

# 高压电机定子绕组绝缘结构的设计

包 蕾

(宁波工程学院电子与信息工程学院 浙江 宁波 315010)

[摘 要]介绍高压电机定子绕组匝间绝缘结构、对地绝缘结构及其设计方法以及防晕的措施,并应用于10500V三相同步发电机上,获得成功。为高压电机定子绕组绝缘结构提供设计思路。

[关键词]高压电机 定子绕组 绝缘结构 设计方法

中图分类号: TM3 文献标识码: A 文章编号: 1671-7597(2008)0910016-02

## 一、概述

随着人们生活质量的提高和工业发展需求,电力需求早逐年上升趋势。电力供应缺口严重地制约了中小型企业尤其是三资企业和乡镇企业的生产发展,工业用电的计划配给使得超计划用电的费用高的离谱,供电的品质又差,说不定在某个时间突然给你一个停电。为使生产用电有保障,许多企业纷纷添置自备电源。在这种形势下,为改善地方局域网的供电质量,在经济上及时抓住电力紧缺的商机,各地方电力部门开始建造调峰电站,能改变电力结构,推动工业发展,如余热调峰电站、天然气调峰电站、抽水蓄能调峰电站。一个时期后,这种投资少、见效快、回收期短的调峰电站在经济发达地区迅速蔓延开来。为进一步减少投资,电站设计时,多采用10.5kV级以上的高压发电机组。因此高压电机在经济建设中所起的作用越来越重要,对高压电机的需求量越来越多,同时对高压电机的技术水平的要求也越来越高。

高压电机中绝缘系统占有非常重要的地位。它在很大程度上决定着高压电机的运行寿命和运行可靠性。而作为高压电机心脏的定子绕组绝缘则更受人们的瞩目和重视。高压电机绝缘系统的技术水平在很大程度上是由其所用绝缘材料与所选绝缘结构决定的。对于高压电机来说,其绝缘系统水平的提高就意味着电机整体水平的提高。

## 二、高压电机定子绕组的绝缘结构

高压定子绕组一般采用多匝框式结构,高压电机定子绕组的绝缘结构主要包括匝间绝缘的选定、对地绝缘厚度及材料的确定及防电晕措施。

### (一) 匝间绝缘的选定

定子绕组制造和运行过程中,当操作过电压陡波侵入时,其匝间过电压比每匝工作电压约高20倍以上,有可能使匝间绝缘击穿。而且现场经验表明,多匝框式定子绕组的大多数故障都是由匝间绝缘损坏开始,而最终导致绝缘对地击穿。因此匝间绝缘的结构至关重要。

在过电压陡波的作用下,相端首匝将出现最大的过电压 $U_s$ (幅值),所以设计时匝间绝缘的冲击击穿电压应高于 $U_s$ 。

$$U_s = U_c \cdot \Delta t / T_r$$

式中:  $U_c$  为冲击过电压,一般取3.5 $U_N$  (kV);

$\Delta t$  为陡波经过线圈一匝所需时间,  $\Delta t = 2L/V$  ( $\mu s$ ), 其中 $V$ 为绕组槽部波速 $m/\mu s$ ,  $L$ 为铁心长(m),  $V = 0.25 \times 1000 \times \sqrt{\delta_1} \times \sqrt{b_s} / h_s$ ,  $\delta_1$  指定子绕组对地绝缘单边厚度(mm),  $h_s$  指定子槽(开口槽)深(mm),  $b_s$  指定子槽宽(mm)。

$T_r$  为冲击过电压波前时间,一般取1.5 $\mu s$ 。

应用在宁波电机厂1250kW10500V三相无刷同步发电机设计中,预选定子绕组对地绝缘单边绝缘厚 $\delta_1 = 3mm$ , 定子槽深 $h_s = 80mm$ , 定子槽宽 $b_s = 16.5mm$ , 定子铁心长 $L = 0.68m$ 。

则:

$$V = 0.25 \times 1000 \times \sqrt{\delta_1} \times \sqrt{b_s} / h_s = 0.25 \times 1000 \times \sqrt{3} \times \sqrt{16.5} / 80 = 22 m/\mu s$$

$$\Delta t = 2L/V = 2 \times 0.68 / 22 = 0.0618 \mu s$$

$$U_s = U_c \cdot \Delta t / T_r = 3.5 \times 10.5 \times 0.0618 / 1.5 = 1514V$$

$$而 U_{smax} = 0.35 U_N = 0.35 \times 10.5 = 3.675 kV = 3675V$$

所以:

$$1514V < 匝间冲击击穿电压 < 3675V$$

定子绕组电磁线若采用自粘性玻璃丝包云母带绕包铜扇线SBEFB-70/155-2N, 导线绝缘层薄, 可靠性好, 耐电晕性好, 关键其弯曲后击穿电

压为4kV。因此对10.5kV高压电机定子绕组若选用此电磁线后, 其匝间不再需另包绝缘, 这样可以提高槽利用率, 缩小电机的主要尺寸, 利用槽内有效的空间以达到良好的电磁性能。

### (二) 对地绝缘厚度的确定

绕组对地绝缘是绝缘结构的主要部分, 确定绝缘厚度时, 要考虑: 机械因素、历次耐压试验的累积效应、绝缘的分散度和正常运行条件下的年平均老化速率等。设对地绝缘材料选用环氧玻璃粉云母带, 其单边绝缘厚度可按下式估算:

$$\delta_i \geq \frac{K_V \cdot U_N}{[1 - (\alpha_1 + \alpha_2)] \cdot 10^{-Bt} \cdot E_b} + \delta_M \quad mm$$

式中:  $U_N$  为额定电压 (kV);

$K_V$  为预防性试验电压倍数, 一般取1.5;

$\alpha_1$  为历次耐压累积效应系数。

为了检查绝缘结构的缺陷, 在制造过程中要按规范对绕组进行多次工频耐压试验, 每进行一次, 就会在结构中产生一定的细微劣化痕迹, 使其耐电性能有所下降, 称累积效应。表示这一效应的系数 $\alpha_1$ 与外施电场的强弱及其作用时间有关。如图1所示环氧粉云母带绝缘一分钟耐压试验的累积效应特性。

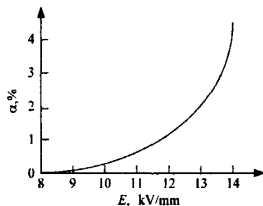


图1 累积效应系数 $\alpha$ 与外施场强 $E$ 的关系

$\alpha_2$  为分散度, 一般6kV以上取0.1, 6kV及以下取0.15;

$B$  为年平均老化速率指数, 发电机取0.02, 电动机取0.03;

$T$  为运行年限, 发电机取30年, 电动机取20年;

$E_b$  为击穿场强 (kV/mm), 计算时一般取24kV/mm;

$\delta_M$  为考虑机械因素所要求的附加厚度, 一般取0.5mm。

例如1250kW10500V三相无刷同步发电机设计中, 绝缘热压成型后线圈绝缘耐压试验电压

$$U_i = 2.75U_N + 4.5 = 2.75 \times 10.5 + 4.5 = 33.4kV$$

外施场强 $E = U_i / \delta_1 = 33.4 / 3 = 11.13kV/mm$  (预选 $\delta_1 = 3mm$ ), 查图1得历次耐压累积效应 $\alpha_1 \approx 1\% = 0.01$ 。所以

$$\begin{aligned} \delta_i &\geq \frac{K_V \cdot U_N}{[1 - (\alpha_1 + \alpha_2)] \cdot 10^{-Bt} \cdot E_b} + \delta_M \\ &= \frac{1.5 \times 10.5}{[1 - (0.01 + 0.1)] \times 10^{-(0.02 \times 30)} \times 24} + 0.5 = 3.44mm \end{aligned}$$

经验数据: 每毫米单边绝缘厚额定输出3~4kV, 则10.5kV发电机定子绕组对地绝缘厚为2.63~3.5mm。

据以上所述, 取对地绝缘厚度 $\delta_1 = 3.5mm$ 。

### (三) 对地绝缘材料的选用

绕组运行的可靠性和使用寿命, 很大程度上取决于绝缘材料的性能。

要求绝缘材料具有良好的电气性能、良好的耐热性能及良好的机械性能，确定绝缘材料时关键要考虑材料的介电强度，要求材料介电强度最小应大于绝缘耐压试验电压。绝缘材料有绝缘纤维制品、浸渍纤维制品、电工用薄膜、绝缘云母及其制品等，其中以绝缘云母及其制品最为常用。如5438-1环氧玻璃粉云母带，机械、电气性能好，柔韧性好，适用于大、中型高压电机线圈主绝缘及其它各种电机、电器绝缘，其固化前、固化后的介电强度均不小于35MV/m。应用在1250kW10500V三相无刷同步发电机定子绕组对地绝缘中，取对地绝缘 $\delta_i=3.5\text{mm}$ ，固化后 $\delta_i'=3.5 \times 0.8=2.8\text{mm}$ ，由于绝缘热压成型后线圈绝缘耐压试验电压 $U_T=33.4\text{kV}$ ，2.8mm的绝缘厚度介电强度最小为 $2.8 \times 35 \times 103/1000=98\text{kV}$ ，计及热压不规则率50%，则2.8mm的绝缘厚度介电强度最小为 $98 \times 50\%=49\text{kV} >$ 线圈绝缘耐压试验电压 $U_T(33.4\text{kV})$ 。所以在1250kW10500V三相无刷同步发电机定子绕组中，采用5438-1环氧玻璃粉云母带作为主绝缘材料、其 $\delta_i=3.5\text{mm}$ 是可行的。

#### (四) 防电晕措施

高压定子绕组在通风槽口及端部处槽口处，由于绝缘表面的电场分布不均匀，当局部电场强度达到一定数值时，气体发生局部电离，在电离处出现蓝色的荧光，并伴有嗤嗤声，这种现象称为电晕。电晕会产生臭氧及氮的氧化物，它们与潮气结合成有害的酸性物质会腐蚀绕组的绝缘；电晕还使绝缘局部发热，加速绝缘老化，严重时迅速破坏绝缘。因此，高压电机的防晕是非常重要的，若防晕措施不合理，电机一旦发生重大电晕，后果不堪设想。绕组最容易产生电晕的部位有槽部、端部、端部异相间及固定件间，防晕应分别对待。

##### 1. 槽部电晕的起因和防止

高压电机定子绕组绝缘表面与槽壁间存在间隙，通风槽口电场分布不均匀，都会使绕组槽部发生电晕。为有效防止电晕的产生，可以采用在绝缘表面加上低电阻的防晕层，如涂刷半导体低阻漆或在包扎主绝缘时同时包扎半导体低阻带方法。涂刷半导体低阻漆时防晕结构与主绝缘的固化应分别进行，且临刷前一定要使用搅拌机把漆搅拌均匀，否则漆的不均匀会造成电位分布二次不均匀从而再次发生电晕；若采用半导体低阻防晕带，则可与主绝缘同时固化，此时槽内要喷或涂上半导体低阻漆。这样一方面使通风槽口电场分布趋于均匀，降低轴向电场；另一方面低电阻防晕层与槽壁接触，可将该处间隙有效短路，使产生电晕的可能性尽量减少。

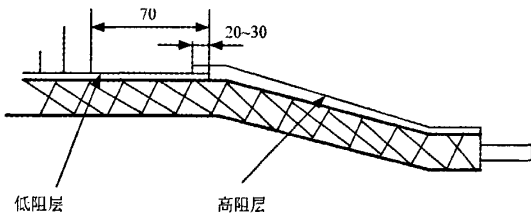


图2 端部防晕结构示例

##### 2. 端部电晕的起因和防止

端部电晕指绕组端部出槽口处电晕，其产生的原因是由于定子绕组端部绝缘表面的泄漏电流向铁心方向递增，因此出槽口处绝缘表面的电

压降最大，也就最易先起晕。可以依靠调整端部表面绝缘的电阻即防晕层的电阻率使端部电位分布均匀化来避免电晕。一般采用防晕层电阻率向着铁心方向递减，就能消除电位突变点获得均匀的电场分布，如端部采用具有非线性电阻的碳化硅防晕层，利用它能随外施场强自动调整电阻率，使电压分布均匀。如图2端部的防晕措施，低阻防晕层与高阻防晕层搭接 $20\sim 30\text{mm}$ ，高阻防晕层一直延伸至线圈端部的引线处，可取得较高的防晕水平。

##### 3. 端部异相间及固定件间电晕的防止

端部斜边间隙的大小与端部间隙的起晕电压成反比关系，因此，端部斜边间隙要保证在工作电压下不发生电晕。可采用耐电晕的适形材料，添塞各固定件间的间隙，适形材料可用室温或高温固化胶，采用高温固化胶需烘培加热固化。在10500V高压电机上反复实践，将端部斜边间隙定在9mm左右，基本上可消除异相间的电晕；端部的固定采用漆玻绳捆扎，将漆玻绳涂刷上高阻漆，使其与端部绝缘粘结良好以消除漆玻绳处起晕。

#### 三、试验测试及结果

上述定子绕组绝缘结构设计方案应用在宁波电机厂1250kW10500V三相无刷同步发电机中，匝间绝缘顺利通过单个工频2000V耐压3s、5次及绕组嵌入铁心并连接后加工频3500V耐压3s、5次；对地绝缘顺利通过工频35kV耐压1min；起晕电压约25kV；瞬时闪络电压约60kV。甚至将此绝缘设计方案应用到11400V电机定子绕组上，也取得了成功。

#### 四、结语

本文对高压电机定子绕组的绝缘结构进行了分析，给出了设计方法和过程。同时将设计的方案在10500V三相无刷同步发电机上进行了应用，表明了设计的正确性，并为以后高压电机定子绕组绝缘结构的设计指导了方向。

#### 参考文献：

- [1]于文霞,王刚. 高压电机定子线圈匝间绝缘结构[J]. 防爆电机, 2007, 42(5): 45-47.
- [2]左建国. 10kV级电机定子线圈防晕结构改进[J]. 中小型电机, 2003, 30(2): 55-56.
- [3]祖连惠,潘延明. 大型高压电机定子线圈主绝缘的发展及其应用[J]. 电工技术杂志, 1994, (2): 5-8.
- [4]施之英. 高压电机定子线圈防晕结构的发展方向[J]. 大电机技术, 1992, (6): 29-30.
- [5]隋银德,傅岚贵. 高压电机定子线圈电场分布的改善[J]. 大电机技术, 2001, (2): 22-25.
- [6]隋银德,刘上椿. 高压电机防晕技术[J]. 绝缘材料通讯, 1995, (5): 32-37.
- [7]徐君贤. 电机与电器制造工艺学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.
- [8]电机工程手册编委会. 电机工程手册第二版[M]. 北京: 机械工业出版社, 1996.

#### 作者简介：

包蕾, 宁波工程学院教师, 高级工程师, 从事电机电器及其控制教学与研究。

(上接第98页)

例11、证明： $C_n^1 + 2C_n^2 + 3C_n^3 + \dots + nC_n^n = n \cdot 2^{n-1}$ 。

证明：构造一个数列  $\{kC_n^k\}$ ，则问题变成一个求这个数列前n项和的问题。

根据数列求和的方法，便有：

$$\begin{aligned} \therefore kC_n^k &= k \frac{n!}{k!(n-k)!} = \frac{n \cdot (n-1)!}{(k-1)!(n-k)!} \\ &= n \frac{(n-1)!}{(k-1)!(n-1-(k-1))!} = n \cdot C_{n-1}^{k-1}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \therefore \text{左边} &= n \cdot C_{n-1}^{1-1} + n \cdot C_{n-1}^{2-1} + n \cdot C_{n-1}^{3-1} + \dots + n \cdot C_{n-1}^{n-1} \\ &= n (C_{n-1}^0 + C_{n-1}^1 + C_{n-1}^2 + \dots + C_{n-1}^{n-1}) \\ &= n \cdot 2^{n-1} = \text{右边, 证毕!} \end{aligned}$$

通过上面的例题可发现构造法在排列组合二项式定理中确实有广泛的应用，虽然这是一种创造性思维活动，但在这方面的训练对我们的学习是有很大帮助作用的。

# 高压电机定子绕组绝缘结构的设计

作者: [包蕾](#)  
 作者单位: [宁波工程学院电子与信息工程学院, 浙江, 宁波, 315010](#)  
 刊名: [硅谷](#)  
 英文刊名: [SILICON VALLEY](#)  
 年, 卷(期): 2008, "" (17)  
 引用次数: 0次

## 参考文献(8条)

1. 于文霞, 王刚 [高压电机定子线圈匝间绝缘结构](#) [期刊论文] - [防爆电机](#) 2007 (05)
2. 左建国 [10kv级电机定子线圈防晕结构改进](#) [期刊论文] - [中小型电机](#) 2003 (02)
3. 祖连惠, 潘延明 [大型高压电机定子线圈差绝缘的发展及其应用](#) 1994 (02)
4. 施之英 [高压电机定子线圈防晕结构的发展方向](#) 1992 (06)
5. 隋银德, 傅岚贵 [高压电机定子线圈电场分布的改善](#) [期刊论文] - [大电机技术](#) 2001 (02)
6. 隋银德, 刘上椿 [高压电机防晕技术](#) 1995 (05)
7. 徐君贤 [电机与电器制造工艺学](#) 2000
8. 《[电机工程手册](#)》编委会 [电机工程手册](#) 1996

## 相似文献(10条)

1. 期刊论文 [朱立颖, 孙雅玲, 王永红, 魏新芳](#) [高压电机定子绕组超低频耐压试验技术和设备](#) - [大电机技术](#) 2001, "" (5)

本文阐述了高压电机定子绕组0.1Hz超低频试验的优点及其超低频试验技术最新发展情况;并介绍了研制的0.1Hz超低频电压试验装置。

2. 期刊论文 [周剑](#) [高压电机定子绕组的防晕结构研究](#) - [现代商贸工业](#) 2009, 21 (8)  
 从试验入手, 阐述了槽部防晕原理是使线圈槽部外表面和铁芯槽部之间的间隙短路以及端部防晕原理是使槽口外线圈端部表面电位梯度尽量均匀。
3. 期刊论文 [杨绍甫, 蔡子亮, YANG Shao-fu, CAI Zi-liang](#) [高压电机定子绕组的防晕结构](#) - [装备制造技术](#) 2007, "" (1)  
 从试验入手, 阐述了槽部防晕原理是使线圈槽部外表面和铁芯槽部之间的间隙短路以及端部防晕原理是使槽口外线圈端部表面电位梯度尽量均匀。

4. 会议论文 [黎崇彬, 祁世发, 孙雅玲](#) [高压电机定子绕组绝缘电阻温度特性研究](#) 1999  
 该文概述了国内外电机绕组绝缘电阻的温度特性, 在对F级绝缘定子线棒(线圈)和定子绕组在不同温度下的绝缘电阻进行实测的基础上, 通过对数据的正态分布分析, 得出F级定子线棒(线圈)和VPI浸渍定子绕组的绝缘电阻温度系数, 并推出其定子绕组在不同温度下的绝缘电阻换算公式。它们与国内外同类绝缘结构电阻温度关系有较好的可比性。

5. 学位论文 [隋银德](#) [高压电机绝缘系统的研究](#) 2004

该文对高压电机的绝缘系统进行了研究。其主要内容是:高压电机定子铁心绝缘的研究;高压电机定子绕组绝缘的研究;高压电机定子绕组槽部固定结构研究;高压电机定子绕组端部固定结构研究;高压电机转子绝缘结构研究。在定子铁心绝缘研究方面, 研究开发了一种新型半无机硅钢片漆。它克服了现用有机漆与水溶性半无机漆的不足, 能够较好地满足Franklin烧损测试电流要求, 甚至在漆膜厚度薄至4 $\mu$ m时仍能达到0.2A以下的要求。同时弥补了现用水溶性半无机漆断面覆盖差的缺点, 可应用于各种不同类型电机, 尤其是应用于水轮发电机组更显示出其不可比拟的优越性。在定子绕组绝缘研究方面, 分别对内冷式和非内冷式定子绕组绝缘结构进行了改进研究, 使得定子绕组绝缘结构的性能得到有效的改善。特别是介损水平得到有效的降低, 介电强度和快速电老化寿命明显提高。对定子绕组防晕结构进行了研究, 使得定子绕组防晕结构的起晕电压和瞬时闪络电压得到明显的提高, 同时耐压性能大大改善。在定子绕组槽部固定结构研究方面, 槽内径向固定结构中, 在槽楔和线圈间加入了具有弹性的绝缘波纹板。线圈侧面固定则采用RTV/CRTV结构, 即用室温硫化硅橡胶(RTV)和半导体硅橡胶(CRTV)涂于线圈两侧并固化。这样既改善了固定效果, 又改善了热传导和电接触效果。在定子绕组端部固定结构研究方面, 主要对端部固定用端环进行了重点研究。研究开发出端环用注射胶和配套使用的玻璃丝套管, 从而降低了成本, 简化了工艺并提高了固定效果和可靠性。在转子绝缘结构研究方面, 匝间绝缘采用上胶Nomex纸, 使得匝间绝缘厚度从0.4mm降至0.26mm。极身绝缘采用宽幅云母带绕于极身表面并热压成型, 厚度从3~4mm降为1.3~1.9mm。

6. 期刊论文 [赵喜君, 尚跃生](#) [火电厂辅机高压电动机定子绕组事故原因和处理方法](#) - [电站系统工程](#) 2004, 20 (3)  
 阐述了高压异步电动机定子绕组绝缘结构, 对电机定子绕组故障出现的原因进行了分析, 提出了诊断方法, 确定解决方案。

7. 期刊论文 [姚国萍, 张仁龙, 邱家训, 李希明, 汪耕](#) [高海拔地区20kV发电机定子绕组端部防晕技术的研究](#) - [上海大中型电机](#) 2004, "" (2)

本文就高海拔地区高压发电机定子端部绕组防晕问题进行了理论分析探讨及试验研究。通过采用高介电性绝缘材料对模拟定子绕组端部相间区域等进行处理, 相间起晕电压提高到30kV以上, 并总结出一套有效可行的端部防晕技术方案。该方案应用于修理电机和新产品电机时能使高压发电机在高海拔(200米以上)环境中运行时达到特殊的防晕要求。

8. 期刊论文 [罗洪霞, 张雪峰, LUO Hongxia, ZHANG Xuefeng](#) [基于关联维数的高压电机定子绕组局部放电信号模式识别](#) - [现代电子技术](#) 2007, 30 (16)

提出了利用分形理论对高压电机定子绕组局部放电信号进行处理的方法, 得到局部放电信号的关联维数, 并将其作为特征参量对几种典型的局部放电

信号进行模式识别. 局部放电信号是非线性、非平稳随机信号, 因此采用非线性理论中的分形理论对其进行分析, 即计算关联维数. 考虑到相空间重构中嵌入维数和时间延迟对关联维数精度的影响, 采用联合算法确定2个参数. 仿真结果表明, 关联维数用于局部放电信号模式识别是行之有效的.

9. 会议论文 [何立汉, 刘德红, 姜建国, 曹海翔. 高抗干扰性能交流高压电机定子绝缘监测系统的研究](#) 2000

局部放电在线检测技术是高压旋转电机定子绕组绝缘监测的有效方法. 该文介绍了一套对大型汽轮发电机和高压异步电动机进行在线局放检测的系统. 该系统采用一种基于微线理论的新型放电传感器(简称MSLS)获取局放信号, 文中较详细地研究了传感器的特性. 在实验的基础上研究了该系统的抗干扰能力. 结果表明该系统有更好的抗干扰性能.

10. 期刊论文 [王旭辉, 孙雅玲, 刘洋, 张东林, Wang XuHui, Sun Yaling, Liu Yang, Zhang Donglin. 高压电机定子绕组绝缘电阻温度特性研究 -防爆电机](#)2006, 41 (4)

阐述了电机绕组绝缘电阻的基础知识和国内外绝缘电阻温度特性相关规定和换算公式, 介绍了国产F级电机绕组的绝缘电阻温度特性测试, 并提出参考的换算公式.

本文链接: [http://d.wanfangdata.com.cn/Periodical\\_guiq200817013.aspx](http://d.wanfangdata.com.cn/Periodical_guiq200817013.aspx)

下载时间: 2010年6月8日