

DOI: 10.20271/j.cnki.1673-9833.2026.2006

虚拟同步发电机的新型二次调频和无锁相环预同步控制

杨秀海, 文定都, 孟雨薇, 钟丁爱

(湖南工业大学 交通与电气工程学院, 湖南 株洲 412007)

摘 要: 针对孤岛模式下二次调频中微电网频率的偏移误差和振荡较大的问题, 提出了一种积分系数自适应的二次调频控制策略。首先, 通过角频率变化率将积分系数分为两阶段控制, 根据阶段1和阶段2的变化要求自适应调整积分系数的大小, 以同时减小二次调频过程中频率的偏移和振荡, 提高系统的稳定性和可靠性。其次, 针对孤岛向并网切换过程中速度与精度较低的问题, 结合孤岛模式下的控制策略, 提出一种新型无锁相环预同步控制策略, 即将逆变器输出的电压矢量末端和电网电压矢量末端之间的距离代替相位差进行补偿, 并且给出了一种新的并网判断条件, 省去了锁相环(PLL)和均方根值(RMS)环节, 且只需要1个PI调节器, 减少了控制参数, 提高了预同步的速度和精度, 实现了离/并网平滑切换。最后, 通过Matlab/Simulink仿真和半实物仿真, 验证了所提方法的正确性。

关键词: 虚拟同步发电机; 二次调频; 预同步; 无锁相环; 平滑切换

中图分类号: TP273

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2026)02-0044-09

引文格式: 杨秀海, 文定都, 孟雨薇, 等. 虚拟同步发电机的新型二次调频和无锁相环预同步控制 [J]. 湖南工业大学学报, 2026, 40(2): 44-52.

Novel Secondary Frequency Modulation and Phase-Locked Loop-Free Pre-Synchronization Control for Virtual Synchronous Generators

YANG Xiuhai, WEN Dingdou, MENG Yuwei, ZHONG Ding' ai

(School of Transportation and Electrical Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: In view of the frequency offset error and large oscillation of microgrids in secondary frequency regulation under islanding mode, an integral coefficient adaptive secondary frequency regulation control strategy with integral coefficient has thus been proposed. Firstly, the integration coefficient is divided into two stages of control through the angular frequency change rate, with the size of the integration coefficient adaptively adjusted according to the requirements of the two stage changes, so as to reduce frequency offset and oscillation during the secondary frequency modulation process, thus improving the stability and reliability of the system. Secondly, in view of the low speed and accuracy in the switching process from islanding to grid connection, a new phase-locked-loop-free pre-synchronization control strategy is to be proposed based on the control strategy in islanding mode. A compensation can be achieved by replacing the distance between the end of the voltage vector output by the inverter and the end of the grid voltage vector instead of the phase difference, with a new grid connection judgment condition proposed, thus eliminating the phase-locked loop (PLL) and root mean square value (RMS) links with the requirement of only one PI regulator, reducing control parameters, improving the speed and accuracy of pre synchronization, and achieving a

收稿日期: 2024-11-24

作者简介: 杨秀海, 男, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为虚拟同步发电机, E-mail: 1328571372@qq.com

通信作者: 文定都, 男, 湖南工业大学教授, 主要研究方向为电力电子与电力传动, E-mail: 125710811@qq.com

$$\begin{cases} J \frac{d\omega}{dt} = \frac{P_m}{\omega_{\text{ref}}} - \frac{P_e}{\omega_{\text{ref}}} - D(\omega - \omega_g), \\ \frac{d\theta}{dt} = \omega - \omega_{g\circ} \end{cases} \quad (1)$$

根据不同阻尼比 ζ ,得到的频率调节情况见图6。由图6可知, K_i 的大小能够改变积分链路的强度,使积分速度发生变化,从而改变频率与额定频率的偏移误差。 K_i 值越小,频率偏移误差越大,振荡越小; K_i 值越大,频率偏移误差越小,振荡越大。因此,保持 K_i 不变不能实现对频率偏移误差和频率振荡的同时控制。为此,本文提出一种积分系数自适应的二次调频控制策略,将二次调频过程分为2个阶段,

$$\Delta u = u_{\text{ga}} - u_{\text{a}} \approx 2U \sin((\omega_0 - \omega)t/2 + (\theta_1 - \theta_2)/2) \cos((\omega_0 + \omega)t/2 + (\theta_1 + \theta_2)/2). \quad (11)$$

由式 (11) 可知, 在切换瞬间能够产生 $2U$ 的电压差, 电压差过大会导致冲击电流较大, 致使并网失败。因此, 实现两种模式间的平滑切换至关重要。

传统的预同步控制策略原理见图 10。

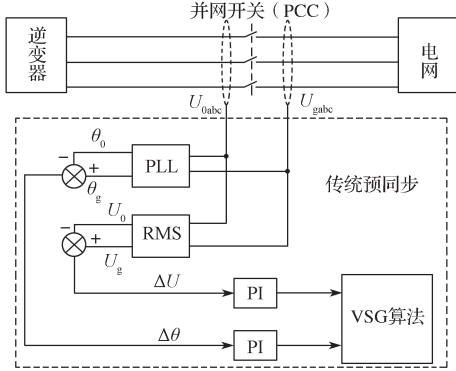


图 10 传统预同步控制策略原理图

Fig. 10 Schematic diagram of traditional pre-synchronization control strategy

由图 10 可知, 传统的预同步控制策略采用 2 个 PLL 分别对并网点两侧电压进行锁相, 并采用 2 个 RMS 提取两者的电压幅值, 然后将并网开关 PCC 两侧电压相位差、频率差和幅值差分别通入有功环路中对 VSG 进行补偿。该方法因使用了 PLL 和 RMS 环节, 故增加了系统设计复杂度, 减慢了预同步速度。

4.2 新型无锁相环预同步控制策略

在孤岛模式下采用二次调频调压控制方法, 使其在负荷变化时 VSG 输出频率和电压幅值能够恢复到额定值。结合此方法, 针对传统预同步控制缺陷, 提出了一种新型无锁相环预同步控制策略, 无需 PLL 和 RMS, 只需要 1 个 PI 调节器, 就能实现从孤岛模式向并网模式的平滑切换, 简化了系统总体结构。

并网点两侧电压如图 11 所示。图中, $U_{0\alpha}$ 、 $U_{0\beta}$ 分别为 VSG 输出电压 U_0 在 α 轴和 β 轴上的分量, $U_{g\alpha}$ 、 $U_{g\beta}$ 分别为电网电压 U_g 在 α 轴和 β 轴上的分量, Δx 为 VSG 输出电压矢量 U_0 和电网电压矢量 U_g 末端之间的距离。

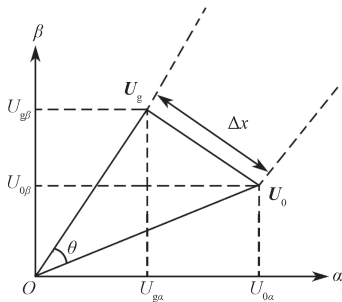


图 11 并网点两侧电压

Fig. 11 Voltage on both sides of the grid connection point

从图 11 可以得出 U_0 、 U_g 、 Δx 的计算式如下：

$$\begin{cases} U_g = \sqrt{U_{g\alpha}^2 + U_{g\beta}^2}, \\ U_0 = \sqrt{U_{0\alpha}^2 + U_{0\beta}^2}, \\ \Delta x = \sqrt{(U_{0\alpha} - U_{g\alpha})^2 + (U_{0\beta} - U_{g\beta})^2}. \end{cases} \quad (12)$$

在孤岛模式下, 由于 VSG 采用了二次调频调压控制策略, 在不同工况下运行时, 始终有 $U_0 = U_g$ 、 $\omega = \omega_g$, 其满足微电网并网要求, 所以预同步时只需要进行相位角预同步即可。

因 $U_0 = U_g$, 故只要 U_0 与 U_g 间存在相位差 $\Delta\theta$ 就一定存在 Δx 。因此, 预同步过程中, 先计算出 Δx 的值, 然后通过 PI 调节器对有功环进行补偿, 就能完成预同步过程。

根据图 11 可得：

$$\cos \Delta\theta = (U_0^2 + U_g^2 - \Delta x^2) / (2U_0 U_g). \quad (13)$$

当 VSG 并联到电网时, 需要满足如下条件：

$$\begin{cases} |f - f_g| \leq f_{\min}, \\ |U_0 - U_g| \leq U_{\min}, \\ |\theta_0 - \theta_g| \leq \theta_{\min}. \end{cases} \quad (14)$$

如果满足 $\Delta\theta < \Delta\theta_{\min}$, 则达到并网要求, 预同步结束, 打开并网开关。由式 (13) (14) 可得新的并网判定条件如下：

$$\Delta x < \sqrt{U_0^2 + U_g^2 - 2U_0 U_g \cos \Delta\theta_{\min}}. \quad (15)$$

新型无锁相环预同步控制的具体实现过程如下：

1) 孤岛模式下, 打开开关 S_1 、 S_2 。在预同步开启前, VSG 的输出电压幅值和频率就能达到并网要求。

2) 根据式 (12) 计算出 Δx , 将此值通入 PI 调节器中, 得到频率扰动量 ω_{syn} , 再对有功环进行补偿。

3) 根据式 (15) 判断预同步结束时间, 预同步过程完成后, 断开开关 S_1 、 S_2 , 打开 PCC 开始并网。

新型无锁相环预同步控制策略的控制框图如图 12 所示。

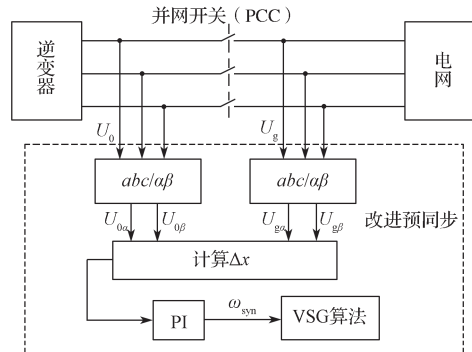


图 12 新型无锁相环预同步控制策略的控制框图

Fig. 12 Control block diagram of new phase-locked loop free pre-synchronization control strategy

5 仿真验证与分析

为了验证本文所提出的 VSG 新型二次调频和无锁相环预同步控制策略的正确性, 在 Matlab/Simulink 软件上搭建了 VSG 工作在不同模式下的仿真模型, 具体的仿真参数见表 1。

表 1 仿真参数及取值

Table 1 Parameters and values of simulation

参 数	取 值	参 数	取 值
直流母线电压基准值 U_{dc}/V	800	额定频率 /Hz	50
有效交流相电压 /V	220	滤波器电感 /H	5×10^{-3}
滤波器等效电阻 / Ω	0.2	滤波器电容 /F	2×10^{-4}
虚拟惯量 / ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$)	0.3	频率调整系数	800
虚拟阻尼 / ($\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{rad}^{-1}$)	10	电压调整系数	0.017 3

5.1 VSG 孤岛运行仿真

在孤岛模式下, 对单台 VSG 逆变器进行仿真, 仿真时间为 2 s。工况设置如下: 逆变器空载启动运行, 0.5 s 时, 加载至 5 kW+2 kvar; 1.0 s 时卸载。逆变器的有功功率和无功功率分别设置为 10 kW 和 1.8 kvar。

图 13 为采用传统的、文献 [10]、文献 [11], 以及本文所提方法的二次调频控制策略的 VSG 输出频率波形。

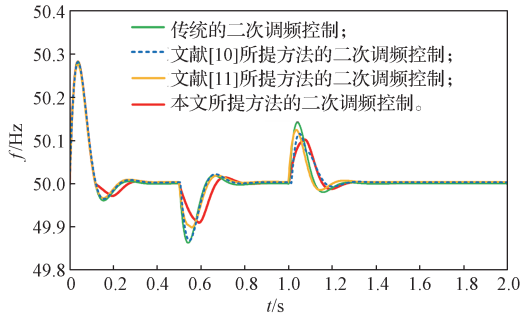
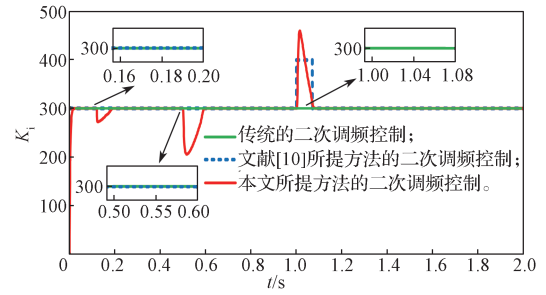


图 13 不同控制下 VSG 的输出频率波形

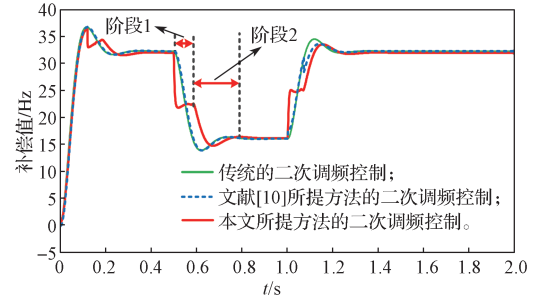
Fig. 13 Output frequency waveform of VSG under different controls

由图 13 可以得知, 在 0.5 s 加载时, 本文所提方法输出频率的偏移误差和振荡明显小于传统、文献 [10] 所提方法的对应值, 略小于文献 [11] 所提方法的对应值。在 1.0 s 减载时, 本文所提方法的输出频率的偏移误差和振荡明显小于传统、文献 [10] 和 [11] 所提方法的对应值。此结果表明, 使用本文所提方法的二次调频控制策略能够同时减少频率偏移误差和振荡。

图 14 为传统的、文献 [10] 以及本文所提方法的积分系数、频率补偿值的波形图。



a) 积分系数



b) 频率补偿值

图 14 不同控制策略下的积分系数、频率补偿值波形

Fig. 14 Waveforms of integral coefficients and frequency compensation values under different control strategies

由图 14a 可知, 传统方法的积分系数为常数, 文献 [10] 所提方法在 1.0 s 减载时积分系数呈阶跃变化。本文所提方法在 0.5 s 加载时, K_i 突减到 205.8, 随后自适应向 $K_0=300$ 变化; 在 1.0 s 卸载时, K_i 突增到 459.8, 随后自适应向 $K_0=300$ 变化。仿真结果验证了本文所提方法的二次调频控制策略的正确性。

由图 14b 可知, 本文所提方法在加载和减载的情况下, 频率补偿值的超调量均小于传统、文献 [10] 所提方法的对应值。

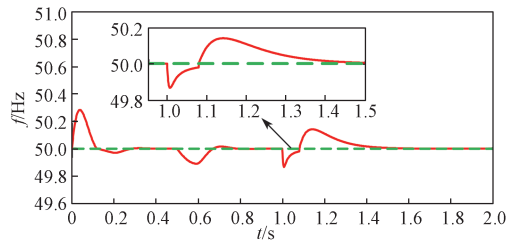
综上, 积分系数自适应二次调频控制策略分 2 阶段自适应控制积分系数的大小, 能够同时减少二次调频中频率的偏移误差及其振荡, 提高系统的稳定性。

5.2 VSG 离/并网切换仿真

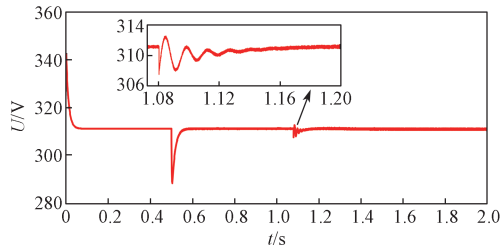
对单台 VSG 逆变器从孤岛模式到并网模式的切换进行仿真, 仿真时间为 2 s。工况设置如下: 逆变器的初始状态为使用二次调频调压控制的孤岛模式。系统空载运行, 0.5 s 时, 加载至 6 kW+2 kvar; 1 s 时, 打开预同步开关; 预同步完成后, 打开并网开关, 开始并网运行。逆变器的有功功率和无功功率分别设置为 10 kW 和 1.8 kvar。

图 15 给出了本文所提方法的预同步控制策略在离/并网切换过程中 VSG 输出以及电网侧的波形图。由图 15a 和 b 可知, VSG 输出的频率、电压幅值在预同步前已和电网侧的相同, 无需进行频率、电压幅值的预同步。图 15c 和 d 为微网电压与电网电压之间

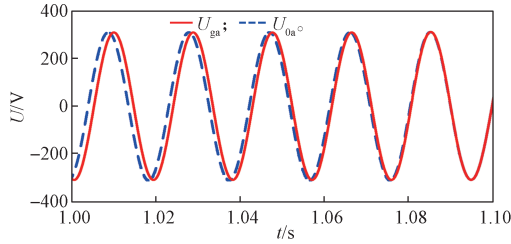
的预同步过程,从图中可以看出,在1.0 s时打开预同步开关,1.081 s时电压相位差几乎为0,符合并网要求,开始并网。



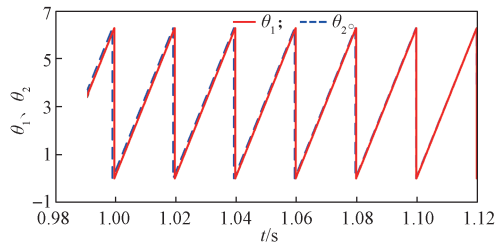
a) VSG 输出频率



b) VSG 输出电压幅值



c) VSG 预同步两侧电压波形



d) VSG 预同步两侧相位波形

图 15 VSG 输出频率、电压幅值、VSG 预同步两侧电压、相位波形变化曲线

Fig. 15 VSG output frequency, voltage amplitude, voltage on both sides of VSG pre-synchronization, and phase waveform variation curves

6 半实物仿真验证

为进一步验证本文所提方法的正确性和可行性,搭建了基于 (real-time laboratory, RT-LAB) 实时仿真器 OP5600 的硬件在环实验 (hardware in the loop simulation, HILS) 平台,如图 16 所示。RT-LAB (OP5600) 仿真器模拟硬件拓扑含理想电压源、逆变器 and VSG 电路,用示波器观察 VSG 的输出波形,其中控制算法写在 DSPTMS320F2812 中。图 17 为

RT-LAB 在环仿真原理图。

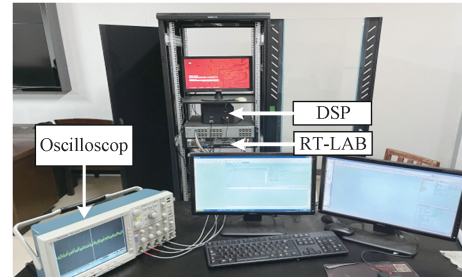


图 16 RT-LAB 实验平台

Fig. 16 RT-LAB experimental platform

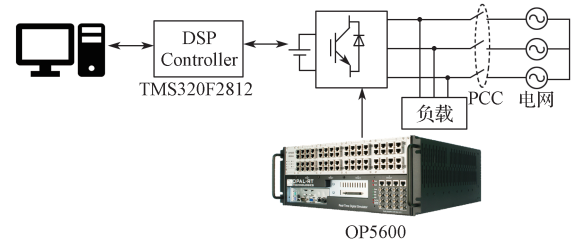


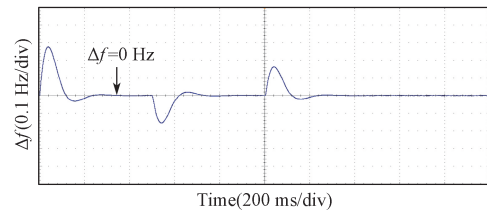
图 17 RT-LAB 硬件在环仿真原理示意图

Fig. 17 Schematic diagram of RT-LAB hardware in the loop simulation principle

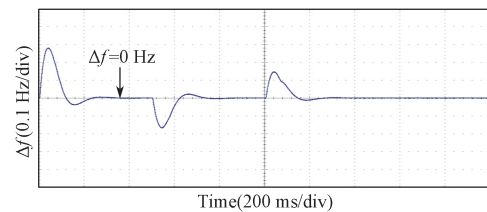
6.1 VSG 运行在孤岛模式

实验运行的工况设置如下:逆变器空载启动运行,0.5 s 时,加载至 5 kW+2 kvar,1.0 s 时卸载。逆变器的有功功率和无功功率分别设置为 10 kW 和 1.8 kvar。

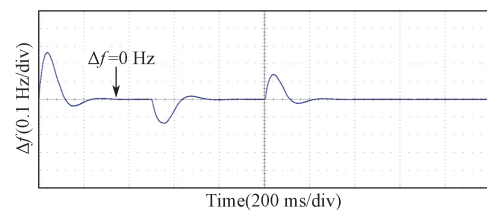
图 18 为传统的、文献 [10]、文献 [11] 以及本文方法的 VSG 输出频率的偏移误差和振荡波形曲线。



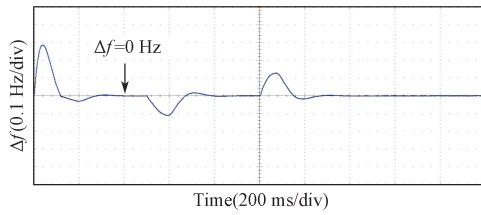
a) 传统的二次调频控制输出



b) 文献 [10] 所提方法二次调频控制输出



c) 文献 [11] 所提方法二次调频控制输出



d) 本文所提方法二次调频控制输出

图 18 4 种策略下 VSG 的输出有功功率曲线

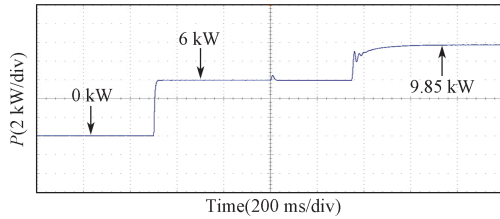
Fig. 18 Output active power curves of VSG under 4 strategies

由图 18 可得, 在 0.5 s 加载时, 本文所提方法的频率偏移误差相比于传统方法、文献 [10] 和 [11] 所提方法分别减少了 33.3%, 33.3%, 16.3%, 频率振荡分别减少了 31.6%, 31.6%, 13.3%。在 1.0 s 减载时, 频率偏移误差分别减少了 29.6%, 13%, 20%, 频率振荡分别减少了 50%, 2%, 16.7%。结果表明, 在孤岛模式下采用积分系数自适应的二次调频控制策略, 系统的综合性能运行在最佳状态, 使频率偏移误差和频率振荡同时得到有效控制。

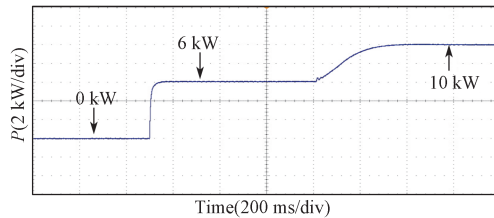
6.2 VSG 运行在离 / 并网模式

实验运行的工况设置如下: 逆变器的初始状态为使用二次调频调压控制的孤岛模式, 0.5 s 时, 加载至 6 kW+2 kvar; 1.0 s 时, 打开预同步开关, 预同步完成后, 打开并网开关, 开始并网运行。逆变器输出的有功功率和无功功率参考值分别设为 10 kW 和 1.8 kvar。

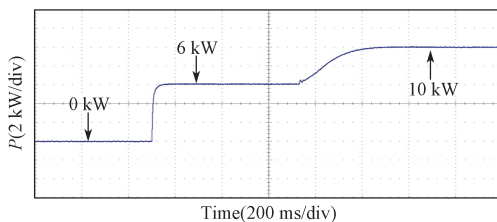
图 19 为传统的、文献 [12]、文献 [16] 以及本文所提方法的预同步控制策略 VSG 的输出有功功率与无功功率波形图。



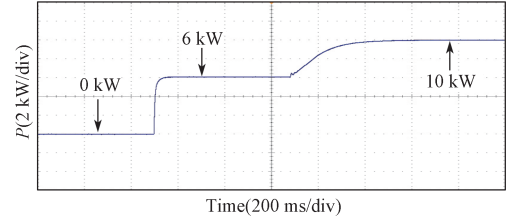
a) 传统有锁相环输出有功功率



b) 文献 [12] 所提方法输出有功功率



c) 文献 [16] 所提方法输出有功功率



d) 本文所提方法输出有功功率

图 19 4 种策略下 VSG 的输出有功功率曲线

Fig. 19 Output active power curves of VSG under 4 strategies

从图 19 中可得出, 传统的预同步时间为 0.350 s, 文献 [12, 16] 所提方法的预同步时间分别为 0.210 s 和 0.121 s, 而本文所提方法的预同步时间为 0.081 s。可知本文所提方法的预同步时间比传统的预同步时间快了约 76.9%, 比文献 [12, 16] 所提方法的预同步时间分别快了约 61.4%, 33.1%。

图 20 为电网电压和 VSG 输出电压矢量末端之间的距离 Δx 波形图。在 1 s 预同步开始时 $\Delta x=16.0$ V, 进行预同步后, 在 1.081 s 时 $\Delta x=5.5$ V, 满足式 (15), 开始并网。结果表明, 使用新的并网判断条件, 能准确判断并网时间。相比于用相位差判断并网时间, 此方法更加简洁、精准。

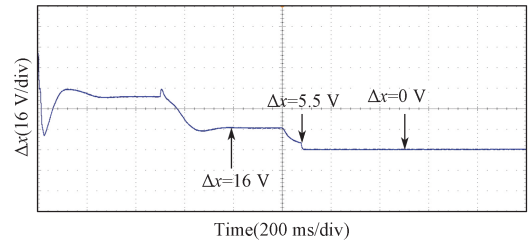


图 20 电压矢量末端距离变化曲线

Fig. 20 Voltage vector end distance variation curve

7 结论

针对孤岛模式下二次调频控制中频率的偏移误差和振荡较大的问题, 提出了一种积分系数自适应的二次调频控制策略。为实现孤岛模式向并网模式的平滑切换, 提出了一种新型无锁相环预同步控制策略。通过仿真与实验分析, 得出以下结论:

1) 相比于传统的、文献 [10] 和 [11] 所提方法, 本文所提积分系数自适应的二次调频控制策略能同时减小频率偏移误差和振荡, 提高系统的稳定性和可靠性, 实现微电网频率的无差控制。

2) 提出的新型无锁相环预同步控制策略使用 Δx 代替相位差进行补偿, 无需 PLL 和 RMS 环节, 仅需要 1 个 PI 调节器即可。相比于传统的、文献 [12] 和 [16] 所提方法, 其预同步速度分别提高了约 76.9%, 61.4%, 33.1%, 实现了离 / 并网的平滑切换。

3) 提供了一种新的并网判断条件, 相比于直接使用相位差判断, 此方法更加简洁。

参考文献:

- [1] LACIS A A, SCHMIDT G A, RIND D, et al. Atmospheric CO₂: Principal Control Knob Governing Earth's Temperature[J]. *Science*, 2010, 330: 356-359.
- [2] MUHTADI A, PANDIT D, NGUYEN N, et al. Distributed Energy Resources Based Microgrid: Review of Architecture, Control, and Reliability[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2021, 57(3): 2223-2235.
- [3] 朱作滨, 张常友, 曾小斌. 基于自适应旋转惯量 VSG 控制策略光储微网系统[J]. *电力系统及其自动化学报*, 2021, 33(3): 67-72.
ZHU Zuobin, ZHANG Changyou, ZENG Xiaobin. Photovoltaic Energy Storage Microgrid System Based on Adaptive Rotating Inertia VSG Control Strategy[J]. *Proceedings of the CSU-EPSA*, 2021, 33(3): 67-72.
- [4] ZHU Zuobin, HUANG Shaoping. Microgrid Stability Control Based on Adaptive Rotating Inertia VSG[J]. *Journal of Electrical Engineering*, 2020, 15(1): 41-47.
- [5] 周建萍, 胡成奕, 茅大钧, 等. 基于虚拟电机的 V2G 新型充放电控制策略[J]. *电机与控制应用*, 2020, 47(2): 97-103, 109.
ZHOU Jianping, HU Chengyi, MAO Dajun, et al. Novel Charging and Discharging Control Strategy of V2G Based on Virtual Machine[J]. *Electric Machines & Control Application*, 2020, 47(2): 97-103, 109.
- [6] 杨旭红, 王阔妹. 一种改进的 LCL 并网逆变器控制方法的研究[J]. *电机与控制应用*, 2017, 44(9): 67-70.
YANG Xuhong, WANG Tianshu. Research on Improved Control Method of LCL Grid Connected Inverter[J]. *Electric Machines & Control Application*, 2017, 44(9): 67-70.
- [7] LU L Y, CHU C C. Consensus-Based Secondary Frequency and Voltage Droop Control of Virtual Synchronous Generators for Isolated AC Micro-Grids[J]. *IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems*, 2015, 5(3): 443-455.
- [8] 李 斌, 周 林, 余希瑞, 等. 基于改进虚拟同步发电机算法的微网逆变器二次调频方案[J]. *电网技术*, 2017, 41(8): 2680-2687.
LI Bin, ZHOU Lin, YU Xirui, et al. Secondary Frequency Regulation for Microgrid Inverters Based on Improving Virtual Synchronous Generator[J]. *Power System Technology*, 2017, 41(8): 2680-2687.
- [9] 涂春鸣, 杨 义, 兰 征, 等. 含多虚拟同步发电机的微电网二次调频策略[J]. *电工技术学报*, 2018, 33(10): 2186-2195.
TU Chunming, YANG Yi, LAN Zheng, et al. Secondary Frequency Regulation Strategy in Microgrid Based on VSG[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2018, 33(10): 2186-2195.
- [10] WANG J F, RAMLI N, AZIZ N H A. Pre Synchronization Control Strategy of Virtual Synchronous Generator (VSG) in Micro-Grid[J]. *IEEE Access*, 2023, 11: 139004-139016.
- [11] 李帅虎, 向丽珍, 向振宇, 等. 用于改善 VSG 频率响应的模型预测控制方法[J]. *高电压技术*, 2021, 47(8): 2856-2864.
LI Shuaihu, XIANG Lizhen, XIANG Zhenyu, et al. MPC Control Method for Improving VSG Frequency Response[J]. *High Voltage Engineering*, 2021, 47(8): 2856-2864.
- [12] TANG M A, LIU X L. A Control Strategy for a Grid-Connected Virtual Synchronous Generator with Virtual Impedance[J]. *Energy Reports*, 2023, 9: 132-142.
- [13] LI H, MENG K, PENG Y F, et al. Control Strategy for Seamless Switching of Virtual Synchronous Generators Based on Secondary Frequency and Voltage Regulation[J]. *Alexandria Engineering Journal*, 2022, 61(12): 10477-10484.
- [14] 周天波. 基于 VSG 的微网逆变器并网运行控制策略研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2022.
ZHOU Tianbo. Research on Control Strategy of Parallel and Off-Grid Operation of Microgrid Inverter Based on VSG[D]. Changsha: Hunan University, 2022.
- [15] 魏亚龙, 张 辉, 孙 凯, 等. 基于虚拟功率的虚拟同步发电机预同步方法[J]. *电力系统自动化*, 2016, 40(12): 124-129, 178.
WEI Yalong, ZHANG Hui, SUN Kai, et al. Pre-Synchronization Method of Virtual Synchronous Generator Using Virtual Power[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2016, 40(12): 124-129, 178.
- [16] TANG W Q, LIU J. A Pre-Synchronization Method for Grid-Connection Based on Virtual Synchronous Generator[C]//2019 6th International Conference on Systems and Informatics (ICSAI). Shanghai: IEEE, 2019: 239-243.

(责任编辑: 廖友媛)