

基于永磁同步风力发电机的风柴油互补发电系统

胡东¹, 赵湘文¹, 蔡旭¹, 尚景宏²

(1. 上海交通大学 电气工程系, 上海 200030; 2. 中国海洋石油总公司 新能源公司, 北京 100027)

摘要: 在孤立电网中, 例如风柴油互补发电系统, 相对高的风电穿透功率能够在很大程度上降低燃料消耗, 节约运行成本, 但是, 风力发电机输出的随机功率扰动给系统带来电压和频率的变化, 会对系统稳定性造成相当大的影响。建立了多极永磁同步风力发电机与柴油同步发电机的数学模型, 用 PSCAD/EMTDC 对永磁同步风力发电机与柴油发电机供电的风柴油互补发电系统进行了仿真和分析。仿真和分析结果表明: 基于多极永磁同步风力发电机的风柴油互补发电系统可以依靠柴油发电机的调节系统实现较高的风电穿透功率和良好的动态性能。

关键词: 永磁同步风力发电机; 柴油发电机; 系统稳定性

中图分类号: TM315 **文献标识码:** A **文章编号:** 1673-6540(2009)07-0034-05

Wind-Diesel Generation Using Permanent Magnet Synchronous Generators

HU Dong¹, ZHAO Xiang-wen¹, CAI Xu¹, SHANG Jing-hong²

(1. Department of Electrical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China;

2. New Energy Development Co., CNOOC, Beijing 100027, China)

Abstract: In isolated power systems, such as a wind-diesel hybrid generation, a relatively high penetration of wind energy can significantly offset the costly fuel generally. It is quite evident that limitations in the wind energy and its intermittent behavior degrade the system stability due to voltage and frequency variations. The analysis and simulation results of the small isolated wind-diesel hybrid system composed of a wind turbine with PMSG connected to an AC bus-bar in parallel with a diesel generator set having a synchronous generator are presented, including the mathematical model of diesel generating sets with excitation system and governor system and the model of a wind conversion system with PMSG. Simulation results based on PSCAD/EMTDC show that the wind-diesel generation using multi-pole PMSG has a high wind power penetration as well as good dynamic characteristics.

Key words: permanent magnet synchronous generator; wind turbine; diesel engine; system stability

0 引言

随着石油价格的攀升, 人们越来越重视可再生能源的应用。风能是最重要、最具潜力的可再生能源, 风力发电机经常被连接到小的电力系统中, 用来减少燃料消耗。在偏远地区最常用的是风柴油发电机并联运行互补供电系统。风柴油互补发电系统的目标是最大化地利用风能, 维持电力系统的电能质量在可接受的范围内, 并且具有好的动态响应特性和足够的稳定边界^[1]。由于风的随机变化, 通过风力发电机产生的功率是波动的。在没有储能装置的情况下, 风的随机变化产生的波动功率会造成电网的电压波动和闪

变^[2], 甚至造成整个系统的不稳定^[3-4]。

风力发电机主要有笼型异步发电机、双馈异步风力发电机和直驱同步风力发电机等。早期的风柴油互补发电系统中, 笼型异步发电机一般直接耦合到电网或通过变换器连接电网。笼型异步风力发电机输出的功率波动大, 需要大的无功补偿, 并且谐波高、电能质量差, 只能通过控制柴油发电机来保证系统电压和频率稳定^[3], 使得柴油发电机的调节能力受到限制。双馈异步风力发电机的控制复杂, 齿轮箱也容易出故障。当出现电压跌落时, 由于定子绕组直接连接到电网, 电压波动大。对于风柴油互补发电的弱电网系统, 要么采用额外的电力电子控制装置^[4], 要么连接储能装置作为缓冲^[5]。多极永磁同步风力发电机用

于风能转换,通过交直交变流器与电网隔离,风力发电机输出电能质量高,风的波动对电网影响小^[6-7];并且由于没有齿轮箱,所以维护量小,适合在偏远地区的恶劣环境中安装使用。本文介绍的直驱永磁风力发电机组采用六相永磁发电机,变流系统是不控整流+升压斩波+PWM无源逆变型多重化并联电路^[8-9],可以在提高系统容量的同时,进一步改善发出的电能质量,抑制谐波,降低风力发电机电压输出的总谐波失真(THD)。基于永磁同步风力发电机的风柴油互补发电系统稳定性、可靠性更高,风的穿透功率更大。在不需要额外的控制调节装置下,该系统可以依靠柴油发电机的调节系统维持功率平衡和系统稳定,最大化地利用风能,节约燃油,降低运行成本。为了验证基于永磁同步风力发电机的风柴油互补发电系统的稳定性,以及维持功率平衡实现互补发电的能力,用PSCAD/EMTDC电力系统仿真软件对该系统进行了仿真和分析;同时通过仿真给出了该系统中风电所占的最大穿透功率。

1 风柴油互补发电系统

本文所分析的基于多极永磁同步风力发电机的风柴油互补发电系统结构图如图1所示。

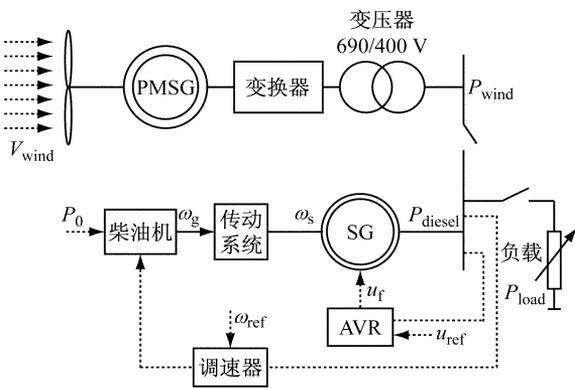


图1 风柴油互补发电系统图

图1中 V_{wind} 表示风速;永磁同步风力发电机通过 AC/DC/AC 变流器用变压器和 400 V 母线相连,其输出功率为 P_{wind} ;柴油机驱动交流同步发电机,直接与 400 V 母线相连,其输出功率为 P_{diesel} ;阻性负载有功功率为 P_{load} 。频率由柴油机的调速系统控制,电网电压由同步发电机(SG)的励磁系统(AVR)调节,风力发电机和柴油发电机

并联运行向一个阻性负载供电。

柴油发电机通过励磁系统和调速系统控制电压和频率,柴油发电机始终工作。柴油发电机的输出功率是负载消耗功率与风力发电机提供功率差,才能维持整个系统的功率动态平衡,因此柴油发电机的输出功率为:

$$P_{diesel} = P_{load} - P_{wind} \quad (1)$$

在该系统中,功率的调节和动态平衡仅依靠柴油发电机的调节系统,没有额外的调节控制装置。

尽管风能在负载有功功率中占的比例越高越好,但对于孤立电网,要考虑的关键问题是风力发电机输出功率的变化及其对电网工作稳定性和电能质量的影响。随着风电穿透率的提高,风电接入对电网稳定性的影响变得越来越明显^[10]。瞬时穿透功率比率是确定接入风力发电机孤立电网的结构与稳定性的一个重要技术指标。风电在孤立电网中的瞬时穿透功率比率定义为:

$$\text{瞬时穿透功率比率} = \frac{P_{wind}}{P_{load}} \quad (2)$$

瞬时穿透功率比率是某一时刻风机发出的有功功率 P_{wind} 占电网负载有功功率 P_{load} 的百分比。因此,在风柴油互补发电系统的稳定性测试中,必须考虑风电的瞬时穿透功率比率。

2 系统模型的建立

为了验证图1所示的基于永磁同步风力发电系统的风柴油互补发电系统能否正确实现互补供电,即当风力发电机对负载提供功率时,柴油发电机发出的功率将会降低,从而达到节约柴油的目的,同时系统的频率,负载电压保持在可接受的范围内。在PSCAD中建立了系统数学模型。该系统主要包含风力发电机和柴油发电机两个模型。

2.1 风力发电机模型

图2为基于永磁同步发电机的风电机组^[8]主电路。它由永磁同步电机、整流电路、三相多重斩波器和双重三相脉宽调制(PWM)逆变器等组成。

风能驱动桨叶带动永磁同步电机旋转发出变压变频的交流电。六相永磁同步发电机通过六相不可控整流,有效减少或抑制了电机侧的谐波转矩脉动,同时对电机绕组几乎没有 du/dt 的影响。另外,从图2可看出,变流装置主回路采用多重化并联技术,提高了系统容量、减少了输出电流谐

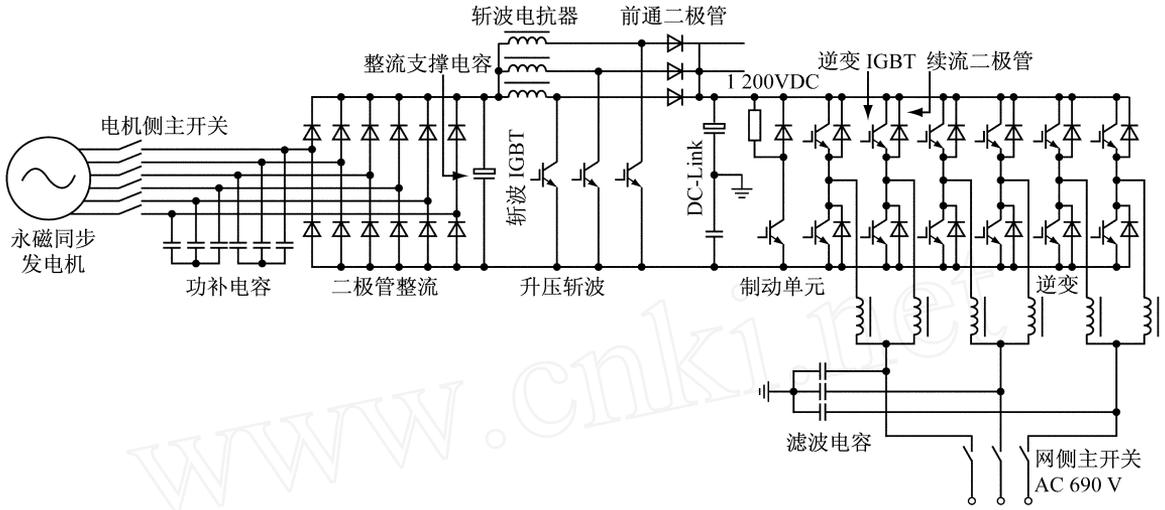


图 2 永磁同步风力发电机主电路

波。中间斩波升压是三重斩波升压,起到了稳压和升压作用,适应了风机的最大风能捕获策略,即把变动的发电机输出电压与整流回路一起最终稳定在 DC-Link 电压设定值附近,使 DC-Link 电压稳定在逆变环节所需的直流电压上。DC/AC 变换部分采用两重逆变策略,通过采用先进的 PWM 技术,有效减少了输出谐波,提高了系统容量。通过控制上的优化,使电压闪变指标在国际技术标准允许范围之内。六相永磁同步风力发电机的参数由表 1 给出,其功率曲线如图 3 所示。

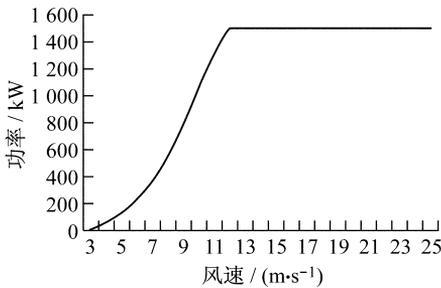


图 3 永磁同步风力发电机功率曲线

2.2 柴油发电机及励磁系统模型

在稳定运行电网中,必须维持频率和电压的稳定。发电机通过励磁自动控制系统和速度控制系统分别维持机端电压和频率的恒定。频率通过柴油机的转矩控制,速度调节器控制柴油原动机的燃油速率,从而使柴油机产生适当的机械转矩带动同步发电机,发出满足电网负载要求的功率,同时维持电网频率的恒定;根据机端反馈电压和

给定的电压信号,励磁自动控制系统通过电压调节器控制励磁机输出相应的励磁电流,维持发电机机端电压的稳定。

表 1 永磁同步发电机参数

参数	参数值
额定输出功率 /MW	1.5
额定转速 / (r · min ⁻¹)	17.8
极对数	88
定子相电阻 /	0.018
定子相电感 /mH	3
额定线电流 /A	640

柴油机驱动三相 50 Hz 额定电压为 400 V, 1 100 kVA 的无刷励磁凸极式同步发电机,其参数见表 2,同步发电机的详细数学模型可参阅文献 [11]。本文采用 PSCAD/EMTDC 库里的模型^[12]。该同步发电机组采用的交流无刷励磁系统符合 IEEE AC8B 型励磁系统。关于更详细的励磁系统模型可以参阅文献 [13]。

3 仿真研究

在该互补发电系统中,当风速变化时,风力发电机的输出功率随之变化,柴油机驱动同步发电机发出的有功功率发生变化维持负载功率平衡,即 $P_{diesel} = P_{load} - P_{wind}$,系统的频率也必须在允许的范围,同时励磁系统维持负载电压稳定。因

为风力发电机的输出功率是随机变化的,所以通过调节柴油发电机调速器的 P 控制器参数,可以保证柴油发电机的输出功率快速增加或减小。下面的仿真可以验证:由风力发电机和柴油发电机同时对负载供电时,由于负载功率的动态平衡,负载获得的功率中风电所占的比例越大,柴油发电机消耗的有功功率越小,可以利用风电来实现节约柴油的目的。

表 2 同步发电机参数

项目	参数
额定输出功率 /kVA	1 100
额定转速 / (r · min ⁻¹)	1 500
额定线电压 /V	400
功率因数	0.8
直轴同步电抗 X_d	2.98
直轴暂态电抗 X_d'	0.20
直轴次暂态电抗 X_d''	0.18
交轴同步电抗 X_q	2.08
交轴次暂态电抗 X_q'	0.26
直轴短路暂态时间常数 T_d'/S	0.14
直轴短路次暂态时间常数 T_d''/S	0.01

在各个装置额定功率范围内,风速任意变化,额定负载时的仿真情况由图 4、5 给出。

风速发生变化的运行过程如图 4 所示,风速经历由开始的 4 m/s 到 6 m/s (第 8 0s) 到 7.5 m/s (第 18 0s),然后又降低为 5 m/s (第 26.0 s) 到最后恢复 4m/s 的过程。可以看到随

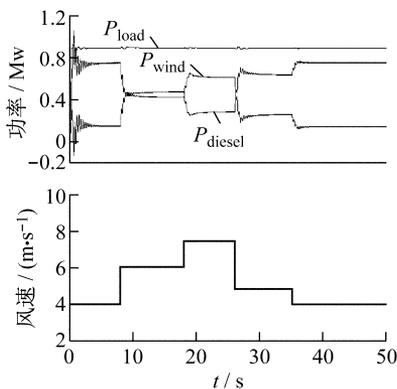


图 4 风速变化时电网有功分配和风速

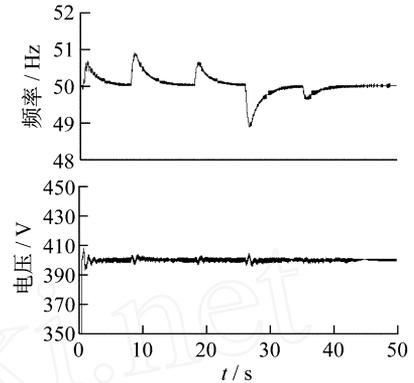


图 5 风速变化时电网系统和负载电压

着风速的提高或降低,风力发电机的出力也相应地增大或减少。而当风力机发出有功 P_{wind} 变化时,柴油发电机改变出力始终维持两者之和与负荷之间的平衡, $P_{diesel} = P_{load} - P_{wind}$ 。图 5 表明由调速系统控制有功的平衡时,频率的变化在允许的范围。风速变化和负荷的投切都造成频率的变化,但通过调速系统作用都能够恢复至额定频率附近;同时励磁系统也可以调节负载电压在额定值附近变化。

当风力发电机的功率增加到一定值时,柴油发电机不能维持功率平衡和电网频率稳定,这个风电功率被认为是孤立系统的最大穿透功率。因为多极同步发电机具有谐波低的高电能质量输出功率,所以基于永磁同步风力发电机的风柴油互补发电系统,在不需要额外的控制调节装置的情况下,在较高的风电穿透功率时仍然能维持较好的动态特性。随着风速的增加,风力发电机的输出功率逐渐增加,柴油发电机在调速系统的控制下,输出功率逐步减少,当系统的频率不能稳定在额定范围时,该互补发电系统中的风电穿透功率比例达到了最大。下面的仿真通过增加风电输出功率测试该系统的最大风电穿透功率。

为了测试模拟互补发电系统中风力发电机发出有功占总有功的比例极限,如图 6 将风速逐渐增加至最后保持在 8.5 m/s,此时系统频率已开始大幅上升,不能再恢复到额定值(如图 7),此时系统已不能稳定运行。此时(第 26.6s)截取的有功数据为: $P_{wind} = 0.798$ MW, $P_{diesel} = 0.091$ MW, $P_{load} = 0.889$ MW;由此所占风电最大穿透功率比率 $= P_{wind} / P_{load} = 89.66\%$,柴油发电机达到最低出力水平 $= P_{diesel} / P_N = 0.091 / 0.889 = 10.24\%$ 。

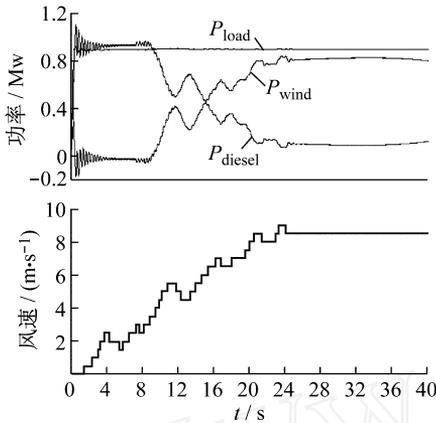


图 6 风机出力比例极限 有功功率和风速

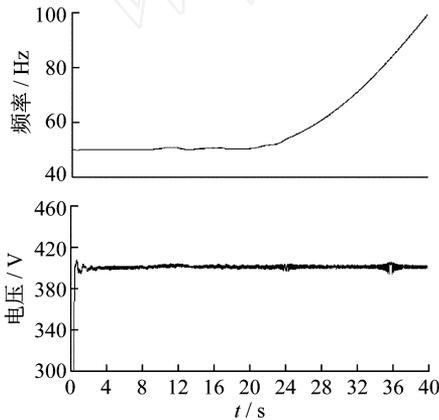


图 7 风机出力比例极限 频率 电压

4 结 语

在不同风速变化下,基于永磁同步风力发电机的风柴油系统对额定负载互补联合供电,仿真验证了所研究的系统能较好地负载供电,维持频率、电压恒定和负载功率分配平衡,具有较快的动态性能,能够适应频繁变化的风速变化条件,从而利用风电实现节约燃料的目的,为实际系统中风柴油互补风力发电提供了理论依据。由于永磁同步风力发电机的高质量输出风电,所以基于永磁同步风力发电机的风柴油互补发电系统可以依靠柴油发电机自身的调节能力,不需要额外的调节控制装置就能维持系统的功率平衡和系统稳定。

另外,仿真还测试了系统中风力发电机能达到最大穿透功率比率以及柴油机能保持的最小输出功率等。制造商通常设计柴油机的最小负载为额定负载的 30% ~ 40%。为了延长柴油发电机

的寿命,尽管风力发电机的最大穿透功率接近 90%,基于永磁同步风力发电机的风柴油系统,实际操作中柴油发电机输出有功功率维持在额定功率的 40% 以上。

【参考文献】

- [1] Muljadi E, McKenna H. Power quality issues in a hybrid power system [J]. IEEE Trans Ind Applicat, 2002, 38, (3): 803-809.
- [2] 孙涛,王伟胜,戴慧珠,等. 风力发电引起的电压波动和闪变 [J]. 电网技术, 2003, 27(12): 62-66
- [3] Papathanassiou SA, Papadopoulos M P. Dynamic characteristics of autonomous wind diesel systems [J]. Renewable Energy, 2002, 23(1): 293-311.
- [4] Pena R, Cardenas R, Probst J, et al Wind-diesel generation using doubly fed induction machines [J]. IEEE Transaction on Energy Conversion, 2008, 23(1): 202-214
- [5] 张步涵,曾杰,毛承雄,等. 串并联型超级电容器储能系统在风力发电中的应用 [J]. 电力自动化设备, 2008, 28(4): 1-4
- [6] Chen Z, Hu Y. A hybrid generation system using variable speed wind turbines and diesel units [C]. Proc 2003 IEEE Ind Electron Soc Annu Meeting Conf, 2003: 2729-2734.
- [7] Neris A S, Vovos N A, Giannakopoulos GB. A variable speed wind energy conversion scheme for connection to weak AC systems [J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 1999, 14(1): 122-127.
- [8] 熊新,梁晖. 兆瓦级风力发电变流系统多重斩波器的研究 [J]. 电力电子技术, 2006, 40(5): 47-49.
- [9] Amei K Y, Takayasu T Ohji A maximum power control of wind generator system using a permanent magnet synchronous generator and a boost chopper circuit [C]. Proc 2002 IEEE Power Conversion Conf, 2002: 1447-1452
- [10] 申洪,梁军,戴慧珠. 基于电力系统暂态稳定分析的风电场穿透功率极限计算 [J]. 电网技术, 2002, 26(8): 8-11.
- [11] Kunder P. Power system stability and control [M]. 北京:中国电力出版社, 2001.
- [12] Manitoba HVDC Research Centre Inc Manitoba HVDC Research Centre Inc, PSCAD user's guide [G]. 2003.
- [13] IEEE Recommended Practice for Excitation System Modeled for Power System Stability [S]. 1992

收稿日期: 2008-09-23