

独立型虚拟同步化微电网分布式无功-电压二级控制策略

吴 鸣¹, 吕振宇², 宋振浩¹, 吕志鹏¹, 熊 雄¹

(1. 中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192; 2. 南京师范大学 电气与自动化工程学院, 江苏 南京 210023)

摘要:针对独立型虚拟同步化微电网无功-电压控制的初级调节特性,在虚拟同步控制技术的基础上,提出了一种计及虚拟同步变流器剩余无功容量的独立微电网分布式无功-电压二级控制策略。该策略以提高系统无功容量利用率及平均电压水平为目标,通过相邻虚拟同步机控制器间的分布式稀疏通信,实现系统平均无功标幺值及端口平均电压值评估。在此基础上,通过所提分布式二级控制器得到虚拟同步变流器无功-电压下垂参数的最优参考值,从而实现无功功率最优分配与电压调节,在提高系统无功容量利用率的同时改善电能质量。基于MATLAB/Simulink搭建独立型虚拟同步化微电网模型,通过仿真验证了所提策略的有效性及其相较于传统无功-电压调节策略的优越性。

关键词:独立微电网;虚拟同步机;无功-电压特性;分布式控制;剩余无功容量;平均电压

中图分类号:TM 761

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202204045

0 引言

分布式电源大多通过并网变流器接入独立微电网,并网变流器的控制方法对微电网系统的稳定性及电能质量具有较大的影响^[1-3]。然而,传统并网变流器存在惯性小或无惯性、过载能力差等问题,为了增加微电网的虚拟惯性和阻尼,虚拟同步机技术引起广泛的关注^[4-5]。虚拟同步机控制借鉴同步发电机的机械方程和电磁方程,在变流器控制中增加虚拟惯性环节和阻尼环节,有效改善了分布式电源的输出特性^[6-7]。

为了提高独立微电网的供电能力,通常将虚拟同步发电机VSG(Virtual Synchronous Generator)与负荷虚拟同步机LVSM(Load Virtual Synchronous Machine)^[8]并联组成虚拟同步化微电网。文献[9]分析了虚拟同步化微电网的有功-频率特性,提出了计及综合效益的虚拟同步化微电网的二次调频策略。针对虚拟同步化微电网的无功-电压控制,已有文献大多借鉴传统多机并联系统的下垂控制策略^[10-12],通过无功-电压下垂控制实现VSG之间无功均分的目标。然而,并联VSG同样存在传统下垂控制具有的无功均分及电压调节问题^[13-14]。为此,文献[15]提出了一种精确的无功分配策略,该策略需借助通信的方式获取线路两端的电压差以计算下垂系数,由于存在通信线路,系统的可靠性及扩展性较差。文献[16-17]提出了基于虚拟电容的VSG无功-电压控制方法,并对其进行改进,该策略无需通信,

具有较强的鲁棒性和“即插即用”特性,但是未考虑VSG间的线路阻抗,对无功分配精度的影响也有待验证。文献[18]考虑配电线路的阻性对传统VSG有功和无功分配的影响,提出了基于虚拟复阻抗的有功-无功解耦控制,从而实现无功的精确分配,但是需要连接线路阻抗值,降低了该方法的实用性。文献[19]采用 $U-Q$ 倒下垂的方式进行无功的精确分配,但是需要采集相同的母线电压,且忽略了VSG间的阻抗。文献[20]采用模糊控制器实现了虚拟同步机在不同运行模式下的自适应控制,但未对无功分配进行详细分析。随着分布式一致性算法在电力系统中的广泛应用,文献[21]提出了基于一致性算法的独立微电网的二级下垂控制策略,通过设计合适的参数实现有功、无功的精确分配以及频率、电压的快速恢复,但是未考虑有功功率输出对无功功率的影响,降低了系统无功功率的利用率。由上述分析可知,已有研究分析了虚拟同步化微电网的无功-电压控制策略,提出了初级控制的改进方法或二级控制策略,但仍存在以下不足:①未考虑VSG间的线路阻抗,无功均分的精度不足;②传统集中控制方式的可靠性及扩展性差;③未考虑LVSM参与时系统剩余无功容量与有功功率输出之间的关系,整体无功功率的利用率低。

本文在分析虚拟同步化微电网无功-电压初级调节特性的基础上,提出了一种计及虚拟同步变流器剩余无功容量的独立微电网分布式无功-电压二级控制策略。该策略采用分布式控制方式,通过相邻虚拟同步机控制器间的有限通信完成对系统平均无功标幺值及端口平均电压值的评估,在此基础上实现无功功率按照剩余无功容量的高精度分配以及电压调节,在提高系统无功容量利用率的同时改善了电压调节的动态特性。最后,通过仿真验证了所

收稿日期:2021-09-15;修回日期:2022-01-05

在线出版日期:2022-04-14

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51877201)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51877201)

提策略的有效性,相较于传统无功-电压控制策略的优越性,并对无功容量越限的情况进行了分析,优化了分布式二级控制器。

1 虚拟同步化微电网的无功-电压调节特性

1.1 虚拟同步机控制技术

基于虚拟同步机技术的并网变流器拓扑结构及其控制框图如图1所示。图中: P_e 、 Q_e 分别为变流器的有功输出、无功输出; U_d^* 、 U_q^* 分别为变流器端口电压的 d 、 q 轴分量参考值; θ 为变流器的虚拟转子角度; $\tilde{m}$ 为调制信号; U_{dc} 为变流器直流侧电压; L 、 C 分别为交流侧滤波器电感、电容; Z_l 为变流器并网连接线路阻抗。变流器直流侧可以是直流电源或可控负荷,交流侧通过LC滤波器接入电网。控制器采集变流器并网点处电压 u_{abc} 、电感电流 i_{Labc} 以及输出电流 i_{abc} 进行功率计算,通过控制算法产生脉宽调制波作用于三相变流器,从而实现控制目的。

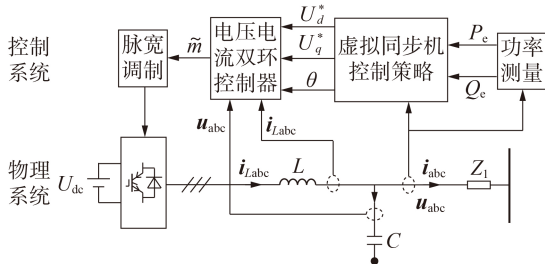


图1 基于虚拟同步机技术的并网变流器拓扑结构及其控制框图

Fig.1 Topology structure of grid-connected inverter based on virtual synchronous machine technology and its control block diagram

借鉴同步发电机的转子机械方程,虚拟同步变流器的有功-频率控制方程为^[6]:

$$\begin{cases} \frac{d\theta}{dt} = \omega \\ J\omega_n \frac{d\omega}{dt} = P_m - P_e - D\omega_n(\omega - \omega_n) \end{cases} \quad (1)$$

$$P_m = P_{set} + K_p(\omega_n - \omega) \quad (2)$$

式中: J 为变流器的虚拟转动惯量; ω 为变流器的虚拟转子角频率; ω_n 为额定角频率; D 为阻尼系数; P_m 为变流器的虚拟机械功率,可由初级调频方程得到,如式(2)所示; K_p 为有功-频率下垂系数; P_{set} 为有功功率设定值。

由式(1)和式(2)可知,当 $D=J=0$ 时,虚拟同步变流器的有功-频率控制即为传统的 $P-\omega$ 下垂控制。

1)当 P_{set} 为正值时,变流器为VSG。此时,随着外部负荷增大,VSG的输出有功功率增大,虚拟转子角频率减小,虚拟机械功率在初级调频的作用下增大,并逐步与输出功率平衡,完成一次调频过程。

2)当 P_{set} 为负值(正常运行情况下 P_e 也为负值)

时,变流器为LVSM。此时,随着并网点处频率减小,LVSM的输入有功功率和虚拟转子角频率减小,负荷功率在初级调频的作用下减小,并逐步与输入功率平衡,完成一次调频过程。

因此,当外部负荷增大时,VSG的输出有功功率增大,而LVSM的输入有功功率减小,故系统频率减小;当外部负荷减小时,VSG的输出有功功率较小,而LVSM的输入有功功率增大,系统频率增加。相比于VSG与LVSM在有功方面相反的运行特性,在无功功率方面,VSG与LVSM均可作为无功电源为微电网内的无功负荷提供支撑。为此,模拟同步发电机的励磁调节系统,将VSG或LVSM的虚拟内动势 E 分成两部分,如式(3)所示。

$$\begin{cases} E = E_0 + \Delta E \\ \frac{d\Delta E}{dt} = k_Q(Q_m - Q_e) \end{cases} \quad (3)$$

式中: E_0 、 ΔE 分别为空载虚拟内电势及补偿量; Q_m 为VSG输出无功功率参考值; k_Q 为无功-电压调节系数。

根据同步发电机的励磁调压策略,无功功率参考值 Q_m 可以由式(4)所示无功-电压下垂控制方程得到。

$$Q_m = Q_{set} + \Delta Q = Q_{set} + K_v(U_{ref} - U) \quad (4)$$

式中: Q_{set} 为无功功率设定值; ΔQ 为无功功率增量; U_{ref} 为VSG端口参考电压的有效值; U 为端口实际输出电压的有效值; K_v 为无功-电压下垂系数。式(3)和式(4)共同决定了VSG的初级调压特性,其端口电压稳态值由式(5)决定。

$$\frac{Q_{set} - Q_e}{U - U_{ref}} = K_v \quad (5)$$

由式(5)可以看出,在虚拟同步机控制中,无功-电压初级控制的稳态方程与传统 $Q-U$ 下垂控制方程相同,仅动态过程不同。基于虚拟同步机控制的变流器可运行于4个象限,因此根据式(1)~(4)可实现有功-频率及无功-电压的独立控制。由于本文的重点是电压调节,因此有功-频率控制部分不再详细叙述。

1.2 虚拟同步化微电网的无功-电压调节特性分析

虚拟同步化微电网主要由VSG及LVSM并联组成,其两机组等效电路模型如图2所示。图中: $E_i(i=$

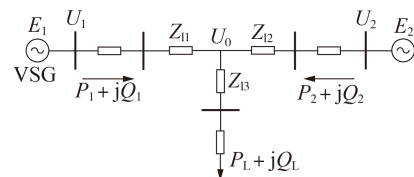


图2 虚拟同步化微电网的等效电路模型

Fig.2 Equivalent circuit model of virtual synchronization technology-based microgrid

1,2)为变流器 i 的虚拟内动势, $i=1$ 对应VSG, $i=2$ 对应LVSM; U_i 为变流器 i 的并网节点处电压; P_i 、 Q_i 分别为变流器 i 的输出有功、无功功率; U_0 为负荷点电压; P_L 、 Q_L 分别为负荷有功、无功功率; Z_{11} 、 Z_{12} 、 Z_{13} 为线路阻抗。

由式(1)和式(2)可知,VSG与LVSM的有功-频率特性决定了系统的稳态频率,当 $P_i \neq P_{seti}$ ($i=1,2$; P_{seti} 为变流器 i 的有功功率设定值)时,系统频率会偏离额定频率。另外,系统的无功负荷 Q_L 由VSG与LVSM的剩余无功容量提供,剩余无功容量 Q_{si} 由式(6)决定。

$$Q_{si} = \sqrt{S_i^2 - P_i^2} \quad i=1,2 \quad (6)$$

式中: S_i 为变流器 i 的容量。由式(6)可知,VSG、LVSM的输出/输入有功功率越大,则其提供无功功率的能力越弱;VSG、LVSM的输出/输入有功功率越小,则其提供无功功率的能力越强。在理想的情况(不计线路阻抗,额定电压下输出的无功功率为0,即 $Q_{set}=0$)下,若无功-电压下垂系数 K_v 与 Q_{si} 成正比,则可以实现变流器的输出无功功率按照剩余无功容量均分的目标。下面从有功和无功两方面对虚拟同步化微电网的无功-电压调节特性进行讨论。

1)有功负荷变化。在传统基于下垂控制的独立微电网中,系统有功功率变化会引起变流器的剩余无功容量同比例变化(比例大小和方向相同),因此各变流器间剩余无功容量之比不变,输出无功功率基本不变。然而,在虚拟同步化微电网中,系统有功负荷变化会导致VSG与LVSM的剩余无功容量的变化不一致(VSG剩余无功容量随着有功负荷的增大而减小,LVSM剩余无功容量随着有功负荷的增大而增大),VSG与LVSM的剩余无功容量之比会发生变化,此时固定的无功-电压下垂系数 K_v 不再满足与剩余无功容量成正比的关系,各变流器的输出无功功率不再均分,从而出现无功环流。

2)无功负荷变化。相较于传统的微电网,虚拟同步化微电网的有功功率与无功功率之间存在较大的耦合关系,当系统无功负荷发生变化时,各变流器端电压会重新分布,固定的下垂系数 K_v 同样无法满足与剩余无功容量成正比的关系。另外,根据式(5),为了提高无功分配精度,需要较小的无功-电压下垂系数 K_v ,然而较小的下垂系数会引起系统端电压的平均值减小,这既会影响电能质量,也会降低系统稳定性。

综上所述,鉴于虚拟同步化微电网的初级无功-电压调节特性,本文在底层VSG控制的基础上,提出了分布式无功-电压二级控制策略,能够使虚拟同步变流器的输出无功功率按照自身剩余无功容量精确分配,增大端口电压平均值,在提高系统无功容量利用率的同时改善电能质量。

2 虚拟同步化微电网的分布式二级控制策略

虚拟同步化微电网的分布式无功-电压二级调控策略框图如图3所示。图中: k 为采样次数; U_{ave} 为全网端口电压平均值的评估值; $Q_{\lambda i}$ 、 $Q_{ave\lambda}$ 分别为变流器 i 的无功功率标幺值、全网平均无功功率标幺值的评估值; ΔU_{Vi} 、 ΔU_{Qi} 分别为电压调节、无功调节的电压变化量; ΔU_i 为变流器 i 的并网节点处电压变化量; $\Delta \omega$ 为变流器虚拟转子角频率变化量; ω^* 、 E^* 分别为变流器虚拟角频率参考值、虚拟内电势参考值; L_v 为变流器虚拟电感; U^* 为变流器端口电压矢量参考值,其幅值 $U^* = \sqrt{(U_d^*)^2 + (U_q^*)^2}$; i_{Ld_ref} 、 i_{Lq_ref} 分别为变流器电感电流参考值的 d 、 q 轴分量; u_d 、 u_q 和 i_{Ld} 、 i_{Lq} 分别为端口电压和电感电流实际值的 d 、 q 轴分量; I 为变流器输出电流矢量, I 为其幅值; L_v 为虚拟阻抗; u_{md} 、 u_{mq} 分别为变流器调制量的 d 、 q 轴分量。

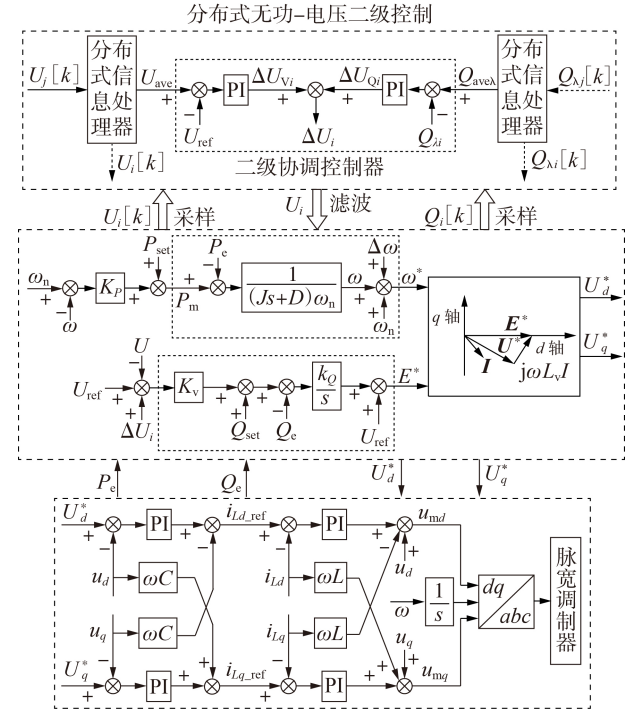


图3 分布式无功-电压二级控制策略框图

Fig.3 Block diagram of distributed reactive power-voltage secondary control strategy

2.1 分布式无功-电压二级控制策略

分布式无功-电压二级控制的前提是信息采集。对于端口电压平均值及平均无功功率标幺值的获取,传统方法通常采用集中控制器采集全网的信息进行处理,但是这种方法因存在中心控制器,可靠性低,可扩展性差。本文采用基于分布式信息处理器的方式获取所需的变量信息。该方法将所有控制单元构成一个对等的稀疏通信网络,各变流器中的分布式信息处理器仅能与其邻居单元中的信息处理器进行通信,通过与邻居单元的信息交换,基于有限的

信息处理获取系统电压及无功功率标么值的平均值。在误差允许的范围内,各分布式信息处理器得到相同的平均值。

本文采用分布式一致性算法^[22]作为分布式信息处理器的信息处理算法。该算法的实现依托稀疏通信网络,无需中心节点,可靠性高。基于上述分布式一致性算法,本文所提基于分布式信息处理器的虚拟同步化微电网分布式无功-电压二级控制流程图见附录A图A1,具体实施步骤如下。

1)启动二级控制。首先,采集本地变量 Q_i 、 P_i 、 U_i ,在采样脉冲作用下得到初始状态值 $Q_i[0]$ 、 $P_i[0]$ 、 $U_i[0]$,脉冲的采样周期为 T_s ;然后,根据式(7)计算对应的无功功率标么值初始值。

$$Q_{\lambda i}[0] = \frac{Q_i[0]}{\sqrt{S_i^2 - P_i^2[0]}} \quad i=1, 2, \dots, n \quad (7)$$

式中: $Q_{\lambda i}[0]$ 为无功功率标么值初始值; n 为参与控制的虚拟同步变流器数量。

2)各VSG、LVSM的分布式信息处理器将上述初始值发送至邻居变流器,并接收邻居变流器的相应数值,根据式(8)进行一致性迭代计算。

$$\begin{cases} Q_{\lambda i}[k+1] = \sum_{j=1}^n d_{ij} Q_{\lambda i}[k] \\ U_i[k+1] = \sum_{j=1}^n d_{ij} U_j[k] \end{cases} \quad i=1, 2, \dots, n \quad (8)$$

式中: d_{ij} 为邻居变流器 j 的状态量对变流器 i 的作用因子(或将其称为通信权重),若两变流器之间有链路连接,则 $d_{ij} > 0$,且 $d_{ij} = d_{ji}$,否则 $d_{ij} = 0$ 。将式(8)写成矩阵形式时,由 d_{ij} 构成的状态转移矩阵 D 为对称矩阵。由文献[22]可知,当矩阵 D 被设计为双随机矩阵时,式(8)中的各状态变量会收敛于初始值的平均值。

3)判断步骤2)中迭代是否满足式(9)所示迭代收敛判据:若不满足,则继续交互更新后的信息并根据式(8)进行迭代计算;若满足,则各VSG、LVSM的信息处理器会获得一致的全网电压平均值 U_{ave} 以及平均无功功率标么值 $Q_{ave\lambda}$ 。

$$|x[k] - x[k-1]| < \varepsilon \quad k \in [1, +\infty] \quad (9)$$

式中: x 为交互的状态变量,在本文中指 $Q_{\lambda i}$ 或 U_i ; ε 为一足够小的数值,具体取值需根据状态变量的数量级确定。

步骤2)中一致性迭代算法的收敛速度由矩阵 D 的性质决定。由文献[23]可知,一致性收敛的过程取决于矩阵 D 的本质谱半径 $R_{est}(D)$,其计算式为:

$$R_{est}(D) = \max\{|\lambda|, \lambda \in \rho(D) \setminus \{1\}\} \quad (10)$$

式中: $\rho(D)$ 为矩阵 D 的特征值集合; λ 为矩阵 D 的特征值集合中非1的特征值。本质谱半径 $R_{est}(D)$ 即为矩阵 D 的第二大特征值(D 的最大特征值必为1),其

大小及结构决定了收敛模式及速度,本质谱半径越小,则收敛速度越快。一般而言,迭代收敛所需次数 N 可根据式(11)计算得到^[23]。

$$N = \frac{-1}{\log_{\varepsilon} \frac{1}{R_{est}(D)}} \quad (11)$$

由式(11)可知,迭代收敛所需次数 N 与构造的矩阵 D 有密切的关系,因此,在给定通信拓扑后, N 可以通过离线计算获得。

4)迭代收敛后,各分布式无功-电压二级控制器将电压平均值 U_{ave} 与额定电压 U_{ref} 进行比较,同时将平均无功功率标么值 $Q_{ave\lambda}$ 与自身的无功功率标么值 $Q_{\lambda i}$ 进行比较,根据比较结果通过PI控制器产生对应的电压调节量 ΔU_{Vi} 和无功调节量 ΔU_{Qi} ,将其加入底层调压控制中,更新电压参考值。

5)底层参考值更新结束后,各变流器继续在采样脉冲的作用下采集本地变量,并获得初始值,将其发送至邻居变流器的控制器,重复步骤2)~4),直至实现式(12)所示控制目标,即各VSG、LVSM的端口电压平均值恢复至额定电压,输出无功功率按照自身的剩余无功容量精确分配。

$$\begin{cases} \lim_{k \rightarrow +\infty} Q_{\lambda i} = L^* \quad \forall i \\ \lim_{k \rightarrow +\infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n U_i = U_{ref} \\ \sum_{i=1}^n Q_i + Q_D + Q_{loss} = 0 \end{cases} \quad (12)$$

式中: L^* 为系统稳定后各变流器的无功功率标么值,表征了系统总无功负荷占系统总剩余无功容量的比例,总无功负荷越大,则 L^* 越大; Q_D 为系统的总无功负荷; Q_{loss} 为网络的无功损耗。

2.2 考虑剩余无功容量约束的分布式二级控制器

当系统的总无功负荷大于总剩余无功容量(即 $L^* > 1$)时,需额外加装无功发生装置来提供无功功率;当 $L^* < 1$,且变流器 i 的剩余无功容量由于某种原因接近最小剩余容量 $Q_{sLi} = \eta S_i$ (η 为一较小的数)时,需控制变流器 i 的无功输出为0,系统的无功负荷由剩余变流器按照自身的剩余无功容量进行精确分配。为此,本文对分布式二级控制器进行改进,其控制框图如图4所示。

以VSG_i为例:当 $L^* < 1$,且剩余无功容量 $Q_{si} \geq Q_{sLi}$ 时,标志位 $f_i = 1$,此时 $Q_{\lambda i}$ 的计算公式如式(7)所示, $\Delta U_{Qi} = \Delta U_{Q_{Li}}$, $\Delta U_{Q_{Li}}$ 由分布式信息处理器计算得到,最后其与电压调节量 ΔU_{Vi} 共同作用于底层VSG控制以实现运行目标;当 $Q_{si} < Q_{sLi}$ 时,标志位 $f_i = 0$,此时由图4可知, $Q_{\lambda i}$ 的计算公式变为 $Q_{\lambda i} = Q_i/S_i$, $\Delta U_{Qi} = \Delta U_{Q_{Qi}}$, $\Delta U_{Q_{Qi}}$ 为 $Q_{\lambda i}$ 与0比较后经过PI控制器得到的无功调节量,在该调节量的作用下VSG_i的无功输出可控制为0。另一方面,为了保证剩余的虚拟同步

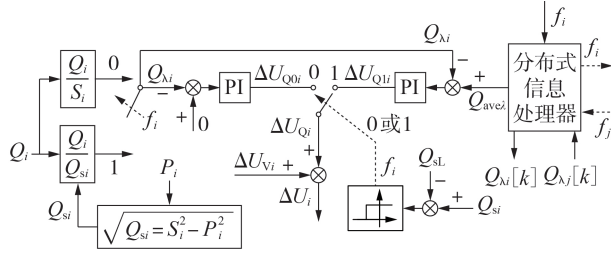


图 4 考虑剩余无功容量约束的分布式二级控制器框图

Fig.4 Block diagram of distributed secondary controller considering remaining reactive capacity constraint

变流器仍然按照剩余无功容量精确分配,各变流器同时交互标志位信息,当 VSG_j ($j \in N_i, N_i$ 为与变流器 i 相连的邻居变流器集合) 接收到标志位 f_i 变为 0 后,其一致性迭代算法中的通信权重 d_{ij} 会随之改变以满足收敛条件。当检测到标志位发生变化后, VSG_j 将更新与其相连的邻居变流器集合 N_j , 然后根据文献 [22] 中采用的 Metropolis 方法重新构造通信权重 d_{ij} , 使得剩余 VSG 所组成的状态转移矩阵 D^* 仍然满足迭代收敛判据。

当 VSG_i 的剩余无功容量恢复后,其标志位 f_i 变为 1, 内部控制目标从不输出无功恢复为参与无功均衡分配,其邻居变流器接收到复位信号后,将 VSG_i 重新加入邻居变流器集合 N_j , 并更新通信权重,实现系统的控制目标。值得注意的是,分布式无功-电压二级控制的流程未发生变化,对于剩余容量低于最小剩余容量的 VSG 而言,虽然其不再输出无功功率,但可以继续参与系统平均电压的恢复,因此电压二级控制部分未做改变。

2.3 分布式二级控制策略的稳态性能分析

由 2.1 节中分布式无功-电压二级控制的流程可知,在每个控制周期 T_s 内,各 VSG 和 LVSM 的分布式二级控制器均已获得系统的平均电压及平均无功功率标幺值(由矩阵 D 的结构保证收敛),因此,在分析二级控制策略的稳态性能时将这 2 个变量作为已知量参与全局稳态性能的分析。鉴于篇幅限制,具体的稳态性能推导过程见附录 B。

稳态性能分析结果表明,经过若干次迭代后各虚拟同步变流器的无功功率标幺值收敛于 L^* , 其值由微电网内的净无功功率决定,净无功功率越大,则 L^* 越大。另外,虚拟同步变流器的端口电压平均值收敛于额定电压 U_{ref} , 即实现了控制目标。

3 仿真分析

3.1 仿真平台搭建

为了验证本文所提控制策略的有效性,基于 MATLAB/Simulink 仿真平台搭建独立型虚拟同步化微电网模型。独立微电网包含 4 台 VSG (VSG_1 — VSG_4)、1 台 LVSM 及 3 组恒功率负荷 L_1 — L_3 , VSG_1 —

VSG_4 、LVSM 的容量分别为 50、25、25、25、30 $kV \cdot A$, L_1 — L_3 的有功功率分别为 30、20、20 kW, 无功功率分别为 10、40、20 kvar。微电网的拓扑结构见附录 C 图 C1, 系统参数及相关变流器的控制参数见附录 C 表 C1。各节点配置分布式信息处理器, 通过环形通信网络交互信息, 通信拓扑对应的状态转移矩阵如式 (13) 所示。

$$D = \begin{bmatrix} 1/3 & 1/3 & 0 & 0 & 1/3 \\ 1/3 & 1/3 & 1/3 & 0 & 0 \\ 0 & 1/3 & 1/3 & 1/3 & 0 \\ 0 & 0 & 1/3 & 1/3 & 1/3 \\ 1/3 & 0 & 0 & 1/3 & 1/3 \end{bmatrix} \quad (13)$$

3.2 仿真效果分析

1) 控制策略的有效性分析。

初始时刻恒功率负荷 L_1 和 L_2 投入系统, 总有功负荷为 50 kW, 总无功负荷为 50 kvar。 VSG_1 — VSG_4 、LVSM 的有功功率设定值分别为 12、10、10、10、-10 kW。仿真结果如图 5 和图 6 所示。1 s 前未启动所提二次控制策略, 各变流器基于虚拟同步机控制实现系统功率平衡以及频率和电压的稳定。由于虚拟同步机的无功-电压调节作用, 各变流器的端口电压与额定值相差较大, 无功功率未按照无功容量均衡分配。1 s 后启动分布式无功-电压二级控制策略, 优化各单元输出无功功率, 恢复系统的平均电压。由图 5

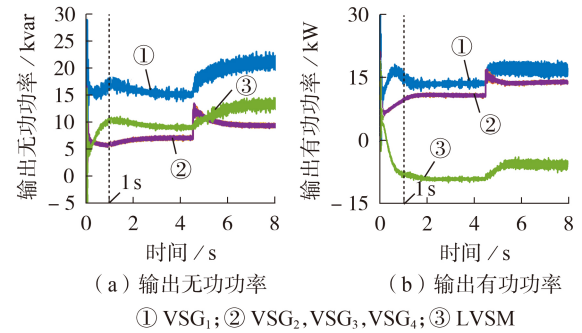


图 5 输出无功功率和有功功率的仿真结果

Fig.5 Simulative results of output reactive and active power

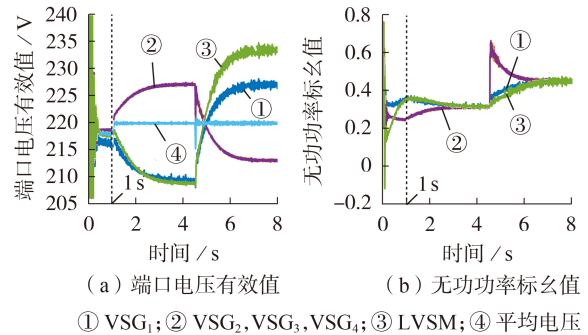


图 6 端口电压有效值及无功功率标幺值的仿真结果

Fig.6 Simulative results of port voltage effective value and reactive power unit value

可知,稳定后VSG₁—VSG₄、LVSM输出的无功功率分别为15.1、7.0、7.0、7.0、9.0 kvar,输出的有功功率分别为13.75、10.80、10.80、10.80、-9.25 kW,根据式(6)计算此时VSG₁—VSG₄、LVSM的剩余无功容量,分别为48.10、22.55、22.55、22.55、28.54 kvar,无功功率标幺值分别为0.313 9、0.310 4、0.310 4、0.310 4、0.315 3。可见,各变流器的无功功率标幺值几乎收敛至相同的值,即按照剩余无功容量实现精确分配。由图6可以看出:大约经过3.5 s后各虚拟同步变流器的无功功率标幺值收敛至0.31,这与理论计算的标幺值相符;各变流器的端口电压平均值恢复至220 V。电压与无功功率标幺值的一致性迭代过程图见附录C图C2。

4.5 s后,恒功率负荷L₃投入,此时有功功率增加20 kW,无功功率增加20 kvar。由图5、6可知,在电压一致性评估和无功功率标幺值一致性评估作用下,各变流器端口电压仍然收敛至额定值220 V,输出的无功功率标幺值收敛至0.45。考察图5可知,进入稳态后VSG₁—VSG₄、LVSM输出的无功功率分别为21.00、9.35、9.35、9.35、13.25 kvar,输出的有功功率分别为17.0、14.1、14.1、14.1、-6.0 kW,根据式(6)计算此时VSG₁—VSG₄、LVSM的剩余无功容量,分别为47.00、20.64、20.64、20.64、29.40 kvar,各变流器的无功功率标幺值分别为0.446 8、0.453 0、0.453 0、0.453 0、0.450 7,可见各虚拟同步变流器仍然按照剩余无功容量实现精确分配。

值得注意的是,LVSM吸收的有功功率随着频率的增大而增多,因此当L₃投入后系统频率降低时,LVSM的有功功率减小,其剩余无功容量增大,而其他VSG的剩余容量相应减小。因此,基于本文所提控制策略,独立微电网通过源、荷的协同调节,能较快地实现控制目标,且系统的暂态过程平滑,验证了控制策略的有效性。

2) 控制策略的性能对比分析。

本文所提控制策略无需采集线路的阻抗信息,因此不管节点间的线路阻抗如何变化,均不影响控制策略的有效性。为了验证本文所提控制策略自适应线路阻抗变化的特性,本文设计了3种情景,各情景的线路阻抗参数见表1(各线路阻抗的位置见附录C图C1)。

表1 不同情景下的线路阻抗参数

Table 1 Line impedance parameters under different scenes

情景	Z_0/Ω	Z_1/Ω	Z_2/Ω	Z_3/Ω	Z_4/Ω	Z_5/Ω
1	0.12+ j0.942	0.1+ j1.256	0.1+ j0.628	0.05+ j0.628	0.1+ j0.628	0.1+ j1.256
2	0.1+ j0.942	0.2+ j1.256	0.15+ j0.628	0.1+ j0.628	0.12+ j0.942	0.1+ j0.942
3	0	0.3+ j1.57	0.1+ j0.628	0.1+ j0.942	0.15+ j0.628	0.2+ j0.942

情景1—3分别用于仿真计算不同控制策略下各虚拟同步变流器的无功功率标幺值以及端口电压平均值。系统无功功率标幺值偏差 $\bar{e}$ 的计算式如式(14)所示,其可以表征无功功率的精确控制程度。

$$\bar{e} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{Q_{\lambda i} - \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n Q_{\lambda j}}{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n Q_{\lambda j}} \right| \quad (14)$$

在不同情景下采用不同控制策略的仿真结果见附录C表C2,分析表中结果可得如下结论。

(1) 本文所提控制策略基本不受线路阻抗及电网结构的影响,可有效减少无功功率标幺值偏差,提高平均电压,具有较强的电网结构适应性。

(2) 当仅实施底层虚拟同步机控制,即未启动任何二级控制策略时,系统进入稳态后的平均电压显著降低,无功功率标幺值随着线路阻抗的不同而发生变化,且偏差显著。

(3) 文献[24]指出,当无功-电压下垂系数 K_v 与剩余无功容量的标幺值相等时,稳态后输出的无功功率按照要求精确分配,为此提出了基于无功功率标幺值的改进下垂控制策略,如式(15)所示。

$$U = U_{ref} + \delta V - K_v^* Q_{\lambda} \quad (15)$$

式中: K_v^* 为无功-电压下垂系数标幺值,本文算例中取值为 8×10^{-3} ; δV 为电压二级控制,用于恢复系统平均电压。由表C2可知,相比于不启动控制策略,改进的下垂控制策略能显著改善无功功率标幺值偏差,并恢复系统的平均电压。但是,与本文所提控制策略相比,采用改进的下垂控制策略时,无功功率标幺值偏差仍然偏大,且会随着线路阻抗的变化而改变,无法自适应电网拓扑的变化。

由上述对比分析可知,基于无通信的改进下垂控制策略由于各变流器端口电压存在偏差,导致无功功率标幺值存在偏差,而无功负荷或电网拓扑改变反过来也会影响端口电压。因此,本文所提控制策略的优势在于即使在线路阻抗未知、节点电压不同的情况下仍能寻找到目标运行点。

3) 考虑剩余无功容量约束的情况。

为了验证本文所提策略在剩余无功容量不足时的运行情况,设计了2种典型工况对变流器的响应过程进行分析:①有功负荷增大;②VSG的有功功率设定值增大。

(1) 典型工况1:有功负荷增大。

初始时刻恒功率负荷L₁、L₂投入系统,总有功负荷为50 kW,总无功负荷为50 kvar。VSG₂的变流器容量从25 kV·A减小为15 kV·A,其余仿真参数不变。该工况的仿真结果如图7所示。由图可知:1 s后启动二次控制策略,由于VSG₂的变流器容量不再

与VSG₃和VSG₄的变流器容量相同,三者的剩余无功容量不同,输出的无功功率也不相同;但是,由于VSG₂—VSG₄的有功功率设定值相同,其输出的有功功率仍然相同;全部变流器的剩余无功容量都满足约束条件,因此系统按照剩余无功容量精确分配无功功率,即各变流器的无功功率标幺值相同。另外,由于VSG₂的变流器容量变小,在无功负荷不变的情况下,工况1收敛后的无功功率标幺值增大。

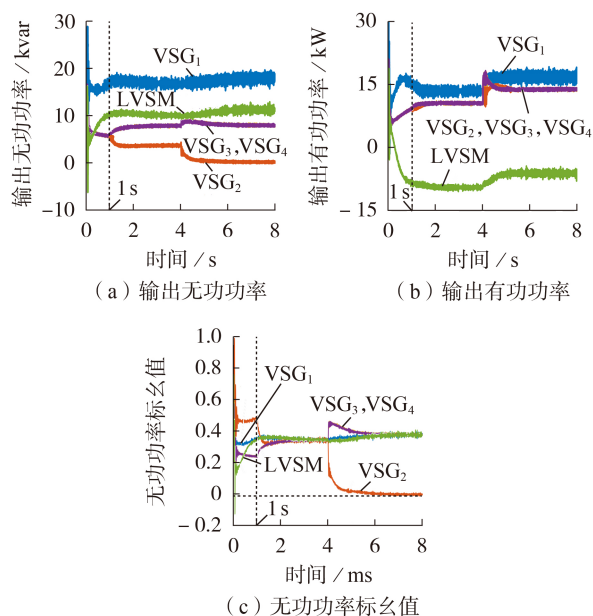


图7 典型工况1的仿真结果

Fig.7 Simulative results of Typical Operating Condition 1

4 s后, L_3 投入系统(L_3 变为纯有功负荷),此时总有功负荷为70 kW,总无功负荷不变。由图7(b)可看出,VSG₁—VSG₄根据有功-频率下垂系数增大有功功率,LVSM则相应减少有功消耗,稳定后VSG₂输出的有功功率接近其变流器容量,剩余无功容量不再满足约束条件,其二级控制器改变控制目标,使得VSG₂的无功功率标幺值趋于0,对应输出的无功功率降为0。在分布式二级控制器的作用下,剩余变流器增大无功出力以补偿VSG₂减小的无功容量,且剩余4台变流器的无功功率标幺值重新趋于一致,继续按照自身的剩余无功容量分配无功。

(2)典型工况2:有功功率设定值增大。

初始时刻恒功率负荷 L_1 和 L_2 投入系统,总有功负荷为50 kW,总无功负荷为50 kvar,VSG₂的变流器容量为15 kV·A,其余仿真参数不变,该工况的仿真结果见附录C图C3。由图可知:1 s后启动二次控制策略,各VSG输出的有功功率、无功功率与典型工况1类似,此处不再赘述;4 s后,VSG₂的有功功率设定值 P_{set} 从10 kW变为15 kW,其输出有功功率相应增大,由于总有功负荷不变,因此VSG₁、VSG₃、VSG₄

按照有功-频率下垂系数减少有功功率输出,LVSM则因频率增大而消耗更多的有功功率。与典型工况1的结果对比可知,在典型工况2下,VSG₂输出的有功功率需经过一段过渡过程才能达到稳定,因此 Q_{s2} 大约经过0.5 s降至 Q_{s12} ,在这段时间内二级控制器未切换控制目标,因此随着输出无功功率及剩余无功容量同时变化,无功功率标幺值出现短暂的无序振荡,当 Q_{s2} 降至 Q_{s12} 后二级控制器改变控制目标,使得VSG₂的无功功率标幺值趋于0,对应输出无功功率降为0。在分布式二级控制器的作用下,剩余变流器增大无功出力以补偿VSG₂减小的无功容量,且无功功率标幺值重新趋于一致,继续按照自身的剩余无功容量分配无功。综上所述,在总无功负荷不变的情况下,某台变流器由于有功负荷增大或变流器输出有功功率增大而导致剩余无功容量越限,剩余变流器仍然能够按照自身的剩余无功容量精确分配功率,控制过程具有较好的动态和稳态性能。

4 结论

1)分析了虚拟同步化微电网的无功-电压调节特性,提出了自适应线路阻抗的分布式无功-电压二级控制策略,实现了各虚拟同步变流器输出无功功率按照自身剩余无功容量精确分配的目标,并同时恢复系统平均电压至额定值。

2)所提控制策略是基于稀疏通信网络的全分布式控制方式,该策略无需获取系统的阻抗参数和恒定功率负荷信息,对系统网络结构的适应性强;配置分布式控制器,避免了集中式控制器可靠性低的弊端。

3)通过优化所提的分布式无功-电压二级控制器,本文所提控制策略在变流器剩余无功容量越限的情况下,仍然能够使剩余变流器按照自身剩余无功容量精确分配功率,调节过程具有较好的动态和稳态性能。

随着虚拟同步机等技术的发展,未来微电网将向着同时兼顾有功-频率与无功-电压协调控制的方向发展。在提高系统频率调节能力的同时,基于点对点通信的分布式控制方式较好地利用了分散的虚拟同步机无功资源,改善了系统的电能质量。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 苏宏升,江昆,杨祯,等. 基于虚拟同步发电机的微网频率与电压综合控制策略[J]. 电力自动化设备,2020,40(3):21-28.
SU Hongsheng, JIANG Kun, YANG Zhen, et al. Comprehensive control strategy of microgrid frequency and voltage based on virtual synchronous generator[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(3): 21-28.
- [2] 耿英明,侯梅毅,朱国防,等. 基于虚拟阻抗的微电网有功均

- 分阻性下垂控制策略[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(10): 132-138.
- GENG Yingming, HOU Meiyi, ZHU Guofang, et al. Resistive droop control strategy of active power distribution for microgrid based on virtual impedance[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(10): 132-138.
- [3] 王俊凯, 牟龙华, 刘鑫. 基于动态虚拟阻抗的多并联逆变器间环流抑制控制策略[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(4): 94-100.
- WANG Junkai, MU Longhua, LIU Xin. Control strategy based on dynamic virtual impedance to suppress circulating current between multiple parallel inverters[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(4): 94-100.
- [4] ZHONG Q C, WEISS G. Synchronverters: inverters that mimic synchronous generators[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(4): 1259-1267.
- [5] ZHONG Q C, NGUYEN P L, MA Z Y, et al. Self-synchronized synchronverters: inverters without a dedicated synchronization unit[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(2): 617-630.
- [6] 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): 2591-2601.
- LÜ Zhipeng, SHENG Wanxing, ZHONG Qingchang, et al. Virtual synchronous generator and its applications in micro-grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(16): 2591-2601.
- [7] 张宸宇, 杨赞, 袁晓冬, 等. 考虑阻尼和惯性的虚拟同步机建模方法研究[J]. 电力工程技术, 2018, 37(5): 45-49.
- ZHANG Chenyu, YANG Yun, YUAN Xiaodong, et al. Modeling method of virtual synchronous machine considering damping and inertia[J]. Electric Power Engineering Technology, 2018, 37(5): 45-49.
- [8] 胡文强, 吴在军, 窦晓波, 等. 负荷虚拟同步机及其低电压故障穿越控制[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(9): 100-107.
- HU Wenqiang, WU Zaijun, DOU Xiaobo, et al. Load virtual synchronous machine and its low voltage ride-through control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(9): 100-107.
- [9] 吴鸣, 宋振浩, 吕振宇, 等. 计及综合效益的虚拟同步化微电网二次调频策略[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(3): 743-753.
- WU Ming, SONG Zhenhao, LÜ Zhenyu, et al. Secondary frequency regulation strategy of virtual synchronization technology based microgrid considering the integrated benefit[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(3): 743-753.
- [10] 郭倩, 林燎源, 武宏彦, 等. 一种改进的分布式电源无功功率精确分配下垂控制策略[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(15): 30-34.
- GUO Qian, LIN Liaoyuan, WU Hongyan, et al. An improved droop control strategy for accurate reactive power sharing among distributed generators[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(15): 30-34.
- [11] 韩华, 刘尧, 孙尧, 等. 一种微电网无功均分的改进控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(16): 2639-2648.
- HAN Hua, LIU Yao, SUN Yao, et al. An improved control strategy for reactive power sharing in microgrids[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(16): 2639-2648.
- [12] HOANG T V, LEE H H. An adaptive virtual impedance control scheme to eliminate the reactive-power-sharing errors in an islanding meshed microgrid[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2018, 6(2): 966-976.
- [13] 朱一昕, 卓放, 王丰, 等. 用于微电网无功均衡控制的虚拟阻抗优化方法[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(17): 4552-4563.
- ZHU Yixin, ZHUO Fang, WANG Feng, et al. Virtual impedance optimization method for microgrid reactive power sharing control[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(17): 4552-4563.
- [14] 肖宏飞, 钱浩, 林艳艳, 等. 考虑无功功率协调的微网二级电压控制[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(4): 1084-1092.
- XIAO Hongfei, QIAN Hao, LIN Yanyan, et al. Secondary control scheme for voltage compensation and reactive power coordination in microgrids[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(4): 1084-1092.
- [15] LI Y W, KAO C N. An accurate power control strategy for power-electronics-interfaced distributed generation units operating in a low-voltage multibus microgrid[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 24(12): 2977-2988.
- [16] XU H Z, ZHANG X, LIU F, et al. A reactive power sharing strategy of VSG based on virtual capacitor algorithm[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(9): 7520-7531.
- [17] XU H Z, YU C Z, LIU C, et al. An improved virtual capacitor algorithm for reactive power sharing in multi-paralleled distributed generators[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(11): 10786-10795.
- [18] ALTAHIR S Y, YAN X W, GADALLA A S. Active and reactive power sharing control strategy for VSGs in microgrid considering the different capacities of distributed energy resources[J]. IET Cyber-Physical Systems: Theory & Applications, 2018, 3(3): 167-173.
- [19] LIU J, MIURA Y, BEVRANI H, et al. Enhanced virtual synchronous generator control for parallel inverters in microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(5): 2268-2277.
- [20] ANDALIB-BIN-KARIM C, LIANG X D, ZHANG H G. Fuzzy-secondary-controller-based virtual synchronous generator control scheme for interfacing inverters of renewable distributed generation in microgrids[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2018, 54(2): 1047-1061.
- [21] 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.
- [22] 吕振宇, 吴在军, 窦晓波, 等. 自治直流微电网分布式经济下垂控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(4): 900-910.
- LÜ Zhenyu, WU Zaijun, DOU Xiaobo, et al. A distributed droop control scheme for islanded DC microgrid considering operation costs[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(4): 900-910.
- [23] XU Y L, LIU W X. Novel multiagent based load restoration algorithm for microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2011, 2(1): 152-161.
- [24] ZHONG Qingchang. Robust droop controller for accurate proportional load sharing among inverters operated in parallel[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(4): 1281-1290.

作者简介:



吴 鸣

吴 鸣(1981—),男,教授级高级工程师,博士,主要研究方向为分布式发电与微电网控制技术、关键设备研发(E-mail: wuming@epri.sgcc.com.cn);

吕振宇(1989—),男,讲师,博士,主要研究方向为微电网运行控制、能量优化管理(E-mail: zhenyu_lv@nnu.edu.cn)。

(编辑 陆丹)

Distributed reactive power-voltage secondary control strategy of independent virtual synchronization technology-based microgrid

WU Ming¹, LÜ Zhenyu², SONG Zhenhao¹, LÜ Zhipeng¹, XIONG Xiong¹

(1. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China;

2. School of Electrical and Automation Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

Abstract: In view of the primary regulation characteristics of reactive power-voltage control in independent virtual synchronization technology-based microgrid, based on the virtual synchronous control technology, a distributed reactive power-voltage secondary control strategy taking into account the remaining reactive power capacity of virtual synchronous converter is proposed for independent microgrid. In order to improve the utilization rate of reactive power capacity and average voltage level of the system, the evaluation of system's average reactive power unit value and average port voltage value is implemented through distributed sparse communication between adjacent virtual synchronous machine controllers. On this basis, the optimal reference values of reactive power-voltage droop parameters for the virtual synchronous converter are obtained through the proposed distributed secondary controller, so as to realize the optimal allocation of reactive power and voltage regulation, and improve the power quality while improving the utilization rate of reactive power capacity of the system. An independent virtual synchronization technology-based microgrid model is built based on MATLAB/Simulink, and the effectiveness of the proposed strategy and its superiority compared with the traditional reactive power-voltage regulation strategy are verified by simulation.

Key words: independent microgrid; virtual synchronous machine; reactive power-voltage characteristics; distributed control; remaining reactive power capacity; average voltage

(上接第62页 continued from page 62)

Impact mechanism analysis of virtual governor on transient power angle stability of VSG

ZHANG Wei¹, HUANG Wen¹, SHUAI Zhikang¹, GE Jun¹, SHEN Chao², CHENG Huijie¹, SHEN Xia¹

(1. National Electric Power Conversion and Control Engineering Technology Research Center,

Hunan University, Changsha 410082, China;

2. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: As an important part of primary frequency regulation, VG (Virtual Governor) is extremely important for VSG (Virtual Synchronous Generator) to maintain transient power angle stability under large disturbances. The LPF (Low-Pass Filter) and HPF (High-Pass Filter) type VGs are taken for research objects, the corresponding VSG transient large signal models are built. The extended equal area criterion is adopted to analyze VSG transient power angle stability mechanism considering different governors, and the phase portrait method is used to quantitatively research the impact of VG control parameters on VSG transient power angle stability. It is found that decreasing the cut-off frequency of VG will improve the system transient power angle stability, increasing the gain of LPF type VG will strengthen the system transient power angle stability, while increasing the gain of HPF type VG will cause the system transient power angle stability strengthen first and then weaken. When the gain and cut-off frequency of VG are the same, LPF type VG has a larger margin of system transient power angle stability than that of HPF type VG. The correctness of theoretical analysis is verified by the simulative results.

Key words: virtual synchronous generator; virtual governor; transient power angle stability; low-pass filter; high-pass filter

附录 A

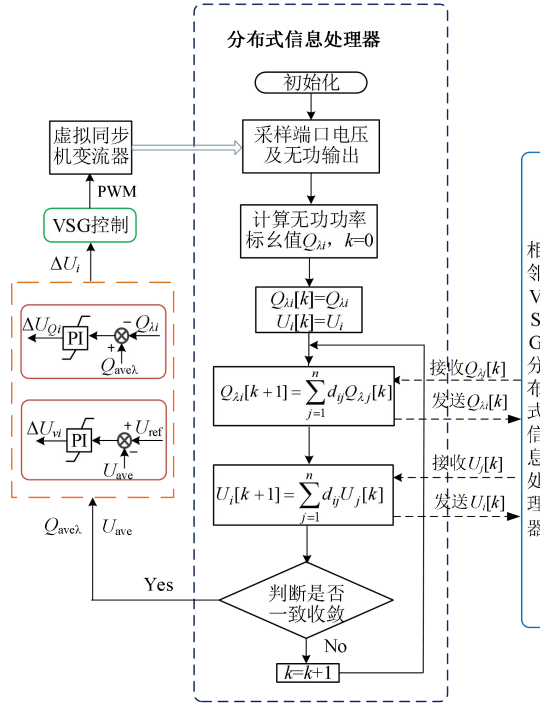


图 A1 分布式无功-电压协同控制流程图

Fig.A1 Flowchart of distributed reactive power-voltage coordinated control

附录 B

虚拟同步变流器无功-电压控制环节的无功参考值为:

$$Q_{mi} = (U_{ref} + \Delta U_{Vi} + \Delta U_{Qi} - U_i) K_v \quad i=1,2,\dots,n \quad (B1)$$

由于全网电压平均值与平均无功标幺值已由一致性迭代获得, 因此将收敛值 $U_{ave} = 1/n \sum_{j=1}^n U_j$ 和

$Q_{ave\lambda} = 1/n \sum_{j=1}^n Q_{\lambda j}$ 代入电压调节量, 得到式 (B2)。

$$\begin{cases} \Delta U_{Vi} = (k_{p,V} + \frac{k_{I,V}}{s})(U_{ref} - \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n U_j) \\ \Delta U_{Qi} = (k_{p,Q} + \frac{k_{I,Q}}{s})(\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n Q_{\lambda j} - Q_{\lambda i}) \end{cases} \quad (B2)$$

对式 (B1)、(B2) 进行拉式变换, 并写成矩阵形式得:

$$\mathbf{Q}_m(s) = [\mathbf{U}_{ref}(s) + \Delta \mathbf{U}_V(s) + \Delta \mathbf{U}_Q(s) - \mathbf{U}(s)] K_v \quad (B3)$$

$$\begin{cases} \Delta \mathbf{U}_V(s) = (k_{p,V} + \frac{k_{I,V}}{s})[\mathbf{U}_{ref}(s) - \mathbf{M}\mathbf{U}(s)] \\ \Delta \mathbf{U}_Q(s) = (k_{p,Q} + \frac{k_{I,Q}}{s})[\mathbf{M}\mathbf{Q}_\lambda(s) - \mathbf{Q}_\lambda(s)] \end{cases} \quad (B4)$$

式中: $\mathbf{U}_{ref}(s) = (U_{ref}/s)\mathbf{1}$; $\mathbf{1}$ 为 $n \times 1$ 的单位列向量; $\mathbf{I}_n$ 为 $n \times n$ 的单位矩阵; $\mathbf{M} = (\mathbf{1} \cdot \mathbf{1}^T)/n$; 令 $\mathbf{L}_n = \mathbf{M} - \mathbf{I}_n$, 则 $\mathbf{L}_n$ 为Laplace矩阵。由于考察稳态性能, 假设系统稳定, $\mathbf{Q}_m = \mathbf{Q}_e$, 并将式 (B4) 代入 (B3), 得:

$$[\mathbf{I}_n + H(s)\mathbf{M}]\mathbf{U}(s) = [1 + H(s)]\mathbf{I}_n \mathbf{U}_{\text{ref}}(s) + [G(s)\mathbf{L}_n - K_v^{-1}\mathbf{B}]\mathbf{Q}_\lambda(s) \quad (\text{B5})$$

式中： $H(s) = k_{p,v} + k_{i,v}/s$ ； $G(s) = k_{p,q} + k_{i,q}/s$ ； 矩阵 $\mathbf{B}$ 为对角矩阵， $\mathbf{B} = \text{diag}\{Q_{s1}, Q_{s2}, \dots, Q_{sn}\}$ 。 将式(B5)两边同时乘以 s^2 ， 并重新组合得到下式：

$$s[1 + k_{p,v}]\mathbf{U}_{\text{ref}} + k_{i,v}\mathbf{U}_{\text{ref}}\mathbf{1} + s[k_{p,q} - K_v^{-1}\mathbf{B}](s\mathbf{Q}_\lambda(s)) + k_{i,q}\mathbf{L}_n(s\mathbf{Q}_\lambda(s)) = s[\mathbf{I}_n + k_{p,v}\mathbf{M}](s\mathbf{U}(s)) + k_{i,v}\mathbf{M}(s\mathbf{U}(s)) \quad (\text{B6})$$

由终值定理可知， 当 $s \rightarrow 0$ 时， $\lim(s\mathbf{U}(s)) = \mathbf{U}^{\text{ss}}$ ， $\lim(s\mathbf{Q}_\lambda(s)) = \mathbf{Q}_\lambda^{\text{ss}}$ ， $\mathbf{U}^{\text{ss}}$ 为稳定时交流电压有效值向量， $\mathbf{Q}_\lambda^{\text{ss}}$ 为稳定时无功功率标么值向量。 因此， 对式（B6）两边同取 $s \rightarrow 0$ ， 并化简得：

$$k_{i,v}[\mathbf{M}\mathbf{U}^{\text{ss}} - \mathbf{U}_{\text{ref}}\mathbf{1}] = k_{i,q}\mathbf{L}_n\mathbf{Q}_\lambda^{\text{ss}} \quad (\text{B7})$$

由于式（B7）对于能使系统稳定的所有 $k_{i,v}$ ， $k_{i,q}$ 恒成立， 故有如下等式：

$$\mathbf{M}\mathbf{U}^{\text{ss}} = \mathbf{U}_{\text{ref}}\mathbf{1} \quad (\text{B8})$$

$$\mathbf{L}_n\mathbf{Q}_\lambda^{\text{ss}} = 0 \quad (\text{B9})$$

对于式（B8）， 等式两边同时左乘以 $\mathbf{1}^T$ ， 即得：

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n U_i^{\text{ss}} = U_{\text{ref}} \quad (\text{B10})$$

对于式（B9）， 由于 $\mathbf{L}_n$ 为Laplace矩阵， 因此式（B9）有且仅有唯一解 $\mathbf{Q}_\lambda^{\text{ss}} = \mathbf{L}^*\mathbf{1}$ ， 即：

$$Q_{\lambda 1}^{\text{ss}} = Q_{\lambda 2}^{\text{ss}} = \dots = Q_{\lambda n}^{\text{ss}} = L^* \quad (\text{B11})$$

附录 C

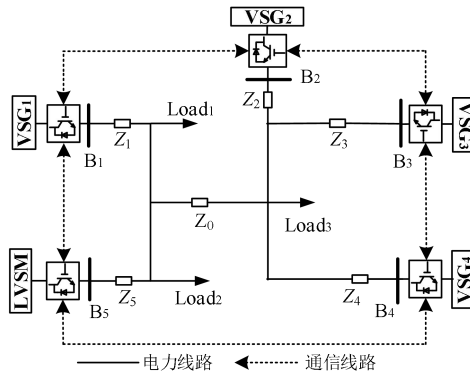


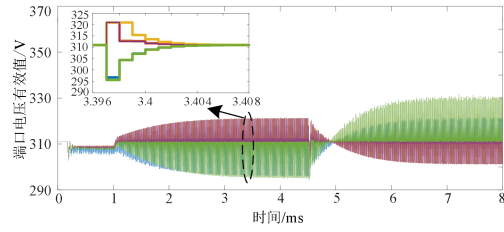
图 C1 微电网系统结构

Fig.C1 Structure of microgrid system

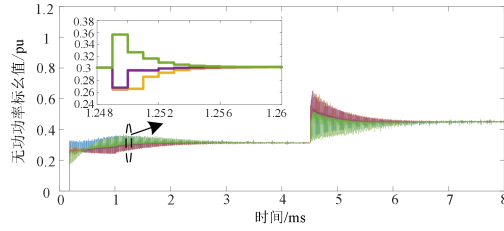
表 C1 微电网系统及虚拟同步机控制参数

Table C1 Control parameters of microgrid system and virtual synchronous machine

参数	取值	参数	取值	参数	取值
额定电压/V	380	虚拟电抗/mH	4	$k_{p,v}$	0.03
额定频率/Hz	50	滤波电抗/mH	5	$k_{i,v}$	20
Z_0/Ω	$0.12 + j0.942$	滤波电容/ μF	25	$k_{p,q}$	10
Z_1/Ω	$0.1 + j1.256$	J	8	$k_{i,q}$	250
Z_2/Ω	$0.1 + j0.628$	D	9	T_s/ms	10
Z_3/Ω	$0.05 + j0.628$	K_p	13089	η	5%
Z_4/Ω	$0.1 + j0.628$	K_v	3214		
Z_5/Ω	$0.1 + j1.256$	k_q	0.05		



(a) 电压一致性迭代过程



(b) 无功标么值一致性迭代过程

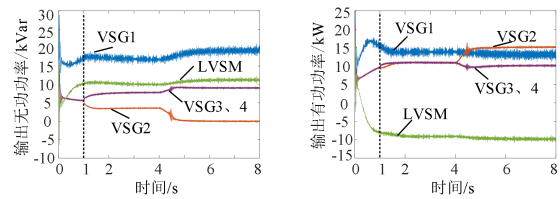
图 C2 电压与无功标么值一致性迭代过程

Fig.C2 Consistent iterative process of voltage and reactive power per-unit value

表 C2 不同情景的实验结果

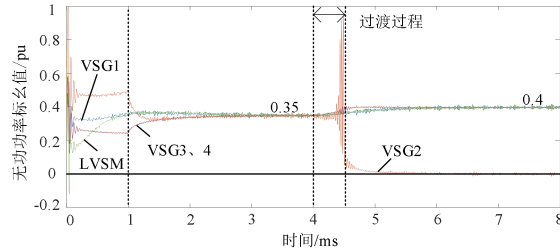
Table C2 Experimental results of different scenes

情景	策略	无功标么值					平均端口电压/V	平均标么值偏差/%
		VSG ₁	VSG ₂	VSG ₃	VSG ₄	LVSM		
1	未启动策略	0.205	0.425	0.458	0.425	0.393	217.7	18.49
	传统改进下垂控制	0.225	0.317	0.325	0.317	0.306	220.7	9.8
	本文策略	0.358	0.361	0.359	0.358	0.36	219.67	0.29
2	未启动策略	0.175	0.449	0.48	0.342	0.481	217.63	26.34
	传统改进下垂控制	0.207	0.317	0.324	0.293	0.36	219.9	13.38
	本文策略	0.361	0.36	0.359	0.357	0.355	219.9	0.54
3	未启动策略	0.104	0.589	0.44	0.555	0.425	217.65	30.16
	传统改进下垂控制	0.18	0.354	0.324	0.347	0.318	219	16.36
	本文策略	0.367	0.36	0.369	0.364	0.365	219.9	0.66



(a) 虚拟同步变流器输出无功功率

(b) 虚拟同步变流器输出有功功率



(c) 虚拟同步变流器输出无功标么值

图 C3 典型工况 2 下 VSG 的响应过程

Fig.C3 Response process of VSGs under Typical Condition 2