

变速恒频风电机组系统方案比较

刘红文, 王立鹏, 唐建平

(南车株洲电力机车研究所有限公司, 湖南 株洲 412001)

摘要: 首先叙述了变速恒频运行的双馈、直驱和半直驱风电机组的特点, 然后根据美国国家可再生能源实验室的报告, 以年发电量、运行和维护成本、度电成本(COE)等指标, 对1.5 MW不同类型的风电机组进行量化比较。其结果表明: 双馈风电机组使用标准组件, 重量轻, 成本最低, 年发电量较低; 直驱式风电机组成本最高, 但维护成本低; 半直驱风电机组价格不是很高, 维护成本和COE低, 年发电量高, 是一种很有竞争力的机型, 应用前景广泛。

关键词: 变速恒频风电机组; 双馈风电机组; 直驱风电机组; 半直驱风电机组

中图分类号: TM315

文献标识码: A

文章编号: 1671-8410(2010)04-0016-03

Comparison of System Concepts for Variable Speed Constant Frequency Wind Turbines

LIU Hong-wen, WANG Li-peng, TANG Jian-ping

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

Abstract: The characteristics of variable speed constant frequency doubly-fed wind turbine, direct-drive wind turbine and semi-direct-drive wind turbine are described. According to the data of U.S. National Renewable Energy Laboratory's report, the quantitative comparisons of different types of 1.5MW wind turbines are carried out based on some indicators such as annual power output, operation maintenance costs and cost of energy (COE). The results show that DFIG is light, low cost and low annual power output with standard components. The cost of direct-drive wind turbine is highest, but the maintenance cost is low. Semi-direct-drive wind turbine is a very competitive model with low COE, high annual power output, but not very high maintenance cost, which will be applied more widely.

Key words: variable speed constant frequency wind turbine; doubly-fed wind turbine; direct-drive wind turbine; semi-direct-drive wind turbine

0 引言

随着人们对能源危机和环境恶化的认识, 世界各国正努力调整能源结构, 开发可再生的清洁能源, 如太阳能、风能、生物能等, 其中, 风力发电技术最为成熟^[1]。截至2008年底, 欧洲风电总装机容量已达66 GW, 并且大型风电场仍在不断增加; 同样, 在中国风电也在蓬勃

发展, 年增长速度在100%左右, 截至2008年底, 中国的风电总装机容量超过了12 GW。风电场的开发也从陆上转向海上风电场。在已建的风电场中, 主要采用带升速齿轮箱驱动的风电机组和无齿轮箱驱动的直驱式风电机组。这两种方案各有利弊: 带升速齿轮箱的风电机组, 其齿轮箱价格昂贵, 易疲劳损坏; 直驱式风电机组没有齿轮箱, 可靠性高, 但采用低速永磁电机, 体积大, 价格昂贵, 并且采用全功率变流器, 进一步增加了其造价成本。随后, 人们在上述两种方案之间折中设计出半直驱风电机组, 采用一级升速齿轮箱驱动发电机, 介于

收稿日期: 2010-03-10

作者简介: 刘红文(1982-), 男, 硕士, 助理工程师, 从事风力发电机组整机设计、整机控制策略研究等开发工作。

直驱和双馈之间,齿轮箱的增速比没有双馈风电机组那么高,发电机也由双馈的绕线式变为永磁同步式^[2]。

本文首先分析了变速恒频运行的双馈、直驱和半直驱风电机组的特点,然后根据美国国家可再生能源实验室的报告^[3-5],以年发电、运行和维修费用、度电成本(COE)等为指标,比较了4种不同风力发电系统的性能,即三级增速齿轮箱+双馈发电机(doubly-fed induction generator with three-stage gearbox, DFIG)、直接驱动+永磁发电机(direct-drive permanent magnet generator, DDPMG)、一级增速齿轮箱+永磁发电机(permanent magnet generator with single stage gearbox, PMG1G)、一级增速齿轮箱+多个永磁发电机(Multi-permanent magnet generator with single stage gearbox, Multi-PM)。

1 变速恒频风力发电技术

变速恒频风力发电机是近年来发展起来的一种新型风力发电系统,也是得到商业化应用的主流机型。其最大的特点是风轮和发电机的转速可以在很大范围内变化,而不影响输出电能的频率;利用先进的电力电子以及控制技术,实现最大风能捕获,提高风电机组的发电量,优化风电机组的运行条件。通过改变发电机自身结构或者发电机与电力电子装置相结合便可实现风电机组变速恒频运行,较有代表的变速恒频风力发电机组有:双馈风电机组、直驱式风电机组和半直驱风电机组。

1.1 双馈风电机组

双馈异步发电机组由三级齿轮箱+绕线式异步发电机+变流器(有源IGBT整流+IGBT逆变)组成(图1)。

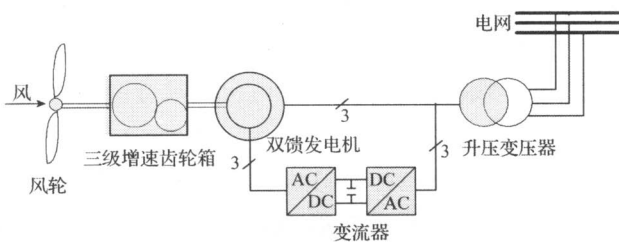


图1 双馈风电机组

Fig. 1 Doubly-fed wind turbine

该类机型的主要优点是,可以实现功率的双向流动,并网简单,功率因数可调,变流器的容量约为发电机容量的三分之一,价格相对便宜。其最大的缺点是,发电机与轮毂采用三级升速齿轮箱连接,齿轮箱噪声大,易损坏,故障率高,维修费用高;同时,双馈风电机组的低电压穿越能力较差,虽然可以增加低电压穿越设备,但会增加其成本。

双馈风电机组采用标准件,价格便宜,仍是风力发电市场的主流机型^[2]。国内外生产该类型风电机组的厂

家主要有: Vestas、华锐、东汽、明阳、中国南车等公司。

1.2 直驱式风电机组

直驱式风电机组取消了沉重的齿轮箱,采用永磁发电机,由风轮直接驱动,发电机的转速随风速而改变,发电机输出的频率变化的交流电通过全功率变流器整流成直流电,再逆变成与电网同步的50 Hz(或者60 Hz)的交流电,其示意图见图2。

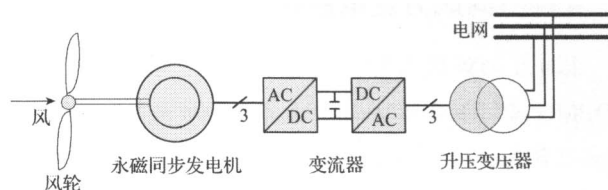


图2 直驱式风电机组

Fig. 2 Direct-drive wind turbine

直驱式风电机组由于没有齿轮箱,零部件数量相对双馈风电机组要少得多,故障较少,维修费用不高;同时,由于直驱式风电机组采用全功率变流器,低电压穿越能力较强。随着风电机组单机功率等级的增大,这种直驱式发电机体积变得更大,价格更为昂贵。目前,国内外生产该类型风电机组的厂家主要有: ENERCON、金风、湘电等公司。

1.3 半直驱风电机组

半直驱风电机组是在双馈和直驱方案之间的一种折中,采用单级增速齿轮箱(传动比大约为6~9)驱动永磁发电机(可以采用一级齿轮箱驱动单台永磁发电机,或者一级齿轮箱驱动多台永磁发电机),再通过变流器与电网连接。这种结构结合了直驱和多级齿轮箱驱动的优点,通常被称为“Multibird”,其示意图分别见图3和图4。

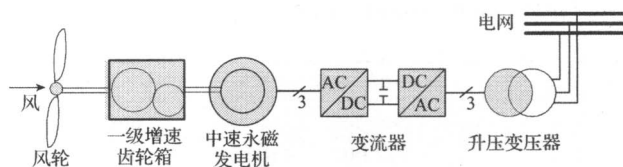


图3 半直驱风电机组(一级增速齿轮箱+单个永磁发电机)

Fig. 3 Semi-direct-drive wind turbine (Single permanent generator with a single-stage speed-increasing gearbox)

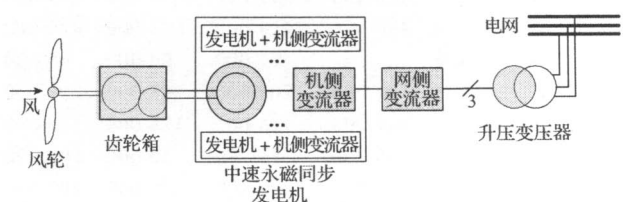


图4 半直驱风电机组(一级增速齿轮箱+多个永磁发电机)

Fig. 4 Semi-direct-drive wind turbine (Multi-permanent generator with a single-stage speed-increasing gearbox)

与直驱式风电机组相比,半直驱风电机组的发电机转速高、体积小、重量轻、系统集成度高,解决了发电机的制造和运输问题。相对于三级齿轮箱驱动双馈电机而言,它具有传动链简单、可靠性较高、后期维护较少、低电压穿越能力强等优点。国内外生产该类型风电机组的厂商主要有WinWind、Multibrid、Clipper等公司。

2 4种不同风力发电系统方案比较

以1.5 MW风力发电机组方案设计为例,对DFIG、DDPMG、PMG1G和Multi-PM 4种不同风力发电机组系统方案进行比较,并对其差异进行量化,分别从风力发电机组的造价、运行和维护费用、年发电量、COE进行比较分析^[4]。

4种风力发电系统的具体方案为:DFIG采用三级齿轮箱(传动比为73)驱动6极双馈异步电机+转子变流器(额定容量约为1/3发电机额定容量);DDPMG采用风轮直接驱动96极永磁电机+全功率变流器;PMG1G采用单级升速齿轮(传动比为9左右)驱动72极永磁电机+全功率变流器;Multi-PM采用一级大齿轮驱动6台250 kW的永磁电机+全功率变流器^[4]。

采用不同方案的风电机组费用比较见表1。DDPMG较其他方案而言,没有齿轮箱,但永磁发电机的成本很高,大约为双馈发电机的5倍;PMG1G、Multi-PM也采用了齿轮驱动,但仅有一级升速齿轮箱,较采取三级齿轮驱动的双馈方案,传输系统的成本至少降低了42%以上。就方案成本而言,PMG1G、Multi-PM成本较低,DDPMG成本最高(表1)。

表1 各种方案费用比较^[4]

Tab. 1 Cost comparisons of various wind turbines^[4]

	(元)			
	DFIG	DDPMG	PMG1G	Multi-PM
传动系统	1 240 000	无	720 000	464 000
支撑结构	272 000	440 000	160 000	152 000
外部冷却系统	19 200	27 200	35 200	42 400
制动器	11 200	99 200	25 600	44 800
联轴器	19 200	无	无	无
机舱罩	136 000	112 000	65 600	56 000
发电机	480 000	2 432 000	432 000	624 000
电力电子器件	496 000	424 000	424 000	424 000
变电站无功控制设备	无	96 000	96 000	96 000
变压器	184 000	208 000	208 000	208 000
电缆	144 000	128 000	128 000	128 000
开关设备	96 000	80 000	80 000	104 000
其他辅助系统	200 000	200 000	200 000	200 000
传动链总装与测试	64 000	75 200	44 000	63 200
总费用	3 361 600	4 320 000	2 616 000	2 600 000

以年发电量、运行和维护费用以及COE为差异量化指标,对不同方案进行比较,其结果见表2。DDPMG无齿轮箱,运行和维修成本较低;DFIG运行和维修成本最高。DDPMG的发电量与半直驱(PMG1G和Multi-PM)的差不多;DFIG由于齿轮箱易出问题,停机维修会减少发电量。DDPMG和半直驱的COE均小于DFIG的,PMG1G为0.250 4元/kW·h,Multi-PM为0.253 6元/kW·h。

表2 年发电量、COE、运行和维修费用比较^[4]

Tab. 2 Comparisons of annual power output, cost of energy (COE), operation and maintenance cost^[4]

	DFIG	DDPMG	PMG1G	Multi-PM
年发电量/kW·h	4.841×10 ⁶	4.99×10 ⁶	5.001×10 ⁶	4.978×10 ⁶
COE/元·(kW·h) ⁻¹	0.286 4	0.302 4	0.250 4	0.253 6
运行与维护费用 /元·(kW·h) ⁻¹	0.040 8	0.037 6	0.033 6	0.037 6

注:表1和表2引用的是美国NERL调查报告,各零部件价格为美国2001年左右的市场行情,为便于阅读,按当时的汇率(1美元兑换成8元人民币)换算成人民币。

3 结语

本文对变速恒频运行的双馈、直驱和半直驱型风电机组的特点进行了分析,以1.5 MW不同类型的风电机组为例,采用4种不同的系统方案,并对此进行了差异化量化比较,结果表明:

(1)DFIG造价成本最低,但其拥有高损耗的齿轮箱,故障率高,后期维护费用较高,收益较低。另外,DFIG采用由铁和铜组成的标准件,基本无法大幅度提高性能和进一步降低费用。

(2)DDPMG造价成本最高,维护费用较少,但随着单机功率等级的增大,永磁发电机的尺寸变得越来越大,不利于运输和安装。

(3)半直驱(PMG1G和Multi-PM)发电量大,造价成本较低,COE最小,维护费用也较少,是一种很有应用前景的方案。

参考文献:

- [1] Tony Burton. 风能技术[M]. 武鑫,译. 北京:科学出版社, 2007.
- [2] Polinder H, van der Pijl F F A, de Vilder G-J, et al. Comparison of Direct-Drive and Geared Generator Concepts for Wind Turbines[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2006, 21 (3): 725-733.

(下转第23页)

额定转速为1 800 r/min,同步转速为1 500 r/min,电网电压690 V。机组满功率发电时,用示波器在网侧变流器端测得电流波形如图7所示。

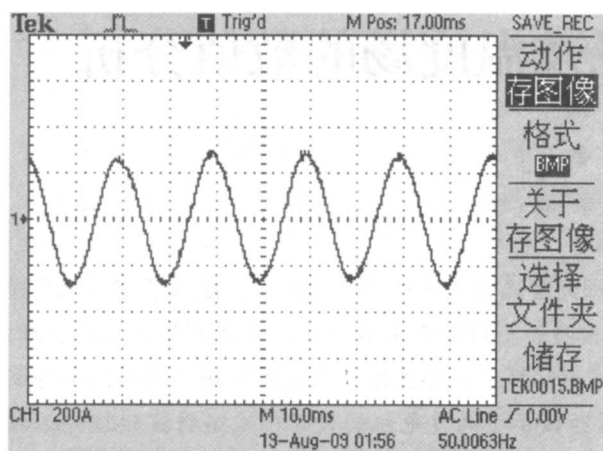


图7 网侧变流器电流波形

Fig. 7 Current waveform of the grid-side converter

从图7可以看出,此时网侧电流峰值约为290 A,其有效值为 $I_n=290/\sqrt{2}=205$ A,与理论计算值相近。所以,此时网侧变流器容量 $P_2=\sqrt{3} \times 690 \times 205=245$ kW。

同样在满功率发电时,在定子侧测得的电流波形如图8所示。

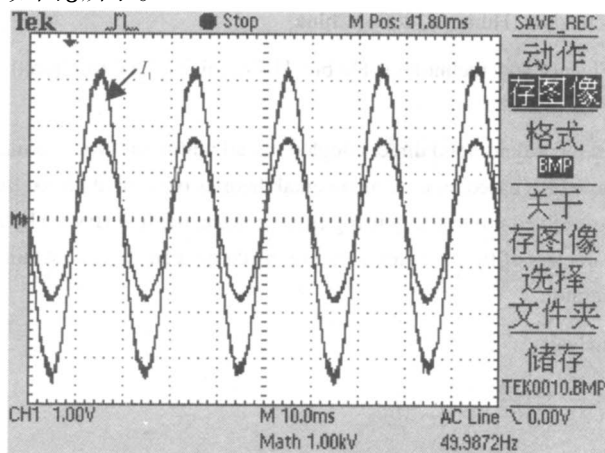


图8 定子电流波形

Fig. 8 Stator current waveform

图8中,幅值较大的波形即为用示波器观测到的定子电流波形,从图中可以读出约为1 550 A,故其有效值 $I_1=1 530/\sqrt{2}=1 082$ A,与理论计算值相近。所以定子侧输出功率 $P_1=\sqrt{3} \times 690 \times 1 082=1 293$ kW。该系统发出的总功率为 $P_1+P_2=1 293$ kW+245 kW=1 538 kW,满足双馈风力

发电系统满功率发电的要求。

图9中,幅值较小的波形为用示波器观测到的转子电流波形图,从图中可以读出约为530 A,故其有效值 $I_2=530/\sqrt{2}=374$ A,与理论计算值相近。

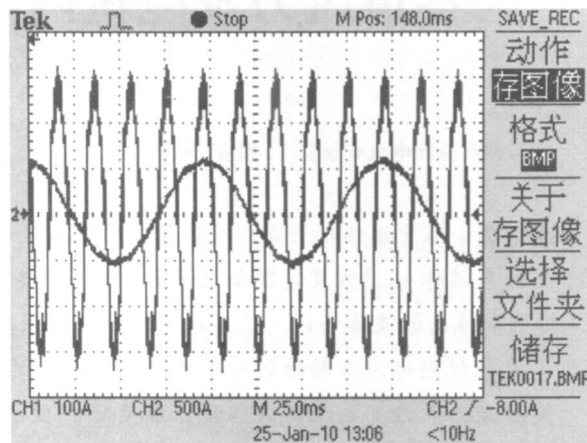


图9 转子电流波形

Fig. 9 Rotor current waveform

6 结语

本文通过对双馈风力发电机稳定运行状态的理论分析和仿真,介绍了双馈电机定子、转子侧电流和功率的计算方法。1.5 MW双馈风力发电机组满功率发电的实验结果证明了所述稳态分析的正确性,这对于实际分析电机的运行状态具有指导意义。

参考文献:

- [1] 刘其辉,贺益康,张建华. 交流励磁变速恒频双馈异步发电机的稳态功率关系[J]. 电工技术学报, 2006, 21(2): 39-44.
- [2] 刘其辉. 变速恒频风力发电系统运行与控制研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2005.
- [3] 汤蕴璆,史乃. 电机学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [4] 杨淑英. 双馈型风力发电变流器及其控制[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2007.
- [5] 苑国峰. 大容量变速恒频双馈异步风力发电系统实现[D]. 北京: 清华大学, 2006.
- [6] Pena R, Clare J C, Asher G M. Doubly fed induction generator using back-to-back PWM converters and its application to variable-speed wind-energy generation[J]. Electric Power Applications IEE Proceedings, 1996,143(3): 231-241.
- [7] 苑国峰,李永东,柴建云,等. 1.5 MW变速恒频双馈风力发电机组励磁控制系统试验研究[J]. 电工技术学报, 2009, 24(2): 42-47.

(上接第18页)

- [3] Poore R, Lettenmaier T. Alternative design study report: WindPACT advanced wind turbine drive train designs study[R]. National Renewable Energy Laboratory, 2003.

- [4] Bywaters G, John V, Lynch J, et al. Northern Power Systems WindPACT drive train alternative design study report[R]. National Renewable Energy Laboratory, 2004.
- [5] Grauers A. Efficiency of three wind energy generating systems[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1996, 11(3): 650-657.