

虚拟同步发电机的相角控制方法

李旭, 丁勇, 李勇, 刘为群

(南京南瑞继保电气有限公司, 江苏 南京 211102)

摘要: 虚拟同步发电机技术利用电力电子变换器模拟同步发电机的特性, 使变流器具有同步发电机一次调频、一次调压、阻尼及惯性等特性, 增强了变流器对电网电压及频率的支撑作用, 提高了电网接入的友好性。提出一种利用常规锁相环校正虚拟同步发电机频率和相位的方法, 在启动并网及强扰动过程中校正频率和相位的不合理偏移, 减小了上述工况下的振荡及失控风险, 并通过实验验证了方法的可行性。

关键词: 虚拟同步发电机; VSG; 相角控制; 相位; 频率; 预同步

中图分类号: TM46

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2017)01-0043-04

传统的并网变流器控制方式往往采用简单成熟的有功、无功解耦电流控制, 该方法可以实现快速准确的功率控制, 但不具备惯性、阻尼等特性, 且该控制方式不支持在离网模式下运行。虚拟同步发电机(VSG)技术利用电力电子变换器模拟同步发电机的特性, 使变流器具有同步发电机一次调频、一次调压、阻尼及惯性等特性, 增强了变流器对电网电压及频率的支撑作用, 提高了电网接入的友好性, 逐渐成为研究热点^[1-4]。

虚拟同步发电机的相位和角频率通过发电机的运动方程得到^[5,6]。但并网启动时, 由于并网解锁时刻之前虚拟同机发电机无法通过摇摆方程与电网同步, 直接并网时会因为与电网间的相位差造成的严重电流冲击; 同时, 虚拟同步发电机并网运行过程中, 当受到较大的扰动时可能出现频率和相位偏离严重的情况, 造成系统失去控制。

本文提出通过相角调节器, 利用常规锁相环(PLL)对虚拟同步发电机的相位及角频率进行预同步和在线校正, 以减少并网冲击实现平滑启动, 并提高系统的抗扰动能力。

1 虚拟同步发电机控制技术

1.1 并网变流器的电路结构

图1所示为最常见的三相并网变流器电路, 直流侧 E_{dc} 可以为恒压源或储能电池等; C_{dc} 为直流支撑电容; u_{ia}, u_{ib}, u_{ic} 为经 PWM 生成的电压; L 和 C 分别为交流滤波电抗器和电容; u_{oa}, u_{ob}, u_{oc} 为经滤波之后的变流器输出端电压; 公共连接点(PCC)为变流器并网点; L_g 为电网侧的电感; u_{ga}, u_{gb}, u_{gc} 为电网电压。

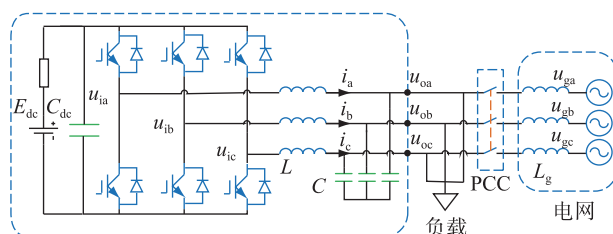
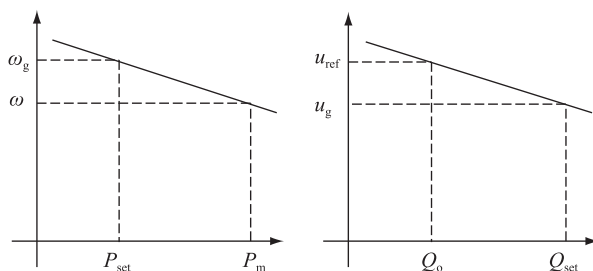


图1 并网变流器电路拓扑

1.2 虚拟同步发电机技术

根据需要分别对同步发电机的一次调压、一次调频、惯性等特性进行模拟。假定线路为感性, 容性无功为正无功, 一次调压、一次调频通过下垂控制实现^[7-9], 如图2所示。



(a) 有功-频率曲线

(b) 无功-电压曲线

图2 有功-频率和无功-电压下垂曲线

$$P_m = P_{set} + D_p(\omega_g - \omega) \quad (1)$$

$$u_{ref} = u_g + D_q(Q_{set} - Q_o) \quad (2)$$

同步发电机的简化运动方程为:

$$P_m - P_o = J\omega d\omega / dt \quad (3)$$

将式(1)代入式(3), 得转子运动方程(摇摆方程)为:

$$P_{set} + D_p(\omega_g - \omega) - P_o = J\omega d\omega / dt \quad (4)$$

$$d\theta / dt = \omega \quad (5)$$

其中 P_{set} 为有功设定; P_o 为实际有功输出; P_m 为机械功率; D_p 为频率有功下垂系数; Q_{set} 为无功设定; Q_o 为实际无功输出; D_q 为无功电压下垂系数; u_{ref} 为

收稿日期: 2016-10-20; 修回日期: 2016-11-22

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2015AA050101)

输出电压参考值; u_g 为电网额定电压; θ 为电角度 (相位); ω 为电角速度; ω_g 为电网额定电角速度。

由式(4)可知,参数设定完成后,转子运动方程中只有 ω 为未知变量,从而可求得电角速度 ω ,进一步对 ω 积分即可得到系统的相位 θ 。

在 dq 旋转坐标系下,变流器输出电压参考值的 d, q 轴分量可表示为:

$$u_d^* = u_{\text{ref}} \quad (6)$$

$$u_q^* = 0 \quad (7)$$

根据式(2)(4)(5)(6)(7),将同步发电机的特性代入变流器控制中形成虚拟同步发电机的电压控制目标以及频率和相位,如下图3所示。

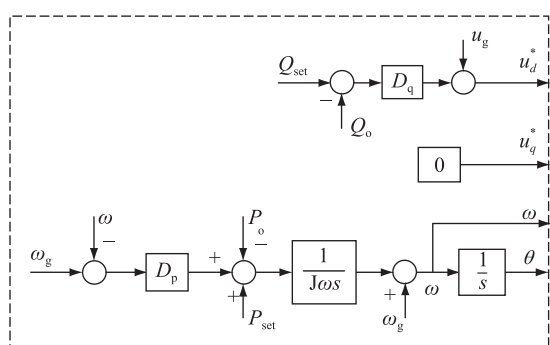


图3 虚拟同步发电机控制目标生成

通过电压外环、电流内环^[10]实现上述目标的控制,以增加系统的控制精度并限制过流,便可最终生成 PWM 的参考值,如图4所示。

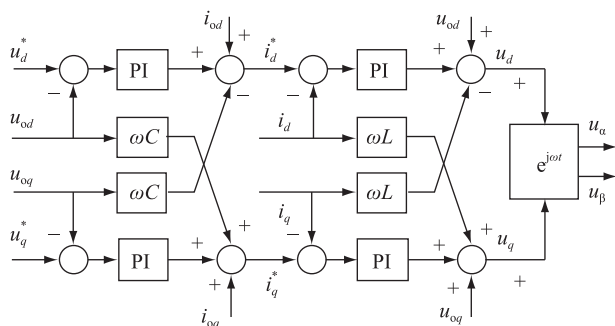


图4 虚拟同步发电机电压和电流控制

2 虚拟同步发电机的相位及角频率控制

虚拟同步发电机的相位和角频率控制统称为相角控制。通过上述虚拟同步发电机控制原理可知,相位和角频率通过模拟发电机的转子运动方程得到。但在并网启动瞬间或强扰动工况下,可能出现控制系统的相位与电网相位的大幅偏离。

针对以上情况,本文在虚拟同步发电机的相角输出中增加相角调节器,让虚拟同步发电机的转子运动方程和 PLL 算法在相角调节环节同时工作,并互相校准。通过锁相环对变流器端口电压进行锁

相,并将其输出的相位和频率作为虚拟同步发电机的相位及角频率的参考,在虚拟同步发电机的输出相位和频率发生较大偏离时,对其进行校正。

相角调节器的原理构成如图5所示,该相角调节器的输入为:PLL生成的相位 θ_{PLL} 和角频率 ω_{PLL} 、VSG 摇摆方程生成的相位 θ_{VSG} 和角频率 ω_{VSG} 、启动触发信号 (GCST) 和相位允许偏差 $\Delta\theta_{\text{set}}$ 。其中,GCST 为变流器的 PWM 脉冲解锁信号; $\Delta\theta_{\text{set}}$ 为设定 VSG 和 PLL 输出的相位允许偏差的限值。

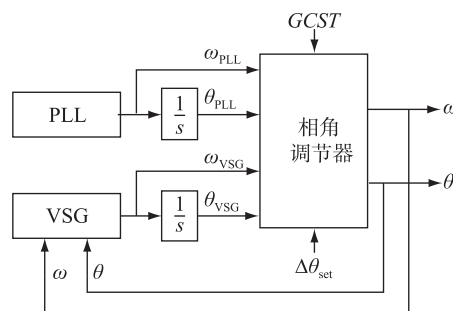


图5 相角调节器控制原理

相角调节器的工作原理:虚拟同步发电机启动时,当收到并网启动指令信号并解锁 PWM 脉冲,此时触发信号 GCST 置位为 1,相角调节器自动将 PLL 的 $\theta_{\text{PLL}}(k)$ 和 $\omega_{\text{PLL}}(k)$ 作为本次运算最终相位和角速度的输出,让 VSG 与电网同频同相启动运行。同时,输出的 $\theta(k)$ 和 $\omega(k)$ 作为下一次 VSG 相位和角速度运算的积分初始值。

$$\theta(k) = \begin{cases} \theta_{\text{VSG}}(k) & \text{GCST} \neq 1 \\ \theta_{\text{PLL}}(k) & \text{GCST} = 1 \end{cases} \quad (8)$$

$$\omega(k) = \begin{cases} \omega_{\text{VSG}}(k) & \text{GCST} \neq 1 \\ \omega_{\text{PLL}}(k) & \text{GCST} = 1 \end{cases} \quad (9)$$

虚拟同步发电机运行过程中,当相位角 $\theta_{\text{PLL}}(k)$ 和 $\theta_{\text{VSG}}(k)$ 之间误差大于允许偏差限值 $\Delta\theta_{\text{set}}$ 时,调节器自动将 $\theta_{\text{PLL}}(k)$ 作为本次运算最终相位的输出,强制让 VSG 与电网恢复同相运行。同时,输出的 $\theta(k)$ 作为下一次 VSG 相位运算的积分初始值。

$$\theta(k) = \begin{cases} \theta_{\text{VSG}}(k) & |\theta_{\text{PLL}}(k) - \theta_{\text{VSG}}(k)| \leq \Delta\theta_{\text{set}} \\ \theta_{\text{PLL}}(k) & |\theta_{\text{PLL}}(k) - \theta_{\text{VSG}}(k)| > \Delta\theta_{\text{set}} \end{cases} \quad (10)$$

通过以上调节器,在并网启动瞬间,通过 PLL 对虚拟同步发电机的相角进行预同步,以减少并网时相位偏差造成的电流冲击;在并网运行过程中,利用锁相环对虚拟同步发电机的相角进行校正,防止发生扰动时虚拟同步发电机与电网之间出现过大的相位偏差,避免控制失稳。

3 实验验证

在 500 kW 储能双向变流器上进行了基于虚拟

同步发电机的相角控制方法测试。

变流器额定功率 500 kW, 直流工作电压范围 420~650 V, 交流额定电压 270 V, 额定电流 1069 A, 额定频率 50 Hz, 电网流出为电流正方向。采用 500 kW/4 h 储能电池作为直流电源, 通过录波器记录测试波形。

设定 $\Delta\theta_{\text{set}} = 0.2 \text{ rad}$, $P_{\text{set}} = 150 \text{ kW}$, 如图 6 所示, 无相角控制情况下变流器并网启动, 并在 600 ms 时刻强制同步相位的波形。可见无相角同步控制情况下, 直接启动时的冲击电流及功率波动都很大; 强制触发相位同步以后系统逐渐收敛, 恢复到稳定运行。

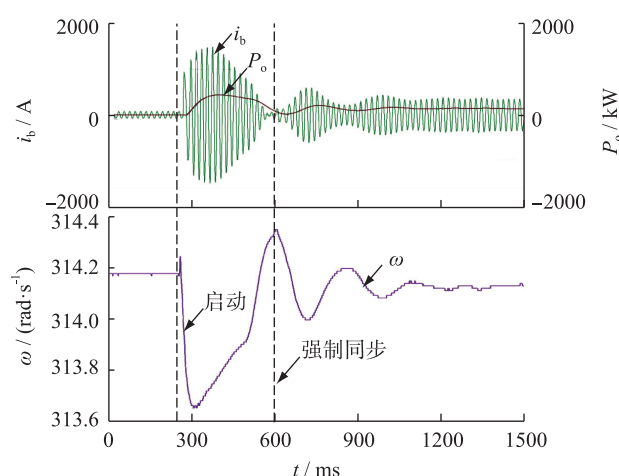


图 6 无相角控制变流器并网启动波形

如图 7 所示, 为同样参数下加入本文所提的相角控制时, 变流器并网启动的波形。可见有相角同步控制时, 系统的启动冲击电流及功率波动明显减小, 系统快速进入稳定运行状态。

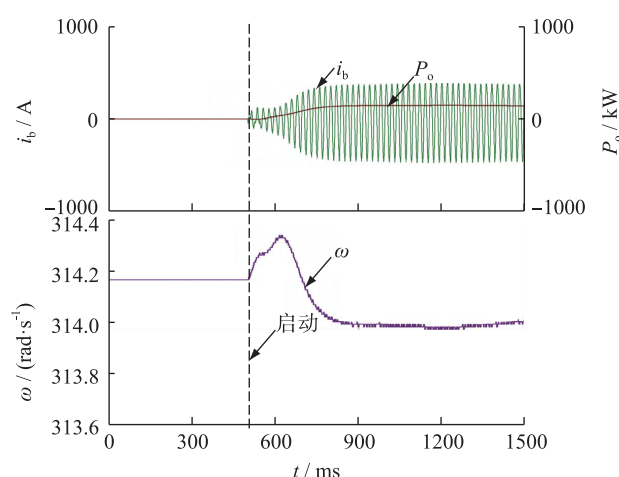


图 7 有相角控制变流器并网启动波形

为验证 VSG 在扰动工况下的控制稳定性, 在上述变流器上进行了非计划性并网到离网切换试验。并网有功指令为 150 kW, 无功指令 0 kVar, 离网就地负载容量为 14.2 kW, 22.7 kVar。

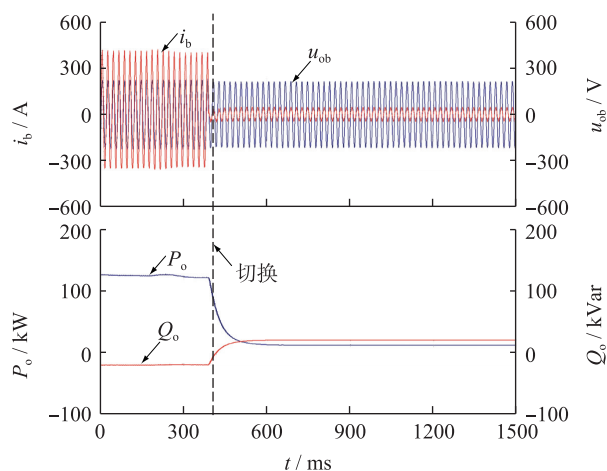


图 8 切换瞬间电压、电流、有功、无功变化

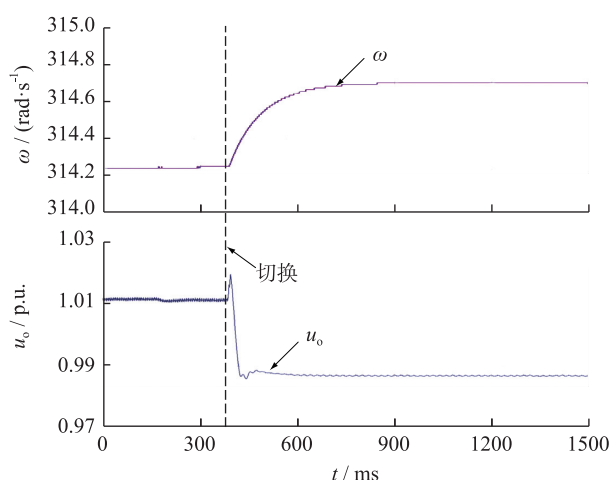


图 9 切换瞬间角频率及电压变化

由图 8、图 9 可见, 在非计划性并网到离网切换过程中, 切换平滑, 电压抖动小。并网运行时变流器与电网电角速度相同, 为 314.251 rad/s, 电网频率为 50.01 Hz; 切换到离网后, 按频率-有功下垂系数 $D_p = 0.5$, 理论计算的离网运行电角速度为 314.702 rad/s, 实际系统中变流器在此工况下的电角速度为 314.703 rad/s, 与理论计算一致; 按电压-无功下垂系数 $D_q = 0.3$, 理论计算的离网运行电压标幺值为 0.986 p.u., 实际系统中变流器在此工况下的输出端电压标幺值为 0.986 p.u., 与理论计算一致。

4 结束语

虚拟同步发电机控制算法通过摇摆方程生成逆变器运行的频率和相位, 将常规锁相环的输出作为虚拟同步发电机的相位及角频率参考, 通过相位调节器对虚拟同步机的频率和相位进行同步和校正, 避免了启动并网及强扰动时虚拟同步发电机与电网之间出现过大的频率和相位偏差, 从而减小了

对变流器及电网的冲击。实验结果验证了算法的有效性。

参考文献:

- [1] 刘波, 杨旭, 孔繁麟, 等. 三相光伏并网逆变器控制策略[J]. 电工技术学报, 2012, 27(8): 64-70.
- [2] 李群, 袁晓东, 李强. 新能源友好接入配电网适应性分析[C]//分布式新能源及微电网技术论文集. 江苏: 江苏省电机工程学会, 2013: 1-7.
- [3] 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.
- [4] 陆以军, 候梅毅. 基于同步发电机的分布式电源孤岛检测方法研究[J]. 江苏电机工程, 2013, 32(2): 66-70.
- [5] 杨向真, 苏建徽, 丁明, 等. 面向多逆变器的微电网电压控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(7): 7-13.
- [6] 曾正, 邵伟华, 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, 13(39): 22-31.
- [7] 黄春燕. 引入虚拟电抗的独立运行微电网改进下垂控制[J]. 江苏电机工程, 2014, 33(4): 39-43.
- [8] ZHONG Q C, WEISS G. Synchronverters; Inverters That mimic

Synchronous Generators[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(4): 1259-1267.

- [9] ZHONG Q C, NGUYEN P L. Self-synchronized Synchronverters; Inverters Without a Dedicated Synchronization Unit[J]. IEEE Transactions Power Electron, 2014, 29(2): 1890-1838.
- [10] 黄华, 周波达, 费建平, 等. 基于根轨迹法的链式 STATCOM 比例谐振电流控制器设计[J]. 江苏电机工程, 2015, 34(2): 1-5.

作者简介:



李旭

李旭(1986—),男,江苏徐州人,工程师,从事新能源发电应用与控制工作。

丁勇(1981—),男,江苏南通人,高级工程师,从事电力系统无功补偿及新能源发电工作。

李勇(1981—),男,江苏南京人,高级工程师,从事新能源发电应用与控制工作。

刘为群(1966—),男,安徽滁州人,研究员级高级工程师,从事电力电子功率变换技术及应用工作。

Phase angle control method of Virtual Synchronous Generator

LI Xu, DING Yong, LI Yong, LIU Weiqun

(Nanjing Nari-Relays Electric Co. Ltd., Nanjing 211102, China)

Abstract: Virtual synchronous generator (VSG) technology simulates the characteristics of the synchronous generator by power conversion system (PCS). Thus, the converter will have the characteristics of the synchronous generator such as primary frequency regulation, primary voltage regulation, damping and inertia. So the voltage and frequency regulation ability of converter for power grid will be enhanced. It can also help to improve the friendliness of grid-connection. In this paper, a new rectification method for phase angle and frequency of VSG based on phase locked loop (PLL) is proposed. The unreasonable deviation of frequency and phase is corrected in the process of starting grid connection and in the condition of strong disturbance, to reduce the oscillation and out-of-control risk under the above conditions. Finally, some experimental tests are given for correctness verification of the proposed method.

Key words: virtual synchronous generator; VSG; phase control; phase; frequency; pre-synchronizations

(上接第 42 页)

Operating Reliability Research of 220 kV Divisional Power Grid Considering UPFC

WANG Xinping¹, LI Qun², LIU Jiankun², ZANG Haixiang¹, SUN Guoqiang¹, WEI Zhinong¹

(1.College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China;

2. State Grid Jiangsu Electric Power Company Electric Power Research Institute, Nanjing 211103, China)

Abstract: With the continuous expansion of the interconnection scale of power grids, the number of the power electronics integrated to the power grid continues to increase, bringing new challenges to the operation reliability of the grid. As the equipment for flexible AC transmission system (FACTS) which has the strongest ability of adjusting power flow, the unified power flow controller (UPFC) has been designed, developed and applied to Nanjing western power grid successfully. In this paper, the operational reliability model considering UPFC is established and applied to perform the operation reliability analysis and benefit evaluation of Nanjing western power grid. The analysis results of the example demonstrate that UPFC can effectively improve the reliability of regional power network and positively contribute to economic benefits.

Key words: operation reliability; UPFC; benefit evaluation