

风电机组柔塔避振控制策略开发与验证

刘红文, 王 毅, 蒋 韬, 万宇宾, 翟大勇, 陆仕信
(中车株洲电力机车研究所有限公司, 湖南 株洲 412001)

摘要: 柔塔技术的应用可以显著提高具有高风切变特性的低风速风电场的年发电量(提高 5%~20% 不等), 对降低风电场的度电成本具有重要意义。但柔塔一阶固有频率与风轮一倍转速频率(1P)有交点, 风电机组可能发生共振现象。为此, 文章以 2MW D121 型风电机组 125 m 高塔为研究对象, 在常规控制策略基础上, 设置转速禁区, 开发了一种柔塔避振控制新策略, 自适应控制并实现转速穿越, 从而避免机组长期运行在共振转速附近, 减小了因共振所导致的异常载荷。通过 Bladed 软件仿真验证了该策略在设计阶段的可行性, 并在样机上完成了测试与验证, 结果表明, 该柔塔避振控制策略可有效解决柔塔风电机组的 1P 共振技术难题。

关键词: 柔塔; 低风速区域; 自适应控制; 共振; 转速禁区

中图分类号: TK83

文献标识码: A

文章编号: 2096-5427(2021)04-0014-05

doi:10.13889/j.issn.2096-5427.2021.04.003

Development and Verification of Control Strategy to Avoid Soft Tower Resonance for Wind Turbine

LIU Hongwen, WANG Dian, JIANG Tao, WAN Yubing, ZHAI Dayong, LU Shixin
(CRRC Zhuzhou Institute Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China)

Abstract: Soft tower can significantly improve annual energy production (can be increased by 5%~20%) for low wind speed wind farm with high wind shear. It is of great significance to reducing the cost of energy. However, because of the intersection of tower first-order natural frequency with rotor speed 1P, there is a risk of resonance. Therefore, a soft tower control algorithm named speed exclusion zone controller is designed relying on the H125 high tower of 2MW D121 type wind turbine, which can realize speed crossing through adaptive control. The strategy can avoid long-term operation of wind turbine in the speed exclusion zone, and reduce abnormal load due to resonance. The feasibility of this control strategy at the design stage was tested by Bladed software and verified on the prototype. The results show that the speed exclusion zone control strategy of soft tower can effectively solve the 1P resonance problem of soft tower wind turbine.

Keywords: soft tower; low wind speed zone; adaptive control; resonance; speed exclusion zone

0 引言

“十三五”期间, 我国风电场开发重心往中东部、南方地区转移, 开发容量达 4 200 万千瓦以上^[1]。中东部地区, 如江苏、安徽及河南等省份, 属于低/超

低风速区域, 风电场年平均风速一般较低。低/超低风速区域具有两个显著特点: (1) 年平均风速低, 典型值在 5.0 ~ 6.0 m/s; (2) 风切变大, 典型值均在 0.2 以上。

回顾风电技术发展历程, 为了提高年发电量, 我国在长叶片风电机组方面进行研发, 取得了很多技术性突破。如 2 MW 风电机组产品, 低风速产品的风轮直径从 110 m 发展到 115 m, 再到 121 m, 至目

收稿日期: 2021-03-03

作者简介: 刘红文(1982—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事风电机组先进控制技术研究工作。

前为止, 已经有 126 m 乃至 130 m 风轮直径的超低风速产品^[2]。风轮直径的增加, 主要从“扫风面积”技术指标提升对风的捕获能力, 从而提高风电机组的年发电量。我国在低风速技术方面的这些技术创新, 持续引领全球低风速风电机组技术革新换代, 促使具有开发价值的风资源的年平均风速下探到 5 m/s 乃至更低, 为我国“弃风限电”背景下的风电行业发展开辟了新的发展方向。而国外, 由于风资源特性差异, 其主要创新集中在高塔架风电机组的技术研究和开发方面, 塔架高度从 120 m 到 160 m 的风电机组均有批量装机, 100 m 以上塔架高度的风电机组安装数量达万台以上。从风资源角度来说, 风速会在垂直距离上有变化, 该变化被称为风切变。风切变越大, 表征风速在该维度上变化越大。可以利用该特性开发不同高度的塔架以提高风场年平均风速。以 85 m 塔架高度为基准, 120 m 塔架高度相对于 85 m 塔架而言, 当 85 m 塔架高度对应风场年平均风速为 5 m/s 时, 风切变在 0.1~0.3 范围内变化, 则 120 m 高度对应风场的年平均风速可增加 0.2~0.6 m/s, 对应年发电量提升约 6.6%~22.7%。因此, 随着风电开发重心的转移, 如何利用和解决高风切变的技术成为我国风电技术最新发展趋势, 高塔架风电机组开发技术成为整机厂家新的技术和产品竞争热点。

目前我国高塔架主要有全钢柔塔(简称“柔塔”)和钢混塔(简称“混塔”)两种技术路线。柔塔技术因对塔筒的设计方法、工艺和质量要求与常规塔筒的一致, 且供应链成熟, 具有成本优势, 因此受到市场青睐。但选择柔塔技术时, 需权衡经济性以及结构强度, 因为塔架的一阶固有频率与风轮的一倍转速频率(1P)有交点, 存在共振点, 会影响机组安全性。为此需要设计独特的控制策略, 从根本上避免机组长期、稳定运行在转速共振区间, 即需设置转速禁区, 该区间的大小一般为转速共振点的 10%^[3]。对于转速禁区的控制方式, 主要有荷兰能源研究中心 ECN^[4]和 E.A.Bossanyi^[5-6]提出的两种不同控制方式, 其中 ECN 所提出的方法为转速-转矩查值法, 并未采用 PID 自适应控制; E.A.Bossanyi 提出在共振转速前后 10% 内设置转速禁区, 在该转速禁区内以一定斜率增加/减小转矩给定值, 实现共振转速穿越, 但并未考虑转速禁区间的能量损失; 文献[7]对荷兰能源研究中心 ECN 和 E.A.Bossanyi 的两种方法进行了定性的对比分析, 并确定以设置转矩函数, 保证负载转矩与驱动转矩之间形成匹配的控制方法, 其也未采用 PID 自

适应控制。本文提出一种新的柔塔控制策略, 其基于 PI 控制的转速禁区控制器, 自适应控制并实现转速穿越, 以避免风电机组运行于共振转速区间, 减小因共振所导致的异常载荷。该策略开发依托 2MW D121 型机组 125 m 柔塔项目, 经过了 Bladed 软件仿真验证, 并在河南内黄高塔样机进行挂机运行, 结果表明本文所采用的全新策略可成功解决柔塔共振技术难题。

1 柔塔机组共振问题分析

风电机组是一个多耦合、非线性系统, 其动态响应可以用考虑多自由度和柔性的数值仿真软件进行模拟。在分析柔塔共振问题时, 可以将塔筒-机舱系统简化成一个单自由度振动系统, 塔筒的运动方程^[8-10]可被描述为

$$M\ddot{q}_i + C\dot{q}_i + Kq_i = F \quad (1)$$

式中: M ——质量矩阵; C ——阻尼矩阵; K ——刚度矩阵; F ——轴向推力; q_i ——位移矩阵; \dot{q}_i ——速度矩阵; \ddot{q}_i ——加速度矩阵。

根据式(1), 塔筒的一阶固有频率为

$$f = \frac{1}{2\pi} \times \sqrt{\frac{K}{M}} \quad (2)$$

由式(2)可知, 塔筒固有频率 f 和刚度 K 成正比, 与质量 M 成反比。随着塔筒高度的增加, 刚度 K 将会减小, 塔筒固有频率也会降低, 在风电机组运行转速区间, 风轮的 1 倍转速频率 1P 将会和塔筒固有频率相交, 引起塔筒共振。如图 1 所示, 对于 125 m 高度塔筒, 其一阶固有频率为 0.175 52 Hz, 与 1P 在 10.6 r/min 处有共振点, 需要采取相应控制策略以避

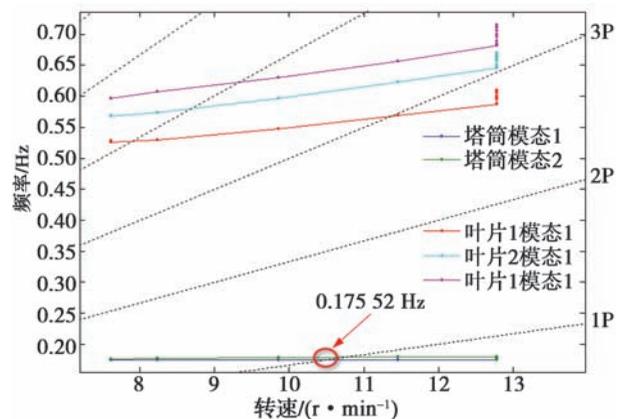


图 1 风电机组整机 Campbell 图(塔架高度为 125 m)
Fig. 1 Campbell diagram of wind turbine
(tower height is 125 m)

免风电机组发生共振。

2 基于 PI 控制的柔塔避振策略

风电机组一般采用最大风能捕获的常规控制策略，其控制的转速-转矩曲线为图 2 中的 A-B-C-D-E-F-G。其中，A-B 与 E-F 两段恒转速区间采用 PID 控制，B-C-D-E 段采用最优风能捕获控制，F-G 段采用变桨控制。而对于采用柔性塔架的风电机组，因其一阶固有频率与 1P 有交点（图 2 中的 O 点），如仍采取常规控制策略，会引起共振。当振动超过结构极限，则会造成塔筒结构损伤，甚至发生倒塌。故需设计一种控制策略，在共振频率附近，形成转速禁区（该区间不能成为风电机组稳定运行区间），即转速-转矩控制曲线变为 A-B-C-H-I-D-E-F-G。

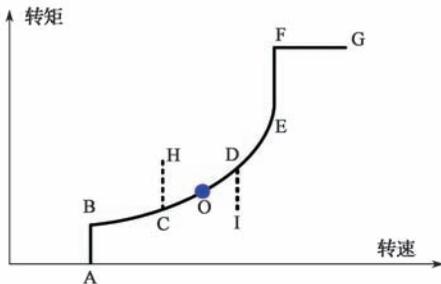


图 2 柔塔控制策略
Fig. 2 Soft tower control strategy

风速波动时，原本在 C-D 段允许稳定运行的转速段，需要通过控制发电机转矩给定来调节发电机转速，让其运行在 C-H 或者 I-D 段。根据振动机理，运行转速在共振点 $\pm 5\%$ 范围以外时，共振可明显消除。针对风电机组柔性塔架，转速禁区段 C-H 及 I-D 一般取共振频率对应转速的 $\pm 10\%$ 。因此，本文在原有转速-转矩控制器基础上，额外增加转速禁区控制器（图 3），通过 PI 控制调节该控制器的输出转矩，并根据风速情况自适应控制，达到转速穿越目的，转速禁区控制逻辑如图 4 所示。

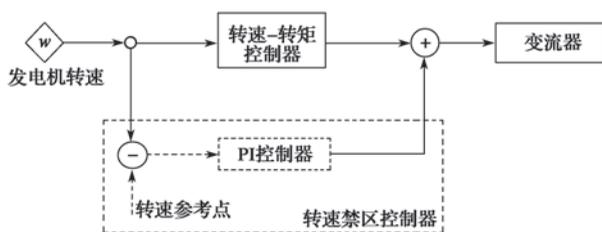


图 3 转速禁区控制框图
Fig. 3 Block diagram of speed exclusion zone control

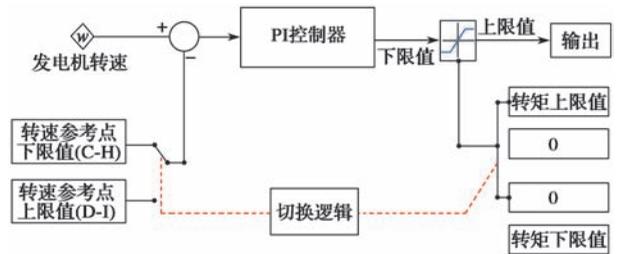


图 4 转速禁区控制逻辑
Fig. 4 Control logic of speed exclusion zone control

图 4 中，转速参考点下限值对应图 2 的 C-H 段（简称“LowerSP”），此时控制器输出限幅值为 [0, 转矩上限值]；转速参考点上限值对应图 2 的 I-D 段（简称“HigherSP”），此时控制器输出限幅值为 [转矩下限值, 0]。两个参考点之间的切换逻辑如下：若转速禁区控制器输出达到转矩上限值时，控制器的转速参考点被设置为 HigherSP；若转矩禁区控制器输出达到转矩下限值时，控制器的转速参考点则被设置为 LowerSP。

综合图 2~ 图 4。风电机组柔塔在全风速段的控制过程详细描述如下：

(1) A-B 区间，常规转矩控制器起作用，转速禁区控制器输出为 0，风电机组维持最低稳定转速运行。

(2) B-C 区间，常规转矩控制器起作用，转速禁区控制器输出为 0，风电机组维持最优 C_p （风能利用率）运行。

(3) C-H 或 I-D 区间，转速禁区控制器输出起主导作用，根据外部风速情况，维持机组在 C-H 段或 I-D 段运行，或根据风速在 C-H 段与 I-D 段间自适应切换，避免机组在转速禁区稳定运行而引起共振。

(4) D-E 区间，常规转矩控制器起作用，转速禁区控制器输出为 0，风电机组维持最优 C_p 运行。

(5) E-F 区间，常规转矩控制器起作用，转速禁区控制器输出为 0，风电机组维持以最高稳定转速运行。

(6) F-G 区间，常规转矩控制器起作用，转速禁区控制器输出为 0，风电机组进行变桨调节。

3 仿真及验证

本文以 2 MW D121 型风电机组 125 m 柔塔为研究对象，其设计约束如下：（1）年平均风速为

6.0 m/s; (2) 湍流强度为 B 类; (3) 风切变为 0.33; (4) 塔架高度 125 m。该样机被安装于河南省内黄县境内。本文首先采用 Bladed 软件仿真验证所提策略的控制逻辑以及载荷适应性, 然后在样机上进行控制逻辑验证与效果验证。

3.1 Bladed 软件仿真

将柔塔避振控制策略编制成外部控制器, 利用 Bladed 软件在转速共振点对应风速附近生成随机湍流风 (图 5), 以模拟风电机组实际运行工况, 验证控制策略的有效性。

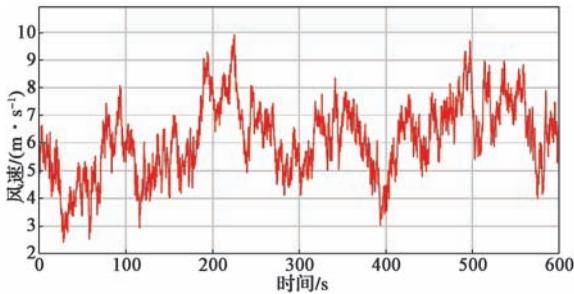


图 5 6 m/s 湍流风
Fig. 5 Turbulence wind with average speed of 6 m/s

有转速禁区控制和无转速禁区控制的仿真结果如图 6 所示。结果表明, 无转速禁区控制的风电机组存在在转速禁区内运行的风险; 而采用转速禁区控制器后, 风电机组按照控制逻辑将转速控制在 LowerSP 和 HigherSP 两个恒转速段, 可根据风速自动切换运行, 避免了在转速禁区内运行的风险。

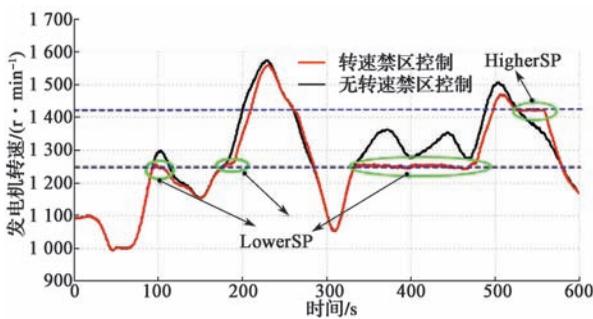


图 6 发电机转速对比
Fig. 6 Comparison of generator speeds

图 7 对比了采用转速禁区控制器前后塔架左右方向的振动加速度情况。结果表明, 柔塔增加转速禁区控制器后, 振动位移明显减小 (红色线), 符合柔塔设计预期要求。

3.2 样机现场验证

对采用柔塔控制策略的柔塔样机进行了现场验

证, 结果分别如图 8 和图 9 所示。图 9 中, 状态 1 对应图 2 的 C-H 段, 状态 3 对应图 2 的 I-D 段, 状态 2 对应图 2 中 C-H 到 I-D 或 I-D 到 C-H 间切换暂态。

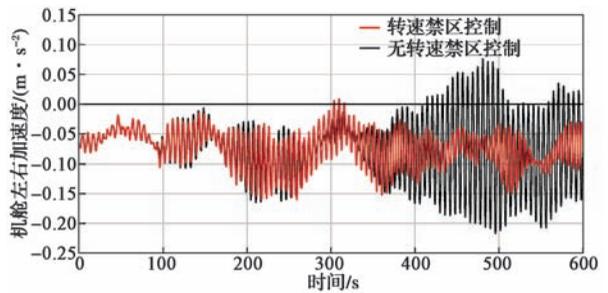


图 7 塔筒振动对比
Fig. 7 Comparison of tower vibration

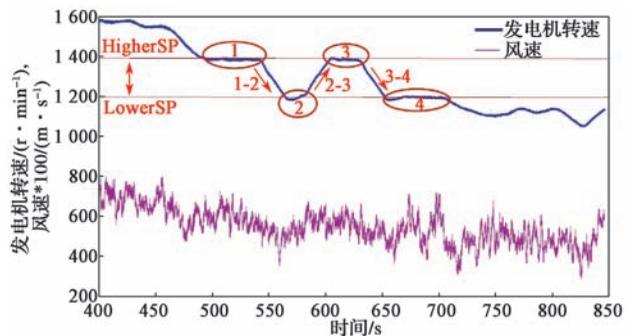


图 8 柔塔样机发电机转速
Fig. 8 Generator speed of the soft tower prototype

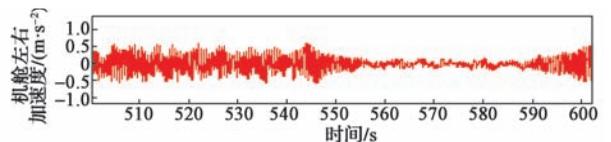
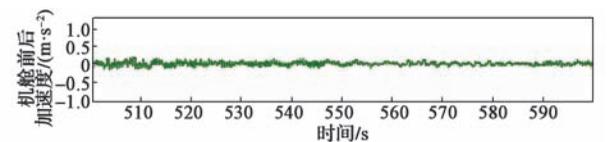
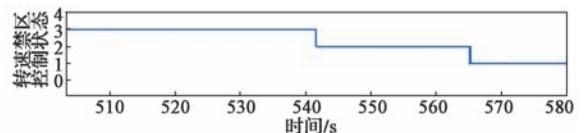


图 9 柔塔样机振动加速度对比
Fig. 9 Acceleration comparison of soft tower prototype

从图 8 可以看出, 采用柔塔控制策略后, 柔塔机组不会在设计转速禁区内形成正常运行点。转速禁区控制器可使机组运行在设计转速禁区最高稳态运行点 HigherSP (图 8 的标识 1 和标识 3) 或者转速禁区最低稳定运行点 LowerSP (图 8 的标识 2 和标识 4), 且可在 1-2, 2-3, 3-4 状态实现自适应平滑切换。

图 9 为柔塔机组在转速禁区内穿越时的机舱前后

及左右方向的振动加速度情况。可以看出,从转速禁区最高稳态运行点切换至转速禁区最低稳定运行点时,机舱前后及左右振动加速度没有明显增加。这说明本文所设计策略对于避免塔筒共振是有效的。

4 结语

针对柔塔因一阶固有频率与风轮转速 1P 存在交点而存在共振风险问题,本文设计了一种基于 PI 控制的转速禁区控制器,并采用自适应控制方法实现了柔塔转速穿越。Bladed 仿真以及样机验证结果表明,采用该控制策略能够避免风电机组在共振转速区间运行,解决了柔塔机组的 1P 共振技术难题。由于转速禁区控制器牵涉到多个控制参数之间的匹配,在特定场址风资源条件下,需根据风频分布情况,对转速禁区的宽度以及控制参数进行针对性优化,这是下一步研究方向。

参考文献:

- [1] 国家能源局. 风电发展“十三五”规划[R/OL].(2016-11-16)[2021-02-20]. http://www.nea.gov.cn/135867633_14804706797341n.pdf.
- [2] 中国可再生能源学会风能专业委员会. 中国风电产业地图 2019[R]. 北京: 中国可再生能源学会风能专业委员会, 2019.
- [3] LICARI J, EKANAYAKE J B, JENKINS N. Investigation of a Speed Exclusion Zone to Prevent Tower Resonance in Variable-Speed Wind Turbines[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2013, 4(4): 977-984.
- [4] YANG J, SONG D R, DONG M, et al. Comparative studies on control systems for a two-blade variable-speed wind turbine with a speed exclusion zone[J]. Energy, 2016,109: 294-309.
- [5] BOSSANYI E A. Wind turbine control for load reduction[J]. Wind Energy, 2003, 6(3): 229-244.
- [6] BOSSANYI E A. The design of closed loop controllers for wind turbines [J]. Wind Energy, 2000, 3(3): 149-163.
- [7] 宋冬然, 杨建, 董密, 等. 两叶片变速风力机组避免塔架共振控制策略 [J]. 振动与冲击, 2015, 34(16): 90-98.
- [8] 单光坤, 王晓东, 姚兴佳, 等. 兆瓦级风力发电机组的稳定性分析 [J]. 太阳能学报, 2008, 29(7):786-791.
- [9] SHAN G K, WANG X D, YAO X J, et al. Stability analysis on MW wind turbine[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2008, 29(7): 786-791.
- [10] BURTON T. 风能技术 [M]. 武鑫, 等译. 北京: 科学出版社, 2007: 404-410.
- [11] 廖明夫, GASCH R, TWICLE J. 风力发电技术 [M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2009: 178-179.

中车株洲所“虚拟轨道智能快运系统关键技术及应用”项目 荣获 2020 年度湖南省技术发明一等奖

2021年7月21日,湖南省科技创新奖励大会在长沙召开,会上颁发了2020年度湖南省科学技术奖励(含光召科技奖),中车株洲电力机车研究所有限公司(简称“中车株洲所”)自主研发的“虚拟轨道智能快运系统关键技术及应用”项目荣获湖南省技术发明一等奖。该项目首创基于虚拟轨道的新型多编组铰接胶轮列车及系统(即“智能轨道快运系统”),通过路径感知、主动导向控制等技术,彻底取消实体轨道,开创了轨道交通全新制式。

智能轨道快运系统自2017年6月在湖南省株洲市全球首次发布以来,获得国内外广泛的关注和高度赞誉,并已在湖南株洲、四川宜宾等城市实现了商业化落地。《控制与信息技术》在2020年第1期以“智能轨道快运系统”专刊形式从技术的角度对该系统进行了全面报道,欢迎感兴趣的读者查阅。

(本刊编辑部)