

基于下垂系数自适应调节的 VSG 控制策略

吴浙勋¹, 高文根¹, 汪石农¹, 邵育兰²

(1. 安徽工程大学电气工程学院, 安徽 芜湖 241000; 2. 芜湖职业技术学院, 安徽 芜湖 241000)

摘要:虚拟同步发电机技术(VSG)促使电路中无旋转元部件的分布式电源具有了同步发电机的有功频率及无功电压调节特性,但离网运行模式下,VSG的一次调频与一次调压本质上是一种下垂控制,属于有差调节,负载功率的改变,将导致其输出频率和相电压幅值偏离。针对此问题,通过分析VSG有功功率变化与频率变化之间的关系、无功功率变化与电压变化之间的关系及功率调节的动态特性,选取下垂系数作为优化对象,引入参数自适应调节的方法,提出一种下垂系数依据实际情况自行调整的改进型VSG。仿真结果表明,在离网运行模式下,改进后的控制策略与传统VSG相比,不仅能维持微电网功率平衡,而且实现了频率的无差调节和相电压幅值调节的小偏差。

关键词:虚拟同步发电机;频率调节;电压调节;下垂系数;自适应调节

中图分类号:TM464

文献标志码:A

引言

随着能源短缺、环境污染等情况已严重影响社会与经济的发展,经济、清洁、可再生的风能、太阳能等新能源受到了越来越多的关注^[1]。作为一个能源消费大国,目前,我国的风能和太阳能并网装机容量已经分别达到1.08亿千瓦与0.37亿千瓦^[2]。

随着新能源并网装机容量快速增长,传统电力系统运行的稳定性因分布式电源发电具有非线性和随机波动性而面临着巨大威胁。因此,有学者提出了包括分布式电源、负载、储能、能量转换器及监控保护装置的微电

网结构^[3-4]。该结构通过储能装置缓解了分布式电源发电对传统电力系统的冲击。其采用的下垂控制无需互联互通,即可使分布式电源具有同步发电机的功率分配特性,且组网灵活、简单可靠^[5]。但微电网中的逆变器由于其电路中无旋转元部件,属于静止式装置,这使得微网与传统同步发电机相比,缺乏维持电网整体能量平衡、系统稳定的旋转备用容量及转动惯量。若能使电路中无旋转元部件的逆变器借助储能装置模拟同步发电机的运行特性,将解决新能源大规模接入电网所造成的稳定性问题。为此,国内外学者提出了虚拟同步发电机技术(Virtual Synchronous Generator, VSG)^[6-9]。

收稿日期:2017-12-06

基金项目:安徽省高校自然科学研究重点项目(KJ2017A107);芜湖市科技计划重大项目(2014zdz3)

作者简介:吴浙勋(1988-),男,安徽芜湖人,硕士,主要从事电力电子技术与自动化装置方面的研究,(E-mail)375255816@qq.com

VSG 按外特性划分为两类:电流控制型与电压控制型。电流控制型 VSG 由于其等效为电流源,在微电网离网运行模式下,难以提供有效的频率和电压支撑^[10-11]。与电流控制型 VSG 相比,电压控制型 VSG 在任何工作模式下,其都等效为电压源,可为系统提供频率与电压支撑^[6,12-15]。

采用 VSG 的微电网既可以工作在并网运行模式,也可以工作在离网运行模式。当并网运行时,由于无需为系统提供频率与电压支撑,VSG 只需向电网输出能量。当离网运行时,面对由负载变化导致的短周期、小幅度频率和电压幅值偏离,VSG 依靠其具有的惯性与阻尼,阻止频率和电压幅值发生突变,使其有足够的时间调节输出功率,恢复系统功率平衡,确保系统输出交流电的各项参数在正常范围以内,以上过程为 VSG 的一次调整。VSG 的一次调整由有功频率控制和无功电压控制两部分组成,本质上是一种下垂控制,属于有差调节。为了使一次调整时频率和电压的偏差最小,文献[16]通过增加线路检测环节,依据线路阻抗识别结果,在下垂控制中加入补偿项以减小偏差,但这种方法需要增加额外的检测与通信硬件,对检测仪器精度要求高。文献[17-18]通过虚拟阻抗改善偏差,但是会影响电能质量。

本文针对 VSG 离网运行模式下负载变化导致的频率和电压调节偏离额定值的问题,在同步逆变器方案的基础上,通过分析 VSG 稳态和动态特性,选取有功频率下垂系数与无功电压下垂系数作为自适应调节的对象,设计了一种下垂系数自适应调节的改进型 VSG 控制器,使得离网运行模式下 VSG 面对负载波动不仅能维持微电网功率的平衡,而且能实现频率的无差调节和电压幅值调节的小偏差。

1 VSG 原理

VSG 由主电路和控制两部分组成。主电路部分为一个如图 1 所示的逆变电路。控制部分为一个在微处

理器中运行控制策略程序的电子控制器,用于产生 SVPWM 波,控制图 1 所示的电力电子开关,控制部分的核心是 VSG 控制策略。

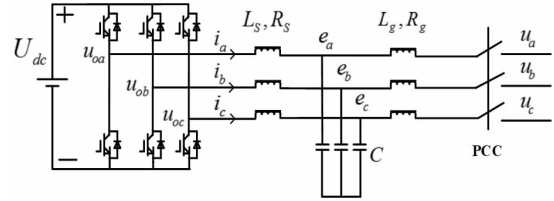


图 1 VSG 主电路拓扑结构

1.1 VSG 主电路拓扑结构

图 1 为典型的 VSG 主电路拓扑结构,主要由直流电压源 U_{dc} 、电力电子开关组成的全桥电路以及 LC 滤波电路组成。其中: L_s 、 R_s 和 C 分别为滤波电感、滤波电感等效电阻及滤波电容; L_g 、 R_g 为 VSG 输出线路等效线路电感和等效线路电阻; $u_o = (u_{oa}, u_{ob}, u_{oc})^T$ 为 VSG 的输出三相电压; $i = (i_a, i_b, i_c)^T$ 为 VSG 的输出三相电流; $e = (e_a, e_b, e_c)^T$ 为滤波电容的三相电压; $u = (u_a, u_b, u_c)^T$ 为微电网电压。

1.2 VSG 控制策略

有功频率调节和无功电压调节是 VSG 控制策略的核心。VSG 控制框图如图 2 所示。

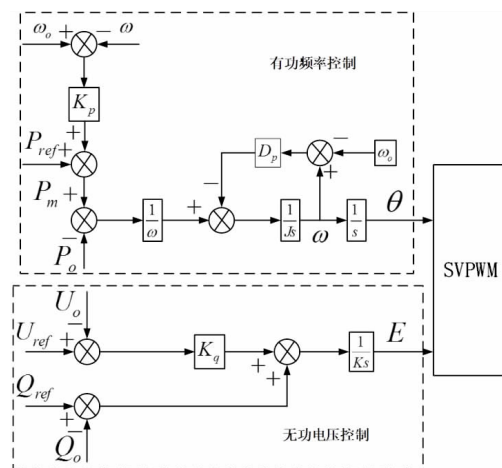


图 2 VSG 控制框图

VSG 的有功频率调节方程为:

$$\begin{cases} J \frac{d\omega}{dt} = \frac{P_m}{\omega} - \frac{P_o}{\omega} - D_p(\omega - \omega_o) \\ \frac{d\theta}{dt} = \omega \end{cases} \quad (1)$$

$$P_m = P_{ref} + K_p(\omega_o - \omega) \quad (2)$$

式中: P_{ref} 、 P_o 、 P_m 分别为 VSG 的给定有功功率、实际输出有功功率及虚拟机械功率; ω_o 和 ω 分别为 VSG 的额定角频率和输出角频率; D_p 为 VSG 虚拟阻尼; J 为 VSG 的虚拟转动惯量; K_p 为有功频率下垂系数; θ 为 VSG 输出相角。

根据式(1)和式(2)可得 VSG 有功功率变化与频率变化的关系为:

$$\begin{aligned} \frac{\omega - \omega_o}{P_o - P_{ref}} &= -\frac{1}{J\omega_o s + D_p\omega_o + K_p} \\ &= -\frac{D'_p}{\tau s + 1} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{cases} D'_p = \frac{1}{D_p\omega_o + K_p} \\ \tau = \frac{J\omega_o}{D_p\omega_o + K_p} \end{cases} \quad (4)$$

式中: D'_p 为调频系数; τ 为惯性时间常数。

由式(3)可知,当 VSG 达到稳态时有:

$$\frac{\omega - \omega_o}{P_o - P_{ref}} = -\frac{1}{D_p\omega_o + K_p} \quad (5)$$

式(3)~式(5)表明, VSG 有功频率调节本质是一种下垂控制。当负荷波动时,因其具有一阶虚拟惯性环节,频率不会突变,有一个过渡时间。过渡时间可用 τ 表示,过渡时间的大小由 J 、 K_p 和 D_p 决定。当 VSG 达到稳态时, VSG 输出频率的偏移量是由 K_p 和 D_p 决定的。

VSG 的无功电压调节方程为:

$$E = \frac{1}{K} \int_0^t [K_q(U_{ref} - U_o) + Q_{ref} - Q_o] dt \quad (6)$$

式中: Q_{ref} 、 Q_o 分别为 VSG 的给定无功功率和实际输出无功功率; U_{ref} 为 VSG 的参考相电压幅值; U_o 为 VSG 的输出相电压幅值; K_q 为无功电压下垂系数; K 为积分控制系数; E 为 VSG 输出的相电压幅值。 E 与 θ 经过合成

便可以得到 SVPWM 发生器的参考信号。

根据式(6)可得 VSG 无功功率变化与电压变化之间的关系为:

$$\frac{U_o - U_{ref}}{Q_o - Q_{ref}} = -\frac{1}{K_s + K_q} \quad (7)$$

由式(7)可知,当 VSG 达到稳态时有:

$$\frac{U_o - U_{ref}}{Q_o - Q_{ref}} = -\frac{1}{K_q} \quad (8)$$

式(6)~式(8)表明 VSG 的无功电压控制本质是一种下垂控制。当负荷波动时,电压不会突变,存在过渡时间,过渡时间的大小由 K 决定。当 VSG 达到稳态时, VSG 输出电压的偏移量由 K_q 决定。

2 下垂参数自适应 VSG 控制器设计

2.1 改进型 VSG 无功电压下垂系数自适应控制

离网运行时,微电网要求相电压幅值变化在一定范围内。针对这一要求,本文设计:当 $U_{min} \leq U_o \leq U_{max}$ 时,不对 K_q 进行调整;当 $U_o < U_{min}$ 或 $U_{max} < U_o$ 时, K_q 依据实际情况自行调整,使得 U_o 恢复到 $U_{min} \leq U_o \leq U_{max}$ 水平。

由 1.2 节可知,在离网运行模式下, VSG 的无功电压控制本质是下垂控制,属于有差调节,当系统达到稳态,相电压的偏移量由 K_q 决定。现以图 3 为例分析 VSG 无功电压调节的相电压幅值偏离与恢复原理。

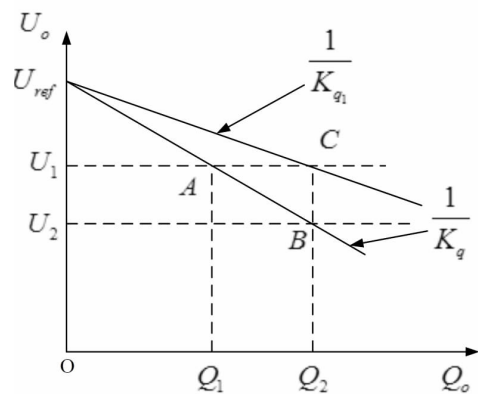


图3 VSG 无功电压下垂控制特性曲线

当微电网无功功率负载增大时,原本在运行工作点 A 的 VSG 将会增加无功功率的输出,以保证微电网的无功功率的平衡。依据无功电压下垂控制特性曲线, VSG 的输出相电压幅值将会由 U_1 下降到 U_2 , 运行工作点由 A 过渡到 B , VSG 输出相电压幅值降低,产生偏移。如果此时能调整无功电压下垂系数,使得 VSG 的运行工作点由 B 过渡到 C 点,则 VSG 能在保证微电网无功功率平衡的同时,使相电压幅值也恢复到了原来的 U_1 水平。同理,无功负载减少后相电压幅值增大后再恢复到原水平。

在离网运行模式下,为了使 $U_{\min} \leq U_o \leq U_{\max}$, 必须使得无功电压下垂系数 K_q 具有自适应调节能力,根据式(8)推导得:

$$\begin{cases} \frac{1}{K_q} = \frac{U^* - U_{ref}}{Q_{t-t_0}} \\ U_o = U_{ref} - \frac{1}{K_q}(Q_o - Q_{ref}) \end{cases} \quad (9)$$

式中: U^* 为 VSG 空载相电压幅值; Q_{t-t_0} 为 VSG 在 $t - t_0$ 时刻输出的无功功率,由 Q_o 延时 t_0 得到。为了维持 VSG 的稳定运行,取 $Q_{\min} \leq Q_{t-t_0} \leq Q_{\max}$, 当 $Q_{t-t_0} < Q_{\min}$ 时,则 Q_{t-t_0} 取值为 Q_{\min} ; 当 $Q_{t-t_0} > Q_{\max}$ 时,则 Q_{t-t_0} 取值为 Q_{\max} 。即仅当 $Q_{\min} \leq Q_{t-t_0} \leq Q_{\max}$ 时, $U_{\min} \leq U_o \leq U_{\max}$ 。

假设微电网无功功率需求突然增加,导致 $U_o < U_{\min}$, 根据式(9)可知, K_q 值先保持不变(因为 Q_{t-t_0} 是由 Q_o 延时 t_0 得到的), VSG 开始增加 Q_o 的输出, U_o 减小; 经过时间 t_0 后, K_q 开始增大,由于微电网无功功率尚未达到平衡, VSG 继续增加 Q_o 的输出, U_o 继续减小; 当相 U_o 减小到最低值并开始回升时, K_q 增大幅度此时也达到最大, VSG 的 Q_o 输出仍继续增加,直至微电网的无功功率达到平衡; 经一段时间的调整,微电网无功功率达到平衡, K_q 值不再改变, $U_{\min} \leq U_o \leq U_{\max}$, VSG 完成无功电压调节。

2.2 改进型 VSG 有功频率下垂系数自适应控制

由于一些关键电气设备对频率的变化的敏感性极高,因此,在离网运行模式下,微电网的频率变化必须控制在极窄的范围内。

由 1.2 节可知,在离网运行模式下, VSG 的有功频率控制本质是下垂控制,属于有差调节,频率的偏移量由 K_p 和 D_p 决定。根据图 2 及 1.2 节内容,可得 P_o 的闭环传递函数为:

$$\begin{cases} G(s) = \frac{K_D}{J\omega_o s^2 + (D_p \omega_o + K_p)s + K_D} \\ K_D = \frac{U_o U_{PCC}}{X} \end{cases} \quad (10)$$

式中: U_{PCC} 为微电网相电压幅值; X 为 VSG 输出阻抗。

由式(10)可知,有功功率调节动态特性与 D_p 和 K_p 均有关。当 D_p 和 K_p 增大, VSG 的阻尼随之变大,系统的响应速度变差。并且 ω_o 的加权,使 D_p 的调整与 K_p 相比,会严重影响有功功率调节的动态特性。因此,将 K_p 作为自适应调节的对象。根据式(5)推导得:

$$\begin{cases} \frac{1}{K_p} = \frac{\omega^* - \omega_o}{P_{t-t_0}} \\ \omega = \omega_o - \frac{1}{D_p \omega_o + K_p}(P_o - P_{ref}) \end{cases} \quad (11)$$

式中: ω^* 为 VSG 空载角频率; P_{t-t_0} 为 VSG 在 $t - t_0$ 时刻输出的有功功率,由 P_o 延时 t_0 得到。为了维持 VSG 的稳定运行, P_{t-t_0} 取值范围必须在 $[P_{\min}, P_{\max}]$ 范围内,当 $P_{t-t_0} < P_{\min}$ 时,则 P_{t-t_0} 取值为 P_{\min} ; 当 $P_{t-t_0} > P_{\max}$ 时,则 P_{t-t_0} 取值为 P_{\max} 。

3 仿真分析

参考图 1,通过 MATLAB/Simulink 构建两台 VSG 仿真模型进行对比实验,一台选择传统 VSG 控制策略,另一台选择改进型 VSG 控制策略。仿真系统参数见表 1。其中,设置传统 VSG 的 $K_p = 6 \times 10^5$ 、 $K_q = 322.3$ 。设置改进型 VSG 初始 $K_p = 6 \times 10^5$ 、初

始 $K_q = 322.3$;

实验步骤:

(1) 仿真开始时,微电网的负载为 $2 \text{ kW} + 200 \text{ var}$ 。

(2) 当 $t = 3 \text{ s}$ 时,微电网的负载增加到 $3.5 \text{ kW} + 300 \text{ var}$ 。

(3) 当 $t = 7 \text{ s}$ 时,微电网的负载降低至 $2.5 \text{ kW} + 200 \text{ var}$ 。

(4) 当 $t = 10 \text{ s}$ 时,仿真结束。

表 1 系统参数

参数	数值	参数	数值
滤波电感 L_s/mH	3	VSG 给定有功功率/ kW	3
滤波电感等效电阻 R_s/Ω	0	VSG 给定无功功率/ var	300
滤波电容 $C/\mu\text{F}$	16	VSG 空载相电压幅值/ V	320
线路等效电感 L_g/mH	0.264	VSG 空载角频率/ $(\text{rad}\cdot\text{s}^{-1})$	316
线路等效电阻 R_g/Ω	0	VSG 虚拟转动惯量 $J/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	0.8
直流母线电压 U_{dc}/V	700	VSG 虚拟阻尼系数 D_p	20
微电网额定相电压/ V	310	VSG 积分控制系数 K	11
微电网额定频率/ Hz	50		

传统 VSG 和改进型 VSG 输出的 P_o 和 Q_o 波形如图 4 和图 5 所示。由图 4 和图 5 可以看出,当负载改变时,改进型 VSG 能及时调整 P_o 和 Q_o 输出,其维持系统功率平衡的能力与传统 VSG 一样。

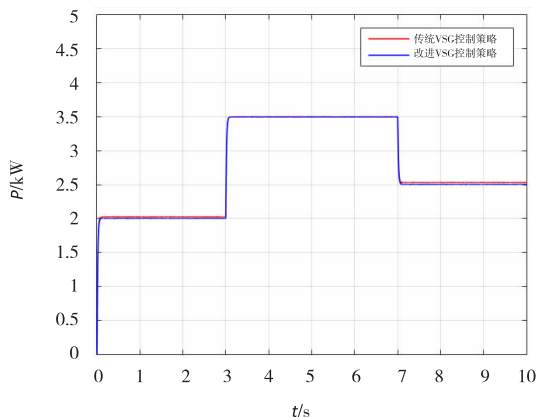


图 4 有功功率输出对比

图 6 为传统 VSG 和改进型 VSG 输出频率波形。由图 6 可知,当 $0 < t < 3 \text{ s}$ 时, $P_o = 2 \text{ kW}$, $P_o < P_{ref}$, 传统 VSG 输出 $f > 50 \text{ Hz}$; 当 $3 < t < 7 \text{ s}$ 时, $P_o = 3.5 \text{ kW}$,

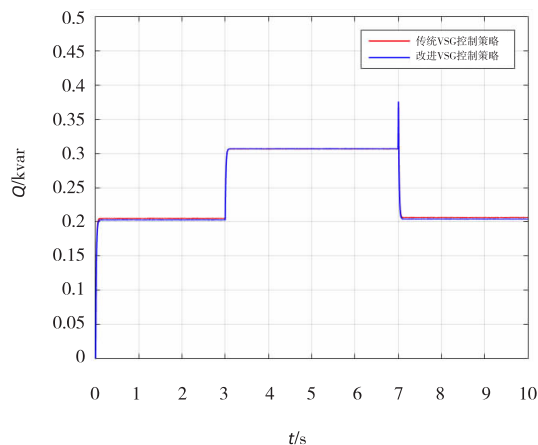


图 5 无功功率输出对比

$P_o > P_{ref}$, 传统 VSG 输出 $f < 50 \text{ Hz}$ 。当 $7 < t < 10 \text{ s}$ 时, $P_o = 2.5 \text{ kW}$, $2 \text{ kW} < P_o < P_{ref}$, 此时传统 VSG 输出 $f > 50 \text{ Hz}$ 。与传统 VSG 相比,改进型 VSG 从仿真开始到结束,面对有功功率负载的变化,其输出频率变化极小,实现了频率的无差调节。

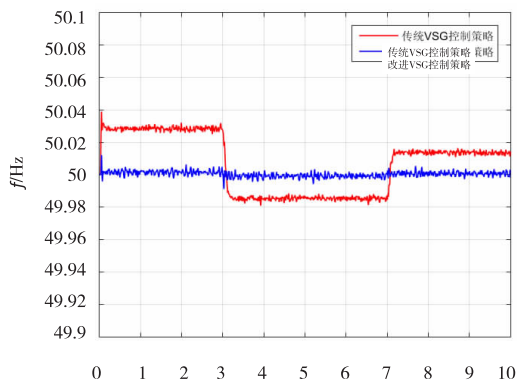


图 6 输出频率对比

图 7 为传统 VSG 和改进型 VSG 输出 U_o 波形。由图 7 可知,当 $0 < t < 3 \text{ s}$ 时, $Q_o = 200 \text{ var}$, $Q_o < Q_{ref}$, 传统 VSG 输出 $U_o > 312 \text{ V}$,改进型 VSG 输出 $U_o \approx 310.5 \text{ V}$; 当 $3 < t < 7 \text{ s}$ 时, $Q_o = Q_{ref} = 300 \text{ var}$,传统 VSG 输出 $U_o = 310 \text{ V}$,改进型 VSG 输出 $U_o \approx 310.1 \text{ V}$; 当 $7 < t < 10 \text{ s}$ 时, $Q_o = 200 \text{ var}$, $Q_o < Q_{ref}$, 传统 VSG 输出 $U_o > 312 \text{ V}$,改进型 VSG 输出 $U_o \approx 310.5 \text{ V}$ 。改进型 VSG 面对无功功率负载的变化, $309 \text{ V} \leq U_o \leq 311 \text{ V}$,实现了 U_o 调节的小偏差。

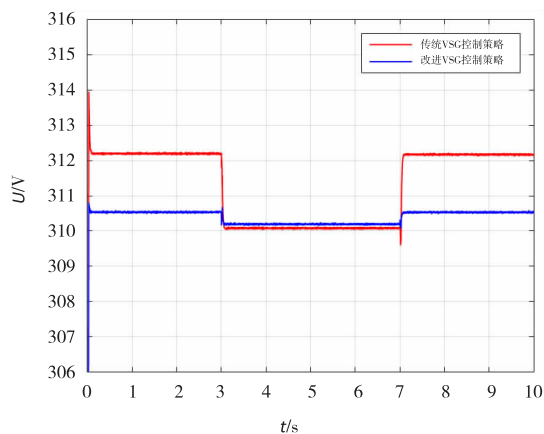


图7 输出相电压幅值对比

4 结束语

本文选取下垂系数作为优化对象,引入参数自适应调节的方法,提出了一种下垂系数能够依据实际情况自行调整的改进型VSG,该策略通过使VSG的有功频率下垂系数和无功电压下垂系数具有自适应调节能力,来改善其在离网运行模式下,由于微电网负载变化导致的频率和相电压幅值的偏离。仿真结果表明,改进型VSG控制策略在离网运行模式下,面对微电网负载的变化,不仅能维持微电网功率的平衡,而且实现了频率的无差调节和相电压幅值调节的小偏差。

参考文献:

- [1] 曾正,赵荣祥,汤胜清,等.可再生能源分散接入用先进并网逆变器研究综述[J].中国电机工程学报,2013,33(24):1-12.
- [2] 刘振亚.构建全球能源互联网,推动能源清洁绿色高效发展[J].华北电业,2015(6):56-56.
- [3] LASSETER R H. Microgrids and distributed generation [J]. Intelligent Automation & Soft Computing, 2010, 16 (2): 225-234.
- [4] 鲁宗相,王彩霞,闵勇,等.微电网研究综述[J].电力系统自动化,2007,31(19):100-107.
- [5] 张丽,徐玉琴,王增平,等.包含同步发电机及电压源逆变器接口的微网控制策略[J].电网技术,2011(3): 170-176.
- [6] ZHONG Q C, WEISS G. Synchronverters: inverters that mimic synchronous generators [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(4): 1259-1267.
- [7] 张兴,朱德斌,徐海珍.分布式发电中的虚拟同步发电机技术[J].电源学报,2012,10(3):1-6.
- [8] 郑天文,陈来军,陈天一,等.虚拟同步发电机技术及展望[J].电力系统自动化,2015,39(21):165-175.
- [9] 吕志鹏,盛万兴,刘海涛,等.虚拟同步机技术在电力系统中的应用与挑战[J].中国电机工程学报,2017, 37(2):349-359.
- [10] CHEN Y, HESSE R, TURSCHNER D, et al. Improving the grid power quality using virtual synchronous machines [C]//Proceeding of the 2011 International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives, Malaga, Spain, May 11-13, 2011: 1-6.
- [11] LOIX T. Participation of Inverter-Connected Distributed Energy Resources in Grid Voltage Control [D]. Leuven: Katholieke Universiteit Leuven, 2011.
- [12] 丁明,杨向真,苏建徽.基于虚拟同步发电机思想的微电网逆变电源控制策略[J].电力系统自动化, 2009, 33(8): 89-93.
- [13] YANG X Z, SU J H, DING M, et al. Control strategy for virtual synchronous generator in microgrid [C]// Proceeding of the 4th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies, Weihai, China, July 6-9, 2011: 1633-1637.
- [14] ASHABANI S M, MOHAMED A R A. A flexible control strategy for grid-connected and islanded microgrids with enhanced stability using nonlinear microgrid stabilizer [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3 (3): 1291-1301.
- [15] SAKIMOTO K, MIURA Y, ISE T. Stabilization of a

- power system with a distributed generator by a Virtual Synchronous Generator function[C]//Proceeding of the 8th IEEE International Conference on Power Electronics and Ecce Asia, Jeju, Korea, May 30-June 3, 2011: 1498-1505.
- [16] 陈晓祺,贾宏杰,陈硕翼,等.基于线路阻抗辨识的电网无功均分改进下垂控制策略[J].高电压技术, 2017,43(4):1271-1279.
- [17] GUERRERO J M, VICUNA L G, MATAS J, et al. Output impedance design of parallel-connected UPS inverters[C]//Proceedings of the 2004 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Ajaccio, France, May 4-7, 2004:1123-1128.
- [18] HE J, LI Y W, GUERRERO J M, et al. An islanding microgrid power sharing approach using enhanced virtual impedance control scheme[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(11):5272-5282.

An Adaptive Drooping Coefficient Adjustment Strategy for the Virtual Synchronous Generator

WU Zhexun¹, GAO Wen'gen¹, WANG Shinong¹, SHAO Yulan²

(1. College of Electrical Engineering, Anhui Polytechnic University, Wuhu 241000, China; 2. Wuhu Institute of Technology, Wuhu 241000, China)

Abstract: The technology of virtual synchronous generator(VSG) make the distributed generation have active frequency and reactive voltage regulation characteristic without inertia, which like synchronous generator's performance in the circuit. While in mode of island operation, the primary frequency modulation and voltage modulation of VSG belong to the droop control, as well as non-difference control. And the change of load power will lead to the deviation of its output frequency and phase voltage amplitude. In view of this problem, it is possible to analyze the features in VSG, including the relationship between active power change and frequency change, reactive power change and voltage change, alone with the dynamic characteristics of power regulation. Taking droop coefficient as an optimization object and introducing parameter self-adaptive adjustment method, an improved VSG is proposed to adjust the droop coefficient according to the actual situation. The simulation show that improved control strategy has better performance compared with the traditional VSG, which not only maintains the power balance of microgrid, but also achieves the small deviation of frequency adjustment and phase voltage amplitude adjustment.

Key words: virtual synchronous generator(VSG); frequency regulation; voltage regulation; droop coefficient; adaptive adjustment