

The Harmonic and Voltage Fluctuation Control Strategy of Wind Power Generator Accesses the Mircogrid

Junbo Fu¹, Liang Ren², Shuhuai Yan³

¹Dept.of Electrical and Electronic Engineering, North China Electrical Power University, 102206, Beijing, China;

²Dept.of Electrical Maintenance, Huainan Luohe Power Plant, 232008, Huainan, China

³Dept.of Thermal Engineering, Anhui University of Technology, 23200, Huainan, China

Email: fujunbo86@126.com

Abstract: The author designs and simulates the wind power generator which used in microgrid, builds model and establishes rectifier and inverter model, introduces the rectifier circuit, chopper circuit, inverter control circuit in detail, To the intermittent、 uncontrollable randomness of the wind power characteristics, proposed constant voltage control method in the chopper circuit voltage to obtain stable voltage. The author also proposes PQ control strategy on inverter device, in order to ensure the wind power generation in accordance with the setting value. Wind power generator generates harmonics and voltage fluctuation when accesses the microgrid. In order to meet the sensitive load demand in microgrid, proposes power quality device---Three-phase shunt compensation of alternating current purifying voltage stabilizer, providing pure sine wave current and voltage to the load. Simulation results show the effectiveness of the proposed control strategy.

Keywords: Synchronous generator; active and reactive control; harmonic; inverter

风机接入微网的谐波及电压波动控制策略

付俊波¹, 任亮², 颜舒准³

¹华北电力大学, 北京, 中国, 102206

²淮南洛河电厂, 淮南, 中国, 232008

³安徽理工大学, 淮南, 中国, 232001

Email: fujunbo86@126.com

摘要: 对微网电源的一种——风机进行了设计仿真, 建立了同步发电机的模型和接入微网的整流逆变模型, 并分别对其中的整流电路、升压斩波电路、逆变控制电路进行了具体说明, 对风力发电的随机性间歇性与不可控性, 提出在斩波电路环节定电压方法以获得稳定的电压。并对逆变装置提出了 PQ 控制策略, 以保证按照需要的功率发电的方法, 对风机接入系统产生的谐波及电压暂降问题进行研究, 说明了风机作为电源提供电流电压存在一定的偏差, 为了能满足微网内部敏感负荷的需求。提出了实用三相并联交流净化稳压电源(三项并联式 DVR)控制谐波及电压暂降的策略, 以提供纯净的正弦波电流和电压给负荷。仿真结果证明了所提出控制策略的有效性。

关键词: 同步发电机; 有功无功控制; 谐波; 逆变器; 三相并联式 DVR

1. 引言

近些年来, 我国电网得到了飞速发展, 以高电压等级, 远距离输送的集中式发电是我国目前电力工业发展的主要方向。但随着包括风电、生物质、光伏等可再生能源和高效清洁的化石燃料在内的新型发电技术的发展, 分布式发电系统(distributed generation system, DGS)日渐成为满足负荷增长需求、减少环境污染、提高能源综合

利用效率和供电可靠性的一种有效途径。DGS 具有投资少、可与环境兼容等优点, 在配电网中得到广泛的应用, 但是 DGS 的大规模渗透也产生了一些负面影响, 如分布式发电单机接入成本较高, 控制较复杂。为整合分布式发电系统的优势, 削弱分布式发电对电网的冲击和影响。同时发挥其固有优势。微网的概念被提出并加以研究^[1]。在微网系统中, 风机是作为常用的微源, 但由于风源的不确定性与随机性, 风机的电能质量问题值得引起我们关注,

输出电压的波动比较明显,另外电能的输出是需要经过电力电子装置的变换,这类电力电子装置的应用也可能会带来谐波问题^[2]。目前关于微网的论文主要集中在控制模式,潮流算法等问题上。微网的电能质量问题很少引起重视。在本文中,将着重研究风机的产生的电压波动及谐波问题,提出使用斩波电路控制直流侧电压稳定和在逆变环节采用有功无功控制的方法,针对系统中的敏感负荷的电能质量问题。使用三相并联式交流净化稳压电源(三相并联式 DVR)补偿策略^[3],以消除谐波和电压波动,得到纯净的电能。

2. 风机运行原理及模型

风电系统发电的基本原理是:风电机组是一种复杂的机电一体化设备,从能量转换角度来看,风力发电机(简称风机)利用叶轮旋转,从风中吸收能量,将风能转化为机械能,叶轮通过增速齿轮箱带动发电机旋转(直驱式电系统无此环节),发电机再将机械能转化为电能。风力发电机可以按照多种不同的方法进行分类,按照发电机运行方式可以分为恒速恒频风力发电和变速恒频风力发电。但由于恒速恒频机组运行范围比较窄,在目前应用的大多是变速恒频机组。变速恒频机组按照发电机类型又可以分为同步发电机和异步发电机。在本文中,选取同步发电机作为研究对象。

2.1 风力机模型

风力机是风力发电系统中的原动机,用于捕获风能。风力机捕获的风能与风速的立方成比例关系,同时还与风力机叶片的转速及结构参数有关。根据风力机功率特性方程,有

$$P_T = \frac{1}{2} C_p A \rho v^3 \quad (1)$$

相应的机械转矩为

$$T_M = P_T / \omega = \frac{1}{2} C_p A \rho v^3 / \omega \quad (2)$$

式中: P_T 为风力机机械功率(W); T_M 为风力机机械转矩(N·m); C_p 为风能利用系数,是桨距角 β 和叶尖速比 λ ($\lambda = R\omega_T/v$)的函数; ω_T 为风力机叶片转速(rad/s); R 为叶片半径(m); A 为叶片扫掠面积(m^2); ρ 为空气密度(kg/m^3); v 为风速(m/s)。由式(2-6)可知,当风速一定时,风力机机械功率的大小取决于风力利用系数 C_p 的大小。当桨距角 β 和叶尖速比 λ 确定时, C_p 可由统计公式计算得到。

本文采用下述统计公式^[4]:

$$C_p = c_1 \left(\frac{c_2}{\lambda_i} - c_3 \beta - c_4 \right) e^{-\frac{c_5}{\lambda_i}} + c_6 \lambda \quad (3)$$

$$\lambda_i = \frac{1}{\lambda + 0.08 \beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad (4)$$

2.2 传动系统模型

传动系统指的是从齿轮箱到发电机转子轴之间的机械部分,主要目的是提高转子机械转速。由于传动系统不是一个刚体,风力机机械转矩从叶片传递到发电机转子转轴上需要一定的时间,具有一定的时滞效应,通常用一阶惯性环节来表示^[5]:

$$pT_m = \frac{1}{T_d} (T_M - T_m) \quad (5)$$

式中: T_m 为发电机转子轴上的机械转矩(N·m); T_d 为机械传动部分的时间常数(s); T_M 为风力机末端轴上的机械转矩(N·m)。

3. 交-直-交风力发电系统

一般而言,可通过机械调速、电力电子技术等多种方法解决恒频发电的问题,机械调速的方法是通过机械或其他复合传动技术,实现风轮与发电机系统间的无级变速传动,以使发电机获得相对恒定的转速输入,采用电力电子方法构成的变速恒频发电系统,一般由发电机和电力电子装置两部分组成,本文中讨论的是全功率变流风力发电系统,如图1所示,通过交-直-交变流技术,可以在发电机定子电路中实现对变速恒频发电系统的控制。发电机产生的变频交流电首先通过三相整流装置变换为直流电,再通过逆变装置变换为工频电输送给电网,变流发电系统提供的电源并网时没有电流冲击,但由于用到的变频装置为静态逆变器,虽然可以调节有功无功功率,仍有高频电流流向电网。另外,变流器开关的动作,也会有谐波注入电网。此种发电系统可以采用多种发电机的选型,如同步发电机、笼型异步发电机和永磁发电机等。对风电机组的总体结构设计十分有利^{[6][7]}。

3.1 变流器模型

整流-逆变装置的设计,采用交-直-交的风力发电系统,整流逆变装置是一个极重要的部分。整流变流器采用是三相不可控二极管整流。

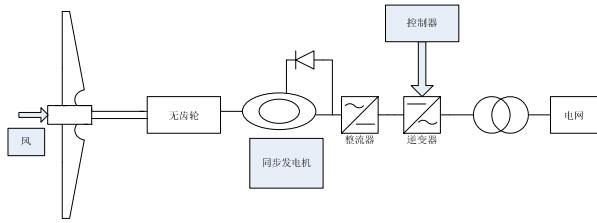


Figure 1. The direct-drive wind power system experiment.
图 1. 直驱式风力发电系统.

当风机出现波动时，直流侧的电压也会出现波动，但逆变装置需要稳定的直流电压，且其幅值要求为800V，故需要斩波电路对其进行升压并维持直流侧电压的稳定。在本文中设计的直流斩波电路为经过整流后的直流侧电压相对较低。故还需要斩波电路对其进行升压。在斩波电路的设计中采用定电压控制，以维持靠近逆变侧的电压保持在800V。电网侧变流器的控制目标是维持两个变流器之间直流电容端电压恒定。本文中，电网侧变流器的控制采用有功无功控制策略，它可以实现电网与电网侧变流器之间有功和无功功率解耦控制。图2为电网侧PWM电压源变频器示意图[8]。

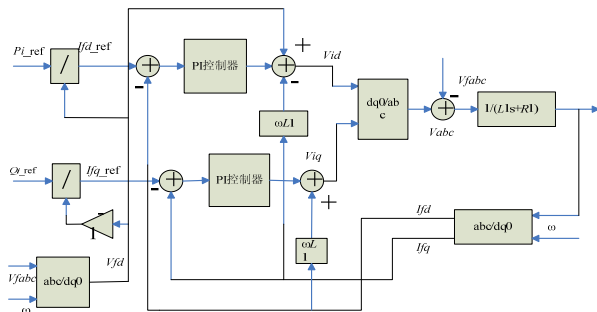


Figure 2. The PQ control structure.
图 2 PQ 控制结构.

目前全球大部分光伏及大型风力发电机已并入电网运行，并网运行省去了蓄电池，提高了可靠性，降低了成本。并网型逆变器的直流到交流的变换实质是一种有源逆变电路，关于逆变器的控制目前主要有 PQ 控制、下垂特性控制、和频率/电压控制这几类，针对随机性负荷一个采用 PQ 控制，图 2 便是 PQ 控制结构图。图中将有功功率无功功率解耦，对电流进行控制，若电网电动势按 q 轴定向，则 $e_d=0$ ，考虑等功率坐标变换，此时逆变器的网侧有功功率 p_s 及无功功率 q_s 可表述为式 (6)

$$\begin{cases} p_s = e_q i_q \\ q_s = -e_d i_d \end{cases} \quad (6)$$

P_{i_ref}, P_{i_ref} 分别为给定的参考目标值， V_{fabc} 是对出口侧电压经过 dq/abc 变换得到的。采用 PI 控制器可使稳态误差为 0。利用锁相环 (PLL) 技术，可使采用 PQ 控制的风机能够获得频率支撑。仿真中输出的 PQ 能快速跟随设定值变化，对发电具有明显间歇性的风力发电来说，若要实用恒定功率输出，则需要配置较大容量的储能装置，这是很不经济的，而实用 PQ 控制策略，则可以实时的调节有功无功输出。

4. 风机电压波动及谐波补偿策略

风机的运行中电压波动和谐波问题是常出现的问题，另外大容量负载的突然启动或者短路状况的发生也可以引起电压跌落，对一些电能质量要求高的负荷，输出的电能质量不能满足要求，因此需要对输出的电能进行补偿，电能质量的补偿策略目前已有很多种方式。在本文中补偿策略采用多功能并联补偿式三相交流净化稳压电源（三项并联式 DVR），原理图见图 2。该电源可以对市电电压波动、谐波和三相不对称度进行补偿。由于在低压配电系统中，我国常采用的是三相四线制电源向负载供电。以满足应用相电压负载和不对称负载的需要。

4.1 SPWM 控制电路

图 4 是三项并联式 DVR 的检测电路。高频变换器的控制电路采用的是正弦脉宽调制 SPWM 控制方法，它是将基准电压信号 u_{dr}, u_{br}, u_{cr} 通过 dq0 变换得到 $\tilde{u}_{dr} + \tilde{u}_{dr}, \tilde{u}_{qr} + \tilde{u}_{qr}, u_{0r}$ ，用图中的低通滤波器滤除交流分量 u_{dr}, u_{qr} 即可得到 dq0 左边系中对应于基波的有功与无功分量 $\tilde{u}_{dr}, \tilde{u}_{qr}$ 与 u_{0r} 。用这两组 dq0 电压信号进行简单的减，加运算后可以得到

$$\begin{aligned} \tilde{u}_{dr} - \tilde{u}_d - \tilde{u}_d + \tilde{u}_{dr} &= 2\tilde{u}_{dr} - \tilde{u}_d - \tilde{u}_d = u_{df} & ; \\ \tilde{u}_{qr} - \tilde{u}_q - \tilde{u}_q + \tilde{u}_{qr} &= 2\tilde{u}_{qr} - \tilde{u}_q - \tilde{u}_q = u_{qf} & ; \\ \tilde{u}_{0r} - \tilde{u}_0 + \tilde{u}_{0r} &= 2\tilde{u}_{0r} - \tilde{u}_0 = u_{0f} \end{aligned}$$

其中 $2\tilde{u}_{dr} - \tilde{u}_d$, $2\tilde{u}_{qr} - \tilde{u}_q$ 反映的是基波电压的波动值， \tilde{u}_d , \tilde{u}_q 反映的是谐波分量， $2\tilde{u}_{0r} - \tilde{u}_0$ 反映的是三相电压不对称度。故将 u_{df}, u_{qf}, u_{0f} 进行 dq0 反变换即可得到反映负载电压（亦即风机输入电压）即基波波动值、谐波分量和三相电压

不对程度之和的调制波指令值 $u_{ac}^* = \pm \Delta u_a + u_{ah}$,

$u_{bc}^* = \pm \Delta u_b + u_{bh}$, $u_{cc}^* = \pm \Delta u_c + u_{ch}$ 。然后用相应的控制电路以 $u_{ac}^*, u_{bc}^*, u_{cc}^*$ 为调制波指令值对高频变换器进行 SPWM 控制，即可以使负载上的电压成为稳定的正弦电压，并且三相不对程度也会得到补偿。

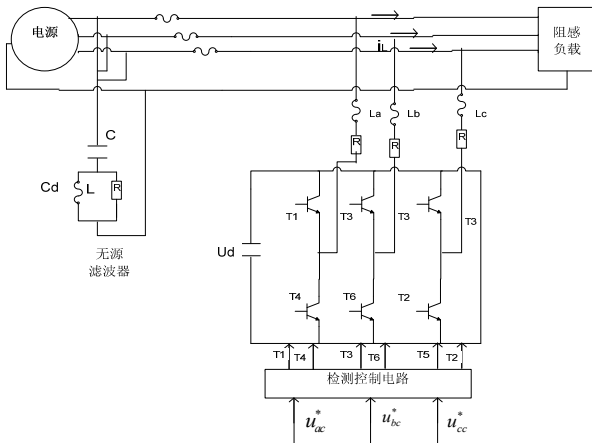


Figure 3 The Three-phase shunt compensation of alternating current purifying voltage stabilizer
图3 三相并联补偿式交流净化稳压电源

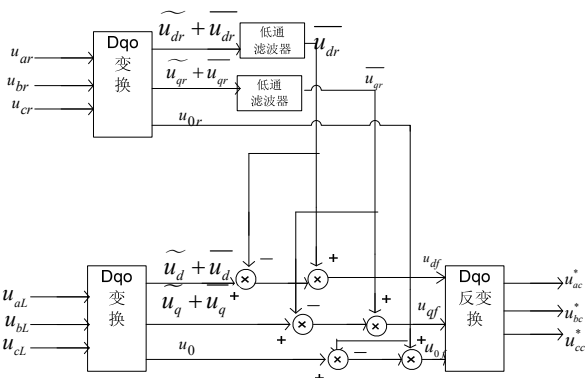


Figure4. The detection circuit diagram of Three-phase shunt compensation of alternating current purifying voltage stabilizer.
图4 三相并联补偿式交流净化稳压电源检测电路图.

5. 仿真分析

在本文中，风力发电机的额定输出机功率为 $P=60\text{KVA}$ ，输出频率 $f=50\text{HZ}$ ，输出电压等级为 $U=380\text{V}$ ，微型燃气轮机接到一个无穷大电网上，用电压 $U=380\text{V}$ ，功率为 $P_5=100\text{MVA}$ 的电源代替，负载分别为 $P_{LOAD1}=80\text{KVA}$ ，功率因素为 0.8， $P_{LOAD2}=160\text{KVA}$ ，功率因素为 0.8，在风机接入母线之前有一个敏感负荷直接与风机输出侧相连，由风机输出电能直接供电给负荷。首先对风力发电机输出侧的电流进行仿真分析，观察输出的电压电流质量，然后使用三相并联式 DVR 用于敏感负荷线路上，观察负荷的电能质量是否得到改善。

由图 5 中可看出，风机输出有功功率 P 随设定值而改变。并且具有快速的追踪能力，在 0.2-0.5s 时刻，改变参考值 P_{ref} ，其输出功率也跟随变化。表明使用 PQ 控制能得到良好的效果。

由图 6 可知，在 0.2s—0.35s 时刻发生过电压跌

落，是因为线路发生三相短路，当接入三相并联式 DVR 在敏感负载侧之后，电压跌落得到了很好的补偿(图 7)。并且通过软件中测量谐波总量的模块测得谐波畸变率也由原来的 3.1%变到 1%，谐波畸变率也得到了大大改善。

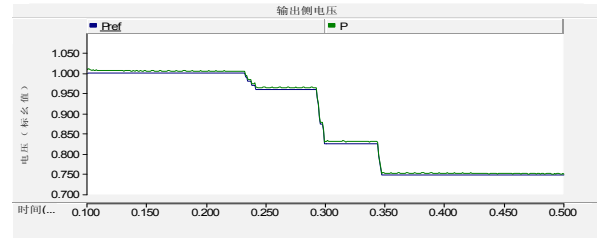


Figure5. The output voltage of wind power
图5 风机输出侧电压

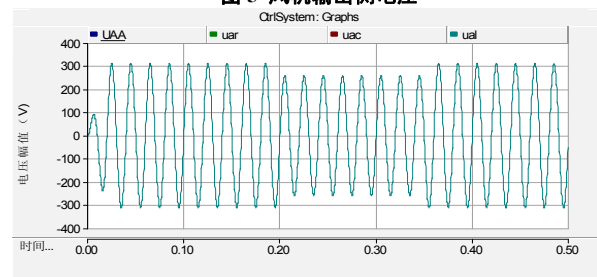


Figure6. The load voltage
图6 负载电压

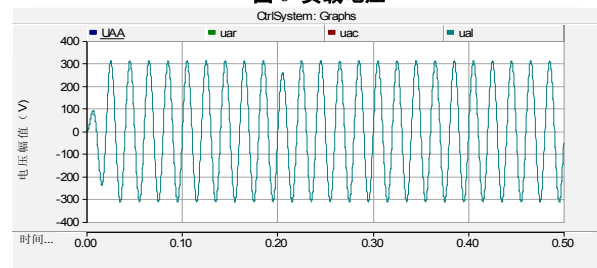


Figure7. The load voltage of DVR accesses the system
图7.DVR 接入后负载电压

6. 结论

本文分析风力发电机、交流转换装置、三相并联式 DVR，接入电力系统数学模型的基础上。着重对风力发电机的输出电能质量进行讨论，并提出实用电能质量治理装置三相并联式 DVR 改善输出电能，以满足敏感负荷的要求，仿真结果表明按照本文中设计的变流装置控制模式能很好的改善风机发电的电压及功率波动状况，能根据实时情况调整有功无功输出，针对风机输出电能不能满足敏感负荷的要求，提出实用三相并联式 DVR，达到了较为理想的效果。

文章中的研究是建立在追求优质电能的目标上，对装置投入使用的经济向问题没有认真考虑。在实际应用中。在追求优质电能的基础上，还需要

考虑投入产出比问题，这个问题有待后续的研究。

References (参考文献)

- [1] LASSETER R H, PAIGI P. Microgrid: a conceptual solution[C]. Proceedings of the 35th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference: Vol. 6, June 20-25, 2004, Aachen, Germany: 4285-4290.
- [2] Xiao Xiangning. Analysis and control of power quality [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004.
肖湘宁. 电能质量分析与控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [3] Liu Fengjun. The Compensation Technology of Municipal Electric Power Quality [M]. Beijing: Science press, 2005.
刘凤君. 市电电能质量补偿技术[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [4] Liu Qihui. The Investigation of Operation and Control for a Variable-Speed Constant-Frequency Wind Power Generation System [D]. Zhejiang: Zhejiang University, 2004
刘其辉. 变速恒频风力发电系统运行与控制研究[D]. 浙江: 浙江大学, 2004.
- [5] Bao Jieqing. Research on Operation Characteristics of Direct Drive VSCF Wind Turbine [D]. Shenyang: Shenyang University of Industry, 2009.
鲍洁清. 直驱变速恒频风电机组运行特性研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2009.
- [6] Yang Renhua. Simulation and Study on Operation Control of Microgrid Based on the Wind Turbine[d]. Beijing: North China Electrical University of Technology, 2009
杨仁花. 基于风力发电机的微网运行控制的仿真研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2009.
- [7] Rui Xiaoming, Liu Yibing, Ma Zhiyong. The Design of Wind Power [M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2010.
芮晓明, 柳亦兵, 马志勇. 风力发电机组设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010
- [8] Wang Chengshan, Xiao Zhaoxia, Wang Shouxiang. Synthetically Control and Analysis of Microgrid[J]. Automation of Electrical Power System, 2008, 32(7):98-102.
王成山, 肖朝霞, 王守相. 微网综合控制与分析[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(7):98-102.