

含分布式新能源的城市配电网供电模式 柔性切换技术研究

黄 磊

(石河子市天富电力设计有限公司)

摘要：随着全球碳减排目标的推进和可再生能源技术的快速发展，分布式新能源逐渐成为电力系统的重要组成部分。在此背景下，城市配电网面临前所未有的挑战与机遇。分布式新能源如太阳能、风能等的接入不仅能够促进绿色能源的利用，降低依赖传统化石燃料的程度，更是实现城市能源结构转型的关键一环。然而，分布式新能源的不稳定性与间歇性特点，给配电网的运行管理和供电可靠性带来了一系列问题。为此，本文基于虚拟同步技术（VSG）探讨含分布式新能源的城市配电网供电模式柔性切换技术，实现配电网在并网、孤岛两种运行模式下的灵活切换，提高系统的稳定性。

关键词：并网；孤岛；分布式；配电网；VSG

0 引言

传统的城市配电网供电模式在应对分布式新能源接入时，往往存在以下问题：一是由于分布式新能源的出力不稳定，可能导致电网电压波动和频率偏移；二是传统配电网的刚性结构难以适应分布式新能源的接入需求，可能导致电网运行效率低下和电能损耗增加。因此，研究含分布式新能源的城市配电网供电模式柔性切换技术，对于提高电网的可靠性和经济性具有重要意义。虚拟同步发电机技术以其独特的技术优势成为当前及未来一段时间内分布式新能源接入城市配电网系统的主流技术。该技术不仅继承了传统下垂控制策略在稳态条件下确保系统电压与电流合理分配

的特性，更在此基础上创新性地引入发电机转子惯性的模拟机制，使逆变器在动态响应过程中，即暂态阶段能够显著抑制频率的剧烈波动，增强了系统的稳定性和可靠性。

1 含分布式新能源的城市配电网运行策略

1.1 一次调频

当配电网处于孤岛运行模式时，系统功率由配电网中各分布式电源提供，并且可以依据负荷变化自动调整有功、无功功率。图1为配电网处于孤岛运行模式时系统的有功-频率控制示意图。

由图1可知，配电网孤岛运行模式下频率偏移和

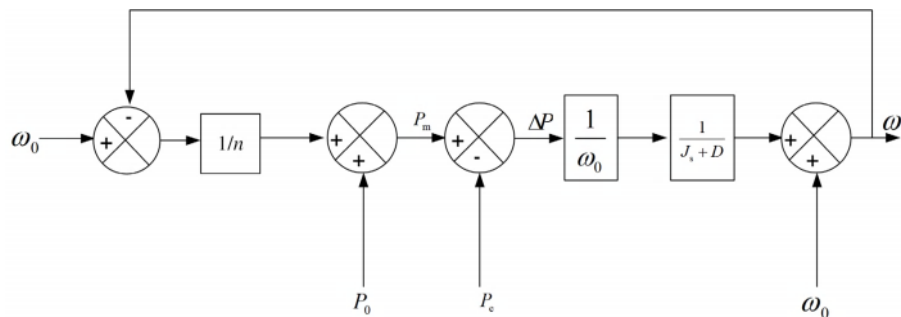


图1 孤岛运行模式下系统有功-频率控制示意图

有功功率变化的传递函数如下：

$$\frac{\Delta\omega(s)}{\Delta P_e(s)} = \frac{\omega(s) - \omega_0(s)}{P_e(s) - P_0(s)} = \frac{1}{JS\omega_0 + D\omega_0 + \frac{1}{n_r}} \quad (1)$$

化简得：

$$\omega(s) = \omega_0(s) - \frac{1}{JS\omega_0 + D\omega_0 + \frac{1}{n_r}} (P_e(s) - P_0(s)) \quad (2)$$

在孤岛运行模式下，当负载功率突然出现变化时，VSG 算法能够有效发挥作用，通过调动储能系统释放电能，以即时补偿由此产生的瞬时功率差额。该过程与传统同步发电机在转矩不平衡引起的功率差异时释放转子动能的机制相仿。通过这种方式，逆变器得以模拟同步发电机的“惯性”效应。当系统监测到频率的变动时，它利用下垂控制或其他相关控制策略调整其功率输出，从而恢复电力均衡。此机制确保了孤岛运行时的系统稳定性，类似于传统发电机调节发电速度以应对功率不匹配的原理^[1]。

图2为单台VSG的一次调频过程原理图，由图可知，逆变器的输出功率与频率调节系数成正相关关系。

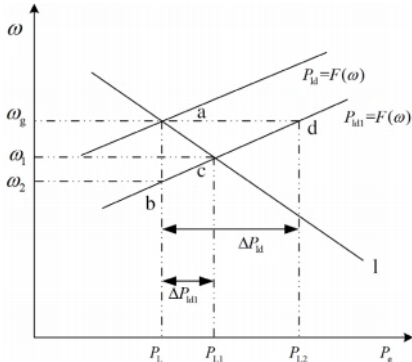


图2 单台VSG的一次调频过程

初始负荷特性表示为曲线 $P_{ld}=F(\omega)$ ，而单台虚拟同步机的功频特性曲线为1，因此a点为系统的初始稳定运行点，此时系统的输出频率为 ω_g ，系统的有功功率为 P_L 。如果系统中的负荷增加 ΔP_{ld} ，负荷特性曲线向下平移至 $P_{ld1}=F(\omega)$ ，如果此时系统中缺少调速器，仅依靠负荷特性曲线的调节，则系统会稳定在b点，此时系统的有功功率依旧为 P_L ，而系统的输出频率会降至 ω_2 。如果系统中存在调速器，则系统会在调速器和负荷特性曲线调节的共同调节下，系统稳定在c点，此时系统的有功功率为 P_{L1} ，而系统的输出频率会变为 ω_1 ，相较于前者，系统负荷增加 ΔP_{ld1} ，小于 ΔP_{ld} ，此过程即为一次调频过程。

1.2 二次调频

虚拟同步发电机的二次调频过程原理如图3所示，二次调频是对一次调频的补充完善，以保证配电网实现无差调节，具体做法是向上平移虚拟同步发电机的功频特性曲线，从而改变系统的有功功率，使系统的输出频率恢复至初始频率^[2]。

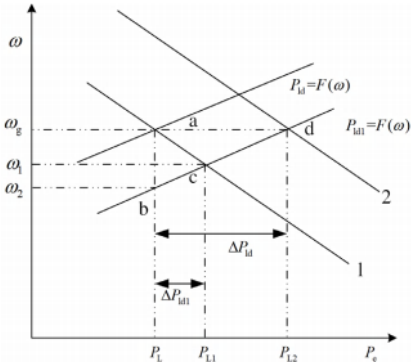


图3 虚拟同步发电机的二次调频过程

二次调频期间虚拟同步机功频特性曲线会由 1 逐渐向上平移至 2，此时由于负荷功率曲线的变化，系统的有功功率也会随之变化。在系统频率发生波动时，调频单元和非调频单元同时发挥作用，相互补充，配电网中各分布式电源共同承担负荷波动，使配电网频率稳定在额定范围内，一次调频和二次调频的相互结合有利于快速稳定系统频率^[3]。基于此，本文通过并联 PI 控制器与调速器，同时完成系统的一次调频和二次调频作用。

在二次调频策略的实施中，通常可划分为集中式控制与分散式控制两大类。集中式控制机制下，MGCC 负责捕获系统频率偏差，并将其输入至积分环节进行处理。随后，依据经济性最优原则，计算并分配功率增量至各个调频单元，此过程仅需一个比例-积分（PI）控制器即可完成。分散式控制则是一种更为自主的策略，其中每个调频单元独立监测本地频率变化，并据此调整自身功率输出，以实现二次调频。此方式的优势在于响应迅速，但多个 PI 控制器的并行运作可能因参考频率的微小误差而引发 VSG 之间的不必要功率交换，使得各单元难以同步至共同的参考频率点。这一状况若持续存在，可能导致系统稳定性下降，表现为振荡、超调等现象的频发，进而阻碍负荷增量在 VSG 之间的有效与均衡分配^[4]。因此，在选择二次调频策略时，需综合考虑系统规模、通信条件及对稳定性与响应速度的具体要求。

2 配电网电压稳定性分析

电压是衡量配电网运行状态与供电质量的重要指标，在系统中，保持系统电压始终处于额定范围内的保障和前提是保证系统无功功率的平衡，而在本文中同步发电机即为系统中最主要的无功设备，当配电网处于孤岛运行模式下，利用 VSG 技术控制逆变从而控制系统电压，即保证各分布式电源无功功率分配平衡^[5]。

一次调压时，无功电压特性应满足以下形式：

$$U_0 - U_{\text{ref}} = -n(Q - Q_{\text{ref}}) \quad (3)$$

式中， n 为虚拟同步机的电压调差系数，数值等于无功-电压下垂特性曲线中下垂系数的倒数，而且虚拟同步机额定功率与电压调差系数存在如下关系：

$$n_1 S_1 = n_2 S_2 = \dots = n_k S_k \quad (4)$$

在一个由多台虚拟同步发电机组成的系统内，当系统负载发生变化时，每台虚拟同步发电机的无功功率变动与其电压调节系数成反比关系，同时与其额定容量成正比关系。

为进一步分析基于 VSG 技术的含分布式新能源城市配电网电压稳定性，借助相关技术搭建 Simulink 仿真模型，Simulink 仿真模型参数见表 1。其他控制方法的相关参数统计见表 2。仿真实验结果显示，孤岛运行模式下，系统频率和电压能基本维持在额定值附近，说明电压具有较好的稳定性。

表 1 Simulink 仿真模型参数统计

参数名称	数值
额定频率	50Hz
直流母线电容	22μF
PCC 点负载功率	50kW
逆变器直流侧额定电压	800V
LC 滤波器电容	49μF
LC 滤波器电感	1.84mH
交流母线电压参考值	320V

表 2 其他相关参数统计

参数名称	数值
P - f 下垂系数	0.0001
Q - U 下垂系数	0.0002
线路电抗	0.112Ω/km
线路电阻	0.599Ω/km

3 配电网并网 / 孤岛运行的切换与运行

配电网的技术性和经济性优势主要体现在其并网、孤岛两种运行模式以及在两种运行模式间的无缝切换能力。而由于配电网在并网和孤岛运行模式下频

率、电压及其参考值的差异性，配电网在两种运行模式之间切换时需要增加对该环节的控制，以保证模式切换期间系统的稳定。

(1) 配电网由并网运行模式切换至孤岛运行模式

由于虚拟同步发电机自身特性，当其并联在大电网系统中时可视为一个独立的受控电压源，此时配电网系统中频率、电压都与主网相同，当配电网由并网运行模式切换至孤岛运行模式时，虚拟同步发电机不会出现明显的暂态过程，可实现并网 - 孤岛运行的无缝切换，此时不需要修改控制算法，只需要考虑配电网运行模式切换后的功率平衡问题即可，再加上虚拟同步发电机具有下垂特性，配电网运行模式切换时相位不会变化，只需配电网中转速调节器和励磁控制器可以依据参考值不断修正有功、无功输出功率。

第一，配电网处于并网运行模式下不存在二次控制环节，但是当配电网切换至孤岛运行模式时，配电网逆变器输出功率缺少主网的调节，很难保证各分布式电源输出功率分配平衡，为此，当配电网经过一次控制环节后，需要及时落实二次控制环节调整各分布式电源功率，才能保证配电网中各单元都处于最安

全、经济、稳定的运行状态。

第二，当配电网处于并网运行模式时，系统无功功率采用 PI 控制，但是当系统处于孤岛运行模式时，在叠加作用下，很容易超出 PI 控制器的上限。为此，在实际操作过程中，需要合理设置 PI 控制器的上下限值，使其在合理区间内输出电压参考值。

(2) 配电网由孤岛运行模式切换至并网运行模式

当配电网处于孤岛运行状态时，逆变器输出电压主要由负载决定，此时各自单元的输出电流与大电网运行电流不一定相同，如若直接将其并联至大电网中，势必会产生冲击电流，损坏配电网和大电网中的设备元件。为此，在配电网切换至并网运行模式前，需要对配电网进行预同步并网控制，在并网前实现各逆变器输出电压与电流与大电网相同，此时再闭合并网开关，实现配电网孤岛 - 并网运行模式的平滑切换。

预同步并网控制器主要由幅值同步器、频率同步器和相位同步器组成，分别介绍三者在大电网控制系统中的结构及其应用原理。图 4 是配电网电压幅值同步器结构图。

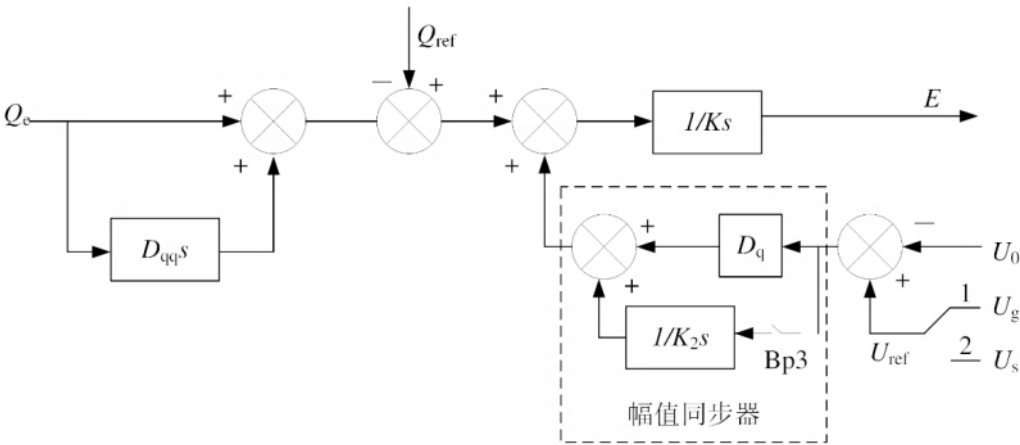


图 4 电压幅值同步器结构图

在虚拟同步发电机（VSG）的并网控制流程中，一旦接收到并网指令，系统即启动自动电压调节机制。此机制旨在将各 VSG 单元的额定运行电压从孤岛模式下的预设值平滑过渡到与大电网相匹配的电压水平。随后，系统执行一个精确的比较过程，将当前逆变器输出的实际电压幅值与调整后的大电网电压值进行比对，计算得出两者间的差异值。紧接着，通过闭合控制链路中的 Bp3 环节，该差异值被有效传递至幅值同步控制单元。在比例 - 积分（PI）调节器的精密调控下，各 VSG 单元的逆变器输出电压幅值能够实现无稳态误差追踪并锁定主电网的参考电压。当系统达到稳定运行状态时，VSG 的输出电压幅值与主电网电压幅值达到高度一致，充分满足了并网运行模式下对逆变器输出电压幅值的严格技术要求。

在 VSG 接收到并网控制指令后，系统随即启动

一系列精确的同步操作以确保平稳并网。具体而言，系统利用锁相环（PLL）技术精确检测电网的相位与 VSG 输出电压的相位，随后通过闭合开关 Bp2，将检测到的相位差值有效传递至相位同步器。在相位同步器内部，该相位差值在比例 - 积分（PI）调节器的精细调控下，与配电网频率同步器所输出的频率值进行叠加处理，最终生成一个精确的相位指令值。

图 5 是预同步并网控制器的结构示意图，该控制器的主要功能是在配电网并网操作前的暂态阶段，确保虚拟同步机输出的电压与主电网的电压一致。这一匹配过程减少了电压差异，避免因电压不同而可能引发的瞬时冲击电流。通过这种方式，同步控制器有效促进配电网与主电网的平滑并网，从而保障了系统的稳定性和运行安全。

基于上述分析可知，应用预同步控制器的配电网

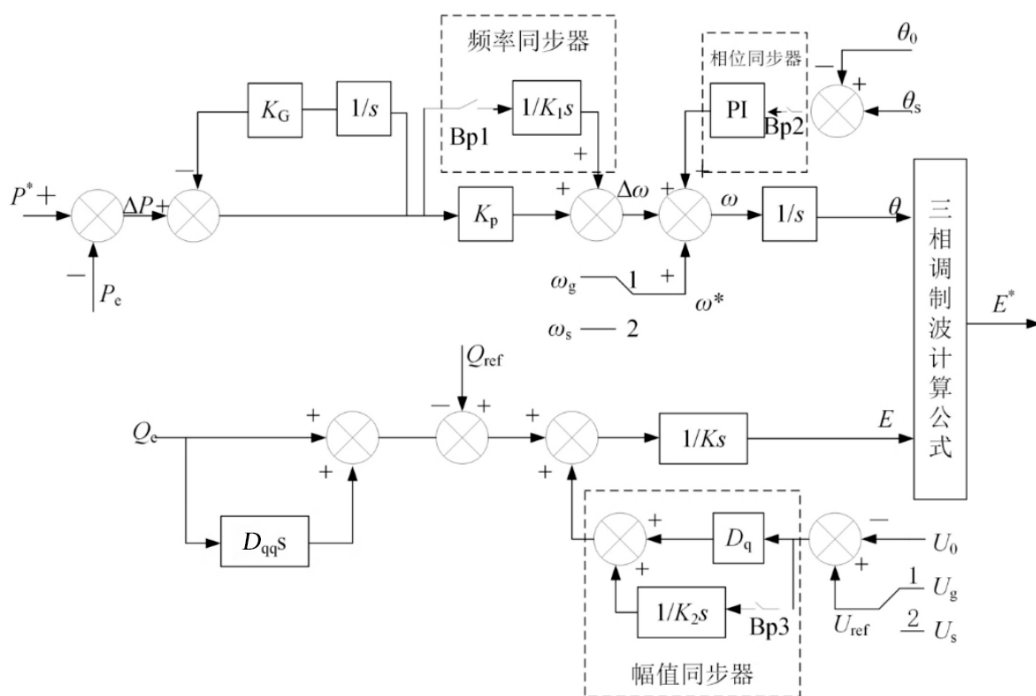


图 5 预同步并网控制器的结构示意图

孤岛 - 并网运行模式切换的具体步骤：

第一，配电网控制系统接收到并网控制指令，自动调节配电网频率、电压幅值参考值。

第二，幅值、频率、相位同步器开始工作，控制虚拟同步发电机输出电压幅值、频率无静差跟踪电网电压，在 PI 调节器的作用下促使虚拟同步发电机输出电压幅值、频率和相位与大电网一致。

第三，待虚拟同步发电机输出电压幅值、频率和相位与大电网相同时，闭合并网开关，实现配电网孤岛 - 并网运行模式的平滑切换。

4 结束语

含分布式新能源的城市配电网在孤岛 - 并网运行模式切换时，为避免产生冲击电流，损害微网和大电网中的设备元件，需要对微网进行预同步并网控制，在并网前实现各逆变器输出电压与电流与大电网相同，此时再闭合并网开关，实现微网孤岛 - 并网运行模式的平滑切换。

参考文献

[1] 徐毅，甘开兵. 关于配电自动化环境下主动配电网调度优化的研究 [J]. 电气技术与经济，2022 (4)：16-19.

[2] 张炆，程韧俐，史军，等. 含分布式新能源的城市配电网供电模式柔性切换方法 [J]. 自动化技术与应用，2022，41 (5)：118-120，155.

[3] 李文建，庄海军，赵亚飞，等. 含分布式新能源的城市配电网供电模式柔性切换方式探讨 [J]. 通信电源技术，2022，39 (24)：93-95.

[4] 刘友波，曾宇，张曦，等. 城市高压配电网负荷转供辅助决策关键技术与系统 [J]. 电力自动化设备，2023，43 (10)：192-199.

[5] 李芸漫，高红均，李海波，等. 考虑综合能源站柔性调控作用的城市配电网多阶段规划方法 [J]. 电力自动化设备，2022，42 (1)：45-54.

(收稿日期：2024-07-14)