

本文全文线上首发由
上海电机系统节能工程技术
研究中心有限公司
支持

耿昊翔,王维俊,唐帅,张国平,米红菊.
基于无锁相环的虚拟同步发电机离并网
切换控制策略研究.
电机与控制应用,2021,48(9):90.

MTST系列 电机型式试验系统



MTST系列 电机型式试验系统①



MTST系列 电机型式试验系统②



MTST系列 电机型式试验系统③



MTST系列 电机型式试验系统④



MTST系列 电机型式试验系统⑤

CS-XY型电机出厂试验测试系统



DZC系列电机定子性能综合测试仪



Tz型电机堵转转矩测试仪



RZJ系列绕组匝间冲击耐电压测试仪



SEARI
上电科



地址: 上海市武宁路505号 传真: 021-62163904

电话: 021-62574990-436、18918357509

邮编: 200063

邮箱: wangcj@seari.com.cn

上海电机系统节能工程技术研究中心有限公司 www.seari.com.cn

基于无锁相环的虚拟同步发电机离并网切换控制策略研究*

耿昊翔¹, 王维俊², 唐 帅², 张国平¹, 米红菊¹

(1. 陆军勤务学院 军事设施系, 重庆 430000;

2. 军事科学院 系统工程研究院, 北京 100000)

摘 要: 针对微电网并网时的电流冲击、电压畸变、功率振荡的问题, 提出了一种基于无锁相环(PLL)的虚拟同步发电机(VSG)离并网切换控制策略。建立了 VSG 的控制模型。然后, 在离并网切换的过程中, 设计了一种无 PLL 的预同步控制单元, 省去了 PLL 环节, 避免了 PLL 对系统控制精度以及响应速度的影响, 简化了控制算法, 缩短了预同步的时间, 加速了离并网切换过程。同时直接将角频率差值反馈回功率环, 避免了 $\Delta\theta$ 符号跳变对控制过程产生的影响, 并引入了积分抗饱和环节以加速调节恢复过程。最后进行了仿真验证, 验证了该控制策略的可行性。

关键词: 虚拟同步发电机; 离网; 并网; 预同步; 无锁相环

中图分类号: TM 464 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2021)09-0090-06

doi: 10.12177/emca.2021.072

Research on Off-Grid/On-Grid Switching Control Strategy of Virtual Synchronous Generator Without PLL*

GENG Haoxiang¹, WANG Weijun², TANG Shuai², ZHANG Guoping¹, MI Hongju¹

(1. Department of Military Installations, Army Logistics University of PLA, Chongqing 430000, China;

2. Academy of System Engineering, Academy of Military Sciences, Beijing 100000, China)

Abstract: Aiming at the problems of current shock, voltage distortion and power shock during microgrid connection, a switching control strategy of virtual synchronous generator (VSG) without phase-locked loop (PLL) is proposed. The control model of VSG is established. In the switching process, a pre-synchronization control unit without PLL is designed. The influence of PLL on system control precision and response speed is avoided. In addition, the control algorithm is simplified, the time of pre-synchronization is shortened, and the process of switching is accelerated. At the same time, to avoid the influence of the jump of $\Delta\theta$ during the control process, the angular frequency difference is directly fed back to the power loop. The integral anti-saturation link is also introduced to accelerate the adjustment and recovery process. Finally, the feasibility of the proposed control strategy is verified by simulation.

Key words: virtual synchronous generator (VSG); off-grid; on-grid; pre-synchronization; no phase-locked loop

收稿日期: 2021-04-28; 收到修改稿日期: 2021-07-15

* 基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0305001)

作者简介: 耿昊翔(1994—), 男, 硕士, 助理工程师, 研究方向为新能源发电与电力电子。

王维俊(1964—), 女, 博士, 研究员, 研究方向为新能源发电与电力电子。(通信作者)

0 引言

随着能源危机和环境污染的问题不断加剧,节能减排势在必行。“十四五”规划提出了2030年前实现碳达峰、2060年前实现碳中和的目标^[1],基于化石燃料的传统发电方式会造成大量二氧化碳的排放,不利于国家战略目标的实现,基于新能源的微电网发电必将成为趋势。传统的微电网逆变器控制缺乏足够的阻尼和惯性,无法为电网电压和频率提供支撑,因此一些学者提出了虚拟同步发电机(VSG)控制技术,通过引入转动惯量和阻尼,模拟同步发电机的运行特性,提高了系统运行的稳定性^[2-4]。

微电网具有离网运行和并网运行2种运行模式。根据微电网运行的需要以及大电网的故障情况需在2种运行模式之间进行切换,由于微电网逆变器在2种模式下的控制方式存在着不同,在由离网转并网的时候,电压的幅值和相位不一致可能导致并网失败,或者引起较大的电流冲击以及功率的波动,对系统的稳定性造成影响。因此,逆变器并离网的无缝切换控制对于微电网的稳定运行以及并网的电能质量至关重要,也是目前研究的热点之一。

由于 dq 同步旋转坐标系是目前分析同步电机运行最常用的一种坐标变换,而 dq 变换需要的电网电压矢量角通常需要锁相环(PLL)来获取^[5],因此PLL在VSG并网中具有广泛的应用。PLL会对系统动态性能与稳态精度产生影响,许多学者不断改进PLL技术或与之相关的控制算法。

文献[6]应用了一种改进的PLL,先获取 2π 的余数,然后将其用作正弦函数后的PI控制器的输入以消除相位接近0或 2π 时的突变。文献[7]提出基于正弦波锁定器的预同步控制,采用SLL获取电网的电压幅值和相位信息,提高系统控制精度和动态性能。文献[8]基于双二阶广义积分器的PLL提出了一种控制器状态跟随的并行切换方法,可实现PQ与VSG控制2种模式下相位和电流指令的实时跟踪,有效降低了切换时的冲击。但由于电网电气状态量偏移较大,采用连续的实时跟踪调节并不是十分有效可行,所以文献[9]提出了一种恒定差量调节方法,待PLL输出稳定值后,通过信号恒定器将该定值持续输

出,然后与逆变器的输出值作差通过PI调节器进入VSG算法来实现后续的调节。

但PLL本身受电网电压波动、频率偏移、电压波形畸变等影响较大,会降低检测精度,出现偏差,甚至可能出现失锁^[10]。采用相应改善措施会增加PLL时间,影响整个控制系统响应的速度。

根据上述分析,无PLL的预同步单元可以避免PLL对系统控制精度以及响应速度的影响,降低控制系统的复杂度。因此,本文采用基于无PLL的VSG离并网切换控制策略。

1 VSG的模型与控制

1.1 VSG的建模

本文中VSG采用三相电压源型逆变器结构,其拓扑图如图1所示。逆变器直流侧由分布式电源提供直流电压,经开关管进行逆变并通过RLC后,输出三相正弦电压,可并网接入电网或离网接入本地负载。

控制部分由功率环及电压电流控制环组成,经功率环与参考电压计算出机端指令电压后,通过电压电流控制环,经空间矢量脉宽调制得到PWM波,从而控制开关管的通断,达到调节输出电压的目的。

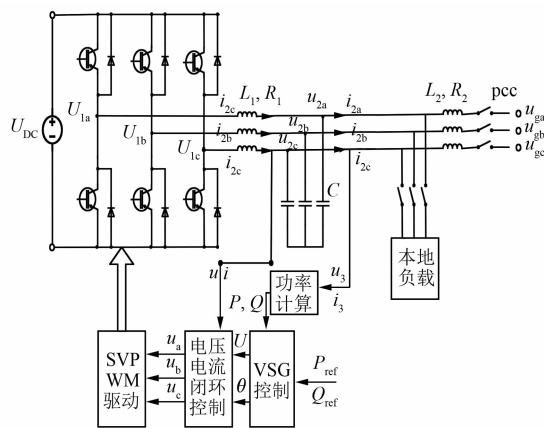


图1 VSG拓扑图

1.2 VSG控制算法

1.2.1 P-F控制

根据同步发电机转子运动方程式：

$$J \frac{d\omega}{dt} = T_m - T_e - K_p(\omega - \omega_0) = \frac{P_m}{\omega} - \frac{P_e}{\omega} - K_p \Delta\omega \quad (1)$$

式中: J 为转动惯量; T_m 为机械转矩; T_e 为电磁转矩; K_p 为阻尼系数; ω 为角频率; ω_0 为额定角频率; P_m 为虚拟输入机械功率; P_e 为虚拟输出电磁功率; $\Delta\omega = \omega - \omega_0$ 。

同步发电机通过调速器对输入功率进行控制, 采用有功频率下垂控制, 即根据电网频率来改变有功功率, 这一特性可表示为

$$P_m = P_{ref} + k_p(\omega_{ref} - \omega) \quad (2)$$

式中: P_{ref} 为参考输入机械功率; k_p 为有功功率下垂控制系数; ω_{ref} 为角频率参考值。

令 $\omega_{ref} = \omega_0$ 。两式联立可得:

$$\frac{d\Delta\omega}{dt} = \frac{1}{J\omega} [P_{ref} - P_e + D_p(\omega_0 - \omega)] \quad (3)$$

其中, $D_p = k_p + K_p\omega_0$ 。

VSG 有功调频控制如图 2 所示。

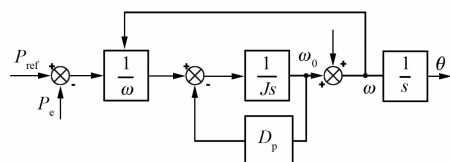


图 2 有功功率控制框图

1.2.2 Q-U 控制

VSG 通过虚拟励磁调节器控制励磁电流来改变感应电动势, 从而调节逆变器的输出的无功功率。感应电动势在励磁控制的作用下, 将随着输出无功功率的增大而减小。VSG 无功调压控制方程可表示为

$$U_s = U_{ref} + D_q(Q_{ref} - Q_e) \quad (4)$$

式中: U_s 为指令电压值; U_{ref} 为参考电压值; Q_{ref} 为参考无功功率; D_q 为无功功率下垂控制系数; Q_e 为输出的无功功率。

VSG 无功调压控制如图 3 所示。

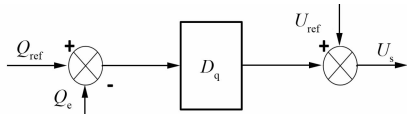


图 3 无功功率控制框图

1.2.3 电压电流双闭环控制

本文的电压电流环采用电压外环及电流内环控制。根据功率环得到的幅值 U_s 和相位 θ 计算得到 VSG 三相参考电压值 V_{ref} , 与输出三相电压

u_{2abc} 进行比较, 通过比例谐振控制器, 得到参考电流值 i_{ref} , 与桥臂输出电流值 i_{1abc} 比较得到偏差值, 再通过 SVPWM 输出桥臂端电压 u_{1abc} 。由基

尔霍夫定律可知, $u_{2abc} - u_{1abc} = L_1 \frac{di_{1abc}}{dt} + R_1 i_{1abc}$, 可得

传递函数为 $\frac{1}{L_1 s + R_1}$, 其中 L_1 为滤波电感, R_1 为滤波电阻。计算出桥臂输出电流值 i_{1abc} , 减去 i_{2abc}

得到电容电流, 再由 $i = C \frac{du}{dt}$ 得传递函数为 $\frac{1}{Cs}$, 计

算出三相输出电压 u_{2abc} , 其中 C 为滤波电容。

本文采用 PR 控制, 因为 PI 控制无法对正弦量实现无静差控制, 而 PR 控制可最大限度的消除目标值与被控制量之间存在的静差。理想的 PR 控制器在基波频率处有一无穷增益, 其传递函数如下:

$$G(s) = K_{p1} + \frac{K_r s}{s^2 + \omega_c^2} \quad (5)$$

式中: K_{p1} 为 PR 控制的比例系数; K_r 为谐振系数; ω_c 为谐振角频率。

但理想的 PR 控制器现实中难以实现, 且在非基频处的增益很小, 当电网频率发生偏移时, 无法有效抑制谐波。为了提高带宽, 且易于通过数字、模拟器件实现, 采用准 PR 控制器, 其传递函数如下:

$$G(s) = K_{p1} + \frac{2K_r \omega_c s}{s^2 + 2\omega_c s + \omega_c^2} \quad (6)$$

电压电流双闭环的控制框图如图 4 所示。

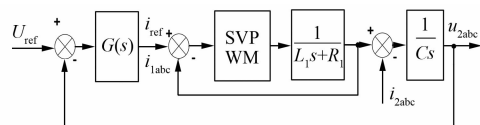


图 4 电压电流环控制框图

2 VSG 离并网控制策略

2.1 VSG 的并网模型

VSG 的等效并网电路如图 5 所示。

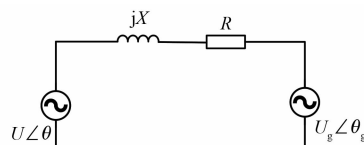


图 5 VSG 并网等效电路图

VSG 输出电压为 $U \angle \theta$, 电网电压为 $U_g \angle \theta_g$, 传输阻抗为 $R+jX$, 由 $S=UI^*$ 可得复功率为

$$S = \frac{RUU_g \cos \theta - RU_g^2 + XUU_g \sin \theta}{R^2 + X^2} + j \frac{-XUU_g \cos \theta - XU_g^2 + RUU_g \sin \theta}{R^2 + X^2} \quad (7)$$

因为 $X \gg R$, 所以有功功率为

$$P = \frac{UU_g \sin \theta}{X} \quad (8)$$

无功功率为

$$Q = \frac{U_g(U_g - U) \cos \theta}{X} \quad (9)$$

2.2 VSG 离并网模式切换

VSG 采用准同期并网的方式, 在由并网切换成离网模式时, 由于 VSG 模拟了同步发电机的机理和外特性, 可以等效为一个电压源, 由于有虚拟阻尼及惯性的存在, 输出电压幅值、相位和频率可以保持, 不会产生较大的冲击, 能够实现平滑地切换。

当 VSG 由离网切换成并网模式时, 由式(8)和式(9)可知, 并网瞬间相位差会带来有功功率的冲击。由于 VSG 离网时输出电压和电网电压幅值相差不大, 此处假设 $U=U_g$, 对两者作差得:

$$\Delta U = U_g \sin(\omega_g t + \theta_g) - U \sin(\omega t + \theta) = 2U \cos\left(\frac{\omega_g t + \theta_g + \omega t + \theta}{2}\right) \sin\left(\frac{\omega_g t + \theta_g - \omega t - \theta}{2}\right) \quad (10)$$

由式(10)可知, 电压相位的不一致会导致 VSG 输出电压以及电网电压之间产生最大值为 $2U$ 的电压差, 由于线路阻抗值较小, 会产生较大的冲击电流, 造成电力电子器件的损坏。因此, 在切换时, 要进行预同步控制, 使逆变器输出电压与电网电压的幅值、相位一致, 满足并网要求。

2.3 预同步控制策略

预同步控制一般包括相位预同步和电压预同步, 通过对逆变器的相角和电压进行补偿, 从而使 VSG 输出电压和电网电压一致。相位预同步控制的预同步向量图如图 6 所示。

相位预同步原理: 令 $U_g \angle \theta_g$ 与 d 轴重合, 调节逆变器的输出相位, 使 $U_g \angle \theta_g$ 在 q 轴分量等于 0, 此时 $\theta = \theta_g$, 完成相位的预同步控制。

由于相角在 $0 \sim 2\pi$ 范围周期变化, 因此, VSG

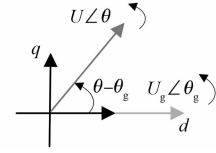


图 6 预同步向量图

输出电压与电网的相角差会出现符号的跳变现象, 在进行 PI 控制时会对控制过程造成影响。因此, 不直接对相角差进行 PI 控制, 而是对角频率的差值进行控制。

对电网电压 U_g 进行 dq 变换, 得到 U_{gq} , 与参考值 $U_{gq}^* = 0$ 比较后, 对差值进行 PI 调节, 将 PI 调节器输出的 $\Delta\omega$ 反馈回有功功率环, 使 VSG 输出电压的相位逐渐与电网同步。

此处将 $\Delta\omega$ 叠加在角频率 ω 反馈点之后, 这样 $\Delta\omega$ 的注入不会影响有功下垂控制回路, 也不受 $P-F$ 控制回路惯性特性的影响, 可以大幅加快相位跟踪误差收敛速度。

相位预同步控制框图如图 7 所示。

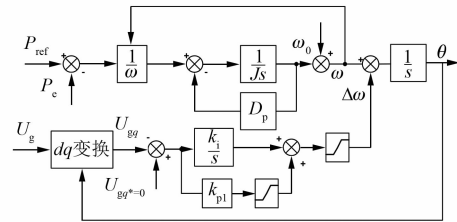


图 7 相位预同步控制框图

图 7 中 k_{p1} 为 PI 控制的比例系数, k_{i1} 为 PI 控制的积分系数。

对电网电压 U_g 进行 $\alpha\beta$ 变换, 得到 $U_{g\alpha}$ 和 $U_{g\beta}$, 计算得幅值与 VSG 输出电压幅值比较后, 对差值进行 PI 调节, 将 PI 调节器输出的 ΔU 反馈回无功功率环, 使 VSG 输出电压的幅值逐渐与电网同步。

电压预同步控制框图如图 8 所示。

对 $\Delta\omega$ 、 ΔU 进行限幅处理, 以避免电网频率和电压的大幅波动, 同时还引入了积分抗饱和环节以加速调节恢复过程, 2 个限幅模块的取值直接影响同步调节过程。

实际并网过程中, 为了使 VSG 输出电压和电网电压保持同步, 收到预同步信号时, 启动预同步控制单元。当 $\Delta\omega$ 、 ΔU 满足条件时触发并网信

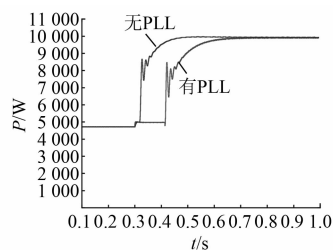


图 12 VSG 输出功率波形

由图 12 可以看出,在并网后 VSG 的输出功率能够跟随指令值变化且未出现较大的功率冲击。

同时在相同仿真工况下,对比传统的有 PLL 的控制策略,由于取消了 PLL 环节,简化了控制算法,预同步时间明显缩短,且并网切换时振荡更小,更加快速完成了离并网的切换。

4 结 语

本文针对微电网的运行特性,提出了一种基于无 PLL 的 VSG 离并网切换控制策略。通过取消 PLL,降低了控制系统的复杂程度,避免了 PLL 对系统控制精度以及响应速度的影响,缩短了预同步的时间,加快完成了离并网的切换,控制算法简单的优势明显。同时,本文不采集 $\Delta\theta$,而是直接将 $\Delta\omega$ 反馈回功率环,避免了 θ 相位突变带来的影响。此外,将 $\Delta\omega$ 叠加在角频率 ω 反馈点之后,使得 $\Delta\omega$ 的注入不会影响有功控制回路,也不受 P - F 控制回路惯性特性的影响,并引入了积分抗饱和环节以加速调节恢复过程,可以大幅加快跟踪误差收敛速度。

该控制策略能够有效地保证 VSG 输出电压的幅值和相位在并网前快速地追踪上电网电压,

避免了在切换瞬间出现电流冲击或电压畸变,实现了平滑的切换。仿真结果验证了本文所提策略的正确性和有效性。

【参考文献】

- [1] 中华人民共和国国务院. 中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要[R/OL]. [2021-03-13]. http://www.gov.cn/xinwen/2021-03/13/content_5592681.htm.
- [2] 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.
- [3] ZHONG Q, WEISS G. Synchronverters: inverters that mimic synchronous generators[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(4): 1259.
- [4] SHINTAI T, MIURA Y, ISE T. Oscillation damping of a distributed generator using a virtual synchronous generator[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(2): 668.
- [5] 邹灿. 三相并网逆变器的无锁相环控制策略研究[J]. 集成电路应用, 2019, 36(1): 18.
- [6] 靳金,王昊睿. 基于虚拟同步机的微网并网无缝切换策略[J]. 电工技术, 2020(9): 165.
- [7] 朱忠斌. 基于虚拟同步机的微电网离网运行与并网切换控制技术研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2020.
- [8] 石荣亮,张兴,徐海珍,等. 基于虚拟同步发电机的微网运行模式无缝切换控制策略[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(10): 16.
- [9] 贾中豪. 基于虚拟同步机的微网快速并网无缝切换技术[D]. 北京: 华北电力大学, 2019.
- [10] 杨艺云,廖波,周林,等. 并网逆变器无锁相环基准正弦的实现方法[J]. 电网技术, 2013, 37(7): 2000.

欢迎订阅 2022 年《电机与控制应用》

2021 年在邮局漏订的读者,可联系编辑部补订,具体请咨询编辑部

地址: 上海市武宁路 505 号《电机与控制应用》编辑部

邮编: 200063

电话: 021-62574990-462

邮箱: eec@seari.com.cn

国内邮发代号: 4-199

每册定价: 15.00 元

全年定价: 180.00 元