

DOI: 10.7667/PSPC161241

基于 Washout 滤波器的虚拟同步发电机新型控制方法研究

程启明, 张宇, 谭冯忍, 高杰, 余德清

(上海电力学院自动化工程学院, 上海市电站自动化技术重点实验室, 上海 200090)

摘要: 虚拟同步发电机(Virtual Synchronous Generator, VSG)控制策略能使逆变器模拟同步发电机运行机制, 有利于改善系统稳定性, 已成为逆变器控制技术的热点问题之一。首先对 VSG 的结构进行详细的分析, 包括电压电流双环的解耦控制、有功功率和无功功率的下垂控制以及同步发电机的建模等。然后在此基础上提出了一种基于 Washout 滤波器特性的新型 VSC 控制方案。最后通过 Matlab 仿真结果验证了所提的 VSG 控制方法的有效性和可行性, 并说明了新的控制方案可以改善微电网系统的频率与电压, 提高微电网的适应性和电能质量。

关键词: 微电网; Washout 滤波器; 虚拟同步发电机; 逆变器控制; 下垂控制

Research on new control method of virtual synchronous generator based on Washout filter

CHENG Qiming, ZHANG Yu, TAN Fengren, GAO Jie, YU Deqing

(College of Automation Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai Key Laboratory
Power Station Automation Technology Laboratory, Shanghai 200090, China)

Abstract: The virtual synchronous generator (VSG) control strategy can make the inverter simulate the operation mechanism of synchronous generator, which is beneficial to improve the system stability, it has become one of hot issues of inverter control technology. First, the structure of VSG is analyzed in detail, including the decoupling control of voltage loop and current loop, the droop control of active power and reactive power, and the modeling of synchronous generator, etc. Then, a new VSC control scheme with Washout filter characteristics is proposed. Finally, the simulation results on Matlab verify that the proposed VSG control method is effective and feasible, the new control scheme can improve the frequency and the voltage of microgrid system, and increase the adaptability and the power quality of microgrid.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 61304134), the Key Science and Technology Plan of Shanghai Science and Technology Commission (No. 14110500700), and Shanghai Key Laboratory Power Station Automation Technology Laboratory (No. 13DZ2273800).

Key words: microgrid; Washout filter; virtual synchronous generator; inverter control; droop control

0 引言

近年来, 分布式发电和微电网技术引起了广泛关注, 是未来世界能源技术发展的重要方向^[1-2]。传统的分布式发电主要采用电力电子逆变器作为发电单元, 与大型并网型同步发电机相比有很大的区别, 它存在容量较小、输出阻抗较低和系统惯性缺乏等问题, 这会使得电网的不稳定性变得更加严重, 并将威胁电网的安全可靠运行^[3-5]。

微电网可靠运行的关键问题是微源逆变器的控制, 下垂(droop)控制是微电网中最常用的微源逆变器的控制方法。通过跟踪由下垂控制器给出的电压幅值和频率的参考信号, 逆变器可以调整输出电压, 从而实现逆变器合理地分配有功和无功功率^[6-9]。然而, 在实施的过程中 droop 控制存在一定缺陷^[10], 例如旋转惯性的缺乏使得它很难为微电网提供必要的阻尼和频率的支持。为了解决上述问题, 虚拟同步发电机(Virtual Synchronous Generator, VSG)控制方案应运而生, 它结合了同步发电机和逆变器各自的特点, 模拟了同步发电机频率和电压的调节, 可以提高系统的稳定性, 自提出以来受到了广泛的关注^[11-12]。

基金项目: 国家自然科学基金(61304134); 上海市重点科技攻关计划(14110500700); 上海市电站自动化技术重点实验室(13DZ2273800)

VSG 控制算法已被公认并广泛地应用在微电网中,但是 VSG 的研究工作尚处于兴起阶段,其控制体系和工程应用仍然存在一些问题亟需解决^[13-14]。大量的学者对其进行了深入研究,文献[15]提出一种锁相环的 VSG 控制方法,以达到并/离网无缝切换的效果,但是其并没有应用电压电流控制,有功与无功之间存在耦合关系,影响 VSG 控制的实现效果。文献[16]提出了电压 VSG 控制策略,虽然在该控制策略下逆变器能够模拟同步发电机的外特性,但其仅适用于并网运行模式下,不利于逆变器的孤岛运行模式。文献[17]提出了一系列虚拟电抗控制策略,通过减去虚拟的电压降,使得系统的阻抗得到改善,电抗和电阻的比值可以在一定程度上降低,但会使孤岛模式的输出电压下降。文献[18]提出了一种自适应惯性控制策略,根据 VSG 的加速度和滑差选取不同的转子惯量,能够增加 VSG 的优越性,同时使其结构过于复杂且实现过程繁琐。

本文在上述文献的基础上,从 VSG 的结构入手,分析了 VSG 的基本原理,然后提出了带 Washout 滤波器的虚拟同步发电机控制器,其中, Washout 滤波器是一个一阶高通滤波器,可以让暂态分量通过的同时滤除直流分量。这种改进型 VSG 控制策略方法无需联络线,不需要增加额外的控制回路就可以消除系统电压与频率稳定偏差。最后在 Matlab/Simulink 软件上验证了提出的 VSG 控制策略的正确性与有效性。本文为微电网控制运行提供了一个有效的新方法。

1 虚拟同步发电机控制系统的结构

对于三相四桥臂的逆变器,在等效输出阻抗呈感性时,可以借助同步发电机原理设计 VSG 控制器。本文采用的 VSG 控制系统结构如图 1 所示。

图 1 中, VSG 控制方法的控制部分可以分为虚

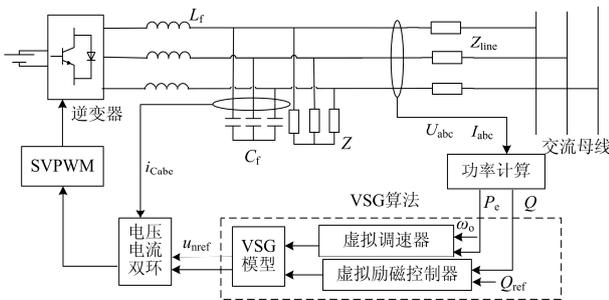


图 1 逆变器的虚拟同步发电机控制系统结构框图

Fig. 1 Structure diagram of VSG control system for inverter

拟调速器、虚拟励磁控制器和虚拟同步发电机控制模型 3 个控制部分,分别模拟了同步发电机的调速器、励磁控制系统和同步发电机的机械特性与电气特性,通过 3 个控制部分的共同作用,达到模拟同步发电机运行特性的目的。其中虚拟同步发电机算法为该控制策略的核心,而虚拟原动机调节模块模拟了同步发电机的一次调频特性。

图中, L_f 为滤波电感, C_f 为滤波电容, Z 为负载阻抗, Z_{line} 为输电线路的阻抗, I_{abc} 和 U_{abc} 分别为三相电压和三相电流, P_e 为电磁功率, Q 为计算的无功功率, ω_o 为电网同步角速度, Q_{ref} 为设置参考无功功率, U_{nref} 为电压电流环的综合输入电压。VSG 逆变器控制方法具体为:首先利用测量元件测量输电线路中的电压和电流;然后计算功率环节得到有功功率和无功功率;再通过虚拟调速器、虚拟励磁控制器以及虚拟同步发电机的模型得到相应的电压与频率指令值;最后通过电压电流双环控制器进行 PI 调节产生 SPWM 正弦调制信号。

同步发电机根据不同的需要可以有多种模型,主要有 2 阶模型、3 阶模型和 5 阶模型等,本文采用经典的 2 阶模型,它能在不失发电机特性的同时,避免复杂的电磁耦合关系。2 阶算法的 VSG 可表示为^[19-20]

$$\begin{cases} T_m - T_e - D\Delta\omega = \frac{P_m}{\omega} - \frac{P_e}{\omega} - D(\omega - \omega_o) = J \frac{d\omega}{dt} \\ \frac{d\theta}{dt} = \omega \\ E^* = U_{abc} + I_{abc}(R_a + jX_d) \end{cases} \quad (1)$$

式中: J 为同步电机的转动惯量; T_m 和 T_e 分别为同步发电机的机械转矩和电磁转矩; D 为阻尼系数; P_m 和 P_e 分别为机械功率和电磁功率; E^* 和 I_{abc} 分别为励磁电动势和电子电流; R_a 和 X_d 分别为定子电枢电阻和同步电抗。

2 虚拟同步发电机控制器的设计

为了体现 VSG 的优越性,本文将 VSG 逆变器设计为具有调频调压双重功能的可控电压源,以便在微电网发生故障时,仍能作为不间断电源向重要负荷供电。

2.1 电压电流双环控制结构的分析

为了更好地实现调频调压控制,模拟同步发电机的特性,要求系统的有功与无功实现充分解耦,本文采用的电压电流双环结构达到解耦控制,具体结构如图 2 所示。

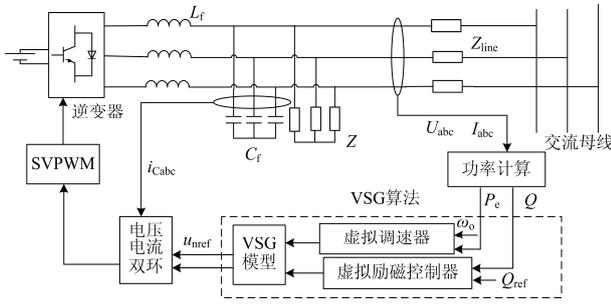


图2 电压电流双环控制系统的结构

Fig. 2 Structure of voltage and current double loop control system

图2中, i_L 和 i_o 分别为电感电流和负荷电流, $K_{P_{PWM}}$ 为逆变器的等效模型。电压外环采用 PI 控制器稳定负载电压, K_{up} 和 K_{ui} 为电压环 PI 控制的比例系数和积分系数; 电流内环采用 P 控制器提高响应速度, K_{ip} 为电流环比例系数。

由图2可知, 当电压控制环分别以 U_{nref} 和 U_{abc} 作为输入和输出时, 逆变器的闭环传递函数可写为

$$U_{abc} = \frac{K_{ip} K_{P_{PWM}} (K_{up} s + K_{ui}) U_{nref}}{LCs^3 + K_{ip} K_{P_{PWM}} Cs^2 + (1 + K_{P_{PWM}} K_{up}) s + K_{ip} K_{P_{PWM}} K_{up}} \cdot \frac{(Ls^3 + K_{ip} K_{P_{PWM}} s)}{LCs^3 + K_{ip} K_{P_{PWM}} Cs^2 + (1 + K_{P_{PWM}} K_{up}) s + K_{ip} K_{P_{PWM}} K_{up}} I_o \quad (2)$$

式(2)可简化为

$$U_{abc} = G(s) U_{nref} - Z_o(s) I_o \quad (3)$$

$$G(s) = \frac{K_{ip} K_{P_{PWM}} (K_{up} s + K_{ui})}{LCs^3 + K_{ip} K_{P_{PWM}} Cs^2 + (1 + K_{P_{PWM}} K_{up}) s + K_{ip} K_{P_{PWM}} K_{up}} \quad (4)$$

$$Z_o(s) = \frac{(Ls^3 + K_{ip} K_{P_{PWM}} s)}{LCs^3 + K_{ip} K_{P_{PWM}} Cs^2 + (1 + K_{P_{PWM}} K_{up}) s + K_{ip} K_{P_{PWM}} K_{up}} \quad (5)$$

式中: $G(s)$ 为电压比例增益传递函数; $Z_o(s)$ 为逆变器闭环系统的等效输出阻抗。

由式(5)可知, 在 VSG 逆变器控制中, 它的等效电抗并不像真实的发电机是一个固定不变的数值, 其等效输出阻抗除了受到线路阻抗和滤波参数影响, 还与控制系数密切相关, 可以灵活配置。

2.2 有功功率-频率的控制

借鉴了同步发电机控制器调速器的设计, VSG 的有功-频率表征了有功功率和系统频率之间的下垂特性, 能够使逆变器具有调频能力, 模拟同步发电机的调速器, 有功-频率下垂控制表达式为

$$P = P_{ref} + (\omega_o - \omega) K_f \quad (6)$$

式中: ω_o 为电网同步角速度; K_f 为有功功率下垂系数。传统的下垂系数计算公式为

$$K_f = \frac{\omega - \omega_{min}}{P_{max} - P} \quad (7)$$

式中: P_{max} 为微电源在频率下降时允许输出的最大有功功率; ω_{min} 为微电源输出有功功率最大相应的最小频率。

随着系统负载的变化, 常规的下垂(droop)控制将不能很好地恢复给定的角频率和电压幅值, 因此, 本文引入 Washout 滤波器来弥补常规的下垂控制这一缺陷^[21]。

Washout 滤波器是一种“通交阻直”的高通滤波器, 它可以使得信号的暂态分量通过, 带 Washout 滤波器特性的有功下垂系数计算公式可表示为

$$K_f = \frac{s + m_f}{k_f s} \quad (8)$$

将式(8)与式(6)结合可以得到一种含 Washout 滤波器的有功下垂特性方程为

$$P = P_{ref} + (\omega_o - \omega) \frac{s + m_f}{k_f s} \quad (9)$$

式中: k_f 表示传统有功下垂控制系数, 本文 k_f 取为 $1.03e-5$; m_f 为固定常数, $m_f=2000$ 。

由式(9)可知, 该控制方法是利用基于 Washout 滤波器的动态反馈, 在反馈路径中利用 Washout 滤波器的主要优势来消除线路中的不确定因素, 这种控制方法可以在负荷变动情况下保持系统电压和频率稳定。

同时, 为了模拟同步电机的转子运动特性, 将同步发电机转子运动方程引入到频率控制中, 使其在调节频率过程中同时具备同步电机的惯性响应, 转子运动方程可表示为

$$\begin{cases} J \frac{d\omega}{dt} = \frac{P - P_e}{\omega} - D(\omega - \omega_o) \\ \frac{d\theta}{dt} = \omega \end{cases} \quad (10)$$

综合有功下垂控制与转子运行方程可以得到基于同步电机转子运动方程的有功-频率整体控制框图如图3所示。

由图3可见, VSG 的频率控制由两部分组成, 即带 Washout 滤波器特性下垂控制环节和转子运行特性环节。当并网运行时, 频率设定值与系统频率一致, 下垂环节将失效, 频率控制主要体现为转子运动特性。当孤岛运行时, 大电网不再为电网提供频率支撑, 微网频率通常会有一定的波动, 此时下垂环节作用产生一个附加功率, 有减小频率波动的作用。

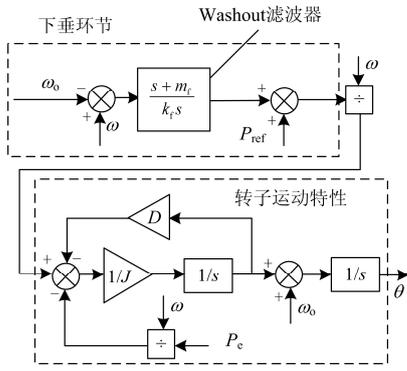


图 3 VSG 有功-频率控制框图

Fig. 3 Control diagram of active power and frequency for VSG

2.3 无功功率-电压的控制

VSG 的无功功率-电压控制实际上是模拟同步发电机的励磁调节功能, 表征了无功功率与电压之间的下垂特性。与有功功率的下垂特性类似, 传统的无功下垂控制已经不能满足系统电能质量的要求, 需要在传统下垂特性中引入 Washout 滤波器, 具体可表示为

$$E = E_0 + (Q_{ref} - Q) \frac{k_v s}{s + m_v} \quad (11)$$

式中: k_v 表示传统有功下垂控制系数, 本文 k_v 取为 $1.03e-5$; m_p 为固定常数, $m_p=2000$ 。

在 VSG 控制模型虚拟励磁系统中, 虚拟电动势 E 不仅受到无功功率调节的影响, 还要受到逆变器机端电压控制信号 ΔE 的影响。其中, 逆变器机

端电压控制信号 ΔE 可等效为同步发电机的自动电压调节器(Automatic Voltage Regulator, AVR), 可具体表示为

$$\Delta E = (E_{ref} - E_m) K_v \quad (12)$$

由式(11)和式(12)可以得到 VSG 电压控制框图, 如图 4 所示。

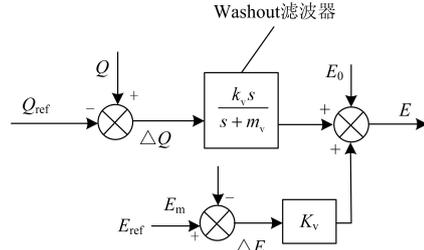


图 4 VSG 无功-电压控制框图

Fig. 4 Control diagram of reactive power and frequency for VSG

2.4 虚拟同步发电机的控制器结构

综上所述, 可以建立逆变器的虚拟同步发电机控制器的结构框图, 如图 5 所示。它包含有功下垂调节、无功下垂调节、转子机械特性、电气实现部分和电压电流双环控制共 5 个模块。其中电气实现部分包含有合成电压部分与同步电机的 2 阶电压模型。同步电机的 2 阶模型中电压方程可以表示为

$$E^* = U_{nref} + I_{abc} (R_a + jX_d) \quad (13)$$

它代表着同步发电机定子的电气特性, 与式(10)代表的转子机械特性相对应, 两者综合即为同步发电机的 2 阶模型方程。

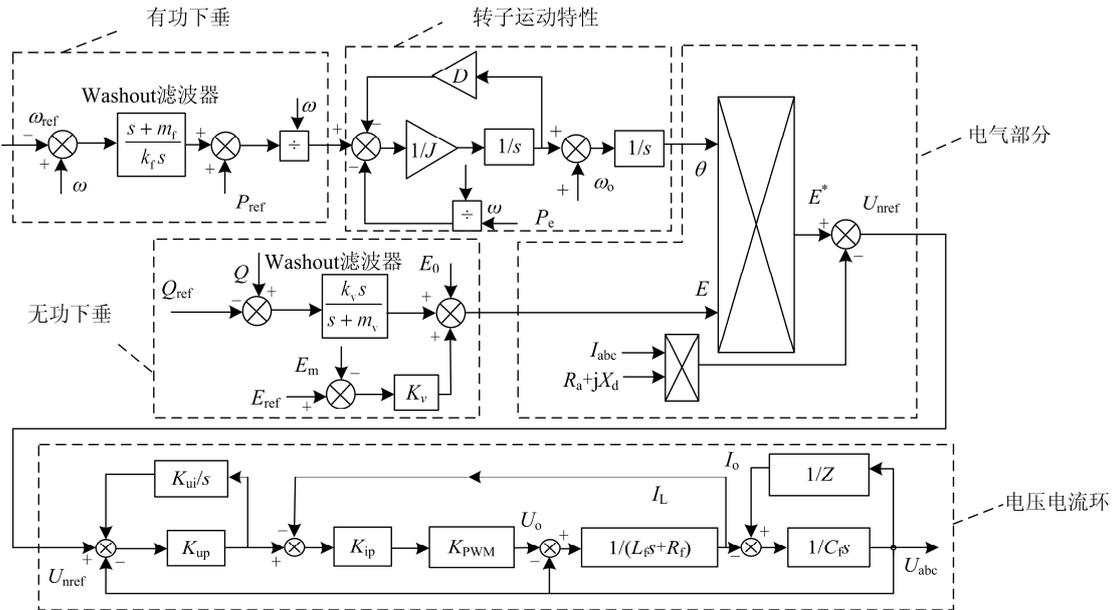


图 5 新型 VSG 控制器的结构框图

Fig. 5 Structure diagram of novel VSG controller

3 仿真分析

利用 Matlab/Simulink 软件搭建图 1 所示的 VSG 结构仿真模型, 系统参数如表 1 所示, 由此仿真验证 VSG 控制策略。

为了验证本文所提的新型 VSG 控制策略的可行性与稳定性, 本文把它与常规的下垂控制、常规 VSG 控制进行仿真比较。仿真中, 假设 3 种控制方法都工作在孤岛模式且负荷发生阶跃变化, 仿真时间为 1 s, 初始时负荷的有功功率为 20 kW、无功功率为 5 kvar, 0.3 s 时有功功率增至 30 kW、无功功率增至 10 kvar, 0.6 s 时有功功率恢复到 20 kW、无功功率恢复到 5 kvar。

表 1 系统主要参数

Table 1 Main values of the system

参数	取值	参数	取值
R_f/Ω	0.1	J	0.5
L_f/mH	1.5	D	20
$C_f/\mu F$	2000	K_{up}	10
Z_{Line}/Ω	0.1+0.001j	K_{ui}	100
E_o/V	311	K_{ip}	5
P_{set}/kW	20	f_s/Hz	6000
ω_o/Hz	314	K_v	0.1
$Q_{set}/kvar$	10		

图 6 为负荷阶跃变化时的频率变化情况。由图 6(a)和图 6(b)负荷阶跃变化时的频率曲线可见, 常规的下垂控制与常规的 VSG 控制具有一致性, 即负荷增加会引起系统频率的下降, 这与传统电网的特性相同。常规的下垂控制与常规的 VSG 控制也存在差异, 即在负荷变化时下垂控制以一定斜率直线形式改变频率, 而 VSG 控制算法中频率下降更缓慢, 这说明 VSG 控制可以延缓频率的变化速度, 增加系统惯性, 这有利于提高系统的稳定性。

通过图 6(b)与图 6(c)的对比可见, 在负荷增加变化时, 本文基于 Washout 滤波器特性的 VSG 控制比常规的 VSG 控制在频率方面表现更为出色, 本文新型 VSG 控制系统的频率能够完全稳定在工频 50 Hz, 在 0.4 s 与 0.6 s 负荷变化时只有轻微的变化, 因此, 本文的改进 VSG 控制方法在稳定系统频率方面表现非常突出, 大大提高了频率的稳定性与可靠性。

图 7 给出了负荷阶跃变化时常规 VSG 控制与本文新型 VSG 控制的电压变化情况。图中, 电压变化情况采用电压的幅值和三相电压的总谐波失真 (Total Harmonic Distortion, THD) 来表示。

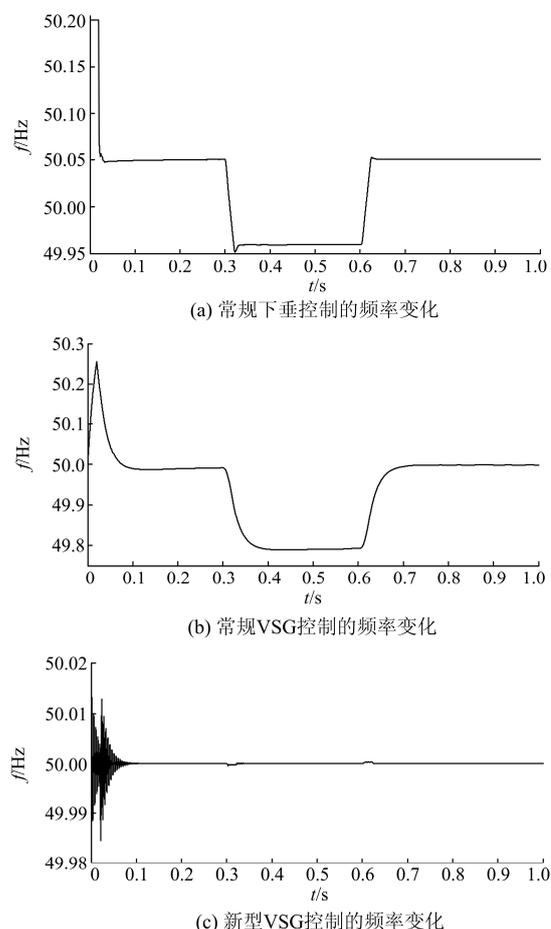


图 6 负荷阶跃变化时的频率变化情况

Fig. 6 Frequency variation of load step change

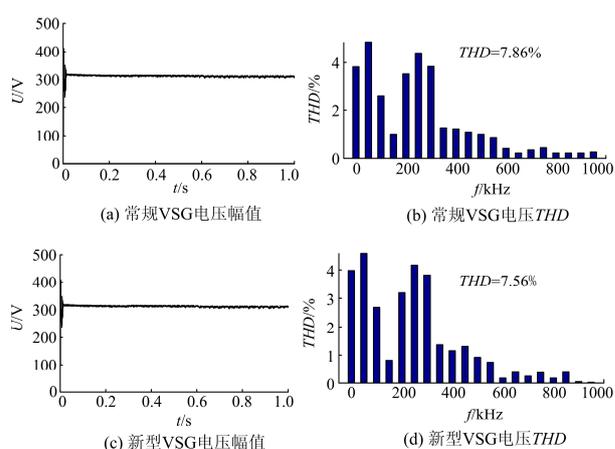


图 7 负荷阶跃变化时的电压变化情况

Fig. 7 Voltage variation of load step change

由图 7(b)和图 7(d)的电压 THD 对比可见, 常规 VSG 控制因其没有加入 Washout 滤波器, VSG 控制系统中存在较多的谐波, 其三相电压 THD 为 7.86%, 而本文提出的新型 VSG 控制算法因其加入了

Washout 滤波器, 它能一定程度地抑制谐波, 其三相电压 THD 降低为 7.56%。

由图 6 和图 7 可见, 本文的新型 VSG 控制在频率维持、电压稳定方面都比常规的下垂控制以及常规的 VSG 控制都有更好的表现。

另外, 有功和无功的输出也关系到控制系统的稳定。图 8 给出了加入 Washout 滤波器后 VSG 控制逆变器的有功功率与无功功率曲线。

由图 8 可见, 本文的 VSG 控制方法可以根据负荷变动自适应地调整对逆变器输出功率的控制, 实现不间断地对重要负荷供电, 且负荷变动的瞬间亦可平稳运行。

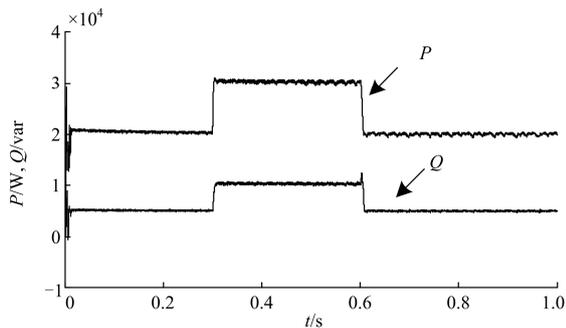


图 8 负荷阶跃变化时的功率变化

Fig. 8 Power variation of load step change

4 结论

本文基于 VSG 的暂态 2 阶数学模型分析了 VSG 控制系统的结构, 基于常规下垂控制存在的问题, 提出了带 Washout 滤波器特性的 VSG 控制系统, 并对这种系统各单元具体的组成结构和连接拓扑进行了详细说明。最后通过仿真验证了控制策略的可行性和有效性, 仿真结果证明了本文的新型 VSG 控制能更好地适应系统负荷变化情况, 提高了系统的稳定性。

参考文献

- [1] WANG Z, CHEN B, WANG J, et al. Decentralized energy management system for networked microgrids in grid-connected and islanded modes[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(2): 1097-1105.
- [2] 王成山, 武震, 李鹏. 微电网关键技术研究[J]. 电工技术学报, 2014, 29(2): 1-12.
WANG Chengshan, WU Zhen, LI Peng. Research on key technologies of microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 1-12.
- [3] 周龙, 齐智平. 微电网保护研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(13): 147-154.
ZHOU Long, QI Zhiping. A review of the research on microgrid protection development[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(13): 147-154.
- [4] HE J, LI Y W, BOSNJAK D, et al. Investigation and active damping of multiple resonances in a parallel-inverter based microgrid[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(1): 234-246.
- [5] XU Jianzhong, ZHAO Chengyong. A coherency-based equivalence method for MMC inverters using virtual synchronous generator control[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(3): 1369-1378.
- [6] 陈丽娟, 王致杰. 基于改进下垂控制的微电网运行控制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(4): 16-21.
CHEN Lijuan, WANG Zhijie. Research of operation control of micro-grid based on improved droop control[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(4): 16-21.
- [7] 闫俊丽, 彭春华, 陈臣. 基于动态虚拟阻抗的低压微电网下垂控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(21): 1-6.
YAN Junli, PENG Chunhua, CHEN Chen. Droop control strategy based on dynamic virtual impedance in low-voltage microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(21): 1-6.
- [8] WANG Xiaofei, BLAABJERG F, CHEN Zhe. Autonomous control of inverter-interfaced distributed generation units for harmonic current filtering and resonance damping in an islanded microgrid[J]. IEEE Transactions on Industrial Applications, 2014, 50(1): 452-461.
- [9] HE Jinwei, YUN wei, LI Blaabjerg B. Flexible microgrid power quality enhancement using adaptive hybrid voltage and current controller[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(6): 2784-2794.
- [10] GUO Wenming, MU Longhua. Control principles of micro-source inverters used in microgrid[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1: 7pp.
DOI 10.1186/s 41601-016-0019-8
- [11] ZHONG Q, WEISS G. Synchronverters: inverters that mimic synchronous generators[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(4): 1259-1267.
- [12] 侍乔明, 王刚, 付立军, 等. 基于虚拟同步发电机原理的模拟同步发电机设计方法[J]. 电网技术, 2015, 39(3): 783-790.
SHI Qiaoming, WANG Gang, FU Lijun, et al. A design method of simulative synchronous generator based on virtual synchronous generator theory[J]. Power System Technology, 2015, 39(3): 783-790.
- [13] JABER A, YUSHI M, TOSHIFUMI I. Power system stabilization using virtual synchronous generator with

- alternating moment of inertia[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 3(2): 451-458.
- [14] 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.
ZHENG Tianwen, CHEN Laijun, CHEN Tianyi, et al. Review and prospect of virtual synchronous generator technologies[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(21): 165-175.
- [15] 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.
LÜ Zhipeng, SHENG Wanxing, ZHONG Qingchang, et al. Virtual dychronous generator and its applications in micro-grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(16): 2591-2603.
- [16] ZHONG Qingchang. Self-synchronized synchronverters, inverters without a dedicated synchronization unit[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(2): 617-630.
- [17] CHENG Junzhao, LI Shusen, WU Zaijun, et al. Analysis of power decoupling mechanism for droop control with virtual inductance in a microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(7): 27-32.
- [18] ALIPOOR J, MIURAY, ISE T. Power system stabilization using virtual synchronous generator with adoptive moment of inertia[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2014, 3(2): 451-458.
- [19] 王思耕, 葛宝明, 毕大强. 基于虚拟同步发电机的风电场并网控制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(21): 49-54.
WANG Sigeng, GE Baoming, BI Daqiang. Control strategies of grid-connected wind farm based on virtual synchronous generator[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(21): 49-54.
- [20] KIM J, GUERRERO J M, RODRIGUEZ P, et al. Mode adaptive droop control with virtual output impedances for an inverter-based flexible AC microgrid[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(3): 689-701.
- [21] YAZDANIAN M, MEHRIZI-SANI A. Washout filter-based power sharing[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(2): 967-968.

收稿日期: 2016-08-07; 修回日期: 2016-10-19

作者简介:

程启明(1965—), 男, 通信作者, 硕士, 教授, 硕士生导师, 研究方向为电力系统自动化、发电过程控制、先进控制及应用等; E-mail: chengqiming@sina.com

张宇(1992—), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统自动化、电机控制等; E-mail: 1499021689@qq.com

谭冯忍(1992—), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统自动化、新能源发电控制等。E-mail: 1520947405@qq.com

(编辑 周金梅)