

低温型风电机组研究初探

文 | 王清波, 赵伟

我国风能资源丰富的地区主要集中在北方及东南沿海地区。同时,我国极端低温天气也主要分布在北方,黄河以北大部分地区在 - 25 到 - 30 之间。东北、内蒙古中东部、新疆北部以及内蒙古西部的部分地区在 - 30 到 - 35 之间,北方局部地区能达到 - 35 到 - 40 ,少数地区极端低温会低于 - 40 以下,且冬季时间漫长,低温持续时间可达4个月 - 6个月。我国记录的最低气温 - 52.3 出现在黑龙江的漠河地区。而黄河、秦岭至西藏以南地区的极端低温均高于 - 15 ,对风电场没有影响,常温型风电机组就能满足需要。

常温型风电机组的生存温度一般设计为 - 20 到 50 ,运行温度为 - 10 到50 ,显然常温型风电机组不适合在高寒地区运行。目前运行在低温风电场的风电机组,仅仅是在常温型机组的基础上进行了改正,并不是真正意义上的低温型机组,为此有必要开发低温型风电机组。

低温对风电机组的载荷、控制、机械结构以及电气系统均有一定影响,同时低温环境对风电机组的安装、运行和维护也提出了新的要求。

低温对风电机组的影响及应对策略

一、空气密度和粘度

空气密度是影响风电机组出力的一个重要因素,常温型风电机组的设计计算用的是标准空气密度,即标准大气压下海平面的空气密度,大小为1.225kg/m³。但是对于低温风电场,其空气密度很可能大于标准空气密度,因此,设计低温型风电机组必须用现场的空气密度或者更大。

我国东部地区的空气密度普遍大于西部地区,长江中下游以北的东部地区空气密度大于1.20 kg/m³,最大值出现在黑龙江地区,空气密度可达1.28 kg/m³,也是我国空气密度最大的地区之一。青藏高原的空气密度最小,基本小于1.0 kg/m³,最小值只有0.73kg/m³。新疆北部、华南地区介于1.15 kg/m³ - 1.20 kg/m³之间,内蒙古中东部地区在1.15 kg/m³ - 1.25kg/m³之间,而中西部地区介于1.0

5kg/m³ - 1.15 kg/m³之间。西北其余大部分地区空气密度均低于1.10 kg/m³。

对于特定场地环境条件下的空气密度可由如下公式计算:

$$\rho_{10min} = \frac{B_{10min}}{RT_{10min}} \quad (1)$$

其中 ρ_{10min} 为计算出的10min平均空气密度(kg/m³), B_{10min} 为特定海拔高度下测量的1min平均气压(Pa), T_{10min} 为测量的10min绝对温度(K), R 为气体常数, $R=287.05J/(kg \cdot K)$ 。

风电机组的输出功率与空气密度成正比。在低温天气下,空气密度增大,风电机组在同风速下的输出功率增大,机组的载荷也会增大,容易发生过功率、过负荷的情况,从而需要对控制系统进行调整。不同温度下的空气密度和粘度见表1。

温度对液体的粘度影响较大,而粘度与压强几乎无关。对于气体,温度降低时气体分子运动减慢,由于气体的粘性切应力主要来自流体层之间分子的动量交换,所以粘性降低。在温度 $T < 2000$ 开时,气体粘度可用萨特兰公式计算:

$$\mu = \mu_0 \frac{T_0 + C}{T + C} \left(\frac{T}{T_0} \right)^{3/2} \quad (2)$$

式中 T_0 和 μ_0 为参考温度及相应粘度, C 为与气体种类有关的常数,标准气体 C 取120K。

因此,对于特定的风电场,对风电机组进行设计计算

表1 不同温度下的空气密度和粘度

温度 [°C]	空气密度 [kg/m ³]	空气粘度 [× 10 ⁻⁵ kg/ms]
-40	1.514	1.524
-30	1.452	1.579
0	1.292	1.736
+5	1.269	1.762
+40	1.127	1.934
+50	1.092	1.982

时，一定要对空气密度和粘度进行修正。

二、叶片

低温条件下，特别是环境温度低于 -20℃ 时，风速达到或超过风电机组额定风速之后，风电机组会发生无规律、不可预测的叶片振动现象，严重时会造成机组停机，影响机组正常发电，同时也可能导致叶片产生裂纹，直至失效。

国内外专家通过大量的计算、试验对比分析得出：对于失速型风电机组，叶片摆振方向的振动主要是由于叶片失速后气动阻尼变为负值，结构阻尼下降所致。对于变速变桨型风电机组，在风速由高突然降低时，也会存在类似的振动，同时，叶片的振动还跟叶片翼型特性，叶片的布局，叶片的结构特性等有关。低温会使复合材料结构阻尼下降。因此，选用合适的叶片材料、增加叶片结构阻尼，改变叶片的气动阻尼以及在叶片内部加阻尼器，都可以抑制叶片的振动。

当叶片结冰时会降低其升力增加阻力，导致输出功率降低，计算降低的输出功率需要考虑风速、结冰周期和数量、温度等影响。低温时输出功率可表示为：

$$E_T = E_0 \left(1 - \int_{-\infty}^T f(t) dt \right) \quad (3)$$

其中 E_0 为常温下的输出功率； T 是风电机组的低温限制温度； $f(t)$ 是温度的概率密度分布函数。

现实中许多参数是难以获得的，因此计算低温时输出功率变得非常困难。初始计算可以参考表2进行。

三、结构与材料

结构强度设计应考虑低温引起的风电机组载荷和结构承载能力的变化，应通过计算和试验来证明低温下结构的可靠性，对半延展性材料可通过断裂力学的方法进行强度验证。对于金属材料结构，其材料应有足够的韧性，要处理好低温下材料疲劳缺口引起的应力集中问题，提高主要

部件的铸造等级，以便提高低温下材料的冲击韧性并降低铸件、焊缝的缺陷。

低温下焊缝对结构的疲劳强度至关重要，焊缝的抗疲劳能力主要取决于焊接质量和焊缝型式，低温环境，焊缝应采取必要的防止低温脆性断裂技术，避免应力集中，同时加强无损检测，定期检查等措施，保障设备的安全。非金属材料结构的设计需要注意材料的膨胀系数，避免产生内应力和裂纹。

四、液压和润滑系统

低温下，液压油和润滑油脂的粘度会大大增加，风电机组在长期停运重新启动时，如果润滑油没有充分预热，其流动性就会变差，不能很好的润滑轴承，导致过载和点蚀。应考虑不同温度下油脂对轴承摩擦力的变化。

五、加热系统

低温下，除了选择抗低温的材料之外，在极端低温下，还需要增加加热系统，风电机组可采用机舱整体加热防护，使机舱内的温度满足风电机组机舱内部元件的正常使用。加热系统应具备过热保护功能、加热均匀。同时需要计算加热功率，适当布置加热器，保证加热部件具有适合的温度和温度上升速率。加热系统须保证机组各元件的正常使用。

六、电气系统

电气元件也要满足低温型风电机组生存温度要求，各子系统在工作之前，须达到其允许的运行温度范围。电气柜内部各种材料应具备阻燃能力，同时计算电气柜内加热系统的功率，配置适当的密封和保护罩来保障内部温度的稳定性。发电机和变频器启动前也应该进行充分预热，以保证其正常使用，各电气元件不仅要满足低温要求，还需要满足设计寿命要求。

七、安全系统

安全系统除了满足常温型风电机组的安全要求外，还需要增加一些低温条件的保护功能，由于采用了低温加热系统，控制系统须对各系统的温度进行监测，以保证各系统内部温度满足各自运行温度。安全系统也应考虑加热装置和温度测量可能发生的故障，配有机舱加热器的低温型机组，应在机舱内设置火灾报警装置。

八、安装、运行和维护

低温环境下进行机组的安装，最重要的是保证人员安全，工具和设备的使用应符合相关规定，指明安装工作温度，紧固件须根据现场温度实际情况进行安装。运行手册中

表2 结冰频率对应功率损失

结冰频率 (天/年)	年功率损失
< 1	可忽略
1-10	很小
10-30	5% - 15%
30-60	15% - 25%
> 60	> 25%

应规定机组启动的条件，维护手册中应增加低温环境下风电机组的调试、运行、检查和维修程序，考虑设备维护时需要的环境温度，国内外规范推荐风电机组外部维护工作一般在环境温度不低于 - 25 下进行，内部维护工作一般在环境温度不低于 - 30 下进行。低温环境机组结冰更加严重，机组的损坏风险加大，应规定结冰停机条件，定期检查。风电场内还应设置落冰警示标志，保障人员安全。

载荷计算

一、低温条件定义

如果某风电场多年（至少10年）的温度观测结果表明，该风电场平均每年低于 - 20 的天数大于9天，则该风电场定义为低温型风电场，该风电场的风电机组就应该考虑使用低温型机组。如果满足9天的要求，且这9天中每天低于 - 20 的时间大于等于1h，就应该使用低温型风电机组。通用低温型环境条件如表3。

二、低温载荷工况描述

低温风电场每个载荷工况须指明温度条件，具体工况请看表4，值得注意的是1.8工况，当设计的平均温度大于 0 时，需用0 对应的空气密度和粘度进行载荷计算，如果结冰工况更加严重，应计算9.1工况。

三、低温型风电机组载荷计算

表5给出了东方电气设计的一款2.5MW永磁直驱风电

机组 - DF110 - 2500、90m塔架常温和低温基础载荷，塔架基础坐标系如图1，该风电机组的叶片锥角设为 - 3°、轮毂仰角设为5°，采用时代新材TMT53.8m的叶片，风轮直径为110m、轮毂高度为90m，适用于GL A风电场。

从表5数据看出：该机组低温型塔底合力矩增加了3.36%，主要原因是低温环境空气密度增大，而作用的风轮上的推力跟空气密度成正比，因此推力也增大，表5中也可以看出Fx增大了5.63%，塔底合力矩自然也会随着增大，载荷最大工况发生的情况是一年一遇阵风和断网，使用的是最低运行温度对应的空气密度1.452 kg/m³，比常温型标准空气密度1.225 kg/m³增加了18.5%，塔基极限载荷没有按比例增加，图2的塔基等效疲劳载荷（S - N曲线反斜率m=4）最大也只增加了5.3%，主要是因为优化了控制算法。

表3 通用低温环境条件的环境温度参数

运行温度范围	-30 —40
生存温度范围	-40 — 50
最低生存温度	-40
最低运行温度	-30
平均温度	5
最高运行温度	40
最高生存温度	50

表4 低温风电场载荷工况描述

温度	GL2010	GL2003	IEC-2005
平均温度	1.1_f,1.3,1.6,1.7,2.1_f, 2.2_f,3.1,4.1,6.1,6.2, 6.3,6.4,8.2,9.2_f,9.4_f, 9.5_eq,9.6_eq,9.7_eq	1.2,1.3,1.6,1.7,1.12, 1.13,2.3,3.1,4.1,6.1, 6.2,6.3,6.4,8.2,8.3, 1.1_eq,1.12_eq,6.0_eq	1.2,1.3,1.4,1.5, 2.4,3.1,4.1,6.1, 6.2,6.3,6.4
平均温度 <= 0	1.8,9.1	1.10,6.5	
最低生存温度	7.1,9.8	6.0,6.6,7.1	7.1,8.2
最低生存温度或者最低运行温度	1.1_e,1.4,1.5,2.1_e, 2.2_e,3.2,4.2,5.1, 9.2_e,9.3_e,9.4_e	1.0,1.1,1.4,1.5, 1.11,2.1,2.2,3.2, 3.3,4.2,5.1	1.1,2.1,2.2,2.3, 3.2,3.3,4.2,5.1
最低生存温度或制造商指定	8.1	8.1	8.1

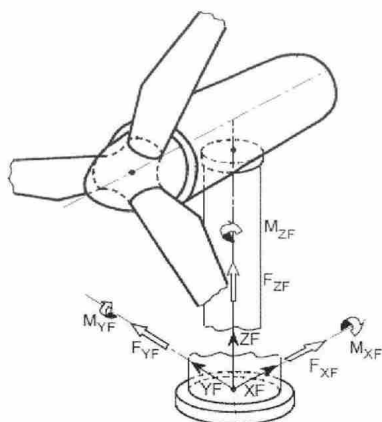


图1 塔架坐标系

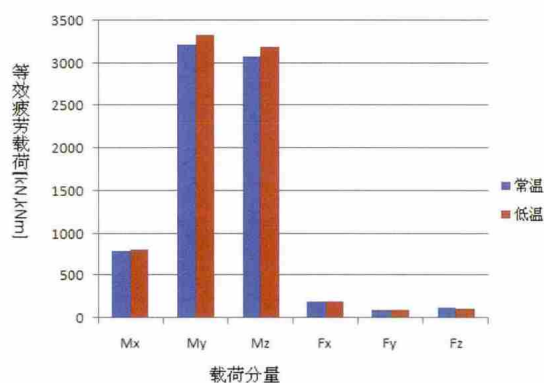


图2 塔底等效疲劳载荷 (m=4)

表5 同款机型常温与低温塔底载荷对比

		常温载荷	低温载荷	增长率
Mx	Max	58799	53607	-8.83%
Mx	Min	-58280	-51913	-10.92%
My	Max	82750	85146	2.90%
My	Min	-93989	-97156	3.37%
Mxy	Max	94004	97166	3.36%
Mxy	Min	2.51	5.6	123.11%
Mz	Max	4156.6	6110.3	47.00%
Mz	Min	-6530	-8375.6	28.26%
Fx	Max	1012	1015.6	0.36%
Fx	Min	-955.4	-1009.2	5.63%
Fy	Max	772.9	623	-19.39%
Fy	Min	-753.5	-627	-16.79%
Fxy	Max	1012.5	1047.5	3.46%
Fxy	Min	0.01	0.01	0.00%
Fz	Max	-4089.5	-3997.9	-2.24%
Fz	Min	-6077.7	-5978.6	-1.63%

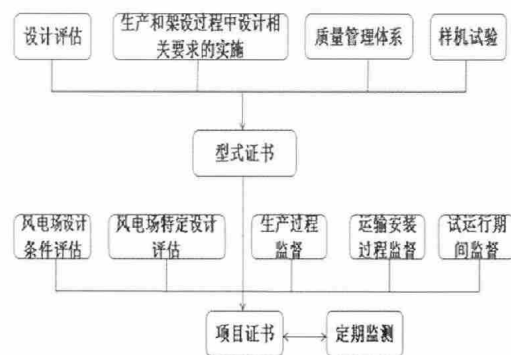


图3 认证流程图

低温型风电机组的认证

低温型风电机组的认证过程与常温型机组无异，只是在常温型认证的基础上增加了相应的低温要求。具体型式认证和项目认证参看图3。

低温型风电机组的认证需要总体说明机组的温度范围以及机组所用到的温度定义和详细描述，机组各零部件的低温性能，加热系统的设计计算和布置说明，机组的冷启动过程描述，环境温度超过运行温度范围时的温度要求，与低温相关的安全策略和安全系统的说明。其型式认证和项目认证较常温型机组认证，主要多了结冰自动探测器评估和加热系统评估。

结语

我国对低温型风电机组的认识和研究还不够深入，到目前为止，国产低温型风电机组仅仅是在常温型风电机组上进行了改正，比如，使用低温材料，采取加热保护和叶片结冰探测器等。为使风电机组满足低温条件下运行的需要，风电行业的专家和工程师们还需继续努力，提高低温机组性能，积累运行经验，提供低温解决方案等，为低温型风电机组的研究做出新的贡献。✘

(作者单位：东方电机有限公司)