

# 并网风力发电机系统的发展综述

李 辉,薛玉石,韩 力  
(重庆大学,重庆 400044)

**摘 要:**在综述不同类型的风力发电机系统特点的基础上,结合国外风电市场的概况和电网对风电机组的要求,对风电机组类型的发展趋势进行了探讨。按风电机组的控制特点和传动链类型,对不同类型风电机组的原理、优缺点和当前的概况进行介绍,并对永磁同步发电机结构进行了重点分析。其次,对不同类型风力发电系统的经济性和市场应用情况进行了定量比较分析。最后,结合电网对风力发电机组的要求,对并网风力发电系统的发展趋势及其比较标准进行了探讨。

**关键词:**风力发电;发电机拓扑;变速;直驱;发展趋势

**中图分类号:**TM 315 **文献标识码:**A **文章编号:**1004-7018(2009)05-0055-07

## Overview of Development of Grid - Connected Wind Power Generation Systems

LI Hui, XUE Yu - shi, HAN Li

(Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:**An overview of different wind generator systems and their development was presented in this paper. Firstly, the contemporary wind turbines were classified with respect to both their control features and drive train types, their strengths and weaknesses were described. The promising permanent magnet generator types were also investigated. Then, the quantitative comparison and market penetration of different wind generator systems were presented. Finally, the developing trends of grid - connected wind generator systems and appropriate comparison criteria were discussed based on the grid requirements to the large wind turbine generation systems.

**Key words:**wind power; generator topologies; variable speed; direct - drive; developing trend

## 0 引言

风能是近年来全球发展最快的可再生能源,过去十多年中风电装机容量迅速增长<sup>[1]</sup>。全球风电累计装机容量到2020年预计将会超过1 260 000 MW,能够满足全球电力消耗的12%<sup>[2]</sup>。欧洲风能协会也提出到2030年风电将满足欧洲电力需求23%的目标<sup>[1]</sup>。

在过去20年中,涌现了多种风力发电方式和风力发电机结构。目前,对风力发电机组的综述论文已有报道<sup>[3-6]</sup>,但仅考虑一些典型的结构,对最新的一些发展并没有做全面介绍,对市场的分析以及对风电机组并网运行要求等方面涉及也很少。本文较全面地分析当前国外风电发展和市场情况,对现有的风力发电机组类型以及可能存在的风力发电机结构进行整体描述,并从现有文献和市场角度对不同类型的风力发电机组进行经济性比较和分析。

## 1 各类风力发电机组简介

按照转速的不同,风力发电机组类型可分为定

转速、受限变转速和变转速三种。变转速风力发电机组根据所使用变频器容量的不同,可以分为部分容量变频器风力发电机组和全部容量(全额)变频器风力发电机组两类。另外,考虑传动链的类型,风力发电机组又可以分为齿轮箱驱动和直驱式两类。齿轮箱驱动的风力发电机组包括传统的多级齿轮箱驱动高速发电机的方式和单级齿轮箱驱动中、低速发电机的方式。下面具体介绍不同风力发电机组的基本结构和特点。

### 1.1 定转速风力发电机组

定转速风力发电机组通常采用多级齿轮箱驱动笼型异步发电机(SCIG, Squirrel Cage Induction Generator),定子侧直接接入电网,如图1所示。由于SCIG只能运行在高于同步转速附近很窄的范围内,因此,由这种发电机构成的风力发电机组又被称为定转速风力发电机组。1980年至1990年间,这种发电方式被众多丹麦风机制造商广泛采用。由于SCIG需要从电网吸收无功功率,1980年前后又在此基础上加入电容器进行无功补偿,并通过软起动来减小对电网的冲击。此外,具有两种转速的变极式SCIG也得到了应用。一些制造商,如Micon(现为Vestas)、Bonus(现为Siemens)、Made和Nordex已

收稿日期:2008-08-15

改稿日期:2008-09-15

生产了这种机型。

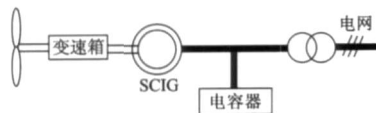


图1 定转速 SCIG风力发电机组

SCIG具有结构简单、成本低的显著优点。当接入大容量电网时,频率基本保持恒定,能够通过失速控制来保持转速恒定。此外,还可以通过桨距控制来实现定转速 SCIG的功率控制。

但是,SCIG风力发电机组的缺点是<sup>[2,5-8]</sup>:

(1)转速不可控,运行范围窄,只能在同步转速以上作发电机运行。转差率越高,消耗在转子导条中的能量越多,因此,1 MW 风力机组转差率一般不高于1%<sup>[6]</sup>。另外,风速波动将直接影响电磁转矩的变化,导致系统(风轮机叶片、齿轮箱和发电机)内部机械应力和疲劳应力较高,造成风力机和发电机之间转轴扭矩较大。

(2)三级齿轮箱是必须的。齿轮箱的存在增加了塔顶重量、维护量和噪声,同时也增加了投资成本。

(3)建立磁场的激磁电流来自 SCIG的定子绕组,因此无法实现对发电机输出电压的有效控制。在大多数情况下,需要设置与发电机并联运行的电容器对其进行无功补偿。

### 1.2 受限变转速风力发电机组

上世纪90年代中期丹麦 Vestas公司采用了一种转子电流控制结构(OptiSlip)。这种风力发电机组采用多级齿轮箱驱动转子电阻可变的绕线式感应发电机(WRIG,Wound Rotor Induction Generator),通过电力电子器件的导通和关断来调整转子回路的电阻值,并采用桨距控制的方法,如图2所示。目前,Vestas和 Suzlon公司已有基于这种结构的产品。



图2 受限变转速 WRIG风力发电机组

WRIG的定子侧直接接入电网,转子绕组与受控电阻串联。通过控制 WRIG转子侧吸收的能量从而实现变速运行。但是,转子外调节电阻上存在能量损耗,随着转速变化范围的增加,转差率越高,需要从转子侧吸收的能量越多,发电机效率越低,所需电阻容量也就越大。因此,转速变化范围取决于转子可变电阻的大小。典型的 WRIG一般只能在同步转速以上10%的范围内运行<sup>[2,5]</sup>,是一种受限的变速方式。另外,这种机组可以实现无刷化结构。例如 Vestas公司将功率器件和电阻都安装在转子内,

控制信号通过光耦合的方式传递给旋转的功率器件。但是这种机组中仍需无功补偿和软启动技术。

### 1.3 采用部分容量变频器的变转速风力发电机组

机组通常采用双馈式感应发电机(DFIG,Doubly Fed Induction Generator),发电机转子采用绕线式结构,并通过变频装置接入电网;而定子直接接入电网,如图3所示。这种机组可以在较宽转速范围内运行,主要取决于变频器容量的大小。一般可在同步转速 $\pm 30\%$ 的范围内运行<sup>[2,5-7]</sup>。变频器容量仅为发电机容量的25%~30%,使得这种机组具有较好的经济性。许多制造商如 Vestas、Gamesa、Repower和 Nordex已将这种机组推向市场。当前商业运行的 DFIG风力发电机组最大容量已达到5 MW。

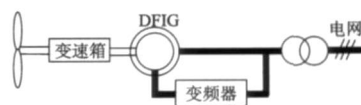


图3 变转速 DFIG风力发电机组

相对于 WRIG机组,DFIG转子侧能量通过变频器馈入电网。再者,应用变频器还可以实现无功功率补偿并减小电网冲击。例如,电网侧变频器可以独立于发电机单独控制无功功率,从而更好地实现电压调节。但 DFIG机组有以下缺点<sup>[2,5]</sup>:

(1)由于 DFIG的转速运行范围与一般风力机的转速范围(10~25 r/min)相差较大,因此,多级齿轮箱仍是该类机组传动链中的必要部件。

(2)需要碳刷和滑环。双馈式电机转子结构的碳刷和滑环需要日常维护,降低了电机的可靠性且增加了损耗。

(3)由于定子绕组直接接入电网,在电网故障的情况下,定子将遭受较大的冲击电流,可能产生较高的转矩。同时,转子绕组的绝缘性能也将受到冲击,从而缩短 DFIG的使用寿命。此外,较大的转子电流将影响变频器的安全控制。此时要求发电机具有一定的并网运行能力,即低电压穿越能力等也使得 DFIG的控制策略较为复杂。

### 1.4 采用全额变频器的变转速直驱风力发电机组

这种机组中变转速风力发电机通过全额变频器接入电网。由于发电机转子直接与风力机的轮毂相连接,因此直驱式风力发电机转速较低。当传递能量一定时,必然要求其具有较高的转矩,从而导致发电机体积较大。低转速还导致发电机电极数较多,为了获得合理的极距,必然要求发电机有较大的外部尺寸来放置磁极。同时,考虑到负载电流和气隙磁密的约束,随着直驱式风力发电机容量的增加,为保证转矩密度不会进一步显著的增加,转矩越高导致发电机体积越大。为了提高发电机的效率、减小发

电机的重量,直驱式风力发电机通常被设计成外径较大、极距较小的结构<sup>[5-6]</sup>。此外,由于取消了齿轮箱,直驱式风力发电机组具有传动链简单、整体效率高、可靠性和可用性高等优点。

相对于部分容量变频器,全额变频器可在整个运行范围内实现变速恒频,并且在电网故障时可以通过网侧变频器的控制来减小对风电机组的冲击。

目前,市场上直驱式风力发电机可分为电励磁同步发电机(EESG, Electrically Excited Synchronous Generator)和永磁同步发电机(PMSG, Permanent Magnet Synchronous Generator)两大类。

#### 1.4.1 EESG

EESG一般采用转子侧直流励磁方式。定子侧的三相绕组结构和感应电机类似。转子可以是凸极或隐极结构。凸极结构常用于低速电机,比较适合用于直驱式风力发电机组。应用EESG的直驱式风力发电机组的并网结构如图4所示。通过控制定子侧变频器可以保证电压的幅值和频率即使在转速较低的情况下也完全可控,使得发电机可以在较宽转速范围内运行。此外,通过控制转子侧变频器可以调节励磁电流的大小。直驱式风力EESG发电机组<sup>[8]</sup>,目前市场上以制造商Enercon为代表,单机容量已达到4.5MW<sup>[8]</sup>。

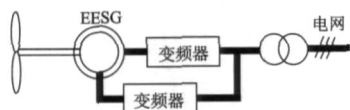


图4 直驱式EESG风力发电机组

直驱式EESG机组具有以下缺点<sup>[9,10]</sup>:

(1)为了给励磁绕组和极靴留有足够的放置空间,需要专门对外径尺寸进行设计以保证有足够的极距。极数较多将会导致电机重量和成本较高。

(2)转子励磁可以采用带有碳刷和滑环的直流励磁方式或旋转整流器的无刷励磁方式。但是,励磁损耗是不可避免的。

#### 1.4.2 PMSG

相比EESG而言,PMSG具有效率高、无励磁损耗、发热量较低、重量轻、能量密度较高、无碳刷和滑环、可靠性较高等优点<sup>[9-16]</sup>,但是,PMSG具有永磁材料成本较高、机械加工困难、永磁材料易受高温去磁效应的影响等缺陷。

近年来,永磁材料性能不断提高,成本不断降低,因此PMSG越来越受到人们的关注。带全额变频器的直驱式风力PMSG机组具有较好的发展前景。直驱式风力PMSG机组结构如图5所示。目前,Zephyros(现为Harakosan)和Mitsubishi公司采用这种结构已生产2MW风力发电机组,并已投入市场。

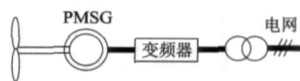


图5 直驱式风力PMSG机组

PMSG在设计中具有很大的灵活性,目前具有多种不同的结构形式。根据励磁方向的不同,PMSG通常可以分为径向式、轴向式和横向式三种类型。下面分别对其结构和特性进行介绍和总结<sup>[9-20]</sup>。

#### (1)径向式永磁同步发电机(RFPMSG)

RFPMSG(Radial Flux PMSG)的永磁体采用径向充磁的方式。直驱式风力RFPMSG机组能够在较宽的转速范围内运行,且运行性能较好。对于制造多极电机,永磁材料粘在转子表面,制造工艺简单。此外,RFPMSG的长度和气隙直径可以独立选取,必要时可以通过增加径向式电机的轴向长度来减小外径尺寸。与EESG相比,RFPMSG具有转矩密度高的优点。

文献[9,16]重点研究了有槽表面式结构和有槽聚磁型结构的RFPMSG,如图6所示。相对于聚磁型结构,表面式结构要求永磁体的剩磁密度必须高于气隙磁密,转子设计简单且重量较轻。



图6 RFPMSG结构

文献[9-10,13,20]研究了表面式RFPMSG,结果表明,这种结构比较适合大型直驱风力发电机组。此外,文献[13]研究了离网型外转子RFPMSG的设计特点。同时,也总结了外转子RFPMSG的一些优点,例如,与内转子结构相比,由于转子外径较大,更适合多极结构,并可以缩短主磁路的长度。并且由于转子直接暴露在空气中,冷却条件得到了改善,降低了温升对永磁体去磁作用的影响。

#### (2)轴向式永磁发电机(AFMSG)

AFMSG(Axial Flux PMSG)采用轴向励磁方式。大量文献主要研究了两种典型的AFMSG结构,有槽、无槽表面式AFMSG。与RFPMSG相比,AFMSG具有绕组简单、转矩波动低、噪声小(无槽结构)、轴向长度短、转矩密度较高的优点,但其缺点是单位重量下转矩较低。此外,对于有槽电机,如图7a所示,定子铁心制造困难。对于无槽电机,外



图7 有槽与无槽式AFPM发电机结构

径较大、永磁体体积较大,结构稳定性差<sup>[14,18]</sup>。

单定子双转子是无槽 AFPM 发电机的一种典型结构,通常也被称为“环形电机”<sup>[15]</sup>,如图 7b 所示。双转子盘由低碳钢组成,利用转子表面放置的永磁体产生轴向的气隙磁场。带状硅钢片环绕在无槽定子铁心上组成,构成三相环形集中绕组。无槽、环形铁心的 AFMSG 具有重量轻、紧凑性好、轴向长度短、便于集成等优点<sup>[21]</sup>。

另外,文献 [12] 分析比较了五种不同结构的 AFPM 发电机,包括双定子有槽结构、双转子有槽结构、定子平衡单边 AFPM 结构、转子平衡单边 AFPM 结构和无槽单定子双转子(环形电机)结构。结果表明,双边 AFPM 发电机优于单边 AFPM 发电机。但是,单边结构用铜量低且导体损耗小。环形结构简单,但是由于放置定子绕组需要增大气隙,导致需要较多的永磁材料来建立磁场。随着功率等级的增加,气隙和气隙磁阻随之增大,因此,这种结构仅适合于低功率等级的风力发电机组。

### (3) 横向式永磁发电机 (TFMSG)

TFMSG (Transversal Flux PMSG) 磁通路径所在的平面与转子转向相垂直。这种电机的转子也有单边聚磁型和双边聚磁型等多种结构方式。图 8 为 TFMSG 结构示意图。TFMSG 本质上与同步发电机相同,运行原理相似,具有转矩较高、铜耗低及绕组简单等优点,但其结构复杂,对于气隙较大的 TFMSG,其转矩大小还取决于发电机的外径<sup>[9,16]</sup>。

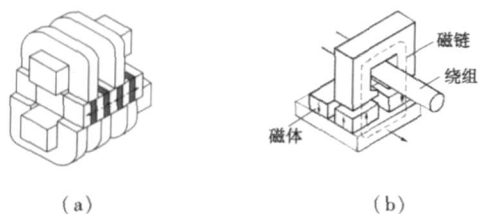


图 8 横向充磁 TFMSG 结构示意图

与 RFMSG 或 AFMSG 相比,TFMSG 最大的不同之处在于绕组放置空间的增加不会降低主磁通的大小,因此其铜耗很低。TFMSG 可以设计成较小极距,但其电磁结构较为复杂。另外,TFMSG 的功率因数较低。

### 1.5 带全额变频器单级齿轮箱驱动变速风力发电机组

变桨距风力机通过传动比约为 10 的单级星型齿轮箱与中、低速永磁同步发电机相连,这种结构通常被称为“Multibrid”,如图 9 所示。它结合了直驱和齿轮箱结构的优点。相对于直驱式风电机组,其发电机转速较高、体积小、重量轻、系统集成度高;相对于三级齿轮箱结构的风电机组,其传动链简单,可靠性较高,因此得到制造商和科研机构的广泛关注,例如 Multibrid 和 WinWind 等制造商都生产了这种

类型的机组。

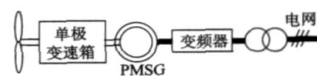


图 9 带全额变频器单级齿轮箱驱动 PMSG 风力发电机组  
1.6 带全额变频器多级齿轮箱驱动变速风力发电机组  
(1) PMSG 风力发电机组

在带全额变频器的变速 PMSG 风力发电机组中,采用多级齿轮箱结构可以减小发电机的体积,提高发电机的效率。其并网结构如图 10 所示。



图 10 带全额变频器多级齿轮箱驱动 PMSG 机组

与 DFIG 机组相比,PMSG 机组具有发电机效率较高、无刷结构、低电压穿越能力控制复杂度低等优点,缺点是变频器容量大(100%的额定容量,DFIG 约 30%)、成本高、损耗较大。目前,市场上这种系统已被应用到 GE 公司的 multi-megawatt 系列中。

### (2) SCIG 风力发电机组

采用全额变频器可以代替图 1 中电容补偿装置和软起动器,实现 SCIG 风力发电机组的变速运行,如图 11 所示。

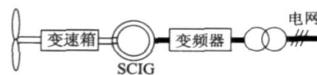


图 11 带全额变频器多级齿轮箱驱动 SCIG 机组

与传统方式相比,采用全额变频器可以使控制更加灵活,例如可以实现变速运行,更好地实现无功补偿和软并网。但其缺点是全额变频器的成本和损耗较高,整个系统(包括齿轮箱、感应发电机和变频器)的效率较低。目前,西门子公司已生产了这类系统,其容量达 3.6 MW (Bonus 107),发电机转速范围为 595 ~ 1547 r/min。

### 1.7 其它可能的风力发电机类型

目前,文献中还提到一些其它类型的风力发电机。例如直线感应发电机、开关磁阻发电机、爪极发电机和无刷双馈感应发电机(BDFIG, Brushless Doubly Fed Induction Generators)<sup>[22-24]</sup>。其中 BDFIG 是最有创新性的结构之一。并网型 BDFIG 风力发电机组的结构如图 12 所示。



图 12 带部分容量变频器 BDFIG 风力发电机组

这种机组感应发电机的输出直接接入电网,因此发电机的输出频率必须与电网频率一致。BDFIG 取消了碳刷和滑环,但其有两套不同极数的定子绕组;一套绕组直接与电网相连,称为功率绕组;另一

套绕组通过变频器接入电网,称为控制绕组。变频器的容量仅为发电机额定容量的一部分。

BDFIG系统可以实现变速运行和有功无功的独立控制。相对于DFIG系统,这种结构省去了碳刷和滑环,但其工作原理和生产装配较为复杂。

## 2 不同风力发电机系统的比较

### 2.1 不同风力发电机组的性能比较

对不同风力发电机组进行比较,目前已有大量相关研究<sup>[5-7,10,12,17,19,25-26]</sup>。其中,文献[26]较为详细地比较了3 MW的五种不同变转速风力发电机组,包括三级齿轮箱驱动DFIG机组(DFIG3G),直驱式EESG机组(EESGDD),直驱式PMSG机组(PMSGDD),单级齿轮箱驱动PMSG机组(PMSG1G)和单级齿轮箱驱动DFIG(DFIG1G)机组。表1列举了其尺寸和性能的比较。

通过比较可知,DFIG3G结构重量最轻,成本较低。在不同结构直驱式风力发电机组中,PMSGDD

年发电量最高,EESGDD重量最大,且成本最高。单级齿轮箱驱动多级发电机结构具有较好的发展前景。DFIG1G单位成本年发电量最高,并且发电机系统的成本最低。PMSG1G的单位成本年发电量高于PMSGDD。

表1 5种3 MW不同风力发电机系统比较

发电机类型	DFIG3G	EESGDD	PMSGDD	PMSG1G	DFIG1G
定子气隙直径/m	0.84	5	5	3.6	3.6
铁心长度/m	0.75	1.2	1.2	0.4	0.6
材料重量/T	5.25	45.1	24.1	6.11	11.37
成本(含公司利润) 千欧元	1870	2117	1982	1883	1837
发电机材料	30	287	162	43	67
年发电量/MWh	7690	7740	7890	7700	7760
年发电量 总成本/(kWh·Euro <sup>-1</sup> )	4.11	3.67	3.98	4.09	4.22

### 2.2 不同风力发电系统的市场占有情况

目前,市场上有多种不同结构、不同容量的风力发电机组。表2列举了当前市场上2 MW以上不同结构的风力发电机组。

表2 市场上2 MW以上大型风力发电机组

风力机组类型	发电机	功率/风机叶片直径/风机转速	制造商
变速多级齿轮箱+部分容量变频器	DFIG	4.5 MW/120 m/14.9 r·min <sup>-1</sup>	Vestas
		2 MW/90 m/19 r·min <sup>-1</sup>	Gamesa
		3.6 MW/104 m/15.3 r·min <sup>-1</sup>	GE Wind
		5 MW/126 m/12.1 r·min <sup>-1</sup>	Repower
受限转速+多级齿轮箱	WRIG	2 MW/88 m/17 r·min <sup>-1</sup>	Suzlon
变速多级齿轮箱+全额变频器	SCIG	3.6 MW/107 m/13 r·min <sup>-1</sup>	Siemens Wind Power
	PMSG	2 x MW/88 m/16.5 r·min <sup>-1</sup>	GE Wind
变速单级齿轮箱+全额变频器	PMSG	5 MW/116 m/14.8 r·min <sup>-1</sup>	Multibrid
		3 MW/90 m/16 r·min <sup>-1</sup>	WinWind
变速直驱+全额变频器	EESG	4.5 MW/114 m/13 r·min <sup>-1</sup>	Enercon
	PMSG	2 MW/71 m/23 r·min <sup>-1</sup>	Zephyros

从表2中可以看出,大多数制造商应用了多级齿轮箱驱动型式。其中制造商Vestas、Gamesa、GE Wind、Repower、Nordex、Ecotecnia主要生产多级齿轮箱驱动的DFIG风力发电机组。通过分析可知,多级齿轮箱驱动DFIG的方式在市场上仍居统治地位,应用最多的发电机类型依然是感应发电机(DFIG、SCIG和WRIG)。目前,Vestas公司是全球最大的风机制造商,其次是Gamesa、Enercon和GE Wind公司。截止到2004年底,这几家公司的市场占有率分别为34%、17%、15%和11%<sup>[21]</sup>。

图13显示了1995年~2004年不同风力发电机系统的市场占有率情况。可见,定转速SCIG机组的市场份额从1995年的70%下降到2004年的25%。WRIG的市场份额自1997年之后不断下降,目前基本上已退出市场。DFIG的年装机容量比例从零增加到2004年底的将近55%,在市场上居统治地位。同步发电机(EESG或PMSG)总体的市场

情况在这十年间变化不大,但在2002年~2004年间有轻微的增长趋势。其中,EESG的市场份额略有下降,而PMSG表现出较好的发展前景<sup>[2,27]</sup>。

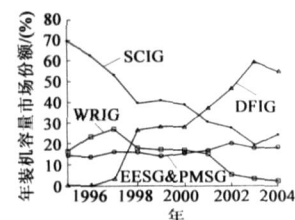


图13 全球不同风电系统年装机容量市场份额

## 3 趋势展望

随着风电技术的快速发展以及风力发电在电力系统中的比重持续增加,单机容量不断增加、大型风电场的建立、海上风力资源的开发以及现有技术的不断完善将成为风电产业发展的主要趋势<sup>[2,8,28,29]</sup>。

### 3.1 电网对风力发电机组的要求

随着风力发电在整个电力系统中比重的不断增

加,对大型风电场的要求也越来越高。大型风电场与电网的连接及其优化配合已成为当前及未来若干年风电领域研究的一个重要问题<sup>[2]</sup>。随着风电容量的不断增加,输电系统运行商(TSO, Transmission System Operators)越来越关注大容量风电对电力系统的影响。因此,研究解决大型风电系统集成中的电网规则以及电网运行需求问题十分必要。图14表示电压降落对风电机组的要求标准。目前,并网运行问题主要包括有功和无功控制、电压和频率控制、电压闪变和谐波、低电压穿越能力等<sup>[2,5,6]</sup>。

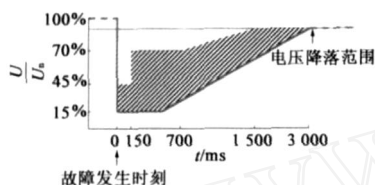


图14 并网风力发电机组允许的电压降落范围

### 3.2 风力发电系统的趋势

(1) 变速运行 由于变速运行方式具有机械应力小、风能捕获能力强等优点,因此,具有较好的发展前景。如前所述,随着变转速风力发电机组市场份额的不断增加,定转速机组的市场份额逐步降低。

(2) 直驱式结构 与齿轮箱驱动的风力发电系统相比,直驱式风力发电系统省去了齿轮箱,可以提高整个系统的效率、可靠性和可用性,但外部尺寸较大,对于海上风力发电,这不是一个重要问题。

(3) 永磁风力发电机 与电激磁电机相比,永磁电机具有效率高、发电量大、可靠性高、能量密度高等优点,除前面列举的 RFMSG、AFMSG 和 TFMSG 等结构外,其在新结构设计方面仍存在改进空间。

随着功率器件的成本不断降低,带全额变频器 FMSGDD 在海上风力发电中的应用具有较好的前景。另外,考虑到单位成本的年发电量以及总重量,采用单级或多级齿轮箱驱动的 FMSG 风力发电系统也越来越受到人们的关注,其在市场上的比重不断增加。

### 3.3 风力发电系统性能比较标准探讨

不同风力发电系统的比较标准有很多,包括转矩密度、成本、效率、材料重量<sup>[6-7,9-10,14,18,26]</sup>。但是,随着风电在电网中比重的增加以及并网运行要求的提高,有必要同时考虑风能质量和风力发电量方面的要求,从而得到整体性定量的比较标准。

目前,风力发电系统研究和发展的趋势之一是海上风力发电。内陆和海上风力发电技术最主要的区别在于海上维护和修理工作不但成本高,并且非常困难,甚至在某些气候条件下根本无法进行。因

此,海上风电系统对鲁棒性和可维护性的要求更高。所以,大型风电系统的可靠性和可用性是需要考虑的一个非常重要的方面。

随着风能在电力系统中比重的不断增加,需要对并网运行的相关特性进行定量的比较分析。例如,闪变将产生额外的成本。此外,低电压穿越能力与风力发电系统的结构类型密切相关,一些与风力发电机组相关的技术指标对风电系统的年发电量有较大影响。例如,在比较不同的风力发电系统时,有必须考虑切入和切出风速,这是因为它们影响不同风力发电机组的年发电量和年可运行时间。

### 参考文献

- [1] Chen Z, Blaabjerg F. WIND ENERGY - The World's Fastest Growing Energy Source[J]. IEEE Power Electronics Society New letter, 2006, 18(3): 1054 - 7231.
- [2] Hansen D, Hansen L H. Wind turbine concept market penetration over 10 years (1995 - 2004) [J]. Wind Energy, DOI 10. 1002/we. 210.
- [3] 刘细平,林鹤云. 风力发电机及风力发电控制技术综述 [J]. 大电机技术, 2007, 3: 17 - 20.
- [4] 谢宝昌. 兆瓦级风力发电机综述 [J]. 电机与控制应用, 2007, 34(2): 1 - 4.
- [5] Hansen L H, Helle L, Blaabjerg F, et al. Conceptual survey of generators and power electronics for wind turbines[R]. Riso national laboratory, Technical Report Riso - R - 1205 (EN), Roskilde, Denmark, 2001.
- [6] Polinder H, Morren J. Developments in wind turbine generator systems[C]//Electrimacs 2005. Tunisia
- [7] Carlson, Grauers A, Svensson J, et al. A comparison of electrical systems for variable speed operation of wind turbines[C]//European wind energy conf, 1994, 500 - 505.
- [8] Bywaters G, John V, Lynch J, et al. Northern power systems wind-PACT drive train alternative design study report [R]. NREL, Golden, Colorado, NREL/SR - 500 - 35524, 2004.
- [9] Dubois MR. Optimized permanent magnet generator topologies for direct - drive wind turbines[D]. Delft Univ. of Technology, 2004.
- [10] Grauers. Design of direct - driven permanent - magnet generators for wind turbines[D]. Goteburg Chalmers University of Technology, 1996.
- [11] Versteegh JA, Hassan G. Design of the Zephyros Z72 wind turbine with emphasis on the direct drive PM generator[C]//NORPIE 2004, 2004: 14 - 16.
- [12] Chen Y, Pillay P, Khan A. PM wind generator topologies[J]. IEEE Trans on Industry Applications, 2005, 41(6): 1619 - 1626.
- [13] Chen, C Nayar, Xu L. Design and finite - element analysis of an outer rotor permanent - magnet generator for directly - coupled wind turbine applications[J]. Proceedings of the IEEE Trans on Magnetics, 2000, 36(5): 3802 - 3809.
- [14] Hanitsch R, Koruji G. Design and constructing of a permanent magnet wind energy generator with a new topology[C]//KOMEL Conf, Poland, 2004: 63 - 66.
- [15] Aydin, Huang S, Lipo T A. Axial flux permanent magnet disc ma-

- chines: A review [R]. 2004.
- [16] Dubois R. Review of electromechanical conversion in wind turbines [R]. Repore EPP00. R03, 2000.
- [17] Bianchi Lorenzoni A. Performance magnet generators for wind power industry: an overall comparison with traditional generators [J]. Opportunities and Advances in International Power generation, 1996: 49 - 54.
- [18] Widyan MS Design, optimization, construction and test of rare-earth permanent-magnet electrical machines with new topology for wind energy applications [D]. Berlin Elektrotechnik und Informatik der Technischen Universität, 2006.
- [19] Parviainen Design of axial-flux permanent-magnet low-speed machines and performance comparison between radial-flux and axial-flux machines [D]. Acta Universitatis, Lappeenrantaensis, 2005.
- [20] Lampola Directly driven, low-speed permanent-magnet generators for wind power applications [D]. Finland: Helsinki University of Technology, 2000.
- [21] Wu W, Spooner E, Chalmers B J. Design of slotless TORUS generators with reduced voltage regulation [J]. IEE Proc - Electr Power, 1995, 142 (5): 337 - 343.
- [22] Boldea Variable speed generators [M]. Taylor & Francis, 2006.
- [23] Torrey D A. Switched Reluctance Generators and Their Control [J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2002, 49 (1): 3 - 14.
- [24] Runcos F, Carlson R, Oliveira A M, et al Performance Analysis of a Brushless Doubly Fed Cage Induction Generator [C] // Nordic Wind Power Conference (NWPC04). Göteborg: Chalmers University of Technology, 2004.
- [25] Poore R, Lettenmaier T. Alternative design study report: WindPACT advanced wind turbine drive train designs study [R]. NREL, Golden, Colorado, NREL/SR - 500 - 33196, 2003.
- [26] Polinder H, FFA van der Pijl, G J de Vilder, et al Comparison of direct-drive and geared generator concepts for wind turbines [J]. IEEE Trans Energy Conversion, 2006, 21: 725 - 733.
- [27] BTM Consults International Wind Energy Department—World Market Update 2004, Forecast 2005 - 2009 [R]. A. Rasmussen, Ringkøbing, Denmark, 2005.
- [28] Chen Z. Issues of Connecting Wind Farms into Power Systems [C] // Proc of IEEE/PES Transmission and Distribution Conference & Exhibition: Asia and Pacific, 2005.
- [29] Sørensen, Bak - Jensen B, Kristian J, et al Power plant characteristics of wind farms [C] // Wind Power for the 21st Century Proceedings of International Conference Kassel, 2000: 176 - 179.

(上接第5页)

$k_{pi} = 30 \text{ s}^{-1}$ 、 $i = 4 \text{ ms}$ 时的响应情况。分析结果说明使用观测器的系统由于在噪声抑制和快速跟踪方面优于使用低通滤波器的系统,因此具有更好的稳定性。

## 5 结 语

本文设计了交流伺服控制系统的电流环和速度环状态观测器,采用全整数运算实现对系统的控制计算。仿真分析验证了观测器无滞后滤波效果,初步确定了观测器最佳极点位置。与采用数字低通滤波器的控制系统进行性能对比试验的结果表明,该方法有效提高了系统的抗干扰性、响应特性和稳定性。

## 参考文献

- [1] 李新兵,张继勇.高性能永磁同步电机交流伺服的研究 [J]. 机电工程, 2005, 22 (4): 30 - 31.
- [2] 陈荣,严仰光.交流永磁伺服系统控制策略研究 [J]. 电机与控制学报, 2004, 8 (3): 205 - 208.
- [3] Guglielmi, Pastorelli P, Pellegrino M, et al A Position - Sensorless Control of Permanent Magnet Assisted Synchronous Reluctance Motor [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2004, 40 (2): 615 - 622.
- [4] Mohamed Boussak Implementation and Experimental Investigation of Sensorless Speed Control With Initial Rotor Position Estimation for Interior Permanent Magnet Synchronous Motor Drive [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2005, 20 (6): 1413 - 1422.
- [5] Oskar Walmark, Lennart Hamelors Sensorless Control of Salient PMSM Drives in the Transition Region [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2006, 53 (4): 1179 - 1187.
- [6] Khikawa S, Tomita M, Doki S, et al Sensorless Control of Permanent - Magnet Synchronous Motors Using Online Parameter Identification Based on System Identification Theory [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2006, 53 (2): 363 - 372.
- [7] 李春龙,沈颂华.基于状态观测器的PWM整流器电流环无差拍控制技术 [J]. 电工技术学报, 2006 (12): 85 - 87.
- [8] 祝晓辉,李颖晖.永磁同步电机高增益速度观测器设计与仿真研究 [J]. 系统仿真学报, 2007 (19): 2550 - 2553.
- [9] 徐建英,刘贺平. PMSM的高精度感应电势状态观测器与位置估计 [J]. 北京科技大学学报, 2007 (29): 537 - 539.
- [10] 王丽梅,田明秀.基于观测器的永磁电机转子位置和速度估计方法 [J]. 沈阳工业大学学报, 2005 (27): 175 - 177.
- [11] Choi HS, Ko SJ, Kim D, et al Precise position control using a PMSM with a Disturbance Observer Containing a System Parameter Compensator [J]. IEEE Proc Electr Power App1, 2005, 152 (6): 1573 - 1577.
- [12] Shinji Shinnaka, New Sensorless Vector Control Using Minimum - Order Flux State Observer in a Stationary Reference Frame for Permanent - Magnet Synchronous Motors [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2006, 53 (2): 388 - 398.
- [13] 曹昌勇,杨贵荣.基于PIC单片机的交流伺服电机控制系统研究 [J]. 机械工程与自动化, 2007 (6): 115 - 117.
- [14] 潘月斗.基于控制器(C166v2)单片机系统的全数字交流伺服系统的研究 [J]. 系统控制与仿真, 2008 (2): 33 - 35.
- [15] Konghirun M, Xu L. A Fast Transient - Current Control Strategy in Sensorless Vector Controlled Permanent Magnet Synchronous Motor [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2006, 21 (5): 1508 - 1512.

作者简介:刘杰(1978-),男,博士研究生,主要从事交流伺服系统控制的研究。