基于虚拟阻抗的微电网有功均分阻性下垂控制策略

耿英明,侯梅毅,朱国防,刘 洋,于 昊,呼延天亮 (山东大学 电气工程学院,山东 济南 250061)

摘要:低压微电网中连接线参数不等使得并联逆变器输出功率存在偏差。针对低压微电网的线路特性,忽略 线路电抗后采用阻性下垂控制方法实现功率解耦,同时增加虚拟负感抗抵消逆变器的等效输出感抗,进一步 提高功率解耦控制的准确性。在此基础上,提出了一种基于本地信息的自适应虚拟电阻控制方法以减小有 功偏差,利用本地逆变器输出的有功功率和电压作为馈入信号自适应地调节虚拟电阻取值,通过有功功率偏 差方程揭示了其作用机理,并利用小信号稳定性分析对虚拟电阻系数的取值进行了优化设计。在仿真和实 验平台中与已有控制策略进行对比,结果表明所提控制策略能够在提高有功均分精度的同时减小电压降,无 需通信系统更有利于实现微电网的"即插即用"。

关键词:低压微电网;阻性下垂控制;自适应虚拟电阻;虚拟负感抗;有功分配

中图分类号:TM 464;TM 761

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202008021

0 引言

微电网是一种将分布式电源、储能系统、负载结 合在一起的微型电力网络,可以运行于孤岛、并网2 种工作模式^[1]。微电网中分布式电源一般采用恒压 恒频控制、有功无功控制和下垂控制,其中下垂控制 模拟了传统同步发电机的功频特性曲线,无需通信 即可自动完成并联逆变器的功率分配,有利于实现 微电网的"即插即用"功能^[2]。

在含有多个逆变器并联运行的低压微电网中, 由于各微源逆变器地理位置的随机性,各条线路阻 抗并不相等且很难测量,采用下垂控制的逆变器不 能完全依照设定的容量分配功率,将导致部分微源 过载、储能电池过放等问题,甚至对系统的稳定运行 产生影响。文献[3-4]提出由中央控制器采集微源 的输出功率或电压等信息量,再对各微源进行功率 均分控制,但该方式对通信和中央控制器的要求较 高,会降低系统的可靠性。文献[5-7]采用分布式控 制仅在相邻微源间进行信息交互,减少对中央控制 器的依赖,但环形通信需要冗余链路以提高系统稳 定性,建设成本较高。

以上文献需要结合同步通信手段获取逆变器输 出功率和母线电压数据,不利于微电网"即插即用" 功能的实现,并且存在通信延迟等问题,降低了整个 系统的可靠性。因此有文献提出不增加通信机制, 仅利用本地信息量减少功率分配的偏差。文献[8] 提出在较短时间尺度内增大下垂系数以提高功率均 分精度,但为了达到目标均分效果,采用较大的下垂 系数会导致电压降越限,降低了电能质量,仍需增加

收稿日期:2020-02-07;修回日期:2020-06-19

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51877126)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51877126)

有通信的二次调节以恢复电压。文献[9]提出了一种无功-电压下垂控制方法,将逆变器出口电压变化率的积分值作为下垂控制变量,以提高功率分配精度,但引入积分值会降低系统的响应速度,并会受到初始条件的影响。文献[10]采用递推法在每个采样周期内对输出电压重新修正,逐步减小功率偏差,但该控制方法也会导致较大电压跌落,并且负荷波动时所需调节时间过长,影响系统运行稳定性。综上所述,基于无通信的下垂改进型控制策略虽然已有一些解决方案,但不易协调功率均分精度与较大电压跌落值之间的矛盾。

此外,低压微电网的线路电阻远大于电感,解耦 控制中电阻不能被忽略,因此传统的感性下垂控制 并不完全适合^[11-12]。为了实现功率的解耦控制策 略,文献[13-14]引入虚拟阻抗使线路阻抗呈感性, 但运行时线路参数未知给虚拟阻抗的取值带来困 难。文献[15-16]针对低压线路阻性的特征,采用阻 性下垂控制策略,但由于逆变器等效感抗的存在,依 然会对解耦控制产生影响。

针对上述问题,本文提出了一种无通信的自适 应虚拟阻抗控制方法,保证了微电网的"即插即用" 功能,在引入有功功率反馈的基础上,端电压也作为 控制量生成虚拟阻抗,并通过合理选择阻抗系数可 以在满足均分效果的基础上,减小系统电压降;同时 根据低压微电网线路特征,采用阻性下垂控制策略, 增加虚拟负感抗降低逆变器等效输出阻抗中的感性 成分,提高了功率解耦控制的准确性。最后通过仿 真与实验验证了所提出方案的有效性。

1 低压微电网功率传输特性分析

1.1 低压微电网下垂控制策略

图1为简化的多逆变器并联运行的低压微电

网结构。图中,将逆变器等效为有内阻的电压源, E_i (*i*=1,2,…)、 U_{PCC} 分别为第*i*个微源 DG_i的输出电压 和母线电压的幅值; δ_i 为 DG_i输出电压和母线电压 间相位差; P_i 、 Q_i 分别为 DG_i输出的有功功率和无 功功率; Z_{ai} 为 DG_i的等效输出阻抗; Z_{II} 为 DG_i至公 共母线的线路阻抗, $Z_{II} = R_{II} + jX_{II}$ 。设 Z_i 为总阻抗, $Z_i = Z_{ai} + Z_{II}$ 。



图1 微电网等效模型

Fig.1 Equivalent model of microgrid

在低压微电网中线路阻抗主要呈电阻特性,通 常情况下 δ_i 很小,即 $\cos \delta_i \approx 1$ 、 $\sin \delta_i \approx \delta_i$,DG_i输出功 率可简化表示为:

$$P_i = \frac{E_i (E_i - U_{\text{PCC}})}{R_{\text{L}i}} \tag{1}$$

$$Q_i = -\frac{E_i U_{\text{PCC}}}{R_{\text{L}i}} \delta_i \tag{2}$$

由式(1)和式(2)可以看出,线路传输的有功功 率主要由线路两端的电压幅值决定,而无功功率则 主要取决于线路两端电压的相位差。由于线路阻抗 特性的不同,低压微电网与传统电网中的功率传输 特性有很大不同。基于式(1)和式(2)在低压微电网 中可以采用有功-电压、无功-频率控制方法,即:

$$E_{i} = E_{ref} - k_{pi} (P_{i} - P_{i}^{*})$$
(3)

$$f_i = f_{\rm ref} - k_{qi} \left(Q_i^* - Q_i \right) \tag{4}$$

其中, E_{ref} 、 f_{ref} 分别为逆变器的电压、频率参考值; P_i^* 、 Q_i^* 分别为DG_i的有功、无功功率参考值; k_{pi} 、 k_{qi} 分别 为DG_i的电压、频率下垂系数, $k_{pi} = (E_{max} - E_{min})/P_{max}$, $k_{qi} = (f_{max} - f_{min})/Q_{max}$, E_{max} 、 E_{min} 和 f_{max} 、 f_{min} 分别为电压 和频率的上、下限值, P_{max} 、 Q_{max} 分别为逆变器输出的 最大有功功率、最大无功功率。

1.2 线路阻抗差异对有功功率分配的影响

当孤岛微电网稳定运行时,各微源逆变器的运行频率一致,因此与频率相对应的无功功率可以实现准确的分配。但由于各微源到母线处的馈线阻抗不相等,导致其输出电压E_i并不统一,使得并联的微源无法按照其下垂系数成比例地分配有功功率。

在低压微电网中,微源的输出电压与母线电压 的关系可以表示为:

$$E_i = U_{\text{PCC}} + \frac{P_i R_{\text{L}i} + Q_i X_{\text{L}i}}{E_i} \approx U_{\text{PCC}} + \frac{P_i}{E_i} R_{\text{L}i} \qquad (5)$$

再结合式(3)所示有功-电压下垂控制曲线,得 到在不同的下垂系数和线路阻抗下,2个并联微源 的有功-电压特性曲线,如图2所示。图中, S_1 、 S_2 分 别为电压下垂系数为 $k_{\mu 1}$ 、 $k_{\mu 2}$ 的曲线;DG_j为第*j*个微 源,相对于DG_i所对应的线路阻抗较大。由图2可 知,DG_i的逆变器端电压 $E_i < E_j$,但其输出有功功率 P_i 要大于 P_j 。根据点A、点B,下垂系数较大时,2个微 源的有功功率偏差会相对较小,但较大的下垂系数 会造成电压偏离较大甚至会超出规定限值;而由点 C、点D可知,在下垂系数较小的情况下,2个微源的 有功功率偏差较大,容易导致微电网运行不稳定。



图 2 并联微源的有功-电压特性曲线 Fig.2 Active power-voltage characteristic curves of paralleled DGs

设 λ_i 为DG_i的输出电压 E_i 与母线电压 U_{PCC} 的比值,将式(3)代入式(1),可得:

$$P_{i} = \frac{U_{\text{PCC}}(E_{\text{ref}} + k_{pi}P_{i}^{*} - U_{\text{PCC}})}{R_{\text{L}i}/\lambda_{i} + k_{pi}U_{\text{PCC}}}$$
(6)

为实现负荷的比例分配,微电网中各微源的下 垂系数与有功功率参考值设置应满足 $k_{\mu}P_i^* = k_{\mu}P_j^*$ 。 由式(6)可以看出逆变器输出的有功功率受参数 R_{Li} 与 λ_i 的影响,考虑下垂系数加权后的有功功率偏 差为:

$$\Delta P = \frac{k_{pi}P_i - k_{pj}P_j}{k_{pi}P_i} = \frac{\lambda_i k_{pi} R_{Ij} - \lambda_j k_{pj} R_{Ii}}{\lambda_i k_{pi} (R_{Ij} + k_{pj} \lambda_j U_{PCC})} \quad (7)$$

由式(7)可知,只有当满足 $R_{Li}/R_{Lj} = \lambda_i k_{pi}/(\lambda_j k_{pj})$ 时,功率偏差 ΔP 才完全消除,各微源逆变器能够按 照其额定容量成比例地分配有功功率。但微电网实 际运行中,线路阻抗未知且很难精确测量,无法达到 该理想情况。

2 自适应虚拟阻抗控制策略

根据上述分析,由于线路阻抗的不匹配导致有 功功率无法实现准确的分配。通过引入自适应虚拟 电阻补偿法,可以改变并联线路的等效阻抗,使各微 源能够按照下垂系数成比例地分配有功功率,减少 功率偏差。

本文提出了一种无需通信的自适应虚拟阻抗控 制方法。将有功功率和逆变器端电压共同引入虚拟 电阻的控制中,解决功率分配精度与电压跌落之间 的矛盾。虚拟电阻取值为:

$$R_{v} = k_{i} P_{i} / E_{i}$$
(8)
其中, k 为 DG 的 虑 拟 由 阳 系 数 . 单 位 为 Ω / A。

将式(8)代入式(7),可得引入虚拟电阻后的功 率偏差为:

$$\begin{cases} \Delta P' = \frac{k_{pi}P_{i} - k_{pj}P_{j}}{k_{pi}P_{i}} = \\ \frac{\lambda_{i}k_{pi}(R_{1j} + k_{j}P_{j}/E_{j}) - \lambda_{j}k_{pj}(R_{1i} + k_{i}P_{i}/E_{i})}{\lambda_{i}k_{pi}(R_{1j} + k_{j}P_{j}/E_{j} + k_{pj}\lambda_{j}U_{PCC})} = \\ \Delta P'_{1} + \Delta P'_{2} \tag{9} \end{cases}$$

$$\Delta P'_{1} = \frac{\lambda_{i}k_{pi}R_{1j} - \lambda_{j}k_{pj}R_{1i}}{\lambda_{i}k_{pi}(R_{1j} + k_{j}P_{j}/E_{j} + k_{pj}\lambda_{j}U_{PCC})} \\ \Delta P'_{2} = \frac{\lambda_{i}k_{pi}k_{j}P_{j}/E_{j} - \lambda_{j}k_{pj}k_{i}P_{i}/E_{i}}{\lambda_{i}k_{pi}(R_{1j} + k_{j}P_{j}/E_{j} + k_{pj}\lambda_{j}U_{PCC})} \end{cases}$$

对比式(9)与式(7)可知, $\Delta P'_1$ 与原始的功率偏差相近,但由于增加虚拟电阻,其值稍小于原始功率偏差。虚拟电阻的引入对功率偏差的影响主要体现在 $\Delta P'_2$ 上,下面结合图2对其进行分析。

为简化分析,假设2个微源的容量和下垂系数相等,2个虚拟电阻系数的取值相同, $k = k_i = k_j$, DG_i的线路阻抗小于DG_j的线路阻抗。根据第1节分析可知,当 $R_{Li} < R_{Lj}$ 时, $P_i > P_j$, $E_i < E_j$, $\lambda_i < \lambda_j$,此时 $\Delta P'_2$ 为负值,抵消了功率偏差 $\Delta P'_1$,使得 $\Delta P' < \Delta P$,则该控制方法能够减小功率偏差。理想情况下,增加虚拟电阻后,图2中原本稳定运行于点C、点D的微源沿下垂曲线移动,虚线为移动后的两微源的电压降曲线,最终两微源在点M达到功率均分的运行状态, P_x 、 E_x 分别为增加虚拟电阻后两微源输出的有功功率、电压。实际运行时通过合理选择系数 k_i ,可以改善电压偏差幅度,使得微源逆变器有功功率的偏差减小,达到目标输出精度。

低压微电网的线路呈电阻特性,但考虑到逆 变器的滤波电感和控制系统,系统的等效输出阻抗 依然含有较大的感性成分,这在一定程度上会影响 功率解耦控制的准确性。为了减小系统感抗对低压 微电网阻性下垂控制的影响,提出增加虚拟负感抗 以降低系统的等效感抗,使系统等效输出阻抗呈电 阻特性。加入虚拟负感抗后虚拟阻抗的表达式为 $Z_x = R_x - jX_x, -X_x$ 为虚拟负感抗。

自适应虚拟阻抗补偿控制结构如图3所示。图中, i_a 、 i_b 、 i_c 为三相电流。虚拟电阻值由式(8)得到, 虚拟负感抗的取值见第3节。对逆变器出口测量得 到的三相电流进行派克变换,得到电流的d、q轴分 量 I_{od} 、 I_{oq} ,根据式(10)可以得到虚拟补偿电压的d、q轴分量 U_{dv} 、 U_{qv} ,结合q轴的电压参考值 U_q^* 和下垂控 制得到的电压参考值 E_i^* ,最终可以得到在dq坐标系 下的输出电压参考值 U_{ad}^* 、 U_{aq}^* 。



图3 自适应虚拟阻抗补偿控制框图



$$U_{dv}, U_{qv}$$
的计算公式为:

$$\begin{bmatrix} U_{dv} \\ U_{qv} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{v} & X_{v} \\ -X_{v} & R_{v} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{od} \\ I_{oq} \end{bmatrix}$$
(10)

自适应虚拟阻抗的引入改变了并联线路的等效 电阻,从而降低了有功功率的偏差;其等效输出感抗 减小,降低了功率耦合,提高了控制精度。

3 自适应虚拟阻抗补偿控制器设计和稳定 性分析

本文所提出的自适应虚拟阻抗补偿控制中,虚 拟电阻、负感抗的取值将分别对系统的稳定性、解耦 控制产生影响,因此下文对逆变器的等效输出阻抗 和小信号稳定性进行分析,为参数优化提供理论 依据。

3.1 小信号稳定性分析

本节重点讨论*R*,的取值对系统稳定性的影响。 对所提出控制策略进行小信号稳定性分析,将虚拟 电阻*R*,作为控制变量,将式(1)和式(2)的功率模型 线性化得到小信号动态模型:

$$\Delta P(s) = \frac{\mathrm{d}P}{\mathrm{d}R_v} \Delta R_v(s) + \frac{\mathrm{d}P}{\mathrm{d}\delta} \Delta \delta(s) = k_{pr} \Delta R_v(s) + k_{p\delta} \Delta \delta(s)$$
(11)
$$\Delta Q(s) = \frac{\mathrm{d}Q}{\mathrm{d}R_v} \Delta R_v(s) + \frac{\mathrm{d}Q}{\mathrm{d}\delta} \Delta \delta(s) =$$

$$k_{qr}\Delta R_{v}(s) + k_{q\delta}\Delta\delta(s) \tag{12}$$

其中, k_{μ} 和 k_{μ} 分别为有功功率对电阻和相位的微分量; k_{μ} 、 k_{μ} 分别为无功功率对电阻和相位的微分量; " Δ "为各变量对应的偏差量。

由于功率的测量计算经过了一阶滤波器,将虚 拟阻抗和下垂方程线性化,可得:

$$\Delta\omega(s) = 2\pi k_{ai} \Delta Q(s) / (Ts+1)$$
(13)

$$\Delta R_{v}(s) = k_{i} \Delta P(s) / \left[E_{i} (Ts+1) \right]$$
(14)

$$\Delta\delta(s) = \Delta\omega(s)/s \tag{15}$$

其中,ω为角频率;T为滤波器的时间常数。 结合式(11)—(15) 可得,

$$a_0 s^3 + a_1 s^2 + a_2 s + a_3 = 0 \tag{16}$$

$$a_0 = T^2 E_i \tag{17}$$

$$a_1 = 2TE_i - k_i k_{pr} T \tag{18}$$

$$a_2 = E_i - k_i k_{pr} - 2\pi T E_i k_{qi} k_{q\delta}$$
(19)

$$a_{3} = 2\pi k_{i} k_{qi} (k_{q\delta} k_{pr} - k_{p\delta} k_{qr}) - 2\pi k_{qi} k_{q\delta} E_{i}$$
(20)

根据式(16)可得虚拟电阻系数变化时的根轨 迹,如图4所示。图中, ξ_1 、 ξ_2 、 ξ_3 为特征根。当 k_i 由 0.01 Ω/A增加到2 Ω/A时,根轨迹都在负实轴侧, 系统能够保持稳定。随着 k_i 增大即虚拟电阻的增 加,共轭特征根 ξ_2 、 ξ_3 的虚部减小,系统阻尼增加,超 调量减小。然而过大的虚拟电阻使得特征根 ξ_3 ,趋近 虚轴为0的直线,系统稳定性变差,但实际运行时电 压限值会优先限制所能增加的虚拟电阻最大值,保 证系统运行在稳定域内。因此综合考虑系统稳定运 行域和电压限值, k_i 的取值应不大于0.3 Ω/A。





3.2 逆变器等效输出阻抗

引入虚拟阻抗后,对逆变器的等效输出阻抗进 行分析,着重对比了虚拟负感抗的不同取值对等效 输出阻抗的影响。

逆变器采用电感电流 i_{L} 反馈的双环控制结构, 并结合自适应虚拟阻抗补偿控制,其控制框图如图 5所示。双环控制结构包括电压外环和电流内环控 制,电压外环控制可以保证系统稳定运行时的计算 精度,电流内环可以提高系统的响应速度。图中, k_{up},k_{ui} 分别为电压外环的比例、积分系数; k_{ip} 为电流 内环的比例系数; k_{PWM} 为逆变器增益; R_{f}, L_{f}, C_{f} 分别 为LC滤波电路的串联电阻、滤波电感、滤波电容; i_{c} 为电容电流; i_{o}, u_{o} 分别为逆变器输出的电流、电压; i_{ref}, u_{ref} 分别为逆变器输出的电流、电压;



图5 引入虚拟阻抗的逆变器结构图

Fig.5 Block diagram of inverter with virtual impedance

$$u_{o} = G_{u}(s)u_{ref} - (G_{u}(s)Z_{v}(s) + Z_{0}(s))i_{o} = G_{u}(s)u_{ref} - Z_{inv}(s)i_{o}$$
(21)

$$G_{u}(s) = \frac{G_{vc} h_{ip} h_{PWM}}{s^{2} L_{f} C_{f} + s C_{f} (R_{f} + k_{ip} k_{PWM}) + G_{vc} k_{ip} k_{PWM} + 1}$$
(22)

$$Z_{0}(s) = \frac{sL_{\rm f} + R_{\rm f} + k_{ip}k_{\rm PWM}}{s^{2}L_{\rm f}C_{\rm f} + sC_{\rm f}(R_{\rm f} + k_{ip}k_{\rm PWM}) + G_{\rm ve}k_{ip}k_{\rm PWM} + 1}$$
(23)

其中, $Z_0(s)$ 为不加虚拟阻抗时的等效输出阻抗; $G_u(s)$ 为系统增益; $Z_{inv}(s)$ 为增加虚拟阻抗后的等效 输出阻抗; $G_{vc}(s) = k_{up} + k_{ui}/s$ 为电压外环的比例积分 控制传递函数。

主要控制参数见附录表A1,根据式(22),可以 得到等效输出阻抗的幅频特性曲线,如图6所示。 在没有虚拟阻抗的情况下,逆变器初始阻抗在基 频处的幅值为9.2 dB,相位为59°,输出阻抗的感 性较强。在增加虚拟电阻 R_v =1.5 Ω后,输出阻抗的 基频增益增加到10.7 dB,并由于电阻增加,相位减 小到33.2°,但系统等效输出感抗依然较大。在虚拟 电阻 R_v =1.5 Ω的基础上增加虚拟负感抗分别为0、 -0.314、-0.628 Ω,等效输出阻抗的幅频特性如图6 箭头所示方向变化,可以看出随着虚拟负感抗的增 加,基频增益和相位都会有所减小。在虚拟负感抗 取值为-0.628 Ω时,输出阻抗的基频增益降为6.3 dB,相位减小到11.8°。







通过上述分析可知,增加虚拟负感抗后可以减 小系统的等效输出感抗,从而提高功率解耦控制准 确性;而且在增加虚拟负感抗以后,基频增益降低, 即等效输出阻抗降低,能够减小电压降,提高系统的 稳定性。

4 仿真和实验验证

4.1 仿真分析

为了验证本文所提出的自适应虚拟阻抗策略的 可行性,在MATLAB/Simulink中搭建微电网系统 仿真模型,设计2台容量相等的微源逆变器并联运 行,微电网仿真参数见附录表A1和表A2,2台逆变 器的控制参数相同,仅线路阻抗不等。

4.1.1 案例1(对比传统下垂控制策略)
 当t∈[0,0.5)s时采用传统下垂控制策略,当t∈

[0.5,2] s时采用本文提出的自适应虚拟阻抗控制策略。0.5 s前微电网带负载1和负载2运行;0.5 s时在 负载未变的情况下采用本文提出的自适应虚拟阻抗 控制策略,以验证本文控制策略是否能够有效减小 有功功率偏差;微电网在1 s时切除负载2,在1.5 s时投入负载3运行,验证本文所提出的自适应虚拟 阻抗在负载波动时是否仍具有有效性。

仿真波形如图7所示。图中,*i*₁、*i*₂和*R*_{v1}、*R*_{v2}分别为DG₁、DG₂相电流和虚拟电阻,*U*_{PCC}为标幺值,后同。



图7 案例1仿真结果

Fig.7 Simulative waveforms of Case 1

根据图7可得如下结论。

(1)在 0.5 s前由于馈线阻抗的差异,微源逆变 器输出的有功功率存在较大偏差,DG₁、DG₂输出的 有功功率分别为2.08、2.91 kW。在 0.5 s以后由于增 加了虚拟阻抗,2 台逆变器的有功功率偏差明显减 小,DG₁、DG₂输出的有功功率分别为2.33、2.48 kW,2 台逆变器间的功率偏差减小到6.23%,在随后负载 功率发生波动时,所提出的控制方法依然能够使有 功偏差维持在较小值,功率分配偏差分别为8.46%、 5.40%。

(2)DG₁、DG₂输出的无功功率在整个仿真过程 中完全相等,增加虚拟阻抗不会对其产生影响。

(3)由DG₁、DG₂的虚拟电阻变化曲线可知,采用 传统下垂控制时,虚拟电阻为0。0.5 s后随着负荷 的变化虚拟电阻会相应地发生改变,DG₁的线路阻 抗较大但*R*_{x1} < *R*_{x2},从而补偿了线路电阻的差异。

(4)0.5 s后引入本文所提出的自适应虚拟阻抗导致了系统压降增大,由采用传统下垂控制策略时的0.994 p.u.降低至0.978 p.u.,在1.5 s后微电网带负载1和负载3运行时,系统电压最低为0.97 p.u.,通

过选取合理的虚拟电阻,电压偏差不会超出系统规定,保证了系统稳定运行。

(5)由 DG₁、DG₂相电流的变化可知,0.5 s前,采 用传统下垂控制策略时,相电流幅值差为1.5 A,0.5 s 后 DG₁、DG₂相电流基本相等,这也验证了所提控制 方法的有效性。

4.1.2 案例2(对比已有改进控制策略)

选取文献[7]作为对照,为了达到相近的功率均 分效果,案例2仿真的有功下垂系数为 $k_{p1} = k_{p2} = 7 \times 10^{-3}$ V/W,电压等其余参数设置与案例1完全相 同,见附录表A1和表A2。仿真时长为1.5 s,负载波动 过程与案例1相同。仿真结果见附录图A1。

当 $t\in[0,0.5)$ s时, DG₁、DG₂输出的有功功率分 别为2.23、2.4 kW, 有功功率偏差控制在7.2%, 在负 载波动后, 有功偏差控制在7%左右, 与案例1中有 功功率分配精度相近。

对比案例1中 U_{PCC} 波形和图A1(b),图A1(b) 中, $t\in[1,1.5)$ s时微电网带负载1和负载3运行,系 统电压降至0.937 p.u.,明显低于本文所提控制策略 的系统电压0.97 p.u.,可以看出本文所提出的自适 应虚拟阻抗引入端电压作为控制量后,可以在满足 均分效果的基础上控制电压降在更小范围内。

4.2 实验验证

基于RTDS平台搭建的实验系统见附录图A2。采用TMS320F28335作为逆变器主控制芯片,使用KEYSIGHT Infiniivision DSOX4024A示波器进行录波。在RSCAD中搭建了微电网的电路部分,运行时的电压、电流数据经过GTAO板卡输送到DSP控制芯片中,本文的控制策略由DSP控制器实现,其调制的PWM控制信号由GTDI板卡送入RTDS中控制逆变器的运行。滤波电感、滤波电容和线路阻抗参数如前所述。微电网有功负荷为15kW,无功负荷为5kvar。

应用本文所提出的改进下垂控制策略的实验结 果见附录图 A3。由图 A3(a)可知,传统下垂控制策 略下 DG₁、DG₂的输出功率分别为 5.2、9.6 kW,在增 加自适应虚拟阻抗以后,DG₁、DG₂的输出功率分别 变为 6.3、6.6 kW,DG₁、DG₂的功率偏差由 59.46%降 低至 4.65%,表明了采用该虚拟阻抗控制方法可以 获得很好的功率均分效果。图 A3(b)为下垂控制策 略切换时相电流变化的波形,在切换到本文所提出 的控制策略后两微源的相电流基本一致,大幅减小 了电流环流。这验证了本文所提出的改进控制策略

5 结论

在含有多个并联微源的低压微电网系统中,传 统下垂控制策略会因线路阻抗不等而存在输出功率 的偏差。本文采用适合低压微电网的阻性下垂控制,提出了一种无需通信的自适应虚拟阻抗控制方法并得出如下结论:

(1)虚拟负感抗能够减小逆变器的等效输出感 抗,在阻性下垂控制中提高功率解耦控制的准确性;

(2)本文所提出的自适应虚拟电阻能够解决线路参数不一致问题,减小并联逆变器有功功率的偏差,无需通信机制,并且引入电压作为虚拟电阻优化量,降低了电压的偏移程度。

最后通过仿真与实验验证了本文所提控制策略 的有效性。虽然本文提出的自适应虚拟阻抗补偿控 制方法能够在满足功率均分精度的基础上减小电压 降,但是采用二次调节进一步减小电压偏移程度的 控制有待进一步研究。

附录见本刊网络版(http://www.epae.cn)。

参考文献:

[1] 王成山,武震,李鹏. 微电网关键技术研究[J]. 电工技术学 报,2014,29(2):1-12.

WANG Chengshan, WU Zhen, LI Peng. Reseach on key technologies of microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2):1-12.

- [2] 韦佐霖,陈民铀,李杰,等. 孤岛微网中分布式储能 SOC 和效率 均衡控制策略[J]. 电力自动化设备,2018,38(4):169-177.
 WEI Zuolin, CHEN Minyou, LI Jie, et al. Balancing control strategy of SOC and efficiency for distributed energy storage in islanded microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment,2018,38(4):169-177.
- [3]郑连清,庄琛,马世强,等.微电网改进负荷功率分配策略与并 网稳定性分析[J].电力自动化设备,2015,35(4):17-23.
 ZHENG Lianqing, ZHUANG Chen, MA Shiqiang, et al. Improved load power allocation strategy for microgrid and gridconnection stability analysis[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(4):17-23.
- [4] HU Y L, XIANG J, PENG Y G, et al. Decentralised control for reactive power sharing using adaptive virtual impedance
 [J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2017, 12(5): 1198-1205.
- [5]郭倩,林燎源,武宏彦,等.考虑自适应虚拟阻抗的微电网分布 式功率控制策略[J].电力系统自动化,2016,40(19):23-29.
 GUO Qian,LIN Liaoyuan,WU Hongyan, et al. Distributed power control strategy for microgrids considering adaptive virtual impedance[J]. Automation of Electric Power Systems,2016,40 (19):23-29.
- [6]肖湘宁,王鹏,陈萌.基于分布式多代理系统的孤岛微电网二次电压控制策略[J].电工技术学报,2018,33(8):1894-1902.
 XIAO Xiangning, WANG Peng, CHEN Meng. Secondary voltage control in an islanded microgrid based on distributed multiagent system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018,33(8):1894-1902.
- [7]余志文,艾芊.基于多智能体一致性的微电网自适应下垂控制策略[J].电力自动化设备,2017,37(12):150-156.
 YU Zhiwen,AI Qian. Adaptive droop control strategy for microgrid based on consensus of multi-agent system[J]. Electric Power Automation Equipment,2017,37(12):150-156.
- [8] 鲍薇,胡学浩,李光辉,等.提高负荷功率均分和电能质量的微

电网分层控制[J]. 中国电机工程学报,2013,33(34):106-114,18.

BAO Wei, HU Xuehao, LI Guanghui, et al. Hierarchical control of microgrid to improve power sharing and power quality [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(34): 106-114, 18.

- [9] 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 Electronics, 2013, 28(4): 1980-1993.
- [10] 孙孝峰,郝彦丛,赵巍,等. 孤岛微电网无通信功率均分和电压恢复研究[J]. 电工技术学报,2016,31(1):55-61.
 SUN Xiaofeng, HAO Yancong, ZHAO Wei, et al. Research of power sharing and voltage restoration without communication for islanded microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(1):55-61.
- [11] 陈达威,朱桂萍.低压微电网中的功率传输特性[J].电工技术学报,2010,25(7):117-122,143.
 CHEN Dawei, ZHU Guiping. Power transmission characteristics of low voltage microgrids[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2010,25(7):117-122,143.
- [12] 陈昕,张昌华,黄琦. 引入功率微分项的并网下垂控制逆变器 小信号建模与分析[J]. 电力自动化设备,2017,37(2):151-156,163.
 CHEN Xin,ZHANG Changhua,HUANG Qi. Small-signal modeling with power differential term for droop control inverter and analysis[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(2):151-156,163.
- [13] DOU C X,ZHANG Z Q,YUE D, et al. Improved droop control based on virtual impedance and virtual power source in low-voltage microgrid[J]. Iet Generation Transmission & Distribution, 2017, 11(4): 1046-1054.
- [14] 张平,石健将,李荣贵,等. 低压微网逆变器的"虚拟负阻抗"控制策略[J]. 中国电机工程学报,2014,34(12):1844-1852.
 ZHANG Ping,SHI Jianjiang,LI Ronggui, et al. A control strategy of 'virtual negative' impedance for inverters in low-voltage microgrid[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(12): 1844-1852.
- [15] 王逸超,谢欣涛,陈仲伟,等.不同容量微网逆变器的自适应虚 拟阻抗运行策略[J]. 电力自动化设备,2018,38(6):29-33.
 WANG Yichao, XIE Xintao, CHEN Zhongwei, et al. Adaptive virtual impedance operation strategy of microgrid inverters with different capacities[J]. Electric Power Automation Equipment,2018,38(6):29-33.
- [16] GUERRERO J M, MATAS J, GARCIA DE VICUNA L, et al. Decentralized control for parallel operation of distributed generation inverters using resistive output impedance[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2007, 54(2):994-1004.

作者简介:



耿荚明(1996—),男,山东泰安人,硕 士研究生,主要研究方向为微电网运行与控 制(E-mail:gymwangyi@163.com);

侯梅毅(1963—),男,山东济南人,副 教授,博士,通信作者,主要研究方向为电力 系统保护与控制、分布式发电与微电网技术 (E-mail:houmeiyi@sdu.edu.cn);

耿英明

朱国防(1975—),男,山东宁阳人,讲师,博士,主要研究方向为配电网自动化、分

布式发电与微电网技术(E-mail:zgfsduee@163.com)。

Resistive droop control strategy of active power distribution for microgrid based on virtual impedance

GENG Yingming, HOU Meiyi, ZHU Guofang, LIU Yang, YU Hao, HUYAN Tianliang

(School of Electrical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract: The output power deviation of paralleled inverters is existed because of the unequal parameters of feeder lines in low-voltage microgrid. According to the characteristics of low-voltage lines of microgrid, after ignoring the line reactance, the resistive droop control strategy is used to realize power decoupling. At the same time, the virtual negative inductive reactance is added to cancel the equivalent output reactance of the inverter, further improving the accuracy of the power decoupling control. On this basis, an adaptive virtual resistance control method based on local information is proposed to reduce the deviation of active power. The value of virtual resistance is adaptively adjusted by using the active power and voltage output from the local inverter as the feeder signal. The function mechanism is revealed by the active power deviation equation, and the value of virtual resistance coefficient is optimized by small signal stability analysis. Compared with the existing control strategies in the simulation and experiment platform, the results show that the proposed control method can improve the accuracy of active power sharing while reducing the voltage drop. And without communication, it is more conducive to realize the "plug and play" of microgrid.

Key words: low-voltage microgrid; resistive droop control; adaptive virtual resistance; virtual negative inductive reactance; active power distribution

(上接第131页 continued from page 131)

XU Dianguo, ZHANG Shuxin, LI Binbin. Flexible primary equipment in power system and their key technologies: applications and prospects[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(7):2-22.

[15] 李子欣,高范强,赵聪,等. 电力电子变压器技术研究综述[J].
 中国电机工程学报,2018,38(5):1274-1289.
 LI Zixin, GAO Fanqiang, ZHAO Cong, et al. Research review

of power electronic transformer technologies[J]. Proceedings of the CSEE,2018,38(5):1274-1289. 作者简介:



李俊杰(1995—), 男, 湖北黄冈人, 硕 士研究生, 主要研究方向为分布式发电与微 电网(E-mail: junjie.seu@outlook.com);

吴在军(1975—),男,江苏南京人,教授,博士研究生导师,主要研究方向为变电站自动化、分布式发电与微网、电能质量分析与控制(E-mail:zjwu@seu.edu.cn)。

(编辑 王欣行)

Adaptive switching strategy of AC / DC hybrid microgrid operating mode based on power electronic transformer

LI Junjie¹, LÜ Zhenyu¹, WU Zaijun¹, LIU Haijun², YANG Shihui²

(1. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. State Grid Global Energy Interconnection Researching Institute Co., Ltd., Beijing 102209, China)

Abstract: According to the real situation that the operation mode switching of AC / DC hybrid microgrid is not timely when fault occurs, an adaptive switching strategy of AC / DC hybrid microgrid operating mode based on power electronic transformers is proposed. Taking the Beijing Chongli Low-carbon Winter Olympics Smart Grid Demonstration Project as the background, the design scheme of AC / DC hybrid microgrid system with dual-end power supply and the control methods of various converters are introduced in detail. On this basis, six typical operation modes are designed, and the steady-state criteria of each operation mode is proposed using the ternary form method, and an adaptive switching strategy of operating mode based on limited communication is proposed. The simulative results show that the proposed adaptive switching strategy of operating mode can automatically switch the proper operation mode under fault conditions according to the preset switching logic, ensuring the reliability of the power supply.

Key words: AC / DC hybrid microgrid; power electronic transformer; adaptive control; mode switching

