

# Research on the Simulation System of the Generator and the Strategy of its Parallel Operation Based on Power Electronics Modules

Shen Ruihan<sup>1</sup>, Liu Dichen<sup>1</sup>, Xu Yizhe<sup>1</sup>, Wu Yuzhi<sup>2</sup>, Guo Junhua<sup>1</sup>

1. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. College of Electrical & Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China

Email: ruihan7715@126.com, dcliu@whu.edu.cn, wudimen123@126.com

**Abstract:** The ever-larger scale and capacity urge a higher demand for maintaining the security and stability of the power production. By the analysis and comparison of the available physical carrier of the power system simulation, no equipment is designed for the simulation, experiments and analysis of the generator on the live transformer substation spot. The waveform representation has been brought in, by which the synchronous generator simulation system for parallel operation has been researched on. The principle of rotating generator has been simulated by the static power electronic components like the rectifier and inverter. Then the output was optimized by the waveform control module. Based on the coordinated control of each module, the strategy for generator parallel operation has been finally analyzed. According to the results of the simulation experiments through the entire process, verified by the parameters of THD and mean square error, the system designed realizes the controllability and adjustment of the power, voltage, current and frequency of the generator, the output characteristics of which meets the project requirement of the power system.

**Keywords:** waveform representation; generator simulation; switching power amplifier

## 基于电力电子模块模拟的发电机系统及并网控制策略的研究

沈瑞寒<sup>1</sup>, 刘涤尘<sup>1</sup>, 徐一哲<sup>1</sup>, 巫宇智<sup>2</sup>, 郭俊华<sup>1</sup>

1. 武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉 430072;

2. 华中科技大学电气与电子学院, 湖北 武汉 430074

Email: ruihan7715@126.com, dcliu@whu.edu.cn, wudimen123@126.com

**摘要:** 现代电力系统的规模和容量空前增大, 对电力生产的安全、稳定提出了越来越高的要求, 本文通过对比分析现有电力系统模拟的物理载体, 发现目前尚无用于变电站现场进行发电机模拟、仿真的试验装置与分析系统, 本文引入波形重现技术, 借此研究同步发电机并网模拟系统。本文利用整流、逆变等电力电子静态模块模拟旋转发电机的发电原理, 通过波形控制子系统对输出优化处理, 借助发电机控制子系统实现各个模块的协调控制, 最终对发电机并网的控制策略进行了分析研究。通过对整个系统的工作流程进行仿真实验, 结合谐波含有量、电压均方误差等参数进行了仿真验证分析, 结果表明了该系统的输出特性以及功率、电压、电流、频率等参数可控可调, 符合电力系统的工程应用要求。

**关键词:** 波形重现; 发电机模拟; 开关型功率放大器

### 引言

现代电力系统的规模和容量空前增大, 结构和控制日趋复杂, 负荷种类日益繁多, 并网和运行方式日新月异, 保证发电机及电力系统的安全稳定运行、输电质量是电力生产的基础, 若在投入新的发电机, 更

换旧发电设备、新能源电站并网的过程中, 对现有电网产生较大的冲击, 不仅不会造福于民, 还会对工农业的正常生产, 人民正常生活造成巨大的损失<sup>[1-3]</sup>。

目前尚未有简便的可用于变电站现场进行发电机模拟、仿真的试验装置与分析系统。采用可行的装置及措施, 对同步发电机的并网过程进行模拟和测试,

最大限度的预防发电机并网对电网造成的不利影响，实现电力生产的安全、稳定，是在电力建设迅猛发展的今天需要特别关注的问题。

### 1. 波形重现技术的引入

在电力系统的发电、输电和配电环节都必须装设功能各异的继电保护及自动装置（PRAAE），以保证电力系统的安全、可靠、稳定、经济和环保运行<sup>[4]</sup>。对 PRAAE 的动作原理及控制策略的研究取决于对复杂的电力系统模拟仿真的精度，当前对电力系统的模拟仿真技术的研究物理载体上呈现 4 种格局：(1)无软件支持的纯硬件模拟系统；(2)有软件支持但无仿真功能的数字模拟混合系统；(3)有强大软件支持并具有仿真功能的数字模拟混合系统；(4)无大功率模拟硬件支持的数字式纯软件系统。

以上四种模拟仿真技术各有其显著的优点，但仍存在不完善之处，有学者开始提出用由各类电力系统仿真软件产生、由 DSS 及其同类系统试验获取或由现场数字型故障录波装置记录的故障或暂态波形通过 PA 放大后模拟系统的运行和故障发生环境，即波形重现技术<sup>[5]</sup>，本文正是利用这一思想，对各种发电机实际产生的电压波形通过 DSP 仿真实现，通过 PA 放大后，分析其电压幅值、频率和相位，实现并网模拟。

### 2. 同步发电机并网仿真系统

#### 2.1 同步发电机并网条件

同步发电机并联投入电网时，为避免发生电磁冲击和机械冲击，总体要求是发电机端各相电动势的瞬时值要与电网端相电压的瞬时值完全一致<sup>[6]</sup>。具体分解开来包含以下五点：(1)波形相同；(2)频率相同；(3)幅值相同；(4)相位相同；(5)相序相同。前四点是交流电磁量恒等的基本条件，最后一点是多相系统相容的基本要求。

由于条件(1)和(5)分别由电机的设计制造和安装接线予以保证，因此，在实际并联操作中，主要是注意条件(2)–(4)的满足，即发电机端各相瞬时的频率、幅值和相位要与电网对应相的瞬时值完全一致。

#### 2.2 同步发电机并网仿真系统

要实现发电机并网模拟，必须使模拟装置的输出电压的频率、幅值和相位可调。为此，设计仿真系统，由四个子系统组成，工作流程如图 1 所示。

##### (1)整流子系统

整流子系统的输入端是 220V 三相交流电，由两部

分组成，即整流电路部分和斩波电路部分。

整流电路部分：整流电路采用三相桥式全控整流电路，当整流输出电压连续时（即带阻感负载时，或带电阻负载  $\alpha \leq 60^\circ$  时）的平均值<sup>[6]</sup>。

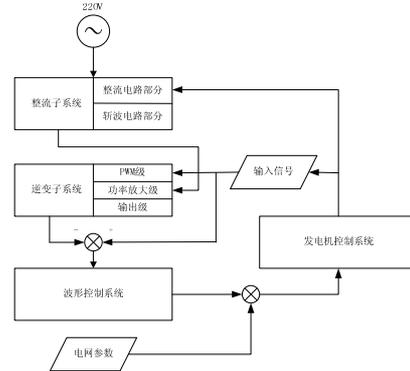


Figure 1. Flow chart of the simulation system  
图 1. 仿真系统流程图

$$U_d = \frac{3}{\pi} \int_{\frac{\pi}{3}+\alpha}^{\frac{2\pi}{3}+\alpha} \sqrt{6}U_2 \sin \omega t d(\omega t) = 2.34U_2 \cos \alpha \quad (1)$$

带电阻负载且  $\alpha > 60^\circ$  时，整流电压平均值为

$$U_d = \frac{3}{\pi} \int_{\frac{\pi}{3}+\alpha}^{\pi} \sqrt{6}U_2 \sin \omega t d(\omega t) \quad (2)$$

$$= 2.34U_2 [1 + \cos(\frac{\pi}{3} + \alpha)]$$

通过触发角  $\alpha$  调节输出电压平均值，整流子系统的输出作为逆变器子系统的电源，输出电压平均值等效于发电机模拟装置输出电压幅值，即并网条件(3)。

斩波电路部分：整流电路部分输出电压波形并非直流的，而在平均值附近上下波动，整流部分的输出波动对逆变输出波形的失真影响较大，因此，本文选用升降压斩波电路，输出电压平均值为

$$U_o = \frac{t_{on}}{t_{off}} E = \frac{t_{on}}{T - t_{on}} E = \frac{\alpha}{1 - \alpha} E \quad (3)$$

以  $U_o$  为基准，使整流电路输出电压波动减小。

##### (2)逆变器系统

逆变器系统是整个发电机模拟系统的核心，以整流子系统的输出电压作为输入电源，通过开关型功率放大器实现对给定波形的功率放大输出<sup>[7]</sup>。该子系统分为三个部分：PWM 级、功率放大级和输出级。PWM 级基于面积等效原理，计算每个开关周期的脉冲宽度，产生 PWM 波形，与常用的调制法不同，采用算法，摆脱输入信号为正弦波的限制，加入高次谐波，甚至

任意信号都可输出其 PWM 波形, 采用矩形积分近似, 可得到每个开关周期 IGBT 管的导通与关断时间为:

$$t_{on} = (n-1)T + \Delta t / 2 \quad (4)$$

$$t_{switch} = \frac{Tf((n-1)T)}{2U_d} + (n-1)T + T / 2 \quad (5)$$

式中,  $t_{on}$  为第  $n$  个开关周期的 IGBT 管 1, 4 的导通时间,  $t_{switch}$  为其关断时间,  $T$  为开关周期,  $f((n-1)T)$  为开关周期初始采样信号值,  $U_d$  为逆变电路的电源,  $\Delta t$  为采用双边设置死区的方式下的死区时间。

功率放大级采用单相桥式逆变电路, 以 PWM 级的输出信号为控制信号, 产生带功率的 PWM 电压波形; 输出级滤除 PWM 控制的逆变电路输出波形中含有较多的, 尤其在开关频率及其倍数附近的高次谐波进行, 将离散的脉冲电压还原为功率放大的电压信号。通过逆变子系统, 可以实现对输出波形频率、相位的调节, 为实现并网条件(2)、(4)提供了基础。

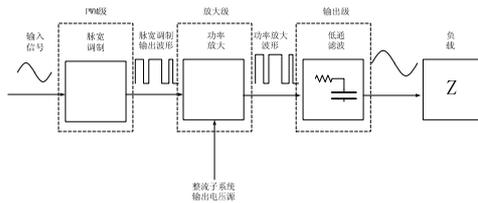


Figure 2. Principle of Switching Power Amplifier  
图 2. 开关型功率放大器工作原理

(3) 波形控制系统

波形控制系统对逆变子系统的输出电压波形进行再优化。逆变子系统的滤波电路部分虽然已经有效改善了采用 PWM 控制方法产生的开关频率及其倍数附近的高次谐波, 实际输出波形与输入信号源比较发现, 逆变子系统的输出波形在跟踪输入信号时, 其响应速度和稳态误差与理想情况有一定差距。本文采用 PID 控制, 对逆变子系统的输出波形进行反馈调节<sup>[9]</sup>。

(4) 发电机控制系统

仿真系统中加入发电机控制系统<sup>[10]</sup>, 将前面环节(整流子系统-逆变子系统-波形控制系统)的输出电压的幅值、频率及相位与给定电网的相应参数比较, 利用比较结果调整整流子系统与逆变子系统的参数, 电压幅值不同, 调整整流系统中整流电路的触发角, 整流电路输出电压的平均值, 即逆变电路的电源电压, 实现输出电压幅值的调节; 频率或相位不同, 改变逆变子系统输入信号的频率与相位、逆变桥在各周期的导通和关断时间, 最终调节输出电压的频率和相位。

## 4. 仿真结果及分析

借助 Matlab/ Simulink 软件, 对上述发电机并网

仿真系统进行软件实现。

### 4.1 整流子系统

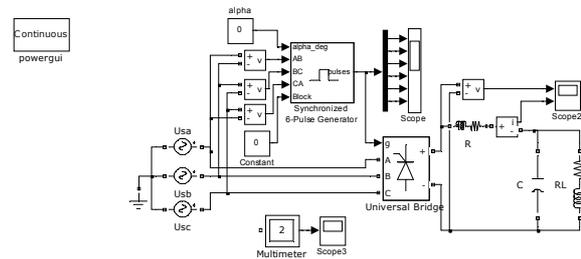
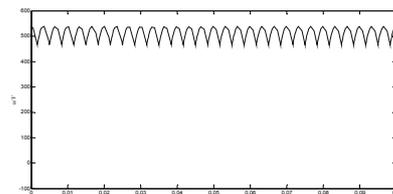


Figure 3. Simulation of three-phase bridge type full-control rectifying circuit.  
图 3. 三相桥式全控整流电路仿真电路。

调节三相桥式全控整流电路的触发角, 可得到平均值可控的电压波形, 以  $\alpha = 0^\circ$  为例, 如图 4 所示



$\alpha = 0^\circ$  时的电压波形

Figure 4. Waveform of the output voltage.

图 4 整流电路的输出电压波形。

由图 4, 三相桥式全控整流的电压波形的波动很大, 这种电压无法满足逆变子系统的电源要求, 加入斩波电路保持整流子系统的电压相对稳定在其电压平均值, 对保证逆变子系统的输出波形质量是十分必要的。

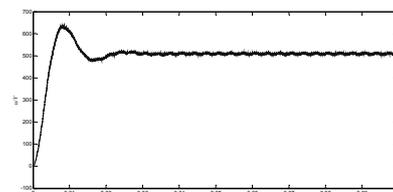


Figure 5. Waveform of the output with chop circuit.  
图 5. 加入斩波电路后的输出电压波形。

图 4 中, 电压波形的波动约 100V; 图 5 中, 虽然其电压波形在仿真初期超调较大, 但在稳定后, 其电压波动可以低至 10V 以内, 达到了设计的预期目标。

### 4.2 逆变子系统

包括 PWM 级、功率放大级和输出级三个部分。

(1) PWM 级

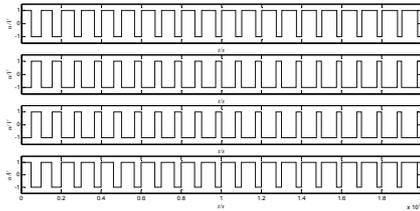


Figure 6. Waveform of the PWM Pulse without dead zone.  
图 6 不加死区时间的 PWM 脉冲波形.

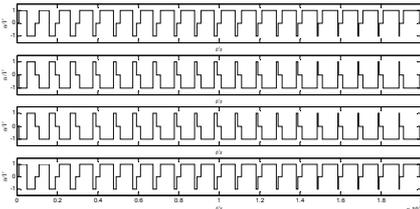


Figure 7. Waveform of the PWM Pulse with dead zone.  
图 7 加入 20%死区时间的 PWM 脉冲波形.

输出端产生 4 个脉冲, 分别控制功率放大级 IGBT 桥的四个开关管的导通与关断, 为防止同一桥臂的两个 IGBT 管同时导通引起短路, 可加入死区时间。

(2) 功率放大级

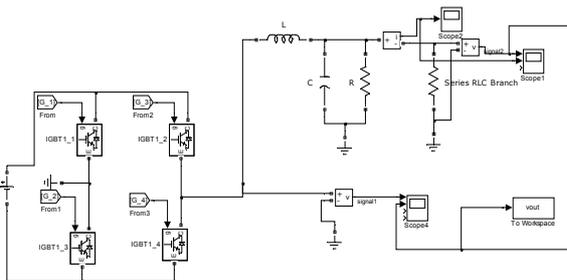


Figure 8. Simulation of the PA circuit.  
图 8.功率放大级仿真电路.

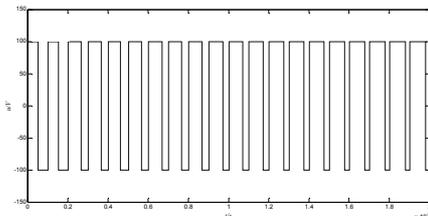


Figure 9. PWM pulse amplified by PA supplied by 100V DC source.  
图 9 100V 直流电源下功率放大后的脉冲波形.

经 POWERGUI FFT 分析, 总谐波含有量 (THD) 为 142.64%, 其中开关频率下的谐波分量, 即  $f=10\text{KHz}$  的谐波含量为 73.69%, 其倍数及附近的谐波分量含量也均在 10%-50%之间。

(3) 输出级

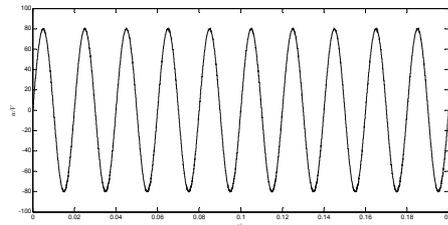


Figure 10. Waveform of the output voltage processed by filter.  
图 10 经过输出级滤波后的输出电压波形.

经 POWERGUI FFT 分析, THD 为 3.96%, 滤波效果较好, 尤其对于开关频率及其倍数附近的高次谐波, 经滤波后, 其含有量均低于 0.01%。

4.3 波形控制系统

图 11 中, 第一行波形为实现输出波形, 第二行波形为输入信号波形, 第三行波形为每一点的偏差值。

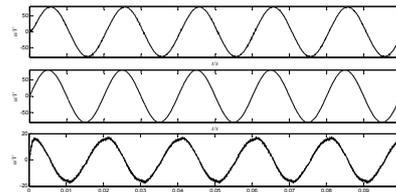


Figure 11. Waveform of the output voltage without PID.  
图 11 无 PID 控制环节的输出波形.

本文采用均方误差参数评价 PID 控制效果,

$$\hat{\epsilon}_{MSE} \approx \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N [U_{out}^*(k) - U_{in}^*(k)]^2 \times 100\% \quad (6)$$

当不采用 PID 控制环节时,  $\hat{\epsilon}_{MSE} = 4.19\%$

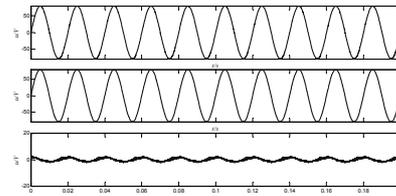


Figure 12. Output voltage with incremental digital PID  
图 12 采用增量式 PID 控制算法的输出电压波形.

当采用增量式 PID 控制算法时  $\hat{\epsilon}_{MSE} = 0.0431\%$

5. 结论

本文应用电力电子技术和波形重现技术以及软硬件控制技术, 设计并构建模拟同步发电机并网系统, 分析研究了模拟系统中的整流、逆变、波形控制、发电机控制等四个子系统之间的协调关系, 结合谐波含有量、电压均方误差等参数进行了仿真验证分析, 结果表明该系统的输出特性以及功率、电压、电流、频

率等参数可控可调，符合电力系统的工程应用要求，该系统可应用于发电机系统的相关测试以及特性实验，还可应用于继电保护的检测与试验以及其他新能源如光伏电源等的模拟仿真。该模拟系统具有体积小、成本低、操作简便 安全、工作效率高等优点。

## References (参考文献)

- [1] Hu Zhaoguang. Study on Electric Requirements of China's Industrialization and Electricity Intensity[J]. Energy of China. 2007, 29(10), P5-9. (Ch)  
胡兆光. 我国经济发展对电耗的影响及电力的需求浅析[J]. 中国能源. 2007, 29(10),P 5-9.
- [2] Li Xinggui. Study on the relationships between the electric power and economic society [J]. Guangdong Science & Technology. 2008(3), P147-148.. (Ch)  
李兴桂. 浅谈电力与经济社会的关系[J]. 广东科技. 2008(3), P147-148.
- [3] Chen Shuping, Chen Huishuang. Study on the relationships between the electric power and economic issues[J].Science. 2008(18), P318-319.  
陈姝萍, 陈惠双. 浅析电力与经济问题的关系[J]. 科技信息. 2008(18),P318-319.
- [4] Sun Xiaoming. Study on the theory and the application of the electrical fault waveform regeneration[D] . Wuhan University.2009  
孙晓明. 电力故障波形重现的理论与应用研究[D]. 武汉大学 2009.
- [5] Sun Xiaoming, Liu DiChen, Yuan Rongxiang. Modeling and adaptive control of inverter for electrical fault waveform reconstruction [J]. Proceedings of the CSEE.2009, 29(34),P63-70.  
孙晓明, 刘涤尘, 袁荣湘. 用于电力故障波形重现的逆变器建模及其自适应控制[J]. 中国电机工程学报 . 2009,29(34) ,P63-70.
- [6] Gu Chenglin,Chen Qiaofu, Xiong Yongqian. ElectricMachinery[M] Wuhan: Huazhong University of Science & Technology Press.2005,P456.  
辜承林, 陈乔夫, 熊永前. 电机学[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2005,P456.
- [7] Wang Zhao'an, Huang Jun. Power electronics[M]. BeiJing: China Machine Press.2000 (Ch)  
王兆安, 黄俊主编. 电力电子技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000: 215.
- [8] Chen Guocheng. PWM inverter and its applications [M]. Beijing: China Electric Power Press 2007,P411. (Ch)  
陈国呈编著. PWM逆变技术及应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007: P411.
- [9] Mei Xiaorong. Automatic Control Principle [M]. Beijing Science Press.2007 (Ch)  
梅晓榕主编. 自动控制原理[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [10] Ni Yixing. Dynamical analysis theory for power system [M]. Beijing : Tsinghua University Press. 2002. (Ch)  
倪以信等著. 动态电力系统的理论和分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.