

Analysis of Frequency Modulation Characteristics of Synchronous Generators in Microgrid

Xincai Liu¹, Yingming Geng²

¹Department of Electrical Engineering, Shandong Polytechnic, Jinan Shandong

²School of Electrical Engineering, Shandong University, Jinan Shandong

Email: liuxincai988@sina.com

Received: Jul. 30th, 2017; accepted: Aug. 21st, 2017; published: Aug. 30th, 2017

Abstract

In the island mode with no support of large power grid, the stable operation is maintained only by distributed energy. We can take synchronous generator as main control unit. This paper focuses on the synchronous generator speed control system characteristics and simulation. The main research contents include the establishment of synchronous generator speed control system and automatic power generation control system mathematical model and the stability analysis of the speed control system. Then through simulation of different load changes, the characteristics of synchronous generator's differential regulation and non-differential regulation are studied, which supports the stable operation of micro-grid.

Keywords

Micro-Grid, Island Operation, Synchronous Generator, Frequency Modulation Characteristics

微电网中同步发电机调频特性分析

刘新才¹, 耿英明²

¹山东职业学院, 电气系, 山东 济南

²山东大学, 电气工程学院, 山东 济南

Email: liuxincai988@sina.com

收稿日期: 2017年7月30日; 录用日期: 2017年8月21日; 发布日期: 2017年8月30日

摘要

微电网在孤岛运行时无公用电网的支撑, 仅由分布式电源维持系统稳定, 可采用以同步发电机作为主控

文章引用: 刘新才, 耿英明. 微电网中同步发电机调频特性分析[J]. 电力与能源进展, 2017, 5(4): 92-98.

DOI: 10.12677/aepe.2017.54015

制单元的运行模式。论文对基于V/f控制的同步发电机调速系统特性进行数字仿真研究, 给出了同步发电机调速系统和自动发电控制系统的数学模型, 分析了调速系统的稳定性。通过对不同负荷变化情况进行仿真, 分析了微电网孤岛运行时同步发电机无差调节及有差调节的特性。

关键词

微电网, 孤岛运行, 同步发电机, 调频特性

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

作为集中式发电的有效补充, 分布式发电技术正日趋成熟。但风、光等新能源具有不可控性, 常规配电系统已无法满足大规模分布式电源的接入。研究跟实践证明, 将分布式发电系统跟负荷等一起组成微电网运行, 可以充分提高风光等新能源的利用率, 提高供电质量[1]。

微电网在并网运行模式下, 其电压和频率由公用电网提供支撑, 分布式电源采用 PQ 控制, 按照给定的有功和无功进行输出。而在孤岛运行时, 采用主从控制模式, 需要一个分布式电源采用 V/f 控制, 提供电压和频率参考, 其他分布式电源采用 PQ 控制[2]。微电网中的同步发电机具有更好地可控性, 因此可以其作为主控制单元, 方便进行功率的连续调节, 保证微电网的长时间稳定运行。所以孤岛运行时, 同步发电机的调速性能对频率的稳定性具有重要作用。

文献[3] [4] [5]从系统稳定和经济性上, 对微电网分布式电源的容量配置问题进行了分析。文献[6] [7]给出了不同类型发电机的模型, 分析了孤岛运行时不同微电源的频率特性。文献[8] [9]对微电网一次调频和二次调频策略进行了分析。

本文主要对孤岛运行时的同步发电机调速特性进行了研究, 首先建立了同步发电机的数学模型, 选择了一个微电网的容量, 进行了一次调频和二次调频的仿真, 研究了同步发电机的调频性能及稳定性。

2. 同步发电机数学模型

为了研究微电网孤岛运行时同步发电机调频特性, 首先建立同步发电机的数学模型。

2.1. 负荷频率控制

负荷频率控制(Load Frequency Control, LFC)是为了保持系统频率为额定频率, 当负荷功率发生变化导致频率变化时, 通过检测频率误差信号并转化为有功功率控制信号 ΔP_V , 把它送到原动机以获得转矩增量。原动机带来发电机输出功率的变化 ΔP_G , 它将改变 Δf 和功率误差 ΔP_{tie} , 使之保持在允许范围内[10]。

同步发电机的负荷频率控制如图 1 所示。

图中: ΔP_g 是调速器输出功率偏差; τ_g 是调速器时间常数; τ_T 是原动机时间常数; ΔP_V 蒸汽开度的变化; ΔP_m 是原动机输出功率的变化; $\Delta \Omega$ 是频率的偏差; ΔP_{ref} 是设定功率; R 是调差系数; H 是发电机惯性常数; D 是负荷变化的百分数与频率变化的百分数之比; ΔP_L 是负荷功率的变化。

以 $-\Delta P_L(s)$ 作为输入, 以 $\Delta \Omega(s)$ 作为输出。可以得到负荷变化量 $\Delta P_L(s)$ 和频率偏差 $\Delta \Omega(s)$ 的闭环传递函数为:

$$\frac{\Delta\Omega(s)}{-\Delta P_L(s)} = \frac{(1 + \tau_g s)(1 + \tau_T s)}{(2Hs + D)(1 + \tau_g s)(1 + \tau_T s) + 1/R} \quad (1)$$

2.2. 自动发电控制

当负荷发生改变时, LFC 控制环可以根据调差系数的值将系统的频率调节到一个存在频率偏差的稳态值。为了将频率的偏差调节到零, 必须提供一个积分控制器, 积分系统将系统的阶数增加一阶。当系统负荷连续发生变化时, 发电机频率被调整到额定值, 这称为自动发电控制(Automatic Generation Control, AGC), 根据自动控制理论, 此时对于阶跃输入信号下的稳态误差为零。

在 LFC 上增加第二个环, 必须调整积分控制器增益满足暂态响应的要求, 得到的控制框图如图 2 所示。

图中: K_1 是积分控制增益。

如图 2 所示, 以 $-\Delta P_L(s)$ 作为输入的闭环传递函数为:

$$\frac{\Delta\Omega(s)}{-\Delta P_L(s)} = \frac{s(1 + \tau_g s)(1 + \tau_T s)}{s(2Hs + D)(1 + \tau_g s)(1 + \tau_T s) + K_1 + s/R} \quad (2)$$

3. 微电网中同步发电机调速特性仿真分析

在采用主从控制模式的微电网中, 孤岛运行时以同步发电机做主控制单元, 采取定电压定频率的控制方式, 其他分布式电源采用定功率控制。

当微网根据情况需要独立运行或者配电网出现故障时, 断开了与配电网的连接, 负荷的变化主要由

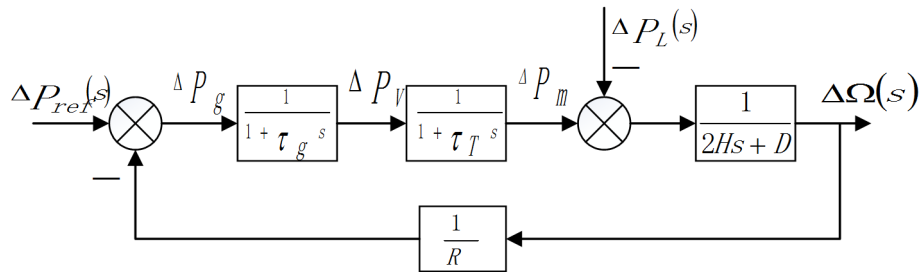


Figure 1. Synchronous generator load frequency control

图 1. 同步发电机负荷频率控制框图

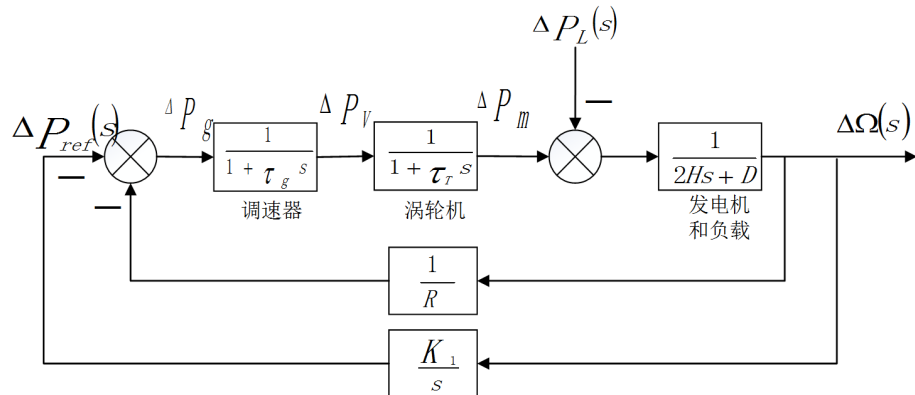


Figure 2. Independent power generation system AGC

图 2. 孤立发电系统 AGC 等效框图

同步发电机跟随。此外在微电网处于孤岛运行时, 负荷的变化也主要由同步发电机跟随, 以提供电压和频率支撑。因此同步发电机的调频性能关系着微电网能否稳定独立运行, 下面以某海岛微电网为例, 对其中同步发电机的调速特性进行仿真分析。

某海岛微电网的峰值负荷为 2200 kW, 其中风机容量 200 kW、光伏容量 700 kW_p、储能容量 270 kW·h、同步发电机容量 2500 kW。同步发电机的参数为: 汽轮机时间常数 $\tau_T = 0.5$ s, 调速器时间常数 $\tau_g = 0.2$ s, 发电机惯性常数 $H = 5$ s, $D = 0.8$ 。

3.1. 同步发电机有差调节

对于微电网功率的较小波动, 同步发电机采用有差调节的方式进行频率稳定。

3.1.1. 调差系数分析

首先分析调差系数的选择对调速系统暂态性能和稳态性能的影响, LFC 控制框图的开环传递函数为:

$$KG(s)H(s) = \frac{K}{s^3 + 7.08s^2 + 10.56s + 0.8} \quad (3)$$

这里 $K = \frac{1}{R}$ 。特征多项式为:

$$s^3 + 7.08s^2 + 10.56s + 0.8 + K = 0 \quad (4)$$

特征多项式的劳斯表 Routh-Hurwitz array 为:

s^3	1	10.56
s^2	7.08	$0.8 + K$
s^1	$\frac{73.965 - K}{7.08}$	0
s^0	$0.8 + K$	0

由劳斯判据可得 $K < 73.965$, 即 $R > 0.0135$ 系统稳定。

为了比较分析调差系数的变化对调速系统暂态性能的影响, 取 $K = 15/20/25$, 进行仿真, 如图 3 所示。

从上图可以看出, K 越大, 调差系数 R 越小, 稳定时间越长, 稳态频率偏差越小。所以调差系数过小, 稳定时间过长; 调差系数过大, 稳态频率误差又会过大。而同步发电机从空载到满载调速系统一般有 5%~6% 的调差系数, 在该案例中选择调差系数为 5%。

3.1.2. 有差调节建模仿真

若电网故障或其他原因导致微电网由并网转孤岛运行, 此时微电网的功率可能不足也可能会盈余; 此外孤岛运行时, 微电网的负荷会一直发生波动, 这都需要进行频率的调整。

如果微电网功率波动较小, 同步发电机需要跟随的功率变化也较小, 调速器只需要进行一次调频即可满足频率波动要求。例如在孤岛运行时, 负荷突然增加或减少了 100 kW ($\Delta P_L = \pm 0.04$ p.u.), 在 simulink 进行建模如图 4 所示。(以阶跃信号模拟负荷的变化量, 本文进行的仿真均以标么值计算。)

仿真得到的频率变化如图 5 所示。

达到稳态时, $\Delta\omega$ 为 ± 0.001923 , 频率偏差实际值为 0.096 Hz。满足电网要求频率偏差限值 ± 0.2 Hz。

根据终值定理, $\Delta\omega_{ss}$ 的稳态值为:

$$\Delta\omega_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} s\Delta\Omega(s) = -\Delta P_L \frac{1}{D + 1/R} \quad (5)$$

计算得 $\Delta\omega_{ss} = -0.001923$, 与建模仿真得到的数据相同。

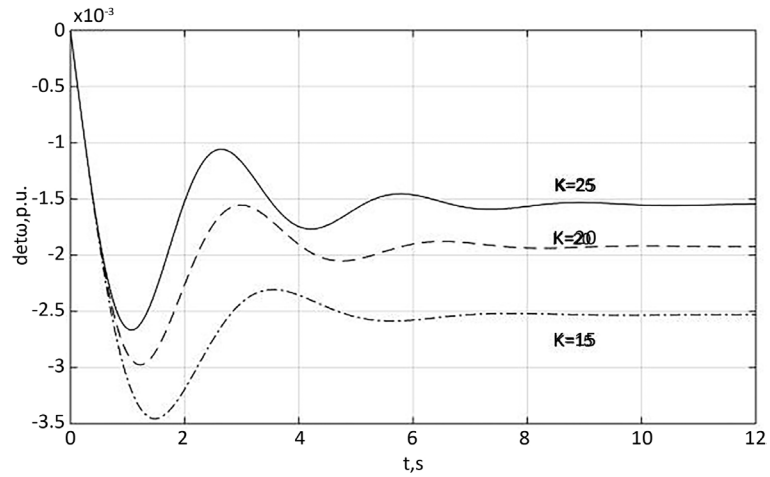


Figure 3. Simulation of different modulation coefficients
图 3. 不同调差系数的仿真图

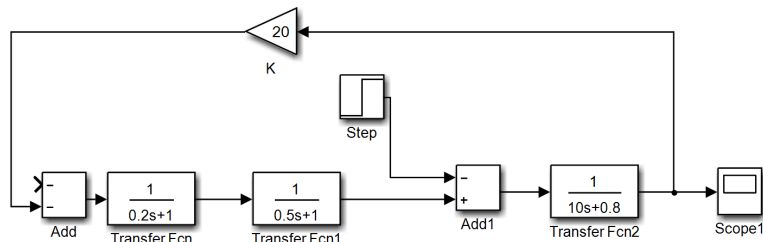


Figure 4. Modeling of differential regulation
图 4. 有差调节建模图

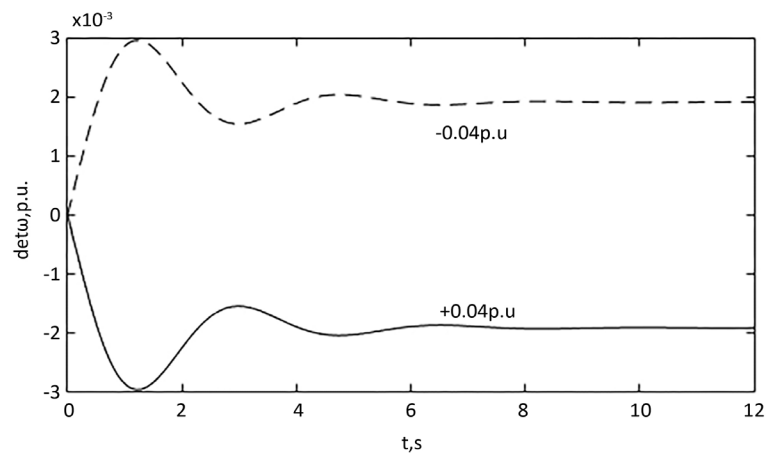


Figure 5. Simulation of differential regulation
图 5. 有差调节仿真图

同时由于微电网同步发电机功率有限, 所能进行有差调节的功率波动具有一定的限度。如果负荷波动较大则无法满足频率的要求, 根据频率限值计算出有差调节的 $\Delta\omega_{ss}$ 最大变化范围 ± 0.004 p.u., 由公式 (5) 计算得到功率的波动最大为 ± 208 kW。

3.2. 同步发电机无差调节

对于周期在 10 s 至 2~3 min 以内而幅度变化较大的负荷, 只由调速器自身的调频特性以不能满足频

率要求, 需要调整调频器的整定机构, 使发电机的静态频率特性曲线向上平移, 直到频率达到额定值, 这称为二次调节, 即无差调节。无差调节增加了一个积分环节, 先判定系统稳定时积分控制增益的取值范围。

系统开环传递函数为:

$$G(s)H(s) = \frac{20s + K_1}{s^4 + 7.08s^3 + 10.56s^2 + 0.8s} \quad (6)$$

特征多项式为:

$$s^4 + 7.08s^3 + 10.56s^2 + 20.8s + K_1 = 0 \quad (7)$$

特征多项式的劳斯表 Routh-Hurwitz array 为:

s^4	1	10.56	K_1
s^3	7.08	20.8	0
s^2	7.62	K_1	0
s^1	$20.8 - 0.93K_1$	0	0
s^0	K_1	0	0

由劳斯判据可得 $0 < K_1 < 20.8$, 取 $K_1 = 7$ 。

在该微电网中, 当负荷发生较大波动, 或者并网转孤岛运行时功率缺额较大, 需采用无差调节进行频率的稳定。根据 2.1.2 求得的有差调节功率变化范围, 假定负荷增加或减少 500 kW ($\Delta P_L = \pm 0.2$ p.u.) 时, 在 simulink 中进行建模如图 6 所示。

仿真得到频率变化如图 7 所示。

由上图可以看出达到稳态时, 频率偏差基本为零。因此当负荷波动较大时, 采用无差调节的方式可以使频率稳定在额定频率。但如果负荷增大过多, 超过了分布式电源的最大功率, 导致频率下降过大时只能进行低频减载, 在此不进行详细讨论。

4. 结论

本文通过对微电网中同步发电机一次调频及二次调频进行仿真, 并对实验结果进行分析, 得到了以下结论:

- 1) 同步发电机的调差系数和积分控制增益会影响系统的暂稳态性能, 调差系数 R 越小, 稳态误差越小, 调节时间会增长, 而过小会导致系统不稳定。因此需要选择适当的调差系数。同时积分控制增益也不宜过大。
- 2) 一次调频所能调整的负荷变化具有一定限度, 负荷变化较大时仅由一次调频作用会导致频率发生

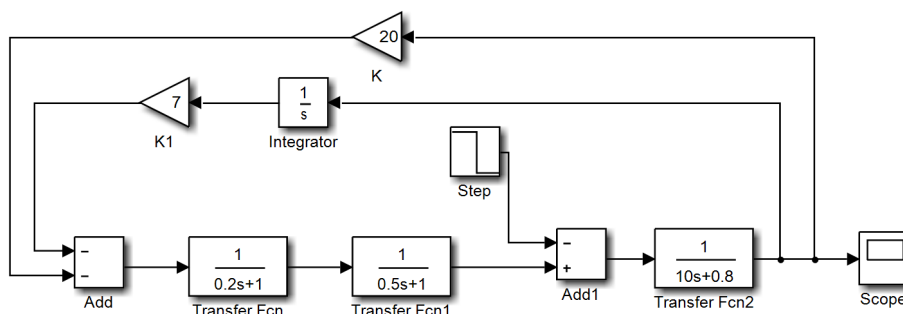


Figure 6. Modeling of non-differential regulation

图 6. 无差调节建模图

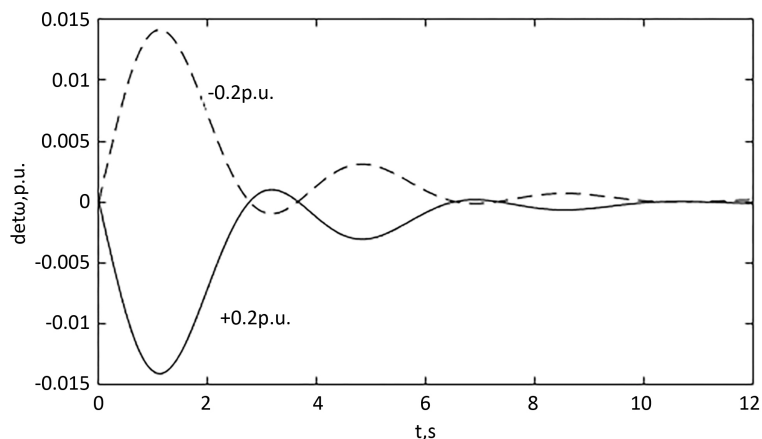


Figure 7. Simulation of non-differential regulation

图 7. 无差调节仿真图

较大偏移不能满足电网的频率要求。此时需要调频器进行调整以实现无差调节。

通过分析可以看出, 同步发电机由于它自身的频率特性, 作为微电网主控制单元进行定电压定频率控制更加方便操作。

参考文献 (References)

- [1] 王成山. 微电网分析与仿真实论[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- [2] Milosevic, M. and Andresson, G. (2005) Generation Control in Small Isolated Power Systems. *Proceedings of the 37th Annual North American Power Symposium*, Ames, 23-25 October 2005, 524-529.
- [3] 牛涛, 钱康, 孙纯军, 等. 基于遗传算法的微电网容量配置方法及软件开发[J]. 中国电力, 2016, 49(9): 160-164.
- [4] 周康. 风光(柴)储联合发电系统容量配置方法研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 电子科技大学, 2012.
- [5] 陈柔伊, 董旭柱, 黄邵远, 等. 孤岛微网系统柴发配置分析[J]. 电工电能新技术, 2014, 33(10): 58-63.
- [6] 时珊珊, 鲁宗相, 闵勇, 等. 微电网孤网运行时的频率特性分析[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(9): 36-41.
- [7] 薛卿. 同步发电机参数对不同假设模型影响的研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 华北电力大学, 2011.
- [8] 梁英, 盛万兴, 钟庆昌, 等. 基于同步逆变器的微电网二次调频策略及特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(2): 391-402.
- [9] 邓浩. 光伏与微型燃气轮机混合微网建模及控制策略研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆大学, 2011.
- [10] Hadi, S. 电力系统分析[M]. 北京: 中国电力出版社, 2008.

期刊投稿者将享受如下服务：

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：aepe@hanspub.org