

[变压器]

大容量机舱风电干式变压器温度设计分析

文/郝亮¹ 包玉良¹ 谭智勇² 闫伟杰¹

1. 许继变压器有限公司; 2. 许继电气股份有限公司

为更准确地反映风电干式变压器的内部温度情况，建立大容量陆上风电干式变压器电磁—温度—流场耦合仿真模型，利用COMSOL多物理场耦合仿真软件得到风电干式变压器铁心和绕组温度场分布。结果表明，风电干式变压器强迫风冷时，气流场速度大，散热效果明显。这为变压器的定点监测提供了参考依据，有助于减少变压器的损耗，延长使用寿命，保证变压器的安全稳定运行。

近年来，全球风电装机容量持续增长，陆上风电作为其中的主力军，其发展速度和规模尤为显著。根据国际能源署（IEA）的数据，截至2022年，全球陆上风电装机容量已超过700 GW，预计到2030年将达到1 200 GW。在这一背景下，大容量陆上风电变压器作为连接风电机组与电网的关键设备，其市场需求也随之迅速增长。与油浸式变压器相比，风电干式变压器具有防火性能好、耐热和抗短路能力强、安全环保等优点，但其导热系数较低，使得其运行温度明显高于油浸式变压器运行温度。同时大容量陆上风电变压器通过针对性设计，解决了风电场环境严苛、负载波动大、并网要求高等挑战，是提升风能利用效率和电网稳定性的核心设备。其技术演进将持续聚焦智能化、设计创新与生态兼容性，助力可再生能源规模化发展。所以，干式变压器温度场的准确计算分析对提高变压器的可靠性、保证变压器的安全稳定运行具有重要的现实意义。

陆上机舱塔桶变压器的特点

与传统的风力发电机通过筒外箱变升压并网的方式相比较，采用机舱式风电干式变压器直接变压通过

高压电缆送出，具有就地升压降低电缆成本、节约土地使用、减少输电电缆线损等优点。如图1所示。

但是，变压器由地面“转战”于风机塔筒顶部机舱内，面临散热条件差、振动大、风机运行负荷频繁变化等问题，对变压器可靠性、免维护性、安全环保、设备外形、尺寸重量和发热量等条件要求极高。如图2所示。

大容量机舱风电干式变压器设计要点

1. 抗冲击设计

风电机组运行受风速的影响很大，可以频繁承受低负载到高负载循环、瞬变过电压，长期在低频振动环境中运行的条件，大幅温差等极端环境需求，变压器需经受频繁的负荷冲击，容易导致绕组开裂。针对此问题，设计应考虑采取以下措施满足使用要求。

1) 环氧树脂和固化剂选用一线优质品牌，长瀚XNR2516(J)环氧树脂XNH2516(F)固化剂，环氧树脂中添加硅微粉，填料比例80%左右，确保良好的耐电弧性能、抗开裂性能和导热性能。

2) 绕组在真空状态下环氧树脂浇注而成，环氧树脂采用薄膜脱泡和静态混料工艺。绕组内外层均

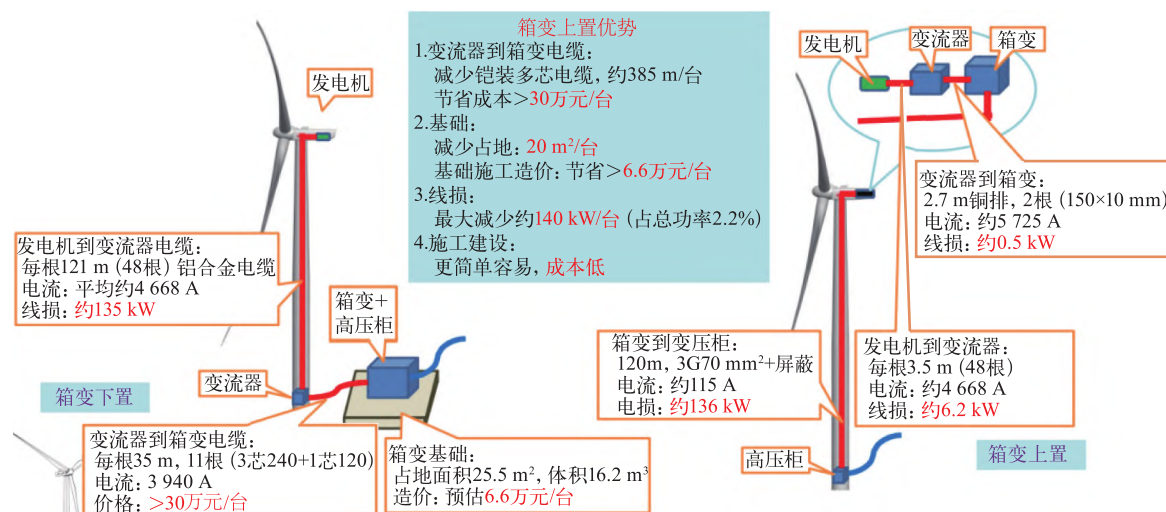


图1 不同箱式变压器方案

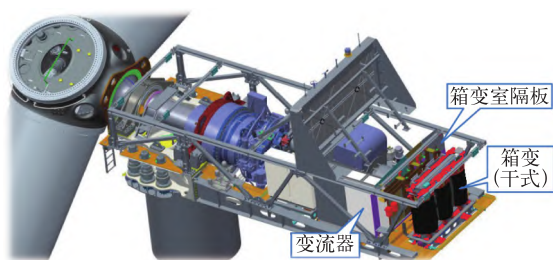


图2 机舱内变压器

增加高强度的玻璃纤维网，换层间和出分接部分需要增强绝缘，从而保证绕组不会因温度的剧烈变化而出现绝缘开裂现象。

3) 应通过 C3 级气候试验验证。

2. 抗过电压设计

风电机组运行过程中经常会出现过电压（可达4倍额定电压），绝缘薄弱处容易产生拉弧放电及接线端子爬电等。针对此问题，设计应考虑采取以下措施满足使用要求。

1) 场强控制。降低层间与段间场强，层间场强 ≤ 600 V/mm，段间场强 ≤ 110 V/mm。

2) 气道控制。由于变压器容量较大，高低压绕组均采用20 mm气道，气道两侧增加2.4 mm的H级玻璃丝网格增强绝缘。确保绕组有较强的过电压能力。

3) 爬距控制。爬距按 ≥ 35 mm/kV设计，垫块采用大伞裙结构，接线端子加高，分接端子端面开槽，增大爬电距离，降低绕组表面爬电的可能性。

4) 高压侧增加金属氧化物避雷器，降低过电压对变压器的影响。避雷器采用10 kA等级，其选型

及设计制造应严格遵守IEC相关标准要求，确保避雷器保护可靠，运行稳定。

5) 变压器雷电冲击按 ≥ 200 kV考核。

6) 应通过E3级环境试验验证。

3. 温升设计温度场的仿真

建立三相风机干式变压器物理模型，使用COMSOL多物理场仿真分析软件，得到大容量风机干式变压器温度分布与流体特性

(1) 三相风机干式变压器物理模型建立

本文研究对象是型号为SCB11-11000/35的三相干式变压器，变压器主要参数见表1。

材料名称	密度/(kg/m ³)	比热容	导热系数
硅钢片	7 650	460	45
铜	8 900	390	385

采用COMSOL多物理场仿真软件，建立风机干式变压器线圈二维等尺寸几何模型，分析大容量风机干式变压器温度分布及流体特性影响。

仿真模型共划分213 644个网格单元，变压器线圈网格剖分结果如图3所示。

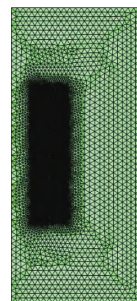


图3 变压器线圈网格剖分结果

(2) 变压器线圈传热分析

变压器内部热量传递包括热传导、热对流和热辐射。

1) 热传导。热传导是介质内部无宏观运动时的传递现象,只要介质内部存在温度梯度,热传导就会发生。

$$q_f = -\lambda A \frac{\partial T_w}{\partial x} \quad (1)$$

式中, q_f 为热传导在单位时间内通过该截面的热量; λ 为介质导热率; A 为截面积; T_w 为截面温度。

2) 热对流。热对流发生在流体内部及流体与固体接触面之间。当存在温度梯度时,流体微粒因密度差异发生相对位移,实现热量传递,热对流一般采用牛顿冷却方程描述为

$$q_s = hA(T_w - T_f) \quad (2)$$

式中, q_s 为热对流在单位时间内通过截面的热量; h 为对流换热系数; T_f 为流体温度。

3) 热辐射。物体温度高于绝对零度,则会向外发出辐射能。热辐射为

$$q_n = \varepsilon_{w1} \sigma A F_{1-2} (T_{w1}^4 - T_{w2}^4) \quad (3)$$

式中, q_n 为热辐射在单位时间内通过该截面的热量; ε_{w1} 为壁面1辐射系数; σ 为Stefan-Boltzmann常数; T_{w1} 、 T_{w2} 分别为发生热辐射的2个壁面温度; F_{1-2} 为2个壁面夹角系数。

(3) 温度场仿真计算

1) 自然风冷情况下变压器温度场分布。热点分布在高压线圈内,温升为107 K,高压线圈比低压温度高约30 K,主要是因为绕组热点出现在靠近变压器几何中心侧,其散热方式包括辐射和对流散热,但辐射效果较差,起主要散热作用的是其与空气的对流换热,由于气道狭窄,空气对流散热量低。因为距离其他绕组近,空间较小散热较差,绕组温度分布如图4所示。

低压绕组热点出现在靠近变压器低压线圈两端,因为低压线圈采用铜箔绕制,电流密度分布趋于线圈边缘,热点温度最高为400 K。高压绕组温度分布与低压绕组温度分布类似,热点出现在绕组内侧。

2) 风冷情况下变压器温度场分布。高温区域分布在线圈上部,主要是因为风机启动后,热空气向上流动,由于空气动力粘度随温度升高而增大,所

以热空气上升的同时,换热层越来越厚,导致局部换热系数随高度增加而减小,导致线圈上半部比下半部温度高。绕组温度分布如图5所示。

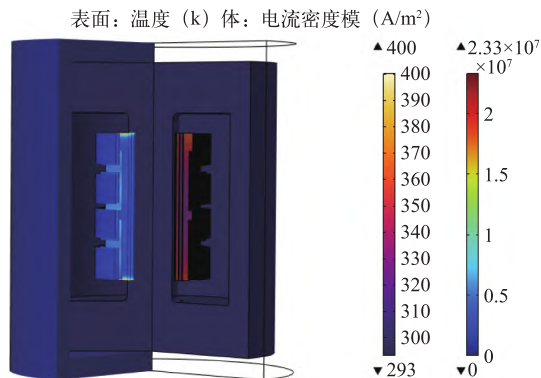


图4 绕组温度分布

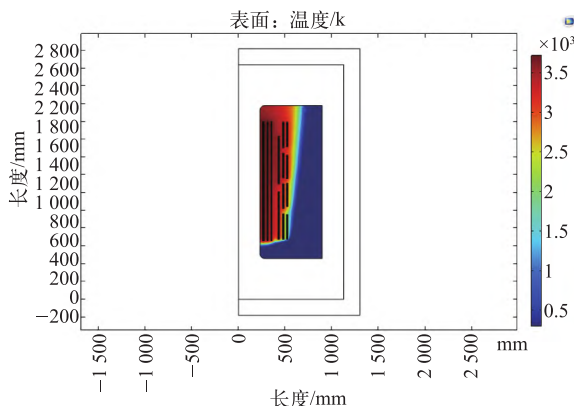


图5 绕组温度分布

4. 机舱变的散热设计

针对机舱变的特殊使用环境。变压器的设计温升至关重要。

机舱运行环境温度为 $-40 \sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$,由于机舱尺及重量限制,变压器多采用铝材,因此变压器不带外壳,采用强迫空气冷却,底部配置冷却风扇,且需根据绕组位置、风扇的吹风角度等调整冷却风扇的倾斜角度,确保冷空气能最大限度地进入绕组内部及高、低压绕组之间。同时绕组相间也要安装冷却风扇。冷却风扇采用离心式,扇壳体防护等级IP66,以防止风沙(沙隔荒地区)将风扇堵塞。冷却风扇的电源线并联,端子安装于接线盒内,接线端子采用PT式直插端子。每个冷却风扇配置常闭热敏开关,保护电动机,防止风扇过热烧毁。变压器冷却风扇的启动温度为任意一相绕组温度超过 $90\text{ }^{\circ}\text{C}$,冷却风扇的停止温度为三相绕组温度

均小于 70℃，关保护电机，防止风扇过热烧毁。变压器冷却风扇的启动温度为任意一相绕组温度超过90℃，冷却风扇的停止温度为三相绕组温度均小于70℃。

5. 机舱变的抗震设计

风电机组运行过程中，机舱时刻都在振动，特别是机组偏航迎风和制动过程中振动很大，因此在变压器结构设计时，需考虑振动的影响。

1) 旁螺杆、穿心螺杆等紧固件要考虑防松措施，采用双防松螺母、防松垫圈等的使用。

2) 垫块压钉采用碟簧加防松螺母结构，使得绕组在轴向方向具有良好的压紧力，且不易松动。

3) 变压器两侧安装斜拉紧装置（如图6所示），与机舱框架连接，变压器与框架连成一体。铁心与底座之间增加硅胶板，形成弹性缓冲结构。

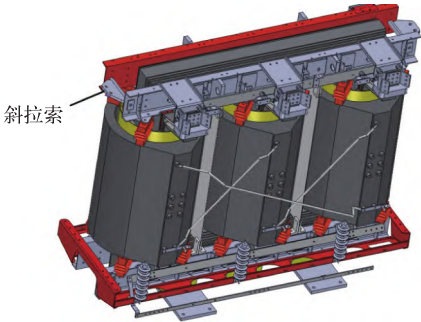


图6 拉索固定示意图

4) 进行严格的振动测试以满足实际使用要求，具体试验项目及试验数据见表1。

结束语

大容量风力发电塔筒内置变压器运行维护成本较高，因此在方案设计阶段，可根据成本、维护便捷性、运行环境、负荷方式情况等，分别从抗负荷冲击设计、抗过电压设计、温升设计、散热设计、抗振设计等几方面提出了设计注意事项，以供制造厂设计人员参考，提高变压器运行的经济安全可靠

表1 振动试验项目

序号	试验项目	试验条件
1	首次共振点扫频试验	分别对X、Y、Z进行首次共振点扫频试验。频率 0.5~120 Hz，加速度 0.75~3 m/s ² ，试验时间为每向8 h
2	扫频耐久试验	分别对X、Y、Z进行首次共振点扫频试验。频率 0.5~120 Hz，加速度 0.75~3 m/s ² ，试验时间为每向8 h
3	极限试验	分别对X、Y、Z进行极限试验 X方向0.6/1.2 Hz，加速度1/4.16 (m/s ²)，X方向2 Hz加速度4 (m/s ²)；Z方向2 Hz加速度4.75 (m/s ²)
4	运输冲击试验（带）	分别对X、Y、Z向进行运输冲击试验，±X冲击峰值3 g，波形半正弦波，脉宽30 ms，冲击次数正负方向各冲击3次；±Y/±Z冲击峰值2 g，波形半正弦波，脉宽30 ms，冲击次数正负方向各冲击3次
5	末次共振点扫频	分别对X、Y、Z向进行末次共振点扫频试验 频率为0.5~1 Hz，位移 50 mm，扫频速率1 (oct/min)，容差为±3 dB，扫频次数为1次 频率为1~120 Hz，加速度为1 m/s ² ，扫频速率1 (oct/min)，容差为±3 dB，扫频次数为1

性。EA

(收稿日期：2025-06-23)

参考文献

[1] 崔丽君. 特种变压器理论与设计[M]. 北京：科学技术文献出版社，1995.

[2] 谢毓城. 电力变压器手册[M]. 北京：机械工业出版社，1998.

[3] 蔡胜伟. 电力变压器技术[M]. 北京：中国电力出版社，2020.

[4] 王兴旺. 基于有限元法的变压器铁芯振动研究[D]. 南昌：南昌大学，2020.

[5] 郭振岩. 中国变压器行业现状及应对措施[J]. 变压2012, 49(3): 43-47.

[6] 王乐. 变压器器身压紧结构与工艺的改进研究[D]. 杭州：浙江工业大学，2014.