

# 浅谈风力发电机组的设计流程

赵伟 郑北超 曾庆忠

**摘要** 本文根据多年风力发电机组开发的工作经验,对风力发电机组的开发设计流程进行了总结,明确了概念设计、初步设计、详细设计阶段的具体内容,提出了一套合理的开发设计流程,对风力发电机组的开发设计具有示范意义。

**关键词** 风力发电机组 概念设计 初步设计 详细设计 开发设计流程

## 1 引言

近几年随着国家大力开发风电,风电行业得到了迅猛的发展,风电设备制造商由原来的几家发展到八十多家,配套企业的产品和产能也得到快速发展,行业竞争也日趋激烈。

东方电机2007年开始进入风电行业,首台样机采用联合开发设计的模式,通过与英国 Garrad Hassan 公司和芬兰 The Switch 公司合作,开发了首台 1.5MW 直驱永磁风力发电机组,之后又合作开发 3MW 半直驱风电机组,1.5MW 直驱机组已形成批量生产。2010年走上了自主研发的道路,独立开发了 1.5MW 第二代直驱永磁风力发电机组和 2.5MW 直驱永磁风力发电机组,这两个新产品分别于 2011年12月和2012年5月在乌吉尔和慈溪风场安装并成功投运。2012年独立开发 2.5MW 直驱电励磁风力发电机组。

通过这几年不断的学习、探索和实践,逐步了解并掌握了大型风力发电机组开发设计技术和独特的开发设计流程。风力发电机组的开发是一个系统工程,多学科交叉,牵涉到空气动力学、结构动力学、机械工程学、电气工程等学科,并且相互耦合。每个系统相互制约,相互影响,同时机组又是一个典型的柔性、非线性系统。这些因素都给设计计算工作带来了很大的困难,如何科学有效地组织开发设计工作,有一个合理的开发设计流程就显得特别重要。

## 2 风电机组结构

风电机组是将风能转换为电能的装置,主要由风轮、发电机、机舱和塔架组成(见图1)。风轮的功能相当于水轮机转轮,主要由叶片、轮毂、变桨轴承、变桨驱动及控制系统等构成。风流经叶片后,由叶片将风能转化为机械能,通过变桨系统调节叶片桨距角调节风轮吸收的风功率。发电机转子与风轮直接连接,将风轮传送的机械能转化为电能。机舱包含机架装配、辅助支架装配等部件。机架装配中的偏航系统实现机组的自动对风。辅助支架装配主要安放一些电气柜体和一些子系统,如冷却系统、液压系统、润滑系统、中央监控系统等。

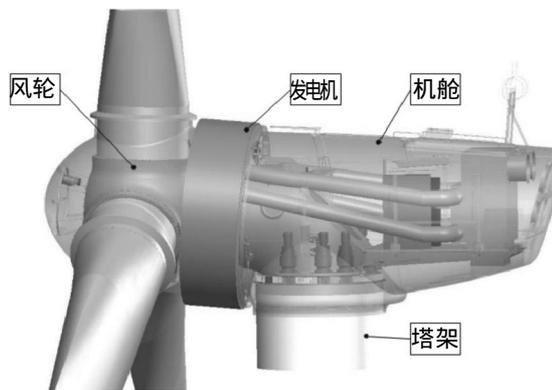


图1 2.5MW 风力发电机组

## 3 风电机组设计流程

风电机组不同于传统的水、火电机组,主要表现为机组运行条件恶劣、交变载荷作用剧烈、可靠性要求高、成本要求低、产品批量大、市场竞争激

来稿时间 2012—05

烈。为满足这些设计条件和机组设计认证、型式认证的需要，新产品开发设计必须遵循相关国际标准，主要为 IEC61400 标准和 GL 规范。通常风力

发电机组的开发设计分为 概念设计、初步设计、详细设计三个阶段，具体内容见图 2。

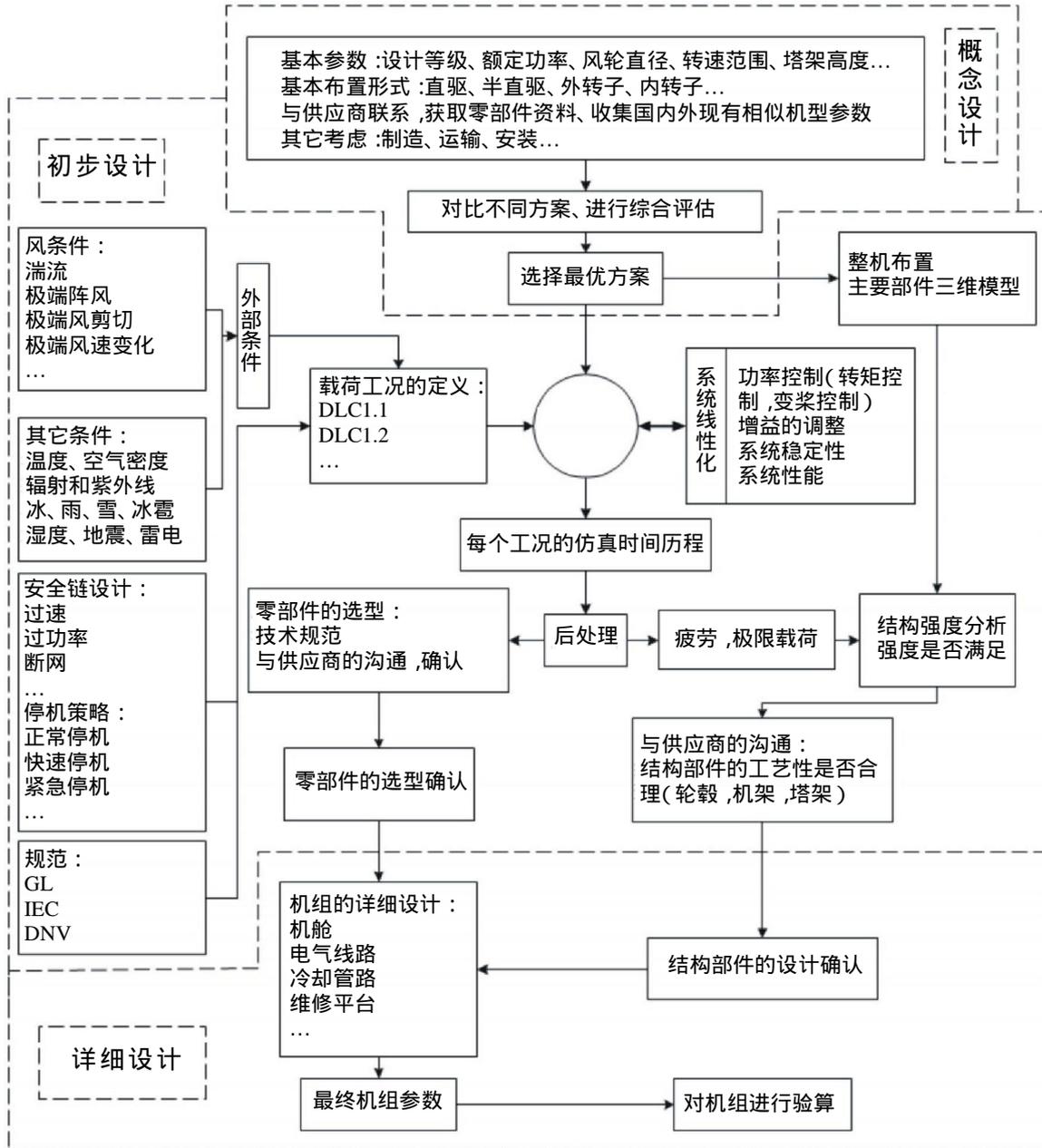


图 2 风力发电机组设计流程

### 3.1 概念设计阶段

概念设计是设计过程的初始阶段，包括确定机组的基本技术类型、主要技术参数、主要零部件、总体方案、结构布置、建立结构模型，其直接决定了新产品的性能和成本。

该阶段要尽可能地收集和分析国内外现有机型资料，以便于提出适合市场需求的产品基本参数。联系主要配套部件的供货商，了解其产品的性能和可靠性情况，索要所需配套部件的技术参数，比如叶片、变桨系统、偏航系统等外购件。由于此

时发电机、轮毂装配、机舱、塔架还处于构思阶段，相关的参数缺乏，这就需要参考以往机型，估计一个大概的参数。该阶段可以选择不同的结构形式、布置和参数，组合为几种方案，通过初步分析的结果，选择最优方案，进入初步设计阶段。

### 3.2 初步设计阶段

初步设计阶段主要是要确定轮毂、发电机、主机架、塔架的主体结构形式，变桨系统、偏航系统的选择，主控控制算法的设计，主要外购件技术规范的编写。包含载荷计算、部件规范的编写和分析工作。

将概念设计的参数输入到整机仿真软件中，建立整机的模型，对机组各方面性能做一个初步的分析。一方面可以通个坎贝尔图(图3)对整机的动态特性进行分析，调节风轮的转速范围；另一方面通过获得的功率曲线(图4)，分析经济性和竞争力。

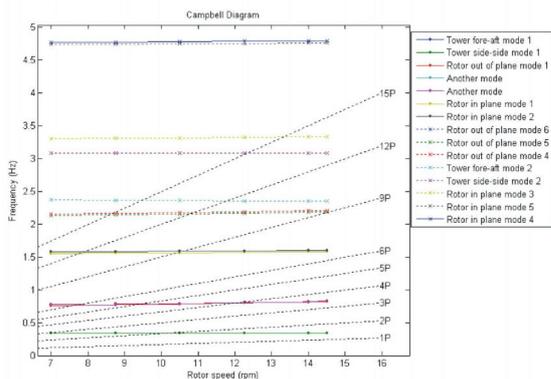


图3 2.5MW 机组坎贝尔图

#### 3.2.1 载荷计算

载荷计算主要是考察机组在现实条件下各个部件的受力情况，为部件受力分析和选型提供依

据。在进行计算时还需要考虑机组的控制系统对载荷的影响。

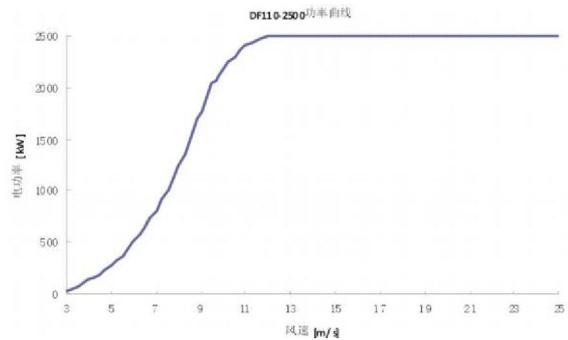


图4 2.5MW 风力发电机组功率曲线

风机控制主要包括两部分：机组的监督控制和正常发电控制。监督控制主要是对机组的安全保护，包括开、停机逻辑、风轮超速、过功率、偏航、解缆等的控制，该部分直接决定机组在极端条件下的载荷情况。正常发电控制主要是指在监督控制范围内，保证在额定功率下追求最佳Cp，在额定功率上对功率的控制，包括扭矩控制和变桨控制，该部分决定机组疲劳载荷的情况。具体可以通过软件的线性化模块，得到整机的线性化模型，即状态空间的A、B、C、D四个矩阵。

$$\dot{x} = Ax + Bu$$

$$y = Cx + Du$$

式中  $u$ ——输出矢量；

$x$ ——系统状态矢量；

A、B、C、D——状态空间矩阵。

选择设计控制器需要的输入  $x$  和输出  $y$ ，利用生成状态空间矩阵就可以建立整机的系统模型，然后通个 Matlab 软件，(如图5)，调整增益值、滤波和

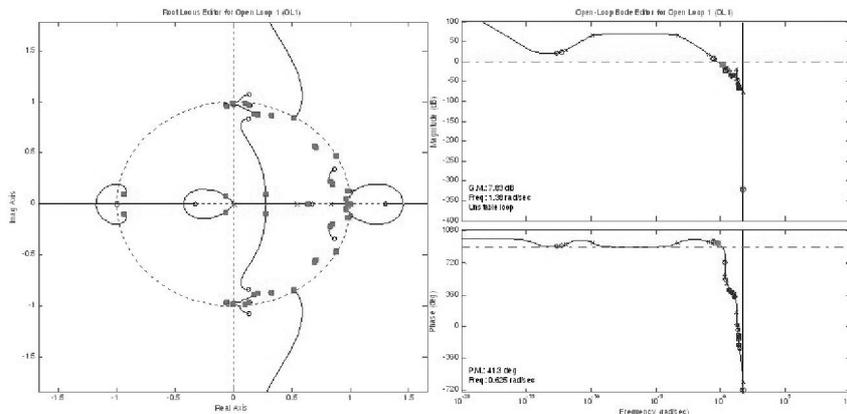


图5 根轨迹及伯德图

陷波器参数,满足系统需要的稳定性和期望的动态特性。在完成上述工作后,需要将机组的控制器生成动态数据链接库DLL文件与整机仿真软件进行通讯,考察机组在不同的外部和内部条件下,整个机组的运行和受载情况。

接下来就需要按照GL、IEC或DNV规范,定义机组在真实运行条件下可能出现的各种风况和机组可能的各种正常发电、故障、停机、启动等各种工况。尽管规范给出了设计时需要考虑的情况,但都是比较粗糙和概括,需要每个公司设计人员进行细化。凡是实际运行中,机组可能出现的情况都必须考虑,实际运行也必须和计算要求吻合,例如计算时考虑的维修风速,就要求实际运行时高于该风速不能进行维修,载荷工况的定义直接影响后续部件设计,既要保证工况考虑的足够安全,同时又不能太保守。具体工况的定义一般都是每个公司的核心,一般不会公布出来。对应于每种工况下的各种风的参数,需要根据机组的设计等级由下表来定义。机组的设计等级就决定了机组所受外部风况。

表 风力发电机组设计等级

参 数					S
$V_{ref}$ (m/s)	50	42.5	37.5	30	制造商 规定
$V_{ave}$ (m/s)	10	8.5	7.5	6	
A( $I_{15}$ )	0.18	0.18	0.18	0.18	
a	2	2	2	2	
B( $I_{15}$ )	0.16	0.16	0.16	0.16	
a	3	3	3	3	

机组的载荷受控制策略的影响比较大,通常是一个交互的过程,在初步控制策略完成后,进行初步载荷计算得出初步载荷结果。通过对结果的评价,决定是否需要对控制系统进行调整、优化,使设计更为合理。

### 3.2.2 部件规范

在进行完载荷计算后,就需要对庞大的计算结果进行处理,提出有用的数据。一方面要对现有参数条件下机组的性能及参数的评价,例如需要考核电机的最大转速,叶尖的变形是否满足要求,另一方面要为部件强度分析提供数据、编写主要零部件采购的技术规范。技术规范包括:主轴承、变桨系

统、偏航系统、叶片、电机等,技术规范中需要写明对该部件的工作环境、接口、功能及技术参数的指定。在部件规范编写完成后,需要提供给供应商,由供应商对所购买的部件进行分析并提供相应的分析报告,该过程中会有大量的沟通工作,包括供应商对规范的理解及对其它数据的要求。通过与供应商的相互沟通与交流,大家会对参数的选取,产品型号达成一致,确认部件的选型。由于轮毂、机架一般为铸件,这时还需要与铸造厂沟通,听取他们的合理建议,改善设计的工艺可行性。

### 3.2.3 部件分析

该部分主要包括对几大结构部件在极限和疲劳工况受载情况下的分析。由于自然条件下风的变化性,使得风力发电机组的受力情况具有很强的交变性,所以对机组在20年运行条件下,各部件的疲劳寿命分析就显得特别重要。具体对于轮毂、机架、塔架、螺栓等部件需要分析的内容,在GL规范中都给出了详细的规定及需要参考的规范。按照规范的要求,基本上就能保证部件的安全性和设计的合理性。

### 3.3 详细设计阶段

在轮毂、机架、塔架、发电机几大部件完成概念设计后,就进入了详细设计阶段,该阶段需要考虑电气线路、冷却管路、维修平台的布置、柜体的安装等工作。主要是进行工程图的绘制,机组维修、调试等文档的编写工作。

### 3.4 厂内试验、调试及现场测试

供应商陆续将主要部件运往工厂进行安装后,需要对重要的部件进行厂内实验和调试,保证现场整个机组调试的成功。试验和调试部件包括:电机、变流器、变桨系统、主控系统,通过试验和调试可以提前发现问题,在厂内解决问题。现场测试是在机组调试完成后,需要对机组整体性能有一个客观的评价,也为机组将来做认证和开拓市场做准备。测试主要包括机组的行为测试,功率曲线测试、载荷测试、噪声测试及机组低电压穿越测试。

## 4 结 论

上述的设计过程只是一个初步的过程,实际整个设计阶段是一个不断的循环过程,通常需要三到

五次循环。在详细设计完成后,需要将机组更为准确的参数用于载荷计算和控制器的设计,在新的载荷出来后又需要对初步设计的部件进行更新,也许原来设计不能满足要求,就需要对初步设计进行调整,再进行载荷计算和控制器的设计,以进入下一流程。

从上面的流程可以看出,概念设计指明机组设计的方向,初步设计是设计的中间过程,详细设计是机组的精细设计。只有综合考虑每个设计阶段的工作,才能设计出优良的风力发电机组。

## 参考文献

- 1 Tony Burton, David Sharpe et al. Wind Energy handbook, John Wiley & Sons, Ltd, England. 2001
- 2 Martin O.L.Hansen. Aerodynamics of wind turbines, Second edition, Earthscan, UK and USA. 2008
- 3 J.F.Manwell,J.G.McGowan,A.L.Rogers. Wind Energy Explained: Theory, Design, Application, John Wiley & Sons, Ltd, England. 2002

## · 信息 ·

# 建设核电强国 :从项目驱动到技术驱动

凭借核电机组已投运装机 12500MW,在建装机 27600MW 的庞大规模,我国“世界核电大国”称号已当之无愧。然而,如何在“大国”基础上发展成为“核电强国”,专家认为,核电技术进步是实现这一目标的关键所在。走过核电发展初期艰难而缓慢的建设历程后,2002 年起,随着秦山二期、岭澳一期等核电项目相继建成投产,我国核电规模不断扩大。这十年间,我国核电也开始了在技术进步和自主品牌建设上大步前进。从跟随到赶超,从“百家争鸣”到统一路线,从项目驱动型到技术驱动型,我国核电正怀着一颗打造强国之心勇敢前行。

在我国核电技术和核电规模加快发展,赶超世界先进国家之时,世界核电却遭遇了集体“刹车”。去年 3 月发生的福岛核事故,一度给核电前景蒙上了一层恐怖的阴影。核电要不要发展,怎么发展?福岛核事故后,我国迅速出台核电“国四条”,并开展全国核设施安全大检查,暂停审批核电项目。经过一系列周密细致的检查,最终得出我国在运及在建民用核设施安全有保障的结论。同时,确定了我国核电发展的基调:安全高效。

在此基础上,2012 年 7 月,《“十二五”国家战略性新兴产业发展规划》出台,为我国核电产业发展指明了方向,即在确保安全的前提下,统筹发展三代核电技术。同时,《规划》还指出,要加强核电安全、核燃料后处理和废物处置等技术研究,开展二代在运核电安全运行技术及延寿技术研发。

此外,《规划》也对核电技术向更先进领域发展提出了要求:实施大型先进压水堆及高温气冷堆核电站科技重大专项,建设示范工程。研发快中子堆等第四代核反应堆和小型堆技术,适时启动示范工程。发展核电装备制造和核燃料产业链。国家核电技术公司总经理盖其庆近期在出席“中国电力主题日”活动时表示,在新的核电发展路线图中,我国核电将从以项目驱动型为主转变为以技术驱动型为主,全面建设核电强国。