

[高压电动机]

# 高压电动机定子采用散绕组的绝缘结构分析

文/邵 帅  
中国石油集团电能有限公司热电二公司

随着现代工业对电动机性能要求的不断提高，高压电动机作为其中重要的组成部分面临着新的挑战。高压电动机定子绝缘结构的研究工作受到了广泛的关注。介绍了一种用于高压电动机定子绝缘结构的新结构、新技术，可为相关研究提供参考。

高压电动机定子采用散绕组结构，可以减小电动机的尺寸、重量和成本，具有较好的性价比，但因其绕组形式不同，绝缘结构也不同。随着时代的发展和科技的进步，人们对电动机的性能要求越来越高，高压电动机定子绝缘结构从原来的单层绕组向多层多绕组发展，结构变得更加复杂。

## 定子槽部绝缘分析

在定子线圈上施加电压，使绕组内的介质发生极化，在这个过程中，表面张力使表面之间互相吸引，内部之间互相排斥。在两个绕组表面之间的绝缘层中，由于表面张力的作用，电荷转移到绝缘层中并向表面扩散。这种现象称为“空间电荷”或“电晕”。空间电荷是由电场的变化产生的，不是由电场本身引起的。如果绝缘层被击穿，电晕现象将继续。对于高压电动机定子绕组来说，绝缘层是由许多层压板制成的，材料一般是单层或多层玻璃布或纤维板等绝缘材料。由于电压等级较高，各层压板之间以及每一层压板之间都存在着大量的空间电荷，它们分布在每一层压板上。因此，每层压板与层压板之间必须形成电场梯度，以减少空间电荷的积聚。而电动机绝缘结构中的电场求解可归纳为边值问题，即

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x}\left(\varepsilon \frac{\partial \varphi}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\varepsilon \frac{\partial \varphi}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\varepsilon \frac{\partial \varphi}{\partial z}\right) = 0, (x, y, z) \in \Omega \\ \varphi = V_0(x, y, z), (x, y, z) \in F_1 \\ \frac{\partial \varphi}{\partial n} = 0, (x, y, z) \in F_2 \\ \left(\varepsilon_1 \frac{\partial \varphi}{\partial n}\right)^- = \left(\varepsilon_2 \frac{\partial \varphi}{\partial n}\right)^-, (x, y, z) \in F_m \end{cases} \quad (1)$$

式中， $F_1$ 、 $F_2$ 、 $\varepsilon$ 和 $F_m$ 分别为定解场域、绕组区域、电动势法向导数为零的边界及介质的介电常数。某台采用定子散绕组的高压电动机的部分参数见表1。

表1 样机部分参数

| 参数名称                 | 参数值   |
|----------------------|-------|
| 额定功率 $P_N/\text{kW}$ | 500   |
| 额定电压 $U_N/\text{V}$  | 6 300 |
| 级数 $2p$              | 4     |
| 相数 $m$               | 3     |
| 定子槽数 $Q_1$           | 54    |
| 每槽导体数 $N_s$          | 16    |
| 绕组层数CZN              | 2     |
| 绝缘等级                 | F     |

该电动机定子槽内电位的分布沿轴线梯度小到可忽略不计，因此，相关绝缘问题可转化为二维静电场问题进行分析，式（1）边值问题最终简化为

$$\left\{\begin{array}{l} \frac{\partial}{\partial x}\left(\varepsilon \frac{\partial \varphi}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\varepsilon \frac{\partial \varphi}{\partial y}\right)=0,(x, y) \in \Omega \\ \varphi=V_0(x, y),(x, y) \in F_1 \\ \frac{\partial \varphi}{\partial n}=0,(x, y) \in F_2 \\ \left(\varepsilon_1 \frac{\partial \varphi}{\partial n}\right)^{-}=\left(\varepsilon_2 \frac{\partial \varphi}{\partial n}\right)^{-},(x, y) \in F_{in} \end{array}\right. \quad (2)$$

## 1. 匝间绝缘分析

高压电动机定子绕组绝缘主要为匝间绝缘，对定子的电磁性能、机械强度等有着重要的影响，是决定电动机性能的关键因素。匝间绝缘的材料为玻璃纤维或环氧树脂，根据其材料特性选择合适的填充材料和用量是提高匝间绝缘性能的有效方法。

对于电动机来说，每个极上都有一个或多个相的线圈，而各个绕组串并联组成各相的绕组。采用多层多绕组结构的高压电动机定子，线圈层数较多，每层线圈之间绝缘结构较为复杂，因此线圈层间绝缘是影响高压电动机定子性能的关键因素之一。采用多层绕组结构时，各层线圈之间绝缘强度相互影响，各层绕组之间绝缘强度也是相互影响。

不同型号高压电动机的定子绕组层数不同，一般多层绕组比单层绕组多一层线圈。层数不同时，各层绕组之间的绝缘强度也是相互影响的。在其他条件相同时，各层线圈之间绝缘强度越高，则各层绕组之间绝缘强度越高。因此需要对各层绕组进行适当组合配置以提高匝间绝缘强度。匝间绝缘计算模型如图1所示。

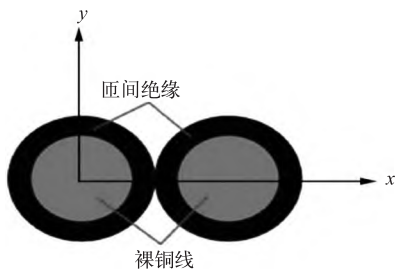


图1 匝间绝缘计算模型

## 2. 层间绝缘和主绝缘分析

高压电动机定子多层绕组绝缘主要由层间绝缘和主绝缘两部分组成。层间绝缘是指每一层的层间绝缘，其作用是防止相邻两层之间短路。由于各层间绝缘是互相独立的，因此，层间绝缘一般选用半

导电材料和高强度绝缘材料。常用的半导体材料有玻璃布、铜箔、云母带等；高强度绝缘材料有环氧树脂、聚酰亚胺树脂、陶瓷等。但由于采用层间绝缘，其厚度较薄，一般在1.5 mm以下，其耐电性能受到一定影响。

主绝缘主要是防止绕组匝间短路和相间短路。主绝缘一般由云母带油浸纸和半导体材料组成。云母带油浸纸的作用是提高主绝缘的耐电性能；半导体材料的作用是降低主绝缘的温升和热老化，提高主绝缘的耐电性能。云母带油浸纸和半导体材料都可以增加层间的电场强度，提高主绝缘的耐电晕性能。一般情况下，为了改善主绝缘和层间绝缘的电气性能，会选择较薄、较轻且耐电晕的半导体材料作为主绝缘。样机定子槽形及绝缘示意图如图2所示。

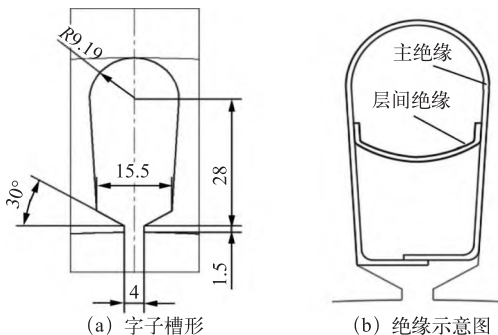


图2 样机定子槽形及绝缘示意图

## 3. 冲片毛刺划伤定子主绝缘分析

冲片毛刺划伤定子绝缘主要有两种情况：一种是定子绕组冲片毛刺划伤定子主绝缘；一种是电动机定子铁心与绕组间发生放电现象划伤主绝缘。两种情况产生的机理不同，导致的后果也不一样。第一种情况，定子绕组冲片毛刺划伤定子主绝缘的原因为：定子绕组冲片与电动机定子铁心之间有绝缘垫块，定子铁心与电动机定子绕组之间没有绝缘垫块。第二种情况，当冲片毛刺划伤定子主绝缘时，由于冲片毛刺的尖端处于电动机定子铁心与电动机定子绕组之间的绝缘垫块上，从而产生电晕放电，将定子绕组与电动机定子铁心之间的绝缘垫块击穿。当冲片毛刺划伤定子主绝缘时，由于电晕放电能量集中在定子绕组冲片与电动机定子铁心之间的绝缘垫块上，从而使电晕放电能量集中在定子绕组冲片上。

## 定子端部绝缘分析

定子端部绝缘是高压电动机定子的重要绝缘结构之一，其作用是保证电动机内绝缘有足够的绝缘强度，使电动机在运行过程中不会出现端部局部放电。定子端部的主要绝缘结构有：叠片、压板和盖板，盖板和压板之间的垫片，铜线和压板之间的垫片，以及压板和铜线之间的垫片等。

定子端部的绝缘结构要求在一定压力下能承受一定的电压，并且能在承受电压后不会因老化或其他原因造成绝缘击穿。因此，为了满足这一要求，在进行绝缘设计时要考虑以下因素。

1) 定子端部结构中的金属构件可以采用高强度材料，以避免发生电腐蚀现象。

2) 采用散绕组结构时，要考虑到端部区域与绝缘材料之间的热膨胀系数差异，避免由于热膨胀系数差异造成端部区域开裂。

定子端部绝缘计算模型及部分试验如图3所示。

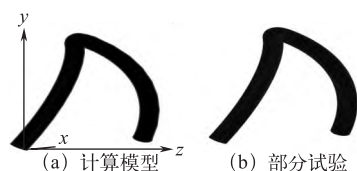


图3 端部绝缘计算模型及部分试验

为验证电动机定子采用散绕组结构的可行性，进行了一系列试验。试验的目的是验证电动机定子采用散绕组结构对电动机的影响，验证电动机定子采用散绕组结构是否会引起电动机绕组局部放电。首先进行了局部放电测试，局部放电测量采用便携式的耐压测试仪，测量时应注意设备的防潮性，测量完毕后应及时将仪器进行干燥处理，防止仪器受潮影响测量结果。然后进行了交流耐压测试，交流耐压试验时，试验电压应大于额定电压的60%，且不应低于额定电压的80%，试验时间不应小于15 min。对电动机定子采用散绕组结构进行了多次局部放电测试和交流耐压测试，结果均符合要求。因此，电动机定子采用散绕组结构是可行的。

## 结束语

由于电动机运行环境恶劣，对电动机的绝缘结构提出了更高的要求，电动机的绝缘结构必须具有耐高压、耐电晕、耐电蚀等特性。在电动机绝缘结

构设计中，各种形式的绕组均有优缺点。目前常用的定子绕组形式主要有双绞四极绕组、多芯（多匝）绕组、多层（多匝）绕组等。由于传统绕组存在制造成本高、绝缘厚度不均匀、容易产生电晕损耗等缺点，限制了在电动机中的应用。随着我国高压电动机技术的发展，定子结构由传统的整体式绕组改为散绕组，使绕组更加灵活、布置更加自由，减少了绝缘结构中的连接线数量。通过对高压电动机定子采用散绕组的绝缘结构的分析可以看出：一是随着电动机技术的发展，电动机的功率等级和效率越来越高，对电动机的性能要求也越来越高，对定子的绝缘要求也越来越严格，电动机定子采用散绕组结构可以减小电动机尺寸、重量和成本，但定子绝缘结构复杂，制造过程中工艺技术要求高，产品质量难以保证；二是随着电动机技术的发展，电动机绝缘材料也在不断创新和发展，具有较高的电导率、介电常数、击穿强度和耐热性等物理性能和电气性能，定子采用多层绕组绝缘结构，可以提高高压电动机定子绕组的对地绝缘水平，改善绝缘性能；三是在电动机设计过程中应综合考虑定子绝缘材料特性和制造工艺技术水平，合理地选择绝缘材料和设计定子结构，通过选择合适的制造工艺，保证产品质量，提高生产效率。EA

（收稿日期：2023-04-20）

## 参考文献

- [1] 冯相为. 高压自启动永磁电机定子采用散绕组的分析与设计研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2021.
- [2] 冯相为, 张炳义. 高压电机定子采用散绕组的绝缘结构分析[J]. 电机与控制应用, 2021, 48(3): 55-61.
- [3] 陈谦, 张琦, 仇娜, 等. 采用定子控制绕组的转子储能调相机[J]. 电力系统及其自动化学报, 2021, 33(2): 51-58.
- [4] 赵贵前. 发电电动机定子绕组线棒绝缘系统制造采用的局部放电防止技术与监造[J]. 水电与抽水蓄能, 2018, 4(2): 90-93.
- [5] 杨世强, 刘冲, 倪继文, 等. 大型汽轮发电机定子铁心磁化试验研究与应用[J]. 电气应用, 2021, 40(5): 44-47.