

研究探讨

风力发电机转子轴的轻量化设计研究

张里洋

(电机基础技术部,陕西 西安 710016)

摘要 风力发电机的轻量化设计是目前风能领域科研重点课题。轻量化设计的重要性也被美国能源部以拨款资助研发项目的动作得以确定。本文展示一个风力发电机的轻量化设计,通过研究优化设计方法,讨论了2 MW级风力发电机转子轴的轻量化设计问题。应用优化设计、有限元分析(FEA)和实验设计(DOE)推导出基础结构的优化结构和参数变量,并且利用这些变量执行转子轴的尺寸优化。通过比较现有设计与优化设计的最大等效应力和最大重量来验证结果。结果表明,基础结构的重量可减少约23%。

关键词 轻量化设计 转子轴 风力发电机 优化设计 有限元分析(FEA) 实验设计(DOE)

0 引言

作为清洁能源的代表,风力发电正在引起全世界的关注。以欧洲区域为例,不仅在陆地上风力发电设施的规模逐年增加,而且在欧洲的北海、爱尔兰海、波罗的海以及大西洋海域,风力更强、更稳定,更多的海上风力发电机也刷新年度新增容量的记录。

从经济和环境的观点来看,风力发电机的发电功率在增加的同时,发电机的重量也在增加,因此需要增加发电机的功率密度和转矩密度(功率/转矩除以整个系统的重量或体积或面积)。除了从经济利用率上考虑,还涉及在海上风电建设时的船舶搭载运输方式,这里对紧凑化和轻量化的设计提出了要求,以提供更小体积、更轻重量的设备便于海上运输与安装;而广泛采用的浮体式海上风电支撑体系结构,又再次对轻量化设计提出更严峻的挑战,原因不在于水下的浮力难以承重,而在于惯性荷载的存在,海上波浪导致整体海上风电系统设施的摇动,而惯性荷载又与浮体式风电设施的重量相关。(如下图1所示)以轻量化设计为对策,减少风力发电机的重量的任务,刻不容缓。

风力发电系统由叶片、主轴、塔架、变速箱、发电机和各种控制器组成,由于寿命必须保证20年以上,只有可靠的产品具备准入市场的竞争力。尤其是转子轴(风力发电机的关键部件之一)必须具有一定的扭转挠性,以便抑制从叶片传递的扭矩振荡;它

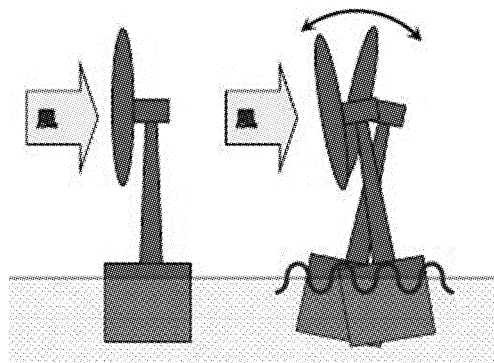


图1 暴风时段海上波浪导致的摇动

也必须具有强大的抗弯曲特性。此外,由于风力发电机系统的扩大,为了提高系统稳定性和最大化发电效率,开发轻量化设计和可靠性设计相关的技术。

为了使风力发电机的转子轴轻量化,大多数风力系统公司使用铸钢制成转子轴。然而,当制造大型铸钢结构时,由于热应力可能发生诸如裂缝的各种缺陷,并且也难以进行变形和质量控制。因此,为了解决这个问题,先进的风力发电系统公司开发了使用锻造技术的转子轴。锻造产品的强度优于铸钢,但缺点是重量很大。本研究为开发2 MW风力发电机转子轴锻造产品,引入优化设计理论,采用有限元分析,设计轻量化的转子轴。

1 风力转子轴设计优化方法

1.1 概述诠释

为了设计轻量化的2 MW风力涡轮机转子轴,

使用实验设计方法,首先通过与形状相关的设计因子进行有限元分析,结果用于重新选择显著影响产品重量的设计因子,以减少有限元分析时间。使用选定的设计因子,使用有限元优化模块进行优化设计。将屈服应力作为约束条件,目标函数是通过设定最小权重来推导出最佳尺寸设计参数。

2 风力转子轴轻量化设计

2.1 风力发电机转子轴的规格和负荷

获得了用于分析和设计研究的转子轴的详细结构、尺寸和结构材料等基本参数后,计算传递到转子轴的扭矩和推力,设计公式参考下面的图2和图3。扭矩和推力计算结果如下:

$$M_z RO_{max} = 132.62x^2 + 2045.3x = 4621.6 [kNm]$$

$$F_z RO_{max} = 18.371x^2 + 217.07x = 507.6 [kN]$$

在这里, $x = 2MW$

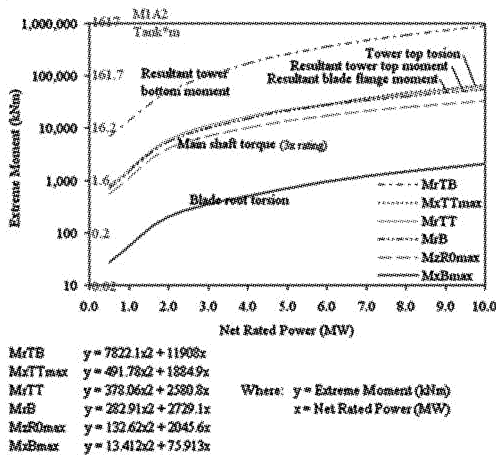


图2 风力发电机分析组的计算极端力矩

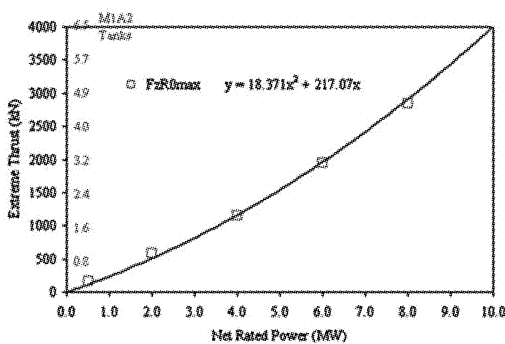


图3 风力发电机分析组的计算极限推力

2.2 转子轴设计因子分析

采用有限元分析和实验设计方法分析轻量化转子轴的设计因子,用实验设计方法进行设计因子之间的敏感性分析。实验设计方法使用田口法。

2.2.1 设计因子选择

通过将空心半径应用于现有的实心轴模型来选

择与形状尺寸相关的设计因子,并且示出了在图4中选择的设计因子。

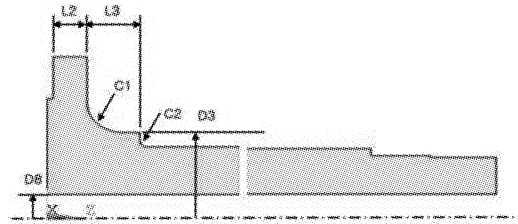


图4 转子轴的截面图和设计参数

2.2.2 实验设计

根据实验设计方法进行有限元分析,对设计因子进行敏感性分析。设计变量是3级因子设计。在每种情况 (Case) 下进行了有限元分析。表1显示了根据实验设计方法的3级因子的设计因子值。

表1 设计参数等级(单位:mm)

设计参数	因子1	因子2	因子3
D3	720	504	936
D8	300	210	390
L2	110	77	143
L3	175	160	227.5
C1	120	84	156
C2	20	10	30

2.2.3 有限元分析

根据实验设计方法进行有限元分析。图5为2MW级空心转子轴的三维模型和加载条件。约束轴承在径向自由度上,假设齿轮部分是完全固定的。将负载分配到轴的前部,以施加负载。使用第2章中的公式计算载荷值。

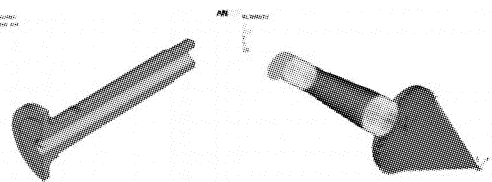


图5 转子轴模型的形状和载荷应用图

2.2.4 设计因子分析的结果

根据实验设计方法进行有限元分析,分析了设计因素的影响。表2显示了分析结果。图6、7、8显示了每个设计因素对应力和体积的影响,即减重的实际指标。在图6、7、8中,可以得出结论,曲线的斜率越大,对设计自身应力和体积的影响越大。因此,空心直径 D_8 对扭转应力的影响最大,而轴承直径

D3 对弯曲应力的影响最大。在扭转和弯曲载荷下,空心直径 D8 对重量的影响最大。

表 2 有限元分析结果

Case	Stress	Volume	Case	Stress	Volume
[MPa]		[m ³]		[MPa]	[m ³]
1	629.7	0.7458	15	440.4	0.7747
2	591.6	0.7485	16	574.2	0.5381
3	779.4	0.7523	17	453.9	0.5422
4	628.8	0.688	18	562.2	0.5473
5	640.8	0.6907	19	327.3	0.9283
6	699.9	0.6945	20	392.4	0.9329
7	771.9	0.5911	21	419.4	0.94
8	789	0.5938	22	370.5	0.7636
9	792.6	0.5976	23	448.8	0.7682
10	392.1	0.8514	24	464.7	0.7753
11	307.8	0.8556	25	461.4	0.6232
12	376.8	0.8607	26	532.8	0.6279
13	480.9	0.7655	27	627.6	0.6349
14	350.7	0.7696			

设计因子优化的基础上,分析了 2MW 风力发电机空心转子轴。在分析中的六个设计因子中,再次选择三个对应应力重量具有高影响的设计因子来提高分析效率。如下图 9 所示

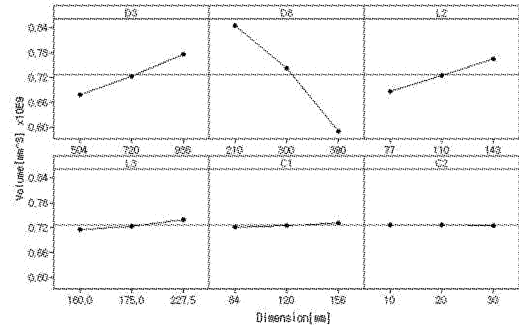


图 8 体积因子效应图

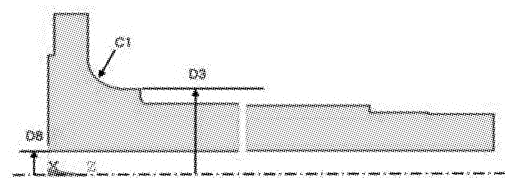


图 9 2MW 级转子轴的优化设计参数

表 3 示出了作为转子轴的设计因子的几何约束边界,包括上限和下限。将目标函数设定为体积,同时不超过为主轴的锻钢的 34CrNiMo6 钢的屈服应力值 630 [MPa]为约束条件。

表 3 优化设计的边界约束条件:单位mm

初始值	设计参数	上限值	下限值
	D8	434	384
	C1	160	140
	D3	937	837

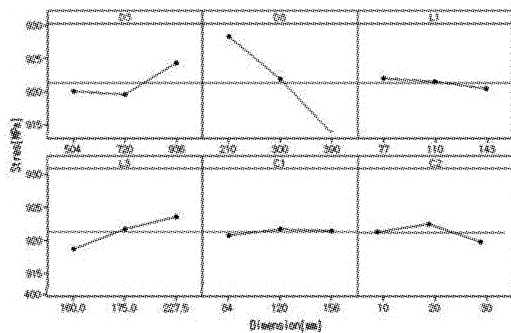


图 6 应力 - 扭矩载荷的因子效应图

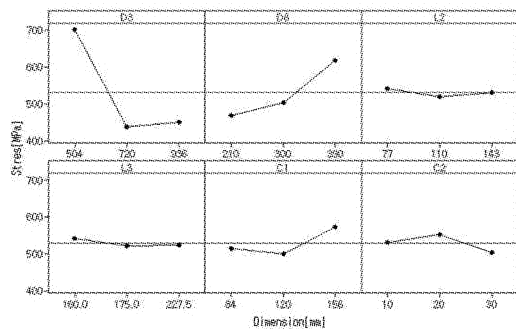


图 7 应力 - 弯曲载荷的因子效应图

2.3 轻质转子轴的优化设计

根据实验设计方法和 ANSYS 模块优化算法,在

对现有的 2MW 级空心转子轴进行结构分析。在图 10 中示出了转子轴的有限元模型,通过施加弯曲载荷和扭转载荷来执行载荷条件以优化分析。



图 10 2MW 级转子轴的有限元模型

2MW 风力发电机空心转子轴扭转和弯曲载荷的设计因素,状态变量(应力)和目标函数(体积)的变化如图 11 - 13 所示。图 11 示出了根据分析时间设计因素的尺寸变化,并且可以看出,在上限值和下限值之间执行最优设计。

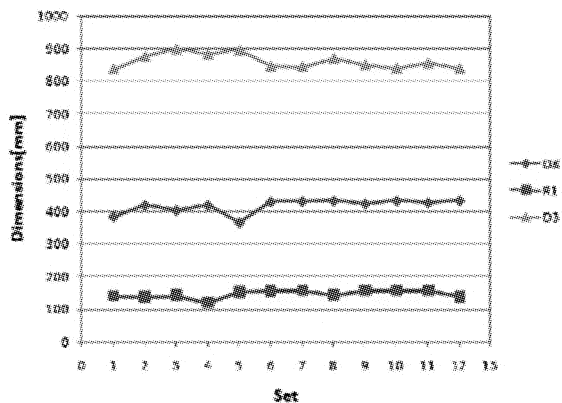


图 11 根据分析时间 - 因子变化设计

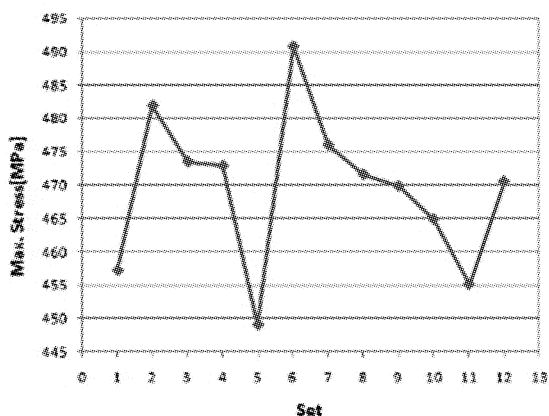


图 12 根据分析时间 - 状态变量变化(应力)

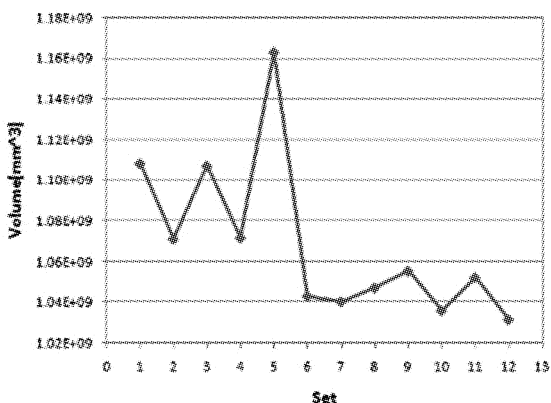


图 13 根据分析时间 - 扭矩负载的目标函数(体积)变化

图 12 显示了应力的变化,综合是一个状态变量,因为进行了最佳设计,屈服应力的变化低于 650 MPa。图 13 显示了体积变化,目标函数,执行最佳设计以及最终步骤中的最小体积。这表明优化表现

良好。

转子轴的最佳设计在表 4 中的结果中,扭矩和弯曲载荷下的最终体积值大致低于实心轴模型(体积:1.395E + 09 m³),减少量为 23% 重量。

表 4 优化设计结果

Notations	Unit	load
Stress	MPa	470.57
D8	mm	433.92
C1	mm	138.38
D3	mm	839.36
VOL	m ³	1.03E + 09

3 结语

在这项研究中,提出了一种 2MW 风力发电机转子轴轻量化设计的有效方法,并使用有限元法作为分析工具解决了这个问题。获得了约 23% 的减重效果。未来,如果将各种优化设计技术应用于设计,可以预期更多的重量减轻。

参考文献

[1] Jeong Young Han, Cheol Hyun Hong, Jin Mo Lee, Ki Bong Han, Hyoung Woo Lee, "A study on lightweight design for wind turbine rotor shaft," Journal of the Korean Society of Marine Engineering, Vol. 38, No. 4 pp. 389 - 395, 2014.

[2] R. Zhu, J. Shen, Y. Liu, Z. Zheng, Z. Fang, Q. Huang, and Z. Zhang, "Analysis and calculation of 3MW wind - turbine main shaft," Advanced Materials Research, vol. 562 - 564, pp. 664 - 667, 2012.

[3] C. W. Lee, S. I. Lee, and J. S. Kim, "A study on the optimal design of mass reduction for engine connecting rod," Proceedings of The Korean Society of Mechanical Engineers Fall Conference, vol. 12, pp. 152 - 157, 2012.

[4] S. W. Han and H. S. Jung, "Weight reducing of aluminum extrusion profiles of a railway - car body based on topology and size optimization," The Korean Society of Mechanical Engineers, vol. A 35, no. 2, pp. 213 - 221, 2011.

公司产品亮相 2019 北京国际风能展

10 月 21 日 - 24 日,公司受邀参加 2019 北京国际风能大会暨展览会。此次大会主题为“风电助力‘十四五’能源高质量发展:绿色、低碳、可持续。

(摘自《电传动时讯》1673 期)