

# 风力发电机组

唐建平, 王立鹏

(南车株洲电力机车研究所有限公司, 湖南 株洲 412001)

**摘要:** 介绍了几种恒速恒频风力发电机组和变速恒频风力发电机组及其变流器的拓扑结构与控制技术, 对不同类型的风力发电机组作对比分析, 并对风力发电机组的发展趋势作了一定的展望。

**关键词:** 风力发电机组; 电力电子技术; 恒速恒频; 变速恒频

**中图分类号:** TM315

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1671-8410(2010)03-0033-05

## Wind Turbine Generator System

TANG Jian-ping, WANG Li-peng

(CSR Zhuzhou Electric Locomotive Research Institute Co.,Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China)

**Abstract:** It introduces topologies and control technologies for certain types of CSCF and VSCF wind turbine generator systems as well as their converters. In addition, comparison analysis between different wind turbines is put forward, and the development tendency is also prospected.

**Key words:** wind turbine generator system(WTGS); power electronic technique; constant-speed constant-frequency(CSCF); variable-speed constant-frequency (VSCF)

## 0 引言

近年来, 全球可再生能源利用年增长率达到25%, 可再生能源的利用将以电力行业为主导, 非水力可再生能源的发电比例将扩大两倍。据统计, 2002年可再生能源的消费量约14亿t油当量, 2030年将超过22亿t油当量。风能发电作为除水力发电外技术最成熟的一种可再生能源发电, 其装机容量占整个可再生能源发电装机总容量的绝大部分。但是电力电子器件性能的限制, 给大容量风电机组的研制及应用造成了一定的瓶颈。随着大功率的电力电子器件和能源存储设备的进一步发展, 风力发电在总投资或发电费用上可与常规能源相竞争, 风力发电技术也会得到更大的发展<sup>[1-2]</sup>。

此外, 随着风电场的容量不断增加, 当电网电压发生跌落时, 保证风电机组不脱网运行、维持区域电网的

稳定显得更加重要。随着大功率的电力电子器件及其控制技术的发展, 目前风电机组所面临的低电压穿越问题将能得到很好的解决<sup>[3]</sup>。

风力发电机组按照主传动链结构形式可以分为具有多级升速齿轮箱的双馈式风力发电机组、无升速齿轮箱的直驱式风力发电机组和具有一级升速齿轮箱的半直驱式风力发电机组; 而按照风力发电机组转速调节方式可分为恒速恒频风力发电机组和变速恒频风力发电机组。变速恒频风力发电机组由于具有较高的风能利用效率, 目前已成为风力发电中的主流机型<sup>[4]</sup>。

## 1 恒速恒频风力发电机组

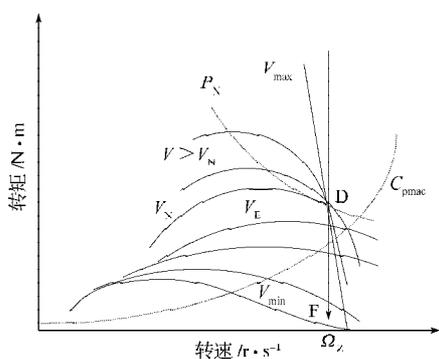
恒速恒频风力发电机组主要分为笼型感应发电机恒速恒频风力发电机组和励磁同步发电机恒速恒频风力发电机组, 具有以下特点: (1) 机组结构简单, 适合在野外环境工作; (2) 由于转速不变, 无法进行最大功率点跟踪控制, 发电效率降低; (3) 当风速快速升高

收稿日期: 2010-03-01

作者简介: 唐建平(1983-)男, 硕士, 工程师, 主要从事风力发电机组整机系统设计开发工作。

时,由于转速不变,风能将通过桨叶传递给主轴、齿轮箱和发电机等部件,产生很大的机械应力,从而引起这些部件疲劳损坏。该类型风力发电机组由于在低风速区域效率低,主要应用于小功率、机组容量低于600 kW的系统<sup>[5]</sup>。

恒速恒频变桨距风力发电机组的基本控制策略如图1所示。



$V$ ——风速;  $V_E$ ——恒速风力发电机组最佳运行点对应的风速;  $V_N$ ——额定风速;  $V_{min}$ ——最小风速;  $V_{max}$ ——最大风速;  $P_N$ ——额定功率;  $C_{pmax}$ ——最佳风能利用系数;  $\Omega_z$ ——恒速风力发电机组的转速

图1 基本恒速恒频变桨距控制策略图

Fig.1 The diagram of basic CSCF pitch-controlled strategy

可控区域内不同风速下气动转矩作为参数与桨距角一起出现,在低于额定风速时,在FD区间内,风力发电机组在某一点运行。当高于额定风速时,控制器调节桨距角来控制功率,使之在额定范围之内,即风力发电机组在D点运行。从图1中可以看出气动转矩是如何经过变化而通过D点的。在变桨失速模式下,所有的抛物线轨道都经过D点,但是转矩会发生变化,原因是,当风速增加时,尖速峰值向右移动。

### 1.1 笼型感应发电机恒速恒频风力发电机组<sup>[6]</sup>

在笼型发电机恒速恒频风力发电机组中,风轮通过多级升速齿轮箱驱动笼型感应发电机,发电机通过双向并联晶闸管和变压器与电网连接,同时一个旁路接触器与晶闸管并排连接在发电机定子绕组与变压器之间,其原理如图2所示。

图2中,双向并联晶闸管连接在发电机与变压器之间。在机组启动过程中,将晶闸管的导通角从0°向180°逐渐打开,直到发电机转速接近同步转速时,晶闸管的导通角完全打开,同时闭合定子接触器将晶闸管短接。当定子接触器闭合后,关断晶闸管的脉冲,风力发电机组处于正常发电状态。其正常发电运行在同步转速以上5%的转差范围内。

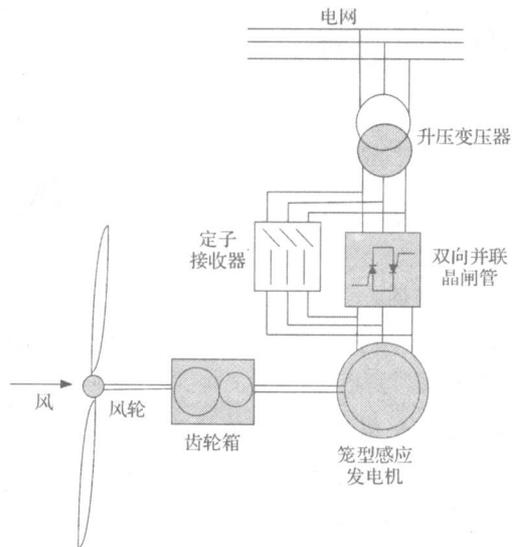


图2 笼型感应发电机恒速恒频风力发电机组  
Fig.2 The CSCF WTGS with caged induction generator

### 1.2 电励磁同步发电机恒速恒频风力发电机组

在电励磁同步发电机恒速恒频风力发电机组中,风轮通过多级升速齿轮箱驱动电励磁同步发电机,发电机通过定子接触器和变压器与电网连接,采用三相半控整流器以并励励磁的方式向同步发电机提供励磁电流,其结构原理如图3所示。

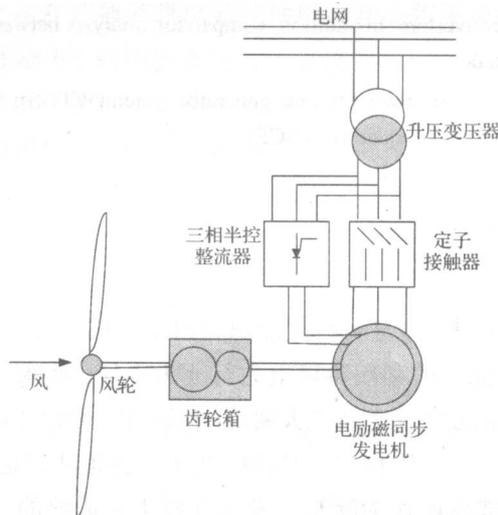


图3 电励磁同步发电机恒速恒频风力发电机组  
Fig.3 The CSCF WTGS with current-excited synchronous generator

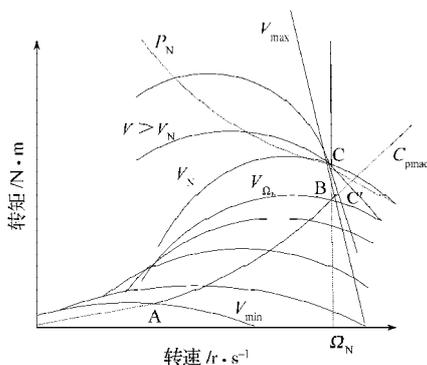
图3中,启动风力发电机组,当发电机转速接近同步转速时,通过控制三相半控整流器的触发脉冲来控制同步发电机励磁电流,从而实现对发电机定子空载电压的控制。当发电机定子空载电压的幅值、相位和频率与电网电压的误差在一定范围内时,闭合定子接触器,使风力发电机组成功并网。在机组正常运行期间,根据电网电压控制晶闸管的整流角,以控制励磁电流的大小,从而调节发电机输出的有功功率和无功功率。

上述两种恒速恒频风力发电机组方案均采用晶闸管作为整流器件,在风力发电机组额定容量一样的情况下,第二种方案中采用的晶闸管容量比第一种方案的小,其容量仅相当于机组额定容量的10%~20%。

## 2 变速恒频风力发电机组

变速恒频风力发电机组由于其转速能随着风速的变化而变化,可以保证机组在低风速区域获得最大的风能利用率,其效率比恒速恒频风力发电机组高得多。目前,变速恒频风力发电机组主要分为双馈异步风力发电机组、永磁直驱风力发电机组和电励磁同步半直驱风力发电机组。目前,双馈异步风力发电机组为变速恒频风力发电机组中的主流机型。

变速恒频变桨距风力发电机组的基本控制策略如图4所示。



$V$ ——风速;  $V_{\Omega_N}$ ——变速风力发电机组额定转速点对应的风速;  $V_N$ ——额定风速;  $V_{min}$ ——最小风速;  $V_{max}$ ——最大风速;  $P_N$ ——额定功率;  $C_{pmax}$ ——最佳风能利用系数;  $\Omega_N$ ——变速风力发电机组的额定转速

图4 基本变速恒频变桨距控制策略图

Fig.4 The diagram of basic VSCF pitch-controlled strategy

风力发电机组在额定风速以下以变速定桨距模式运行;而在超过额定风速时,则以变桨距模式运行。在低风速下,风力发电机组在A点和B点之间沿 $C_{pmax}$ 轨迹运行,在B点,转速达到额定转速 $\Omega_N$ 。因此,当风速从 $V_{\Omega_N}$ 增大到 $V_N$ 时,在BC区间内,转速维持在 $\Omega_N$ 点不变;当风速超过额定风速时,通过调节桨距角以保证风力发电机组在C点运行。当额定功率双曲线和最大功率跟踪抛物线的重合区域出现在转速限值右侧时,C点就会回落到C'点,在这种情况下,运行轨迹就成为AC'曲线<sup>[7]</sup>。

### 2.1 双馈异步变速恒频风力发电机组

在双馈异步风力发电机组中,风轮通过多级升速齿轮箱驱动双馈发电机,发电机定子绕组通过接触器

和变压器与电网连接,转子绕组通过能够四象限运行的变流器和变压器与电网连接<sup>[8]</sup>,其原理如图5所示。

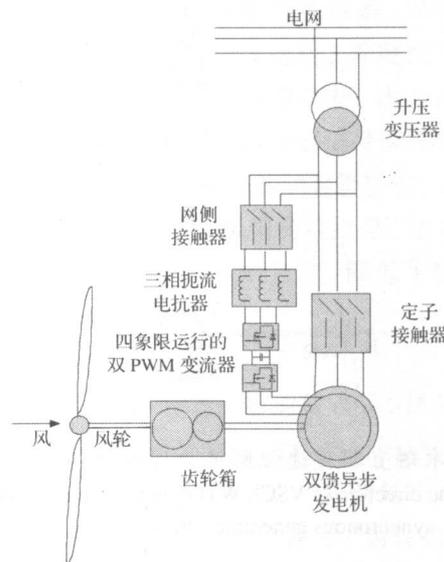


图5 双馈异步变速恒频风力发电机组

Fig.5 The VSCF WTGS with doubly-fed asynchronous generator

图5中,风力发电机组启动后,发电机转速接近同步转速时,根据检测的电网电压,变流器调节发电机转子电流的幅值、频率和相位,以控制发电机定子空载电压。当发电机定子空载电压幅值、相位和频率与电网电压的误差在一定范围内时,闭合定子接触器,机组处于正常发电状态,同时根据风速和电网电压的大小,调节发电机输出的有功功率和无功功率。

三相四象限运行的变流器可以为“交-直-交”双PWM变流器或“交-交”矩阵式变流器。“交-直-交”双PWM变流器是目前应用较广泛的变流器,但其直流环节的滤波电容体积大、寿命较短且开关损耗较大;而“交-交”矩阵式变流器,由直接接于三相电源和三相负载之间的9个开关阵列组成,没有中间直流环节,功率电路简单,可输出幅值、频率、相位和相序均可控的电压。三相四象限运行的变流器谐波含量较小、输入功率因数可控,但是其换流过程不允许2个开关同时开通或关断,控制较复杂。

### 2.2 永磁直驱变速恒频风力发电机组

在永磁直驱风力发电机组中,风轮直接驱动多极低速永磁同步发电机,发电机定子绕组输出的电流通过三相不控整流桥整流为直流,然后通过一个直流升压斩波电路提高电压等级,最后通过三相全控逆变器、扼流电抗器和变压器送入电网,其原理如图6所示。

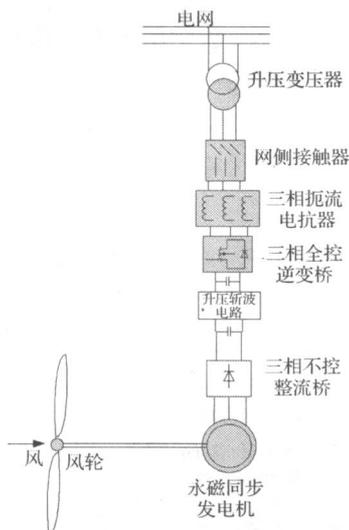


图6 永磁直驱变速恒频风力发电机组(方案一)  
Fig.6 The direct-drive VSCF WTGS with permanent-magnetic synchronous generator (the first scheme)

图6中,风力发电机组启动后,发电机通过三相不控整流桥向低压侧电容器充电;同时通过控制升压斩波电路的占空比调节高压侧电容器电压,当高压侧电容器电压达到工作电压附近时,控制三相全控逆变桥,使机组同步并网。在机组正常运行过程中,根据发电机转速实时控制逆变器输入到电网的功率,保证机组运行在最佳功率点。在机组整个运行过程中,控制升压斩波电路,使高压侧电容器电压维持在工作电压附近<sup>[9]</sup>。

该风力发电机组的另一种整流逆变电路拓扑结构是:发电机通过四象限运行的双PWM全控整流-逆变器和变压器与电网连接,变流器的额定容量为整个风电机组的额定容量,其原理如图7所示。

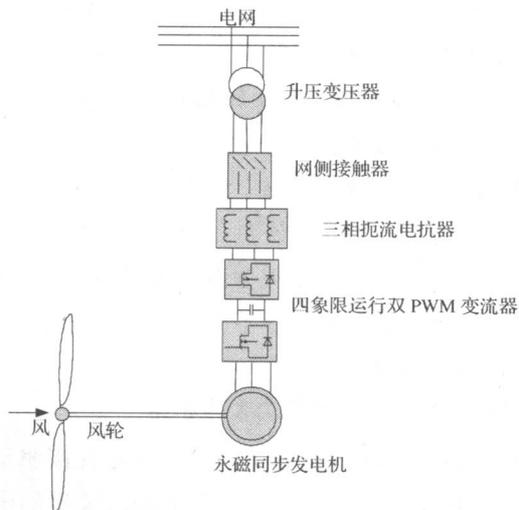


图7 永磁直驱变速恒频风力发电机组(方案二)  
Fig.7 The direct-drive VSCF WTGS with permanent-magnetic synchronous generator (the second scheme)

图7中,风力发电机组启动后,永磁同步发电机通

过与IGBT反并联二极管形成的三相不控整流桥对直流侧电容器充电;当电容器电压达到工作电压时,控制三相网侧全控逆变器同周期并网;并网成功后,控制发电机侧三相全控整流器,以控制发电机输出功率,使发电机处于正常运行状态<sup>[10]</sup>。

### 2.3 电励磁同步发电机半直驱变速恒频风力发电机组

在电励磁同步发电机半直驱风力发电机组中,风轮通过一级低传动比齿轮箱驱动电励磁同步发电机;发电机定子绕组电流通过三相不控整流桥整流为直流,然后通过一个直流升压斩波电路提高直流电压等级,最后通过三相全控逆变器、扼流电抗器和变压器送入电网;高压侧电容器通过H桥降压斩波电路为发电机提供励磁电流,其原理如图8所示。

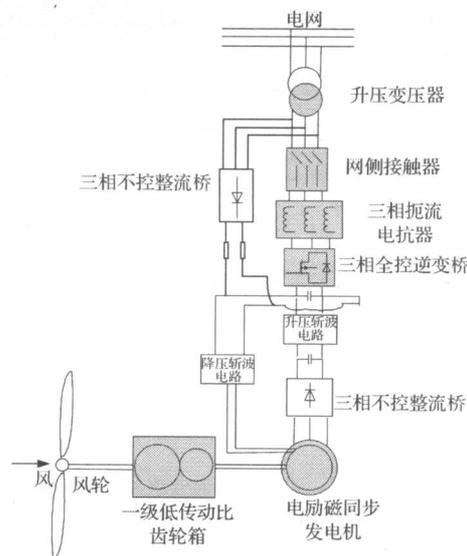


图8 电励磁同步发电机半直驱变速恒频风力发电机组(方案一)

Fig.8 The semi-direct-drive VSCF WTGS with current-excited synchronous generator (the first scheme)

在风力发电机组启动前,导通与三相全控逆变器并联的不控整流桥,对高压侧直流电容器充电;当充电电压达到稳定状态时,断开不控整流器,闭合网侧接触器,控制三相全控逆变器,使高压侧直流电容器达到稳定工作电压;此时控制降压斩波电路为发电机提供励磁电流,同时启动机组,控制升压斩波电路,机组进入正常发电状态。在机组正常运行过程中,风电机组控制系统根据检测到的发电机转速实时控制网侧逆变器输入到电网的功率,保证机组运行在最佳功率点。在机组整个运行过程中,控制升压斩波电路,使高压侧电容器电压维持在工作电压附近<sup>[11]</sup>。

与永磁直驱风力发电机组类似,该类型风力发电机组的整流逆变电路也可以采用四象限运行的双PWM全控整流-逆变器,其原理如图9所示。

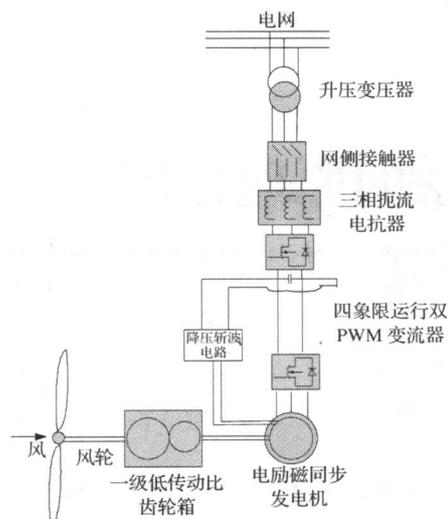


图9 电励磁同步发电机半直驱变速恒频风力发电机组(方案二)

Fig.9 The semi-direct drive VSCF WTGS with current-excited synchronous generator (the second scheme)

### 3 各种风力发电机组的对比分析

#### 3.1 恒速恒频风力发电机组与变速恒频风力发电机组的对比分析

##### 3.1.1 恒速恒频风力发电机组

恒速恒频风力发电机组在正常发电过程中,发电机定子绕组直接接入电网,其转速由电网频率确定,风力发电机组的转速在整个运行风速范围内保持恒定。其优点是,不需要采用大功率全控开关器件进行变频控制,降低整个机组的成本和控制复杂程度;缺点是,整个风力发电机组的转速恒定,使得机组在低风速区间内不能以最佳叶尖转速比运行,造成低风速区间内的能量损失。

##### 3.1.2 变速恒频风力发电机组

变速恒频风力发电机组在正常运行过程中,其转速随着风速变化。其优点是,在额定转速以下,风力发电机组的转速跟随风速变化,保证机组运行在最佳叶尖转速比点,使机组在低风速区间内获得最大风能利用率;其缺点是,由于电网频率基本不变,而机组的转速在一定范围内变化,这就要求在发电机与电网之间增加全控变流器,以实现电网频率与发电机转速之间的解耦控制,因此,风力发电机组的成本和控制复杂程度会相应增大。

由于风电场一年内大部分时间段的风速都在额定风速以下,提高额定风速以下风力发电机组的风能利用效率是提高机组年发电量的关键因素。另外,大功率的全控电力电子器件的出现,使得现代风力发电机组大都采用变速恒频风力发电机组。

#### 3.2 各种变速恒频风力发电机组的对比分析

##### 3.2.1 双馈异步风力发电机组

双馈异步风力发电机组的特点是,风轮通过多级升速齿轮箱驱动双馈风力发电机,发电机转子绕组电流通过三相四象限运行变流器控制。由于该类型风力发电机组正常运行转速范围为双馈异步发电机同步转速的 $\pm 30\%$ ,因此转子变流器的容量较小,只有整个风电机组总容量的 $1/3$ 。该机组的缺点是,增加了多级升速齿轮箱,增加了传动链的长度,降低了机组的可靠性,增加了维护成本。

##### 3.2.2 永磁直驱风力发电机组

永磁直驱风力发电机组的特点是,风轮直接驱动多级低速永磁同步发电机,发电机定子绕组与电网之间通过变流器进行能量传输。与双馈异步风力发电机组比较,该类型风力发电机组省去了齿轮箱,缩短了传动链的长度,提高了可靠性,发电机采用低速永磁同步发电机,提高了机组的效率;缺点是低速永磁同步电机尺寸大,成本高,变流器采用全功率变流器,增加了变流器的容量和控制复杂程度。

与图7中的永磁直驱风力发电机组方案相比,图6方案中的网侧逆变器与发电机侧整流器均采用全控开关器件,成本相应会有所增加;但图7方案中升压斩波电路的控制较复杂,并且发电机侧变流器采用不控整流方式,导致发电机定子绕组中的谐波电流较大。随着电力电子器件的发展,目前大功率全控电力电子器件的成本不断下降,因此,综合考虑各方面的因素,图7的方案比图6的方案更佳。

##### 3.2.3 电励磁同步半直驱风力发电机组

电励磁同步半直驱风力发电机组的特点是,风轮通过一级低传动比齿轮箱驱动电励磁同步发电机,发电机定子与电网之间通过全功率变流器进行能量传递。由于该类型风力发电机组的主传动链采用一级低传动比齿轮箱,简化了齿轮箱的结构、降低了齿轮箱的重量和成本,同时发电机转速相比永磁直驱风力发电机组的有所提高,发电机的体积减小和成本降低。

同理,与永磁直驱风力发电机组两种方案类似,对于电励磁同步半直驱风力发电机组,图9的方案比图8的方案更佳。

从成本、体积、可靠性方面综合考虑,由于电励磁同步半直驱风力发电机组综合了双馈异步风力发电机组和永磁直驱风力发电机组的优点,同时消除了两种风力发电机组各自的不足,因此,电励磁同步半直驱风力发电机组在上述三种风力发电机组方案中为最优方案。

(下转第50页)

门冷却风道,冷却效果理想,结构紧凑、安装方便。由图6可知,冷却空气通过冷却风机从机车顶部吸入,通过上半部分柜体的一级V型多孔网滤清器滤清,再分别

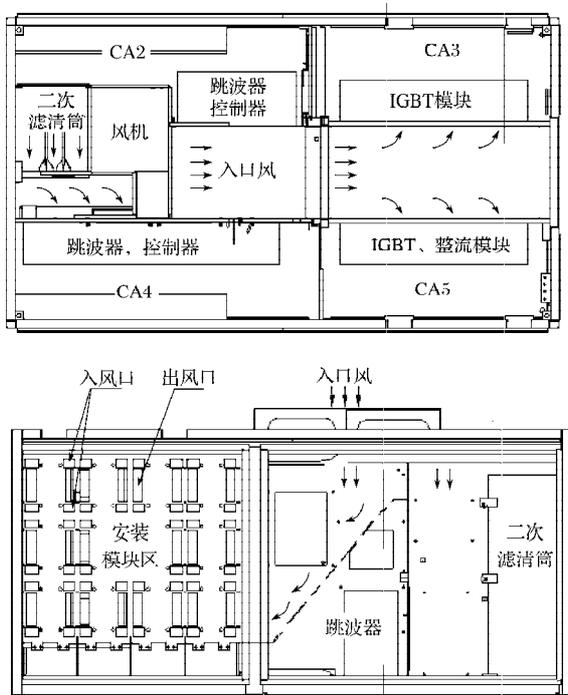


图6 风道走向示意图  
Fig.6 Schematic of the duct direction

流经牵引电气系统和辅助电气设备的风道,从两侧为功率部件提供冷却风。针对北方风沙大的特殊性,对控制模块系统采用滤清精度高、纳污能力强的纸质干式空气滤清筒,为变流器柜内的控制器及跳波控制器提供洁净的空气。但在寒冷季节,雪水容易粘附在滤纸表面结冰,会加大进气阻力,故空气滤清筒更换周期会比其他季节稍短。

## 5 结语

HXN5型内燃机车充分发挥了交流传动的优势,并结合中国铁路运输需求进行了适应性改进,具有功率大、操作简单、运行可靠等特点,得到机车运用部门的肯定。目前HXN5型内燃机车电气系统产品已经批量生产,正在逐步装车,该型机车的应用大力推动了内燃机车领域里交直传动向交流传动转换的进程。

## 参考文献:

- [1] 黄济荣. 电力牵引交流传动与控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998.
- [2] 王兆安, 黄俊. 电力电子技术[M]. 4版. 北京: 机械工业出版社, 2002.
- [3] 郝金伟. HXN5型大功率交流传动内燃机车[J]. 机车电传动, 2009(2): 1-5.

(上接第37页)

## 4 结语

本文介绍了几种典型的恒速恒频风力发电机组和变速恒频风力发电机组及其变流器的拓扑结构,并对风电机组的并网作了简单的介绍,最后对不同类型的风力发电机组进行了对比分析,为风力发电机组的设计提供了一定的参考。随着大功率全控开关器件的出现,风力发电机组单机容量也逐渐增大,风力发电机组也会逐渐从目前的双馈异步风力发电机组向永磁直驱风力发电机组和电励磁半直驱风力发电机组发展。

## 参考文献:

- [1] 蔡宣三, 宋建国, 周伟松, 等. 风能, 一种清洁的可再生能源[J]. 电力电子, 2007(1): 3-7.
- [2] 郭红霞, 杨金明. 风力发电中的电力电子技术和控制技术[J]. 中国水运, 2007, 7(3): 70-73.

- [3] 高赐威, 何叶. 考虑风力发电接入的电网规划[J]. 电力科学与技术学报, 2009, 24(4): 19-24.
- [4] 徐建中, 冯遵安, 王恩荣. 电力电子技术在可再生能源发电系统中的应用[J]. 南京师范大学学报, 2007, 7(3): 21-25.
- [5] 岑海堂, 薛正福. 大型风电机组发展现状与关键技术[J]. 科技创新导报, 2008(24): 78-81.
- [6] 刘光德. 风力机控制系统原理、建模及增益调度设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.
- [7] Hua Geng. A Novel Control Strategy of MPPT Taking Dynamics of Wind Turbine into Account[C]. IEEE Conference of PESC 2006, 2006.
- [8] 叶航冶. 风力发电机组的控制技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.
- [9] Carrillo C, Feijoo A E, Cidras J, et al. Power fluctuations in isolated wind plant[J]. IEEE Trans. on energy conversion, 2004, 19(1): 217-220.
- [10] Chen Z, Spooner E. Grid power quality with variable speed wind turbines[J]. IEEE Trans. on energy conversion, 2001, 16(2): 148-153.
- [11] Blaabjerg F, Chen Z, Kjaer S B. Power electronic as efficient interface in dispersed power generation system [J]. IEEE transactions on power electronics, 2004, 19(5).