

基于改进型同步逆变器技术的微电网变换器^{*}

杨鹏龙¹, 董海鹰²

(1. 兰州交通大学 自动化与电气工程学院, 甘肃 兰州 730070;

2. 兰州交通大学 新能源与动力工程学院, 甘肃 武威 733000)

摘要: 针对风光储等分布式电源接入配电网(微电网)造成系统“低惯量、欠阻尼”进而导致的稳定性问题,对模拟同步发电机外特性的虚拟同步发电机(Virtual Synchronous Generator, VSG)技术进行了研究。在下垂控制的基础上,通过对电磁方程和机械方程的设计,使得电力电子装置的变换器具有同步发电机的转子转动惯量和阻尼特性,同时具备一次调频调压的能力。同时,对 VSG 输出功率的动态和稳态特性的矛盾性,提出一种改进型 VSG 方案。最后,利用 MATLAB/Simulink 仿真工具,验证所提模型和控制策略的正确性与有效性。

关键词: 同步逆变器; 改进型虚拟同步发电机; 转动惯量; 阻尼特性; 调频调压

中图分类号: TM 464 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2018)01-0007-05

A Grid-Friendly Converter Based on Improved Synchronous Inverter Technology^{*}

YANG Penglong¹, DONG Haiying²

(1. School of Automatic and Electrical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;

2. School of New Energy and Power Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Wuwei 733000, China)

Abstract: Aimed at the stability problem of distribution network (micro-grid) caused by “low inertia and underdamping”, while distributed power integrated in, such as wind energy, photovoltaic, energy storage and so on, virtual synchronous generator (VSG) simulated synchronous generator characteristic had been studied. Based on the droop control, the converter power electronic device would have synchronous generator rotor inertia and damping characteristics by the design of the electromagnetic equation and the mechanical equation, so it had the capability of primary frequency and voltage regulation. In view of the contradiction between dynamic and steady state characteristics of VSG output power, an improved VSG scheme was proposed. Finally, the correctness and effectiveness of the proposed model and control strategy were verified by MATLAB/Simulink simulation.

Key words: synchronous inverter; improved virtual synchronous generator; moment of inertia; damping characteristic; frequency and voltage regulation

0 引言

为应对能源危机和环境污染,风力发电、光伏发电以及储能等分布式发电和微电网技术得到广泛研究和大量应用^[1-3]。光伏阵列和储能蓄电池没有惯性,风电机组具有少量惯性^[4],大量无

(低)惯性分布式间歇性能源接入,使电网的整体惯性降低,电压和频率调节能力减弱,再吸纳能力随之降低^[5-6]。

微电网功率吞吐通过电力电子变换器,响应速度一般为毫秒级。并网时一般采用恒功率(PQ)控制,按照功率指令输出恒定功率,不参与

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金项目(61663019); 国网甘肃省电科院储备项目“大规模储能在友好型电力系统中的检测及应和技术研究”(SGGSKY00DYJS1700215)

作者简介: 杨鹏龙(1990—),男,硕士研究生,研究方向为新能源发电智能优化控制。

董海鹰(1966—),男,博士,教授,博士生导师,研究方向为电力系统自动化及电网故障诊断。

电压和频率的调节;孤岛运行时一般采用恒压恒频(U/f)控制,使逆变器输出频率和电压维持在参考值附近。但这两种控制方式都不能为微电网提供一定量的频率和电压支撑,更不能为稳定性较差的微电网提供必要转动惯量的阻尼作用。下垂控制(Droop Control)模拟同步发电机 P - f 、 Q - U 曲线,但依旧不能为微电网提供惯性和阻尼^[7]。于是,虚拟同步发电机(Virtual Synchronous Generator, VSG)技术应运而生^[8-12]。文献[8]所提的“VSG”方案在外特性上模拟了同步发电机的摇摆方程。文献[9]所提的“VISMA”方案技术更能体现同步机运行特性,但上述都为电流型VSG,无法提供频率和电压支撑。文献[10]对VSG小信号模型进行分析,并对重要参数整定提供了依据。文献[11]对VSG逆变器直流侧储能的优化配置进行研究,给出了平抑功率波动的幅值所需配置储能的最小功率。文献[12]提出了VSG的一种转子惯量自适应控制策略,同时满足了有功功率和频率超调较小的快速动态响应。

本文在上述研究的基础上,对微电网中具有同步发电机技术的同步逆变器技术展开了研究。首先分析了同步逆变器的数学模型和控制算法(频率、电压以及功率控制),引入转动惯量和阻尼方程,对VSG输出功率的动态和稳态特性存在的矛盾,提出了一种改进型VSG,然后在生成参考电压的基础上,对其进行双闭环控制,最后在MATLAB/Simulink平台上验证所提策略的正确性。

1 VSG模型与原理

并网逆变器等效为VSG的过程如图1所示。

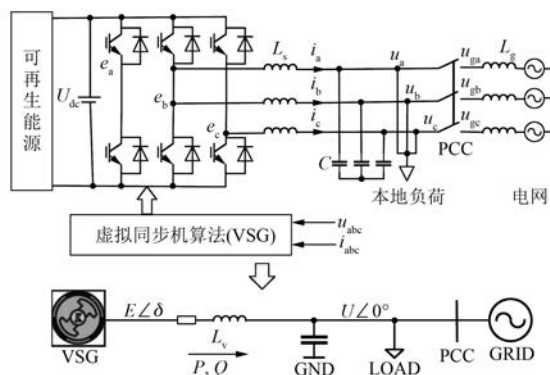


图1 并网逆变器等效为VSG的过程

将电力电子装置构成的逆变器加上控制算法等效成同步发电机,滤波电感 L_f 和电阻 R_f 等效为同步发电机的定子电抗。 U_{dc} 为直流侧电压, $\mathbf{e}_{abc} = [e_a, e_b, e_c]^T$, $\mathbf{u}_{abc} = [u_a, u_b, u_c]^T$, $\mathbf{i}_{abc} = [i_a, i_b, i_c]^T$ 分别为VSG三相感应电动势、输出端电压与并网电流。

从逆变器控制的角度来讲,VSG其实是在下垂控制的基础上,引入定子电磁方程和转子转动惯量方程,使逆变器不仅具有一次调频调压能力,而且为稳定性较差的微电网提供电压和频率支撑及阻尼作用。VSG的主控制框图如图2所示。

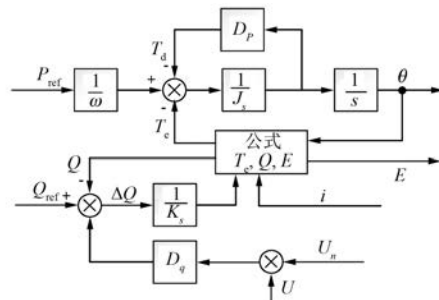


图2 VSG主控制框图

借鉴同步发电机的数学模型,可知VSG的基本方程为式(1)~式(5)。式(1)为转子运动方程,式(3)~式(5)依次为逆变器输出电压、电磁转矩、无功功率表达式。

$$\begin{cases} J \frac{d\omega}{dt} = T_m - T_e - T_d = \frac{P_m}{\omega_0} - \frac{P_e}{\omega_0} - D(\omega - \omega_0) \\ \frac{d\delta}{dt} = \omega - \omega_0 \end{cases} \quad (1)$$

$$e = \omega M_f i_f \sin \theta \quad (2)$$

$$T_e = M_f i_f \langle i, \sin \theta \rangle \quad (3)$$

$$Q = -\omega M_f i_f \langle i, \cos \theta \rangle \quad (4)$$

$$\begin{cases} \sin \theta = \left[\sin \theta, \sin \left(\theta - \frac{2}{3} \pi \right), \sin \left(\theta + \frac{2}{3} \pi \right) \right] \\ \cos \theta = \left[\cos \theta, \cos \left(\theta - \frac{2}{3} \pi \right), \cos \left(\theta + \frac{2}{3} \pi \right) \right] \end{cases} \quad (5)$$

式中: J 、 T_m 、 T_e 、 T_d 、 D ——转动惯量、机械转矩、电磁转矩、阻尼转矩、阻尼系数;

M_f, i_f ——定转子的互感与励磁电流。

由图 2 VSG 的主控制框图可知, D_p 是转子阻尼系数, 同时反映了有功-频率特性(P - f), 即有

$$\begin{cases} D_p = -\frac{\Delta T}{\Delta \omega} \approx -\frac{\Delta P}{\Delta \omega \omega_n} \\ P_G = P_{\text{set}} + D_p \omega_n (\omega_n - \omega) \end{cases} \quad (6)$$

因为有内置的有功频率下垂机制, VSG 可以与在同一母线上的其他类型的自动分配负载, 也可以将其看成是一个级联的控制结构: 内环是频率(速度)环, 外环是转矩(功率)环。频率环的时间常数 $\tau_f = J/D_p$, 没有延迟环节, 所以比同步发电机的小, 响应速度快。

VSG 无功功率电压的调节由类似上述的有功频率的方式来实现。

$$\begin{cases} D_q = -\frac{\Delta Q}{\Delta V} \\ \tau_v = \frac{K}{\omega D_q} \approx \frac{K}{\omega_n D_q} \end{cases} \quad (7)$$

由式(7)可以看出, 同步发电机的数学模型完全可以引入逆变器的控制, 使逆变器具有下垂控制的有功频率和无功电压下垂特性。下垂控制加上后面的机械方程就完全模拟了同步发电机的转子转动惯量和阻尼特性, 使得逆变器等效为同步发电机, 从而增加逆变器控制的稳定性。

2 改进型 VSG 方案

2.1 改进型 VSG

根据 VSG 控制电路可知其输出功率:

$$P_{\text{out}} = P_{\text{ref}} + (K_\omega + D_p)(\omega_0 - \omega) \quad (8)$$

可见, VSG 输出功率由参考值和稳态偏差两部分组成, 为减小偏差, D_p 应尽可能小。又由文献[9]可知, 功率动态响应与 J 、 D_p 都有关: 转动惯量 J 越大, 阻尼越小, 超调越大, 稳定性越差; D_p 越大, 阻尼越大, 超调越大, 响应速度越慢, 调节时间越长。因为无法兼顾 J 、 D_p , 为此提出了如图 3 所示的改进型 VSG 控制方案。

由图 3 可知, 加了微分补偿环节的 VSG, 有闭环系统阻尼变大, 自然振荡频率不变, 很好地解

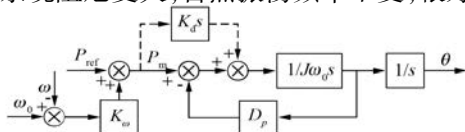


图 3 改进型 VSG

决了动态和稳态之间的矛盾。

2.2 双闭环控制

经图 2 VSG 的主控制框图生成 VSG 输出电压, 即参考电压:

$$E = \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E \sin(\varphi) \\ E \sin(\varphi - 2\pi/3) \\ E \sin(\varphi + 2\pi/3) \end{bmatrix} \quad (8)$$

将参考电压经过派克变换, 把同步发电机在旋转坐标系 $dq0$ 下的经典二阶方程引入作为 VSG 的虚拟阻抗; 虚拟阻抗可以使得 VSG 像同步发电机那样, 在多 VSG 并联时抑制环流, 实现功率均分, 提高稳定性。

$$\begin{cases} u_d^* = -R_v i_d - L_v \frac{di_d}{dt} + \omega L_v i_q + U_{\text{ref}} \\ u_q^* = -R_v i_q - L_v \frac{di_q}{dt} + \omega L_v i_d + 0 \end{cases} \quad (9)$$

式中: R_v, L_v ——虚拟电阻和虚拟感抗。

参考电压经过虚拟阻抗方程产生参考电压, 参考电压再经由电压、电流双闭环控制得到调制信号, 最后经过 PWM 调制就可以得到开关管的门级信号控制 IGBT 的关断。

VSG 自身的动静态性能与其输出功率和电能质量(电压、电流、频率等)密切相关, 故选取适当的电流双闭环控制参数相当重要^[13]。

按照如图 4 所示的电压、电流双闭环控制框图对双环控制的 PI 参数进行设计, 得出如图 5 所示的电压电流双闭环模型。

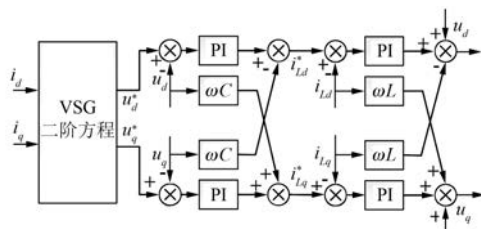


图 4 电压、电流双闭环控制

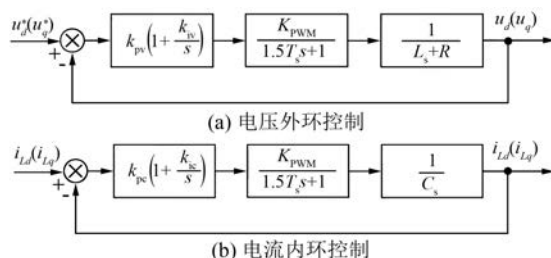


图 5 电压、电流双闭环模型

按典型 I 型系统对内环电流环控制器参数进行设计,为了抵消传递函数的极点,可令 $k_{pc}/k_{ic} = L/R$,这样可增大系统的相位裕度,提高系统稳定性。由图 5(b)可知闭环传递函数为

$$G_{cc}(s) = \frac{\omega_m^2}{s^2 + 2\xi\omega_m s + \omega_m^2} \tag{10}$$

其中:

$$\begin{cases} \xi = 0.5\sqrt{R/1.5K_{PWM}k_{ic}T_s} \\ \omega_m = \sqrt{K_{PWM}k_{ic}/1.5T_sR} \end{cases} \tag{11}$$

按 I 型系统,取系统阻尼比 $\xi=0.707$,可得优化的 PI 参数为

$$\begin{cases} k_{pc} = L/3K_{PWM}T_s \\ k_{ic} = R/3K_{PWM}T_s \end{cases} \tag{12}$$

为保证 VSG 输出电压具有较强的稳定性及抗扰动性能,可按照典型 II 型系统对电压外环进行设计。可得

$$\begin{cases} k_{pv} = (h_v + 1)/8h_vT_s \\ k_{iv} = (h_v + 1)C/32h_v^2T_s^2 \end{cases} \tag{13}$$

式中: C ——滤波电容值;
 h_v ——中频宽,工程上一般约取为 5。

3 仿真分析

为验证本文所提出的 VSG 控制策略的正确性与有效性,在 MATLAB/Simulink 2016b 仿真平台搭建如图 1 的系统模型进行仿真验证,仿真时间 1 s。仿真参数如表 1 所示。

表 1 仿真参数

参数名称	参数值
直流侧母线电压 U_{dc}/V	700
交流侧额定电压 U_N/V	311
额定角频率 $\omega_0/\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$	314
滤波电感 L_f/mH	5.0
滤波电容 $C_f/\mu\text{F}$	100
开关频率 f/Hz	1e4

3.1 孤岛运行状态

VSG 运行在孤岛模式下,开始运行时,VSG 带 10 kW 的三相阻性负载,0.5 s 时投入一组 5 kW 和 5 kvar 的阻感性负载,VSG 由轻载状态变为重载状态,其仿真波形如图 6 所示。

由图 6 可以看出,初始状态投入 10 kW 的三

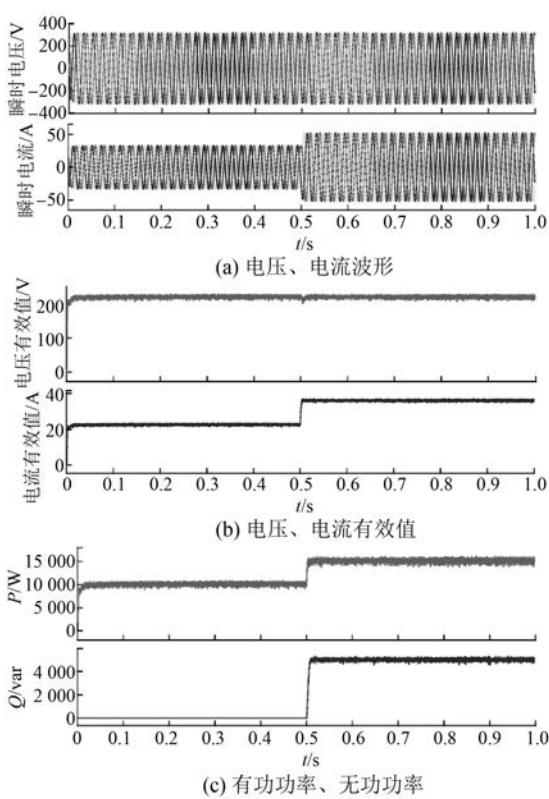


图 6 孤岛运行时仿真波形

相阻性负载时,由于模拟的转子转动惯量和阻尼的作用,电压和电流缓慢增加至有效值;0.5 s 投入另一组阻感性负载时,电压没有急剧下降,而是在模拟调速器的作用下对电压进行有差调节,最后电压有一定的降落,这和电压调节系数 D_q 有关,电压电流波形正常无畸变,有功和无功也是按指令有序变化。

3.2 并网运行状态

VSG 运行在并网模式下,开始运行时,VSG 带 10 kW 的三相阻性负载,0.5 s 时投入一组 5 kW 和 5 kvar 的阻感性负载,VSG 由轻载状态变为重载状态,其仿真波形如图 7 所示。

通过图 7 可以看出,在负荷变化和 PCC 点电压电流以及 VSG 输出功率的整个过程中,电压波形基本没有变化,因为此时电网相较 VSG 是一个无穷大系统,所以 VSG 的输出电压没有发生畸变,而在 0.5 s 负荷增加时,同样由于转子惯量的存在,VSG 的功率输出平滑稳定,未对电网造成冲击。

4 结 语

本文针对分布式电源惯量低、并网逆变器响

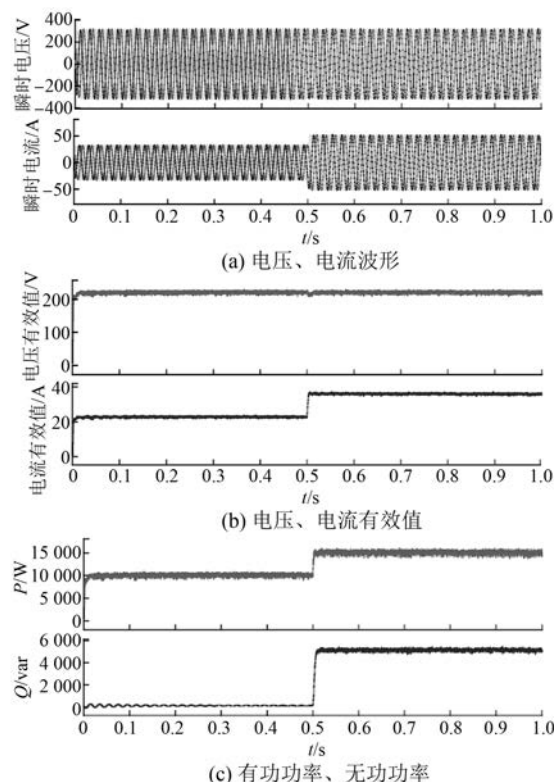


图7 并网运行时仿真波形

应速率快、无法为系统提供频率和电压支撑的缺点,在下垂控制的基础上,引入同步发电机电子磁链方程和转子机械方程,即 VSG 技术,使得电压源的电力电子接口具有同步发电机的惯性和阻尼特性。同时,改进型的 VSG 又能很好地解决逆变器输出动稳态之间的矛盾。这样,采用 VSG 控制算法的微电网逆变器像传统的同步发电机一样具有自治能力:孤岛运行时能为系统提供转动惯量和一定的阻尼,且进行频率和电压的一次调节;并网运行时,大量“低惯量、欠阻尼”的新能源通过 VSG 接入电网,降低对电网的冲击,为新能源的大规模消纳开辟一条有效途径。

【参考文献】

[1] LASSETER R H. Micro-grids and distributed generation[J]. Journal of Energy Engineering, 2007, 133(3): 144-149.

[2] 杨新法,苏剑,吕志鹏,等.微电网技术综述[J].中国电机工程学报,2014,34(1): 57-70.

[3] 周孝信,陈树勇,鲁宗相.电网和电网技术发展的回顾与展望—试论三代电网[J].中国电机工程学报,2013,33(22): 1-11.

[4] 赵争鸣,雷一,贺凡波,等.大容量并网光伏电站技术综述[J].电力系统自动化,2011,35(12): 101-107.

[5] 丁明,王伟胜,王秀丽,等.大规模光伏发电对电力系统影响综述[J].中国电机工程学报,2014,34(15): 1-14.

[6] ENSLIN J H R, HESKES P J M. Harmonic interaction between a large number of distributed power inverters and the distribution network[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2004, 19(6): 1586-1593.

[7] 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.

[8] TOM L. Participation of inverter-connected distributed energy resources in grid voltage control[D]. Leuven: Katholieke Universiteit, 2011.

[9] CHEN Y, HESSE R, TURSCHNER D, et al. Improving the grid power quality using virtual Synchronous machines [C] // Power Engineering, Energy and Electrical Drives (POWERENG), 2011 International Conference on, 2011: 1-6.

[10] 吕志鹏,盛万兴,钟庆昌,等.虚拟同步发电机及其在微电网中的应用[J].中国电机工程学报,2014, 34(16): 2591-2603.

[11] 曾正,邵伟华,冉立,等.虚拟同步发电机的模型及储能单元优化配置[J].电力系统自动化,2015,39(13): 22-31.

[12] 程冲,杨欢,曾正,等.虚拟同步发电机的转子惯量自适应控制方法[J].电力系统自动化,2015,39(19): 82-89.

[13] 石荣亮,张兴,徐海珍,等.基于虚拟同步发电机的多能互补孤立型微网运行控制策略[J].电力系统自动化,2016,40(18): 32-40.

收稿日期: 2017-06-08