继承了原低压发电机绝缘系统的优势，具有端部紧凑、工艺成熟及性价比高的特点。同时对匝间绝缘及相间绝缘进行了有效加强，提高了绝缘系统的可靠性，为690 V发电机稳定高效运行提供保障。适用于各类非线性负载的应用场合，具有广阔的市场前景。**EA**

（收稿日期：2023-06-01）

参考文献

[1] 于文霞，吴刚．高压电机定子线圈匝间绝缘结构[J]．防爆电机，2007(5)，45-47．

[2] 陈世坤．电机设计[M]．2版．北京：机械工业出版社，2000．

[3] 姜其斌，陈红生，衷敬和，等．变频电机用耐电晕绝缘材料的应用研究进展[J]．绝缘材料，2007，40(6)：20-23．

[4] 孙雅玲，刘洋．冲击电压对高压交流电机定子绕组匝间绝缘的影响[J]．防爆电机，2005(1)：35-37．

[5] 吴鹏，刘丽兵，陈志勇，等．发电机定子线棒绝缘老化后不同部位参数比较[J]．高电压技术，2004．5(5)：23-24．

[6] Greg C Stone，Ian Culbert，Edward A Boulter，et al．旋转电机的绝缘——设计、评估、老化、试验、修理[M]．北京：机械工业出版社，2016．

[7] 三相同步电机实验方法：GB/T 1029—2021[S]．北京：中国标准出版社，2021．

[8] YIN W J．Failure mechanism of winding insulations in inverter-fed motors[J]．IEEE Electrical Insulation Magazine，1997，13(6)：18-23．

[9] 杨世强，何信林，王团结，等．大型发电机转子绕组匝间短路故障诊断研究与应用[J]．电气应用，2021，40(9)：30-34，40．

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net