

双馈风力发电机转子绝缘结构优化研究

张道朋

(弗兰德传动系统有限公司海泰分公司, 天津 300384)

摘要: 双馈风力发电机(DFIG)的转子绝缘结构在变频电压冲击下,会承受恶劣的电应力。虽然耐电晕聚酰亚胺薄膜及其复合材料可以提高转子绝缘结构寿命,但是在成本控制的压力下,需要探索普通绝缘材料应用于转子绝缘结构的可行性。通过电场有限元仿真和试样绕组试验,证实单面玻璃丝布补强少胶云母带可以单独使用或配合聚酯薄膜补强少胶云母带使用,2种绝缘结构电气性能均良好,完全能够满足风力发电机转子绝缘结构设计要求。

关键词: 双馈风力发电机(DFIG);转子绝缘结构;电场仿真;局部放电;击穿电压

中图分类号: TM 305.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2021)07-0073-04

doi: 10.12177/emca.2021.036

Optimization Research on Rotor Insulation Structure of Doubly-Fed Induction Generator

ZHANG Daopeng

(China Haitai Branch of Flender Co., Ltd., Tianjin 300384, China)

Abstract: The rotor insulation structure of doubly-fed induction generator (DFIG) bears severe electric stress under the impact of variable frequency voltage. Although the coronaresistant polyimide film and its composite materials can increase the life of the rotor insulation structure, the feasibility of applying common insulation materials to the rotor insulation structure needs to be explored under the pressure of cost control. Through the electric field finite element simulation and the sample winding test, it is proved that the single-side glass fabric reinforced mica tape can be used alone or in combination with the polyester film reinforced mica tape. Both insulation structures have good electrical properties and can completely meet the design requirements of the wind turbine rotor insulation structure.

Key words: doubly-fed induction generator (DFIG); rotor insulation structure; electric field simulation; partial discharge; breakdown voltage

0 引言

双馈风力发电机(DFIG)转子由变频器供电^[1],变频器在系统中会产生高频脉冲电压,在这种高频脉冲电压作用下DFIG转子绕组绝缘表面和绝缘内部微小气隙会产生局部放电,绝缘系统将承受更严酷的电、热应力,造成绝缘材料和绝缘结构的损害^[2-3],导致绝缘系统过早失效^[4]。

风力发电机的转子绝缘结构有2种:(1)以耐电晕聚酰亚胺薄膜为主要耐电晕材料,复合云母为辅,这种结构具有机械强度较高、厚度薄的优点,但缺点是导热系数低,导热性能差,成本较高;(2)以云母为主要耐电晕材料,这种绝缘结构与前者相比具有导热系数高、成本低的优点,但绝缘较厚^[5]。

针对DFIG转子的特殊要求,通过电场仿真分析和转子模拟线圈试验,探索普通绝缘材料应

收稿日期: 2021-03-20; 收到修改稿日期: 2021-04-28

作者简介: 张道朋(1987—),男,硕士,助理工程师,研究方向为变频电机绕组工艺和绝缘结构。

用于转子绝缘结构的可行性,对开展风力发电机转子绝缘结构优化研究具有重要意义。

1 电场仿真分析

1.1 二维建模

转子绕组双边绝缘厚度约为 1.8 mm,嵌线间隙为 0.5 mm。假设绕组浸漆之后,嵌线间隙被浸渍漆全部填满,由此画出单个槽内的绕组截面二维简化模型并计算,如图 1 所示。

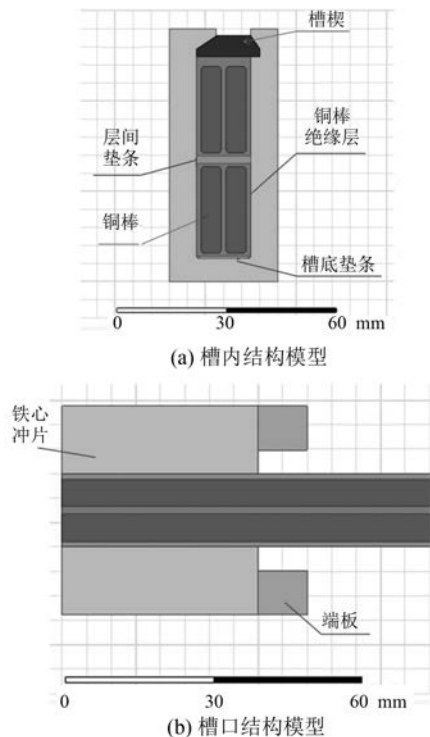


图 1 转子二维简化模型

1.2 分析计算

DFIG 转子的开口电压一般约为 2 kV,但是由于转子是变频供电,转子绕组绝缘结构需要承受对地脉冲电压,如图 2 所示,转子需要承受对地峰值电压 U_{pk} 为 2.0 kV。转子绕组绝缘按照绕组承受对地峰值电压为设计输入依据,而实际绝缘结构设计和测试过程中,考虑脉冲电压对绕组绝缘的电冲击烈度比较高,一般采用等值的工频相电压 U_p 代替脉冲电压对地峰值电压 U_{pk} 。

在此使用 Ansys Maxwell 软件仿真时,设定绕组每处的绝缘结构相对介电常数为 3.8,对转子绕组施加相电压设定为 2.0 kV,仿真结果如图 3 和

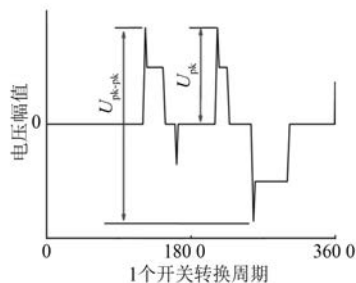


图 2 转子绕组在 1 个开关转换周期内承受对地脉冲电压

图 4 所示。

图 3 为槽内绝缘系统电场强度分布图。从图 3 中可以看出,槽内最大电场强度在铜排的 R 角位置,其电场强度约为 2.2 kV/mm,槽内绝缘结构对地平均电场强度约为 1.8 kV/mm。

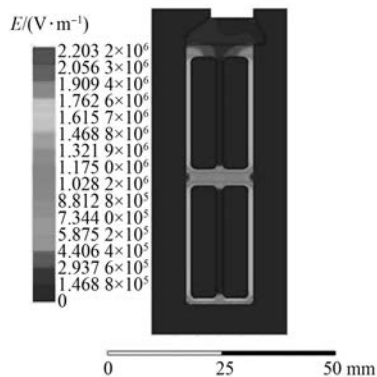


图 3 槽内绝缘系统电场强度分布

图 4 为槽口绝缘系统电场强度分布图。从图中可以看出,绝缘结构的最大电场强度出现在槽口位置;绝缘材料中最大电场强度约为 3.8 kV/mm;空气在槽口位置的最大电场强度约为 4.3 kV/mm。

绕组的单边绝缘厚度长期承受的电场强度为 3~4 kV/mm^[6],而仿真结果显示转子绝缘结构的最大电场强度为 3.8 kV/mm。因此,从理论上转子绝缘结构可以使用普通云母带作为主绝缘结构。但是需要验证槽口是否存在电晕放电问题。

空气的击穿电压一般约为 3 kV/mm,但是根据巴申定律,空气的击穿电压与气压和间距有关,槽口位置绕组与铁心的间距距离较小,不能直接判断其是否会起晕。因此槽口位置的空气是否起晕放电需要测试绝缘结构的起晕电压。

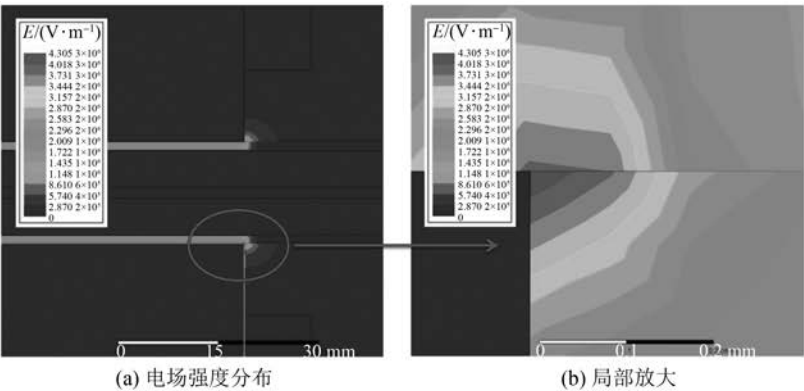


图 4 槽口绝缘系统电场强度分布

2 转子绕组试样制备

本试验的转子绕组试样绝缘结构如表 1 所示。

表 1 转子绕组试样绝缘结构

绝缘结构编号	绕组绝缘材料	叠包方式
试样 1	0.13 mm×20 mm 单面聚酯薄膜补强少胶云母带	半叠包 2 次
	0.11 mm×20 mm 耐电晕聚酰亚胺薄膜玻璃丝布补强少胶云母带	半叠包 1 次
试样 2	0.13 mm×20 mm 单面玻璃丝布补强少胶云母带	半叠包 1 次
	0.13 mm×20 mm 单面聚酯薄膜补强少胶云母带	半叠包 2 次
试样 3	0.13 mm×20 mm 单面玻璃丝布补强少胶云母带	半叠包 3 次

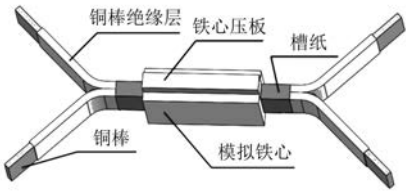


图 5 转子绕组试样模型

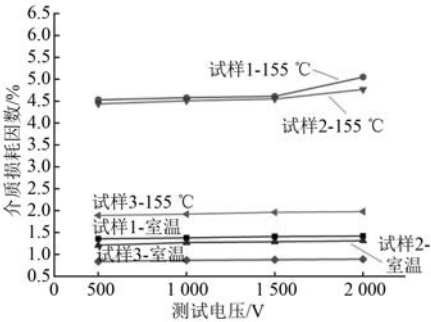


图 6 转子绕组试样常温介损和热态介损数据

3 讨论与分析

3.1 转子绕组试样介质损耗因数分析

中型高压电机少胶整浸线圈质量的优等品要求为 $0.6 U_N$ 测试电压时,在常温下,介质损耗因数小于 1.5%;在 155 ℃ 下,高温介质损耗因数小于 8%^[7]。

电机的额定电压 U_N 是指电机的线电压 U_L 。风力发电机转子绕组采用为 Y 型连接方式, $U_L = \sqrt{3} U_P$ 。因此, $0.6 U_N = 0.6 U_L \approx U_P$ 。

图 6 为工频电压测试转子绕组试样的介质损

耗因数,从图 6 中可以看出,在常温、2.0 kV 测试电压下,模拟绕组的常温介质损耗因数增量较小,3 种试样的介质损耗因数值均不超过 1.5%;在 155 ℃、2.0 kV 测试电压下,3 种试样的高温介质损耗因数也均未超过 8%。

试验结果显示 3 种试样均达到了优等品标准。与此同时,试样 3 的常温和高温介质损耗因数小于其他 2 种绝缘结构。试样 1 和试样 2 介

损耗因数高的一个重要原因是浸漆烘焙时,浸渍漆容易从聚脂薄膜补强少胶云母带中薄膜一侧流失,在绕组绝缘层中留下微孔,使聚脂薄膜补强云母带结构介质损耗因数较大。

3.2 局部放电分析

变频器供电的旋转电机比工频供电的电机绝缘结构更容易局部放电^[8]。本次设计的转子绝缘结构有2种不存在耐电晕材料,如发生局部放电,则可使这2种绝缘迅速失效。因此,测量绕组绝缘结构放电水平可作为评价本次绝缘结构性能的关键指标。

3种转子试样进行了局部放电测试,测试结果如图7所示。从图7中可以看出,3种结构的局部放电性能从高到低依次为试样3、试样2、试样1。相比薄膜补强少胶云母带,玻璃布补强少胶云母带的透气性能更好,浸渍漆可充分填充其层间的孔隙,进而减少绝缘结构中的缺陷,从而提高绕组绝缘结构的局部放电起始电压。

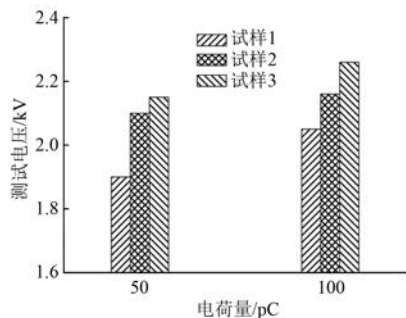


图7 转子局部放电测试结果

试样2和试样3在50 pC放电时,起始电压均超过2.0 kV,可满足转子绝缘结构电气性能要求。

3.3 起晕电压

在暗室中,对试样2和试样3进行起晕电压测试,其起晕电压均超过2.5 kV。绝缘结构电场仿真中空气在槽口的最大电场强度较高,但是由于间隙距离较小,绝缘结构在承受2 kV电压时,空气在槽口位置不会发生电晕放电,两种试验结构满足转子绝缘结构设计要求。

3.4 击穿电压分析

绕组绝缘结构的设计击穿电压 $\geq 7U_N$ ^[9]。设计转子绕组的击穿电压 $\geq 7U_N = 7 \times \sqrt{3} U_p = 24.3 \text{ kV}$ 。

表2为转子绕组试样的击穿电压测试数据。从表2中可以看出3种绝缘结构的爬电击穿均不低于24.3 kV,满足转子绝缘结构设计要求。

表2 转子绕组试样击穿电压

模拟绕组编号	试样1	试样2	试样3
击穿电压/kV	29、29、30	29、28、32	30、28、27
平均击穿电压/kV	29.3	29.6	28.3

注:击穿方式为爬电击穿。

4 结 语

综合有限元分析和模拟绕组试验,可得如下结论:

(1) 单面玻璃丝布补强少胶云母带有助于提高绝缘结构一体性,减小绕组结构中的气隙缺陷,从而有利于提高绝缘结构的局部放电起始电压,降低介质损耗因数。

(2) 单面玻璃丝布补强云母带可以单独使用或配合聚酯薄膜补强云母带使用,2种绝缘结构电气性能均良好,完全能够满足风力发电机转子工作要求。

【参考文献】

- [1] 李松田,贺建华. 2.5 MW 双馈绕线型三相异步风力发电机的研制和开发[J]. 东方电机, 2009(4): 52.
- [2] 潘庆辉,何明鹏,张小俊,等. 风力发电机定子线圈绝缘高频脉冲电老化性能研究[J]. 绝缘材料, 2014, 47(6): 70.
- [3] HOSSEIN T, ALI K. A review of design consideration for doubly fed induction generator based wind energy system[J]. Electric Power Systems Research, 2018, 160: 128.
- [4] 张生德,汪双灿,赵超. 电机绝缘系统在高频冲击下局部放电试验研究[J]. 电机与控制应用, 2018, 45(2): 102.
- [5] 周健. 双馈异步风力发电机设计准则和方法研究[J]. 上海大中型电机, 2011(4): 30.
- [6] 包蕾. 高压电机定子绕组绝缘结构的设计[J]. 硅谷, 2008(17): 16.
- [7] 全国旋转电机标准化技术委员会. JB/T 50133—1999: 中型高压电机少胶整浸线圈 产品质量分等[S]. 北京: 中国标准出版社, 1999.

(下转第88页)