

一种适用于低压微网的下垂控制方法

徐梅

(淮南联合大学 机电系,安徽 淮南 232038)

摘要:由于传统的下垂控制方法对微网系统控制存在一定的局限性,提出一种基于阻抗复合控制的下垂控制方法。根据输出有功和无功实时动态改变下垂系数,利用动态变系数和暂态变系数的方法抵消线路阻抗的不匹配;采用开环和闭环补偿虚拟阻抗产生的电压降,在校正输出阻抗的同时避免虚拟阻抗产生的电压跌落,改善无功功率的动态和稳态均分特性;最后采用 MATLAB/Simulink 软件仿真验证所提出控制算法的可行性。

关键词:微网;下垂控制;阻抗匹配;自适应

中图分类号:TM464 **文献标识码:**A **文章编号:**1671-5322(2017)04-0035-06

微网是一种新型智能型的分布式电源接入方式,是由多个负载、微源以及储能单元共同组成的新型分布式电源系统。作为一种智能电源系统,微网具有并网和离网两种运行模式,对外表现为单一受控源,克服了传统 DG 的随机波动,可以解决高渗透率 DG (distributed generation) 并网问题,减弱分布式发电对大电网的冲击和不利影响,充分挖掘分布式能源为电网和用户带来的价值和效益^[1-2]。

在孤岛微网状态下,由于没有电网支持,多台分布式储能单元常常使用下垂控制共同支撑孤岛微网的电压和频率,同时分配系统中的有功功率和无功功率^[3]。然而传统的 $P-\omega/Q-U$ 下垂控制适用于线路阻抗呈现感性,而低压线路呈现为阻感性,有功无功耦合严重,恶化了传统下垂控制的效果^[4-5];同时,微网中储能单元分布较散,且功率等级不均,各单元之间的线路阻抗存在差异,无法满足传统的下垂控制要求各台逆变器之间存在的特定匹配关系,使得无功功率无法按照功率等级均分。

为了适应低压微电网,许多学者提出了各自的改进型下垂解决方案。为了适应阻性和阻感性的线路阻抗,文献[6]、文献[7]分别提出了 $P-U/Q-\omega$ 以及虚拟功率的下垂控制策略,该策略要根据传输线路阻抗特性对电压/频率的影响程度

重新定义下垂关系,但它无法克服线路阻抗不一致导致的功率分配偏差。在下垂控制中加入虚拟阻抗可调节线路阻抗的特性,在虚拟阻抗远大于线路阻抗条件下,各单元之间的阻抗可认为由虚拟阻抗唯一决定,从而改善原有的线路阻抗特性,创造功率解耦的条件。但是加入虚拟阻抗不可避免地带来了电压的跌落,同时微网中各单元间的线路阻抗差异明显,导致虚拟阻抗未能起到主导作用,从而影响虚拟阻抗的作用效果。为此,文献[8]设计了自适应的虚拟阻抗,根据线路阻抗的特性动态调节虚拟阻抗特性和数值。

由于大部分改进型下垂控制均需要获取准确的线路阻抗信息,而负荷分配的准确度受到线路阻抗检测准确度的限制。本文提出了一种基于阻抗复合控制的微网下垂控制方法,该方法在补偿线路阻抗电压跌落的同时,增加了变系数的动、稳态下垂项;另外,为了保证端口电压满足下垂曲线,设计了闭环的下垂控制补偿项,消除了测量导致的控制偏差,从而能在线路阻抗测量出现偏差的情况下,仍能合理分配动、静态负荷。文章的最后,采用 MATLAB/Simulink 仿真软件验证了所提控制算法的可行性。

1 负荷分配对线路阻抗的要求

图1为多逆变器组网的孤岛微网结构示意图

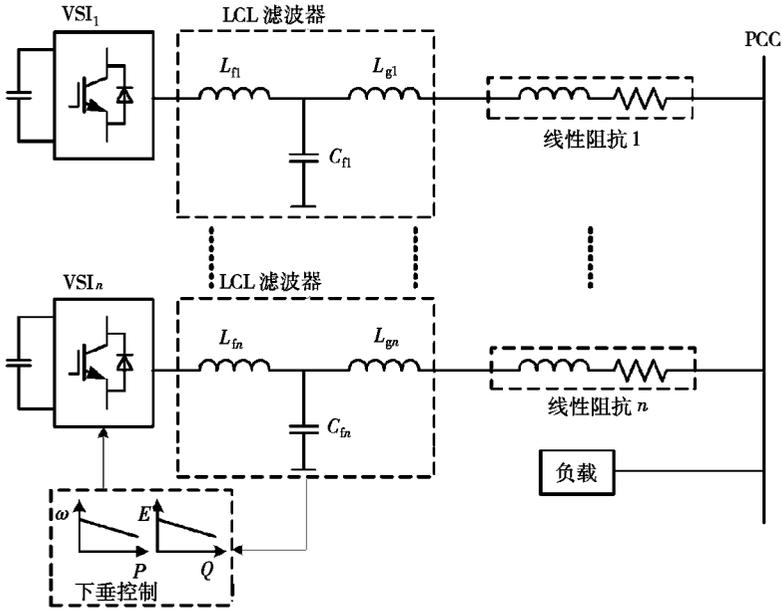


图 1 多 MGI 组网的微网结构示意图

Fig. 1 Configuration of multi-MGI formed microgrid

图,其中 VSI 经 LCL 滤波器和连接线阻抗连接到含有公共负荷和其他 DG 单元的公共母线上。

由于储能单元的分散性,VSI 常常采用下垂控制来实现多台储能单元共同支撑电压频率。下垂控制的表达式为:

$$\omega^* = \omega_0 + m(P_0 - P) \quad (1)$$

$$E^* = E_0 + n(Q_0 - Q) \quad (2)$$

式中: P_0 、 Q_0 、 ω_0 和 E_0 分别为有功、无功、参考频率和电压; ω^* 、 E^* 分别为 VSI 的频率和输出

电压的给定值; P 和 Q 分别为 VSI 的输出有功和无功功率; m 和 n 则为 $P-\omega$ 和 $Q-U$ 的下垂系数。

由于微网中 DG 位置分散,VSI 仅能通过测量逆变器输出功率下垂调节自身的频率和电压,而输出阻抗和连接线阻抗的线损和电压跌落,则会导致 VSI 偏离预先设定的运行点,从而失去负荷优化分配的前提。

图 2 给出 2 台 VSI 并列组网的等效电路图,说明线路阻抗对负荷分配的影响。

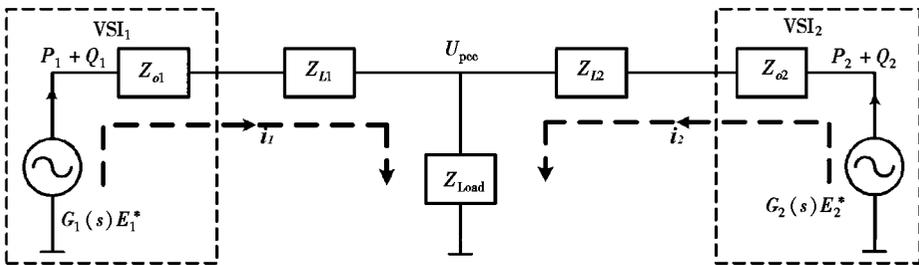


图 2 两台 VSI 并列的等效电路图

Fig. 2 Equivalent Circuit of two paralleled VSIs

式中: U_{pcc} 为母线电压向量,负荷连接在 PCCC 点; $Z_{Li} = R_{Li} + jX_{Li}$ 为 VSI 和 PCC 点之间的连接线阻抗; P_i 、 Q_i 为馈入母线的有功功率和无功功率; $G_i(s)E_i^*$ 为第 i 台 VSI 的等效电压源,输出电压为 $E_i \angle \delta_{Ui}$; Z_{oi} 为 VSI 的输出阻抗,可表示

为 $Z_{oi} = R_{oi} + jX_{oi}$ 。

假设 2 台 VSI 的容量比为 $S_1 = kS_2$,希望 2 台 VSI 按照容量比分配负荷,则 VSI 输出的有功和无功功率满足:

$$P_1 = kP_2, \quad Q_1 = kQ_2 \quad (3)$$

根据功率传输原理, P_i 和 Q_i 的表达式为^[9]:

$$P_i = \frac{X_i E_i U_{pcc} \sin \delta}{R_i^2 + X_i^2} + \frac{R_i U_{pcc} (E_i \cos \delta - U_{pcc})}{R_i^2 + X_i^2} \quad (4)$$

$$Q_i = -\frac{R_i E_i U_{pcc} \sin \delta}{R_i^2 + X_i^2} + \frac{X_i U_{pcc} (E_i \cos \delta - U_{pcc})}{R_i^2 + X_i^2} \quad (5)$$

式中: $R_i = R_{oi} + R_{li}$ 为输出阻抗和连接线阻抗之和的阻性分量; $X_i = X_{oi} + X_{li}$ 为输出阻抗和连接线阻抗之和的感性分量; $\delta_i = \delta_{li} - \delta_{pcc}$ 为内电势到 PCC 的功角差。

将式(4)代入式(5), 可得

$$Q_i = \frac{U_{pcc} (E_i \cos \delta - U_{pcc})}{X_i} - \frac{R_i P_i}{X_i} \approx \frac{U_{pcc} E_i - U_{pcc}^2}{X_i} - \frac{R_i P_i}{X_i} \quad (6)$$

假设沿用式(1)、式(2)的 $P - \omega$ 、 $Q - U$ 的下垂控制, 由于稳态时 $\omega_1 = \omega_2$, 则在 $\omega_{10} = \omega_{20} = \omega_0$ 的条件下, 可得

$$P_1 = k P_2 \quad (7)$$

而对于无功功率而言, 如果希望 $Q_1 = k Q_2$, 由于下垂系数 $n_1 = n_2/k$, 由式(2)可知, 内电势必须满足

$$E_1 = E_2 \quad (7)$$

因此, 若满足 $Q_1 = k Q_2$, 则必然有

$$(U_{pcc} E_1 - U_{pcc}^2) \left(\frac{1}{X_1} - \frac{k}{X_2} \right) + P_1 \left(\frac{R_2}{X_2} - \frac{R_1}{X_1} \right) = 0 \quad (8)$$

由此可得, 阻抗匹配条件为:

$$\frac{R_{o2} + R_{l2}}{R_{o1} + R_{l1}} = \frac{X_{o2} + X_{l2}}{X_{o1} + X_{l1}} = k \quad (9)$$

式(9)表明: 采用下垂控制时, 控制器不能完全决定系统的负荷分配, 阻抗需要满足特定的匹配关系才能保证无功功率的合理分配。实际运行中, 由于连接线阻抗的数值不定, 式(9)的阻抗匹配条件很难成立, 功率分配不具备可控性。

2 基于阻抗复合控制的下垂方法

根据上节分析可知, 传统的下垂控制需要满足特定的阻抗匹配关系, 才能实现负荷分配。本节提出了一种基于阻抗复合控制的下垂方法——孤岛微网下垂控制方法, 该方法设计了满足阻抗匹配关系的虚拟阻抗, 能根据阻抗的耦合特性确定下垂关系, 同时可在4个象限内改进负荷的动、静态分配性能, 其控制框图如图3所示:

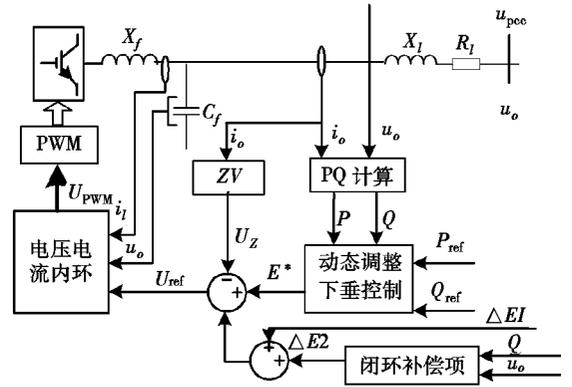


图3 系统控制框图

Fig. 3 Control diagram of the proposed controller

图3的系统框图中包含了3层控制环路, 最外环为带闭环补偿的功率下垂环, 根据输出的有功功率和无功功率动态确定下垂系数, 并引入了闭环补偿项保证下垂特性, 从而得到虚拟内电势; 然后是虚拟阻抗环路, 通过电感电流反馈引入感性虚拟阻抗, 在内电势 E 的基础上减去虚拟阻抗的压降获得端口电压的给定值, 虚拟阻抗可改善线路阻抗呈现的感性, 减小功率耦合; 最后是电压电流环, 采用电容电压和电感电流的双闭环控制, 跟踪给定的输出电压, 保证输出电压的特性。

根据上述思路, 所获得的第 i 台 VSI 电压输出表达式为:

$$E_i = E^* + n_i (Q_i^* - Q_i) + \Delta E_{1i} + \Delta E_{2i} \quad (10)$$

式中: ΔE_{1i} 为线路阻抗的开环电压补偿值; ΔE_{2i} 为下垂曲线的闭环校正值; n_i 为动态 $Q - U$ 的下垂系数, 根据实时的无功功率确定。

为了获取更好的动态特性, 与之对应的第 i 台 VSI 频率输出表达式为:

$$\omega_i = \omega^* + m_{1i} (P_i^* - P_i) + K_{p2i} \frac{d |P_i|}{dt} \quad (11)$$

2.1 开环补偿项

开环补偿项用于线路阻抗和虚拟阻抗产生的电压偏差, 抵消线损产生的电压跌落。如果令 $U_i \angle \delta_i = U_i$, 则图2中第 i 台逆变器的内电势 \vec{E}_i 、输出电压 \vec{U}_i 和母线电压 \vec{U}_{bus} 之间线路上的电压跌落可表示为:

$$(\vec{U}_i - \vec{U}_{bus}) = \frac{P_i R_{Li} + Q_i X_{Li}}{U_i} + j \frac{P_i X_{Li} - Q_i R_{Li}}{U_i} \quad (12)$$

$$(\vec{E} - \vec{U}_i) = \frac{P_i R_{oi} + Q_i X_{oi}}{U_i} + j \frac{P_i X_{oi} - Q_i R_{oi}}{U_i} \quad U_i \approx U_{bus} + \frac{X_i}{E^*} Q_i \quad (20)$$

可得开环补偿项 ΔE 为:

$$\Delta E = (\vec{E} - \vec{U}_i) + (\vec{U}_i - \vec{U}_{bus}) \approx \frac{P_i R_i + Q_i X_i}{U_i} \quad (14)$$

2.2 闭环补偿项

虚拟阻抗的闭环电压校正项 ΔE_{2i} 由 $Q-U$ 下垂特性 PI 调节器对 $Q-U$ 下垂特性进行闭环控制获得,表达式如下:

$$\Delta E_{2i} = ((E^* - U_{oi}) + n_i(Q_i^* - Q_i))(K_p + \frac{K_i}{s}) \quad (15)$$

式中: U_{oi} 为第 i 台 VSI 端口电压测量值; K_p 为 PI 调节器的比例系数; K_i 为 PI 调节器的积分系数。

由于 PI 控制器可实现直流量的无差控制,因此稳态时,式(15)可表示为

$$(E^* - U_{oi}) + n_i(Q_i^* - Q_i) = 0 \quad (16)$$

由此可见,加入了闭环校正项 ΔE_{2i} ,可保证端口电压和无功功率根据实时调整的下垂系数 n_i 分配,从而使得各单元间的无功功率分配由下垂系数唯一决定,保障了各单元之间无功功率的合理分配。

2.3 动态下垂项

下垂系数 n_i 由 $Q-U$ 下垂系数动态调整器根据 VSI 输出的有功和无功功率实时动态确定。下垂系数 n_i 选取公式为:

$$\begin{cases} n_i = n_i^* + K_{qli} |Q_i| + K_{q2i} \frac{d|Q_i|}{dt} \\ 0 < n_i < n_{imax} \end{cases} \quad (17)$$

式中: n_i^* 为第 i 台 VSI 静态 $Q-U$ 下垂系数; K_{qli} 为无功功率的比例校正系数; K_{q2i} 为无功功率的微分校正系数。

考虑到 VSI 功率双向流动,使用无功功率的绝对值 $|Q_i|$,保证下垂系数为正,维持微网的稳定。

首先考虑所提出的下垂控制对稳态无功分配的影响。稳态时,式(17)中的微分项失效,式(17)改写为

$$n_i = n_i^* + K_{qli} |Q_i| \quad (18)$$

结合式(15),可知输出电压表达式为:

$$U_i = E^* + (n + K_{qli} |Q_i|)(Q^* - Q_i) \quad (19)$$

在感性线路条件下,式(12)可表示为:

联立式(18)、式(19),并假设 $Q^* = 0$,可得

$$U_{bus} = E^* + (n + K_{qli} |Q_i| - \frac{X_i}{E^*}) Q_i \quad (21)$$

式(19)表明当多台逆变器采用式(2)的下垂曲线,阻抗大的线路,输出无功功率小。而式(20)则表明在下垂系数中引入无功功率,能反向调节下垂系数,减小多台逆变器之间的无功偏差。

其次,基于阻抗复合控制下垂方法所提出的有功功率和无功功率的微分控制环路,可改善其动态性能,提高有功功率和无功功率的动态分配性能。

以上分析可知,下垂系数 n 越大,两台 VSI 能更好地分配无功功率,但随着下垂系数 n 的增大,稳态电压控制精度受到威胁^[10]。因此下垂系数的选取应满足如下约束条件:

$$(n + K_{qli} |Q_{max}| - \frac{X_i}{E^*}) Q_{max} \leq 2\% \Delta_{max} \quad (22)$$

式中, Q_{max} 为 VSI 能输出的最大无功功率;

在感性条件下,可近似认为有功无功解耦,因此可单列出无功功率对电压跌落的传递函数:

$$\frac{Q}{E^* - U} = \frac{(\frac{K_p}{n_i} + 1)s + \frac{K_i}{n_i}}{\frac{X_i}{U}s^2 + (n_i + \frac{X_i}{U} + K_p)s + K_i} \quad (23)$$

由于下垂系数增大会导致系统稳定性变差^[11], n 的设计应满足稳定性要求,即

$$Re(s_i) < -5 \quad (24)$$

3 仿真实验

为验证前面提出控制策略的正确性和可行性,建立 3 台 VSI 并联组网的微网系统,如图 4 所示。其中 VSI 1 和 VSI 2 的容量均为 10 kW, VSI 3 的容量为 20 kW。

图 4 中, VSI 1 的虚拟阻抗为 $Z_{v1} = R_{v1} + jX_{v1} = 0.2 + j1.885$, 线路阻抗为 $Z_{l1} = R_{l1} + jX_{l1} = 0.1 + j0.628$; VSI 2 的虚拟阻抗为 $Z_{v2} = R_{v2} + jX_{v2} = 0.2 + j1.570$, 线路阻抗为 $Z_{l2} = R_{l2} + jX_{l2} = 0.15 + j0.785$; VSI 3 的虚拟阻抗为 $Z_{v3} = R_{v3} + jX_{v3} = 0.2 + j2.513$, 线路阻抗为 $Z_{l3} = R_{l3} + jX_{l3} = 0.2 + j0.314$ 。初始时刻, 负荷 $Z_{load} = R_{load} + jX_{load} = 1.6 + j0.628$, 在 $t = 0.4$ s 时, 突加 $6.66 + j2.095$ 阻感性负荷, 得到 3 台 VSI 的下垂系数, 如表 1 所示。

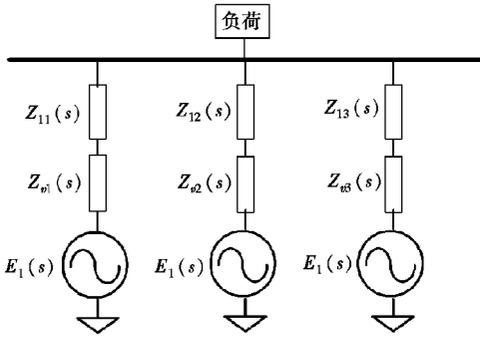


图4 仿真系统框图

Fig.4 Block diagram of simulation system

表1 仿真参数配置表

Table 1 Configuration table of simulation parameters

逆变器	m	n	K_q	k_{p1}	k_{p2}	k_{q1}	k_{q2}
1#	1E-5	2E-4	2.5E-8	-1.4E-8	-1.21E-5	-3.5E-8	3.1E-6
2#	1E-5	2E-4	2.1E-8	-4.8E-8	-1.86E-5	-1.81E-8	4.56E-6
3#	0.5E-5	1E-4	1.3E-8	-5.5E-8	-0.9E-5	-2.25E-8	2.24E-6

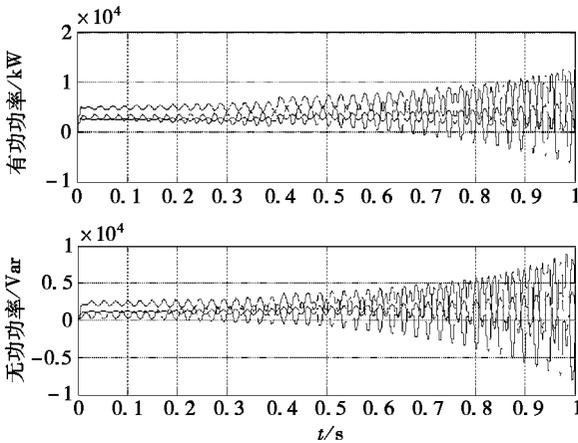


图5 传统下垂控制下的系统响应

Fig.5 System response under traditional droop control

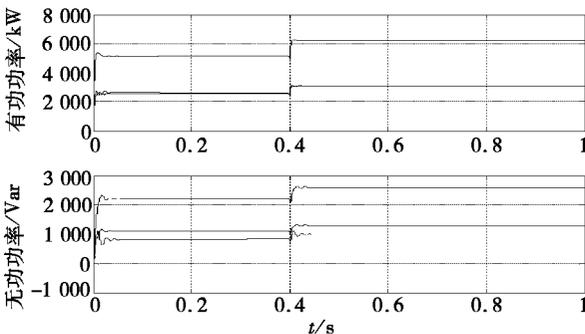


图6 采用暂态下垂的有功无功波形

Fig.6 Active and reactive waveforms using transient droop

图5给出了使用传统下垂控制的有功功率和无功功率响应。由图5可以看出系统功率响应出现大幅超调且趋向不稳定,体现了阻抗不匹配对系统性能的影响。

图6为采用动态下垂项进行控制的有功功率和无功功率输出波形。由图6可以看出:动态下垂改善了系统的动态特性,消除了阻抗不匹配引起的功率超调,使得系统趋于稳定;但是,由于阻抗不一致,无功功率不能按照功率等级进行均分,动态下垂项无法消除稳态的无功功率偏差。

图7为加入基于阻抗复合控制的控制器后有功功率和无功功率的输出波形。由图7可以看出:其中的动态下垂项优化了系统的动态特性,而稳态下垂项消除了阻抗不一致引起的无功功率不平衡,使得无功功率按照功率等级进行分配。

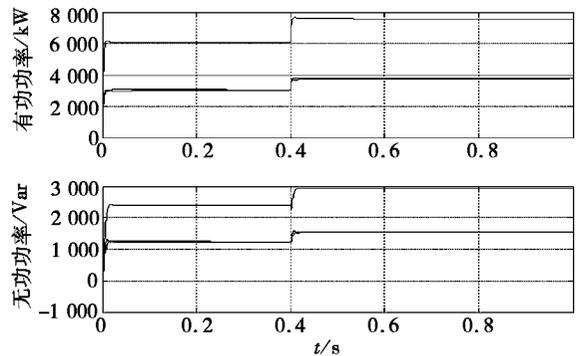


图7 采用所提出控制策略的有功无功波形

Fig.7 The active and reactive waveform of the proposed control strategy is adopted

4 结论

(1)分析了下垂策略中有功、无功的合理分配对逆变器的输出阻抗以及连接线阻抗的匹配要求,揭示了常规下垂控制的局限性。

(2)在上述理论分析的基础上,提出了一种新型下垂控制方法。该方法加入了适用于4个象限运行的开环补偿项、稳态补偿项以及闭环补偿项,不仅优化了系统的动态特性,而且消除了阻抗

不一致引起的无功功率不均衡,使得无功功率按照功率等级进行分配。

(3)通过仿真验证证明了该方法的有效性和可行性。

参考文献:

- [1] Rocabert J, Luna A, Blaabjerg F, et al. Control of Power Converters in AC Microgrids[J]. IEEE Transaction on Power Electronics, 2012, 27(11): 4 734-4 749.
- [2] 王成山,李鹏. 分布式发电、微网与智能配电网的发展与挑战[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(2): 10-14.
- [3] Guerrero J M, Matas J, Garcia De Vicunagarcia De Vicuna L, et al. Wireless - control strategy for parallel operation of distributed generation inverters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2006, 53(5): 1 461-1470.
- [4] Guerrero J M, Vasquez J C, Matas J, et al. Control Strategy for Flexible Microgrid Based on Parallel Line-Interactive UPS Systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(3): 726-736.
- [5] 王成山,高菲,李鹏,等. 低压微网控制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(25): 2-8.
- [6] Lee C T, Chu C C, Cheng P T. A new droop control method for the autonomous operation of distributed energy resource interface converters[J]. IEEE Transactions on Power Elec - tronics, 2013, 28(4): 1 980-1 993.
- [7] 周贤正,荣飞,吕志鹏,等. 低压微电网采用坐标旋转的虚拟功率 V/f 下垂控制策略[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(2): 47-51.
- [8] He J, Li Y W, Guerrero J M, et al. An islanding microgrid power sharing approach using enhanced virtual impedance control scheme[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(11): 5 272-5 282.
- [9] 夏道止. 电力系统分析[M]. 2 版. 北京:中国电力出版社, 2006: 157.
- [10] 阚志忠,张纯江,薛海芬,等. 微网中三相逆变器无互连线并联新型下垂控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(33): 68-74.
- [11] 张尧,马皓,雷彪,等. 基于下垂特性控制的无互连线逆变器并联动态性能分析[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(3): 42-48.

A Droop Control Method Suitable for Low Voltage Micro-grids

XU Mei

(Department of Electrical and Mechanical Engineering, Huainan Union University, Huainan Anhui 232038, China)

Abstract: Because the traditional droop control method has some limitations in micro-grid control, a droop control method based on impedance compound control is proposed. According to the active and reactive power output, the droop coefficient can be changed dynamically in real time, and the mismatch of the line impedance is eliminated by using the dynamic variable coefficient and the transient variation coefficient method. The open loop and the closed loop are used to compensate the voltage drop caused by the virtual impedance. The voltage drop caused by the virtual impedance is avoided while correcting the output impedance. The dynamic and steady-state equipartition characteristics of reactive power are improved. Finally, the feasibility of the proposed control algorithm is verified by Matlab/Simulink software simulation.

Keywords: micro-grid; droop control; impedance matching; self-adaption

(责任编辑:李华云)