

基于动态虚拟阻抗的多并联逆变器间环流抑制控制策略

王俊凯,牟龙华,刘鑫
(同济大学 电气工程系,上海 201804)

摘要:孤岛微电网中基于下垂控制的各分布式电源逆变器并联运行,其参数差异会引发系统环流。为此提出一种基于动态虚拟阻抗的环流抑制策略。首先分析了采用下垂控制的逆变器并联时所产生环流的组成成分,得出无功环流占主导以及线路阻抗不匹配造成无功环流的结论。其次在虚拟阻抗中引入无功反馈项,实现无功精确分配,从而抑制无功环流。通过在电压控制方程中加入电压补偿项以消除线路压降,对传统的下垂控制策略进行改进,进一步抑制无功环流。最后在MATLAB/Simulink中搭建了3台逆变器并联的微电网模型,仿真实验结果表明,动态虚拟阻抗控制策略可以消除线路阻抗的影响,实现逆变器间无功功率的精确分配,解决多并联逆变器间的环流问题。

关键词:并联逆变器;下垂控制;环流分析;动态虚拟阻抗;无功分配

中图分类号:TM 464

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202101034

0 引言

下垂控制技术消除了逆变器并联控制系统对通信线路的依赖,实现了逆变器的“即插即用”。当逆变器输出阻抗呈感性时,其输出有功功率与频率、无功功率与电压幅值间具有线性解耦关系^[1]。在此条件下,逆变器可根据下垂控制方程自主调节输出功率,实现负荷均分,使微电网能够稳定运行。

孤岛运行模式下,各逆变器按照自身额定容量分配微电网中的负荷,采用下垂控制策略即可通过分散式控制方式实现微电网中负荷的自动分配^[2]。但不同额定容量逆变器间的线路阻抗不匹配会造成微电网中的负荷分配不均问题,从而引发环流现象^[3-4]。

环流的存在不仅会影响负荷的均分,降低功率传输效率,而且会造成系统中大量电力电子设备过热损耗,缩短设备寿命使其安全性能降低^[5-6]。因此对孤岛运行模式下的并联逆变器进行环流抑制控制有着非常重要的意义。

为解决环流问题,国内外专家学者在改进传统下垂控制和引入虚拟阻抗这2个方面进行大量研究。文献[7]以阻性微电网为研究对象,采用虚拟负电抗控制以及自适应虚拟电阻的方法,消除了逆变器有功和无功之间的耦合,实现了分布式电源逆变器的“即插即用”。文献[8]分析了环流产生的原因,通过实际功率反馈实时调节下垂系数从而抑制环流。但下垂系数的变化降低了输出电压的质量。文献[9]提出了一种线路阻抗辨识方法,利用测量所得线路阻抗值计算线路压降,进而补偿线路压降,实现

无功功率的合理分配。文献[10]以阻性低压微电网为研究对象,提出在控制环路中引入额外积分环节从而消除功率分配与线路阻抗之间的依赖关系,有效抑制系统环流。文献[11]提出了“虚拟复阻抗”的概念,以“虚拟负电阻”来抵消线路阻性成分,实现解耦的同时减小系统环流。文献[12]将虚拟阻抗分为固定阻抗和可变阻抗2个部分,同时实现功率解耦和均分,但需设置通信线路。文献[13]提出自适应虚拟阻抗控制策略,使虚拟阻抗值随着母线电压幅值波动在线调整,从而减小母线电压偏差,抑制系统环流,但所提策略需增设通信线路传输母线电压实时值。文献[14]将实时无功功率值与理想无功功率值做差,根据所得结果控制虚拟阻抗大小,但需依赖通信系统,可靠性较差。文献[15]提出了基于模糊自适应虚拟阻抗的改进下垂控制策略。通过各逆变器输出的无功差值自适应调整虚拟阻抗,从而抑制无功环流。在实际工程中,引入虚拟阻抗抑制环流的方法由于其实用性得到了广泛的应用。

本文分别对相同容量与不同容量逆变器的并联系统进行环流分析,归纳出系统环流的统一表示形式,得出系统环流中由无功分配不均造成的无功环流占主要成分的结论。在此基础上提出动态虚拟阻抗控制策略,消除线路阻抗不匹配造成的无功分配不均,从而抑制无功环流。为消除线路阻抗压降造成的输出电压偏差,提出一种改进的下垂控制策略以补偿线路压降。最后在MATLAB/Simulink平台搭建3台逆变器并联的微电网模型,验证所提策略的控制效果。

1 环流分析

分布式电源连接至公共母线,并向公共母线所连的负荷供电,是一种典型的微电网结构。微电网

收稿日期:2020-07-30;修回日期:2020-12-03

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(22120200230)

Project supported by the Fundamental Research Funds for the Central Universities(22120200230)

中各接口逆变器呈并联关系,由于输出电压差异以及线路阻抗不匹配等因素,逆变器间存在环流。为寻找环流成因,可将逆变器并联系统分为等容量逆变器并联与不同容量逆变器并联进行分析。

1.1 等容量逆变器并联

理想情况下等容量逆变器并联时,各台逆变器均分微电网中的负荷,无环流流动。但实际情况下,逆变器控制参数差异、线路阻抗差异等都会造成功率分配不均,从而引起环流。图1为双逆变器并联结构。图中, E_1 、 E_2 和 I_1 、 I_2 分别为2台逆变器的输出电压和电流; I_L 为公共负载电流; V_{PCC} 为公共连接点处电压; Z_1 、 Z_2 为线路阻抗; Z_L 为负载阻抗; k_1 、 k_2 为2台逆变器的容量比,等容量情况下 $k_1=k_2=1$; $I_{H1,2}$ 为环流分量; I'_1 、 I'_2 为逆变器受环流影响后的实际输出电流。

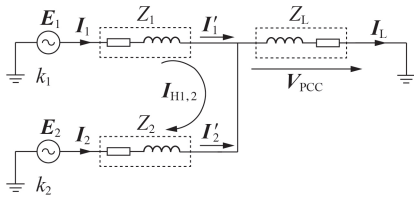


图1 逆变器并联等效电路

Fig.1 Equivalent circuit of parallel inverters

列写基尔霍夫电压方程可得:

$$\begin{cases} E_1 - I_1 Z_1 - I_L Z_L = 0 \\ E_2 - I_2 Z_2 - I_L Z_L = 0 \end{cases} \quad (1)$$

2台逆变器的输出电流分别为:

$$\begin{cases} I_1 = \frac{E_1(Z_2 + Z_L) - E_2 Z_L}{Z_1 Z_2 + Z_1 Z_L + Z_2 Z_L} \\ I_2 = \frac{E_2(Z_1 + Z_L) - E_1 Z_L}{Z_1 Z_2 + Z_1 Z_L + Z_2 Z_L} \end{cases} \quad (2)$$

由于负载阻抗远大于线路阻抗,此时乘积项 $Z_1 Z_2$ 可以忽略,从而得到逆变器输出电流表达式为:

$$\begin{cases} I_1 = \frac{E_1 Z_2}{Z_1 Z_L + Z_2 Z_L} + \frac{E_1 - E_2}{Z_1 + Z_2} = I'_1 + I_{H1,2} \\ I_2 = \frac{E_2 Z_1}{Z_1 Z_L + Z_2 Z_L} + \frac{E_2 - E_1}{Z_1 + Z_2} = I'_2 + I_{H2,1} \end{cases} \quad (3)$$

其中, $I_{H2,1}$ 为环流分量。将环流表达式推广到 t 台逆变器并联情况,当每台逆变器等效电路的线路阻抗相等,即 $Z_1=Z_2=\dots=Z_t=Z$ 时,各台逆变器环流分量 I_{Hi} ($i=1,2,\dots,t$)可表示为:

$$\begin{bmatrix} I_{H1} \\ I_{H2} \\ \vdots \\ I_{Ht} \end{bmatrix} = \frac{1}{tZ} \begin{bmatrix} t-1 & -1 & \dots & -1 \\ -1 & t-1 & \dots & -1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -1 & -1 & \dots & t-1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ \vdots \\ E_t \end{bmatrix} \quad (4)$$

当各台逆变器等效阻抗不同,即 $Z_1 \neq Z_2 = \dots \neq Z_t$ 时,各台逆变器环流可表示为:

$$\begin{bmatrix} I_{H1} \\ I_{H2} \\ \vdots \\ I_{Ht} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{j=2}^t \frac{1}{Z_1 + Z_j} & \frac{-1}{Z_1 + Z_2} & \dots & \frac{-1}{Z_1 + Z_t} \\ \frac{-1}{Z_2 + Z_1} & \sum_{j=1}^t \frac{1}{Z_2 + Z_j} & \dots & \frac{-1}{Z_2 + Z_t} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{-1}{Z_t + Z_1} & \frac{-1}{Z_t + Z_2} & \dots & \sum_{j=1}^{t-1} \frac{1}{Z_t + Z_j} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ \vdots \\ E_t \end{bmatrix} \quad (5)$$

从上述分析可以看出,输出功率的均分是由每台逆变器的输出电压和其所在线路的阻抗共同决定的。在高压微电网中逆变器等效阻抗的感性成分远大于阻性成分,且经虚拟阻抗控制后逆变器的输出阻抗呈感性。为简化分析,忽略电阻影响,由图1可得:

$$\begin{cases} I_1 = \frac{E_1 \angle \delta_1 - V_{PCC} \angle 0^\circ}{R_1 + jX_1} = \frac{E_1 \cos \delta_1 - V_{PCC} + jE_1 \sin \delta_1}{R_1 + jX_1} \\ I_2 = \frac{E_2 \angle \delta_2 - V_{PCC} \angle 0^\circ}{R_2 + jX_2} = \frac{E_2 \cos \delta_2 - V_{PCC} + jE_2 \sin \delta_2}{R_2 + jX_2} \end{cases} \quad (6)$$

其中, E_1 、 E_2 、 V_{PCC} 分别为 E_1 、 E_2 、 V_{PCC} 的幅值; R_1 、 R_2 和 X_1 、 X_2 分别为逆变器1、2所在支路的线路电阻和电抗; δ_1 、 δ_2 为电压相角,其值接近于 0° ,即可近似认为 $\cos \delta_1 \approx 1$, $\cos \delta_2 \approx 1$, $\sin \delta_1 \approx \delta_1$, $\sin \delta_2 \approx \delta_2$ 。忽略式(6)中电阻后,可得2台逆变器间环流为:

$$I_{H1,2} = \frac{1}{2} \left(\frac{E_1 \delta_1}{X_1} - \frac{E_2 \delta_2}{X_2} \right) + j \frac{1}{2} \left(\frac{E_2 - V_{PCC}}{X_2} - \frac{E_1 - V_{PCC}}{X_1} \right) \quad (7)$$

采用下垂控制时,系统的功率分配由下垂控制方程与线路的电气特性共同决定。图2为单台逆变器接入公共连接点的等效电路图。图中, E_i 、 δ_i 分别为逆变器 i 输出电压幅值、相角; R_i 、 X_i 和 Z_i 、 θ_i 分别为逆变器 i 所在支路的线路电阻、电抗和线路阻抗、阻抗角; $P_i + jQ_i$ 为流经逆变器 i 所在支路的功率。

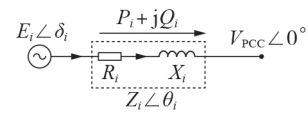


图2 单台逆变器等效电路

Fig.2 Equivalent circuit of single inverter

由图2可知,逆变器 i 输出的有功和无功功率为:

$$\begin{cases} P_i = \frac{V_{PCC} R_i (E_i \cos \delta_i - V_{PCC}) + V_{PCC} E_i X_i \sin \delta_i}{Z_i^2} \\ Q_i = \frac{V_{PCC} X_i (E_i \cos \delta_i - V_{PCC}) - V_{PCC} E_i R_i \sin \delta_i}{Z_i^2} \end{cases} \quad (8)$$

同理,忽略电阻影响,令 δ_i 近似为 0° (即 $\cos \delta_i \approx 1$, $\sin \delta_i \approx \delta_i$),简化可得:

$$\begin{cases} P_i = \frac{V_{PCC} E_i \delta_i}{X_i} \\ Q_i = \frac{V_{PCC} (E_i - V_{PCC})}{X_i} \end{cases} \quad (9)$$

将式(9)代入式(7)可得逆变器间环流表达式为:

$$I_{H1,2} = \frac{1}{2} \frac{P_1 - P_2}{V_{PCC}} + j \frac{1}{2} \frac{Q_2 - Q_1}{V_{PCC}} \quad (10)$$

由上述分析可得,逆变器间环流可分为有功环流和无功环流,分别由各逆变器有功、无功分配不均造成。

1.2 不同容量逆变器并联

不同容量逆变器并联运行时,负荷应按各逆变器额定容量之比合理分配。下垂控制逆变器间设置下垂系数与额定容量成反比即可实现负荷的自动分配。但现实情况下,各逆变器间线路阻抗很难实现互成比例的关系,因此存在较大的环流。图3为 t 台不同容量逆变器并联等效电路。

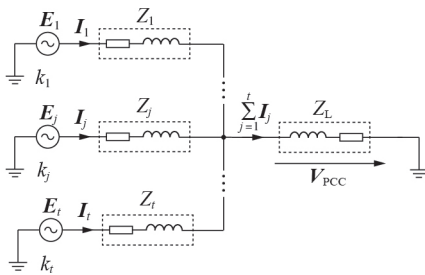


图3 t 台逆变器并联等效电路

Fig.3 Equivalent circuit of t parallel inverters

理想情况下,逆变器间无环流存在, t 台逆变器输出电压均相等,输出电流与逆变器额定容量 S 成正比,即:

$$I_1^* : I_2^* : \dots : I_t^* = k_1 : k_2 : \dots : k_t = S_1 : S_2 : \dots : S_t \quad (11)$$

其中, I^* 为理想情况下逆变器的输出电流。

由于环流只在逆变器间流动,流入流出相互抵消,故逆变器间环流的总和为0。理想情况下逆变器 i 的输出电流可表示为:

$$I_i^* = k_i \sum_{j=1}^t I_j / \sum_{j=1}^t k_j \quad (12)$$

多台不同容量逆变器间环流流向错综复杂,难以确定,因此定义其输出电流与理想情况下输出电流的差为流经逆变器 i 支路的环流,即:

$$I_{Hi} = I_i^* - I_i \quad (13)$$

对图1所示模型进行不同容量逆变器并联时的环流分析,假设条件与式(7)相同,可得环流表达式为:

$$I_{H1,2} = -I_{H2,1} = \frac{1}{k_1 + k_2} \left(k_1 \frac{E_2 \delta_2}{X_2} - k_2 \frac{E_1 \delta_1}{X_1} \right) + \frac{j}{k_1 + k_2} \left(k_1 \frac{E_2 - V_{PCC}}{X_2} - k_2 \frac{E_1 - V_{PCC}}{X_1} \right) \quad (14)$$

将式(9)代入式(14)可得:

$$I_{H1,2} = \frac{1}{k_1 + k_2} \frac{k_1 P_2 - k_2 P_1}{V_{PCC}} + \frac{j}{k_1 + k_2} \frac{k_2 Q_1 - k_1 Q_2}{V_{PCC}} \quad (15)$$

由上述分析可得,各台逆变器间的有功、无功环

流分别由有功分配比与额定容量比差异和无功分配比与额定容量比差异造成。

2 动态虚拟阻抗控制策略

逆变器间功率分配失调是环流产生的主要原因。本节主要分析环流中有功成分和无功成分的占比,以及等效线路阻抗与功率分配的关系,提出采用动态虚拟阻抗控制实现环流抑制。

2.1 并联逆变器功率分配分析

由式(9)可以看出,逆变器输出的有功功率主要由电压相角决定,无功功率由电压幅值差决定。传统下垂控制的表达式为:

$$\begin{cases} \omega_{refi} = \omega_0 - m_i P_i \\ E_{refi} = E_0 - n_i Q_i \end{cases} \quad (16)$$

其中, ω_{refi} 和 E_{refi} 分别为下垂控制得到的角频率和电压幅值参考值,稳态时 $\omega_{refi} = \omega_i$ 且 $E_{refi} = E_i$; ω_0 和 E_0 分别为逆变器的空载角频率和空载输出电压; m_i 和 n_i 为下垂系数。为使各逆变器按额定容量分配输出的功率,设下垂系数与额定容量成反比。结合式(9)与式(16)可得:

$$\begin{cases} P_i = \frac{\omega_0 - \omega_{PCC}}{sX_i / (V_{PCC} E_i) + m_i} \\ Q_i = \frac{V_{PCC} (E_0 - V_{PCC})}{X_i + n_i V_{PCC}} \end{cases} \quad (17)$$

其中, ω_{PCC} 为公共连接点处角频率。

根据式(17),逆变器功率环控制框图见图4,图中有功控制环中由于积分项的存在,稳态时输出功率与阻抗无关,而无功控制环中没有积分项的存在,稳态时阻抗的不匹配将引起无功环流。则逆变器间环流中无功环流占主要成分,而产生无功环流的主要原因是系统阻抗不匹配。

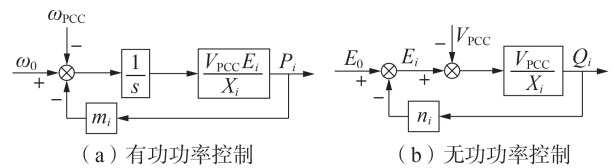


图4 外环功率环控制框图

Fig.4 Block diagram of outer loop power control

由式(17)可知,为实现负荷无功功率按逆变器额定容量比例分配,式中分母需与逆变器容量成反比。此时下垂系数 n_i 和线路等效电抗 X_i 均需与逆变器容量成反比,该条件在实际中难以实现。为便于分析,定义无功功率配比系数 η 为^[16]:

$$\eta = \frac{Q_i}{w_{Si,j} Q_j} \quad (18)$$

其中, $w_{Si,j}$ 为第 i 台逆变器与第 j 台逆变器的额定容量比值,即 $w_{Si,j} = S_i : S_j = k_i : k_j = n_j : n_i$ 。 η 越接近1说明功率分配效果越好。

2.2 动态虚拟阻抗

逆变器内环采用电压电流双环控制策略,电压环采用比例积分控制以提高输出电压精度,电流环采用比例控制以提高系统的动态性能。引入虚拟阻抗 Z_V 后的控制框图见图5。图中, k_p 、 k_i 分别为电压环比例、积分参数; k_e 为电流环比例系数; k_{pwm} 为PWM变换环节; E'_{refi} 为加入虚拟阻抗后的电压环参考值; I_{refi} 为电流环参考值; L_{fi} 、 C_{fi} 分别为滤波电感和电容; I_{fi} 为流过滤波电感的电流。

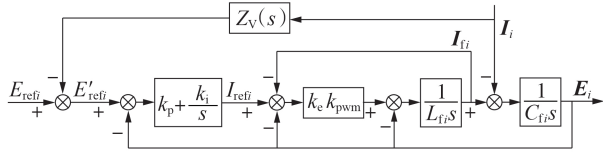


图5 内环控制框图

Fig.5 Block diagram of inner loop control

根据图5,可得未加入虚拟阻抗控制时,系统的传递函数为:

$$E_i = \frac{(k_p s + k_i)k_e k_{pwm}}{\Delta} E_{refi} - \frac{L_{fi} s^2}{\Delta} I_i \quad (19)$$

其中, $\Delta = L_{fi} C_{fi} s^3 + k_p k_e k_{pwm} C_{fi} s^2 + (1 + k_p k_e k_{pwm})s + k_i k_e k_{pwm}$ 。

加入虚拟阻抗后,可得:

$$E'_{refi} = E_{refi} - Z_V(s) I_i \quad (20)$$

将式(20)代入式(19)可得:

$$E_i = G(s) E_{refi} - (G(s) Z_V(s) + Z_0(s)) I_i \quad (21)$$

其中, $Z_0(s)$ 为加入虚拟阻抗前的系统等效阻抗; $G(s)$ 为传递函数。由式(21)可得加入虚拟阻抗后的等效输出阻抗为:

$$Z'_0(s) = G(s) Z_V(s) + Z_0(s) \quad (22)$$

可见, $G(s)$ 接近1可以减小传递函数对虚拟阻抗抗值的影响。合理设置控制参数,保证 $k_p k_e k_{pwm} \gg 1$,使输出电压跟随给定值,即系统传递函数 $G(s) \approx 1$ 。

为使系统等效输出阻抗呈感性,并消除线路电阻影响,本文采用虚拟阻抗控制策略,即:

$$Z_V = R_V + jX_V \quad (23)$$

其中, R_V 、 X_V 分别为虚拟电阻、虚拟电抗。虚拟电阻取负值,则虚拟阻抗上电压降 ΔE 在 dq 坐标系下的表示形式为:

$$\begin{cases} \Delta E_{id} = I_{id} R_V - I_{iq} X_V \\ \Delta E_{iq} = I_{iq} R_V + I_{id} X_V \end{cases} \quad (24)$$

其中, ΔE_{id} 、 ΔE_{iq} 分别为加入扰动后输出电压偏移量的 d 、 q 轴分量; I_{id} 、 I_{iq} 分别为逆变器 i 输出电流的 d 、 q 轴分量。根据式(24),可得虚拟阻抗控制策略在 dq 坐标系下的控制框图如附录中图A1所示。

虚拟阻抗控制策略中,虚拟电阻部分给定负值可以抵消线路电阻的影响。为抑制无功环流,本文采用动态虚拟电抗来平衡线路阻抗差异,所提出的动态虚拟电抗表达式为:

$$\begin{cases} X_{V1} = X_{set} + k_V Q_1 \\ \vdots \\ X_{Vi} = w_{S1,i} (X_{set} + k_V w_{S1,i} Q_i) \\ \vdots \\ X_{Vt} = w_{S1,t} (X_{set} + k_V w_{S1,t} Q_t) \end{cases} \quad (25)$$

其中, X_{set} 为虚拟电抗给定值; k_V 为无功反馈系数。在求解过程中,将容量最小的逆变器标记为1号。

为了比较动态虚拟阻抗与传统虚拟阻抗的控制效果,以 $t=2$ 为例进行证明。假设 X_1 、 X_2 存在以下关系:

$$X_2 > w_{S1,2} X_1 \quad (26)$$

在式(26)所示条件下,采用传统定值虚拟电抗得到的无功配比为:

$$\eta = \frac{X_2 + n_2 V_{PCC} + X_{V0}}{w_{S1,2} (X_1 + n_1 V_{PCC} + X_{V0})} > 1 \quad (27)$$

其中, X_{V0} 为虚拟电抗参考值。采用动态虚拟电抗控制策略后,无功配比为:

$$\eta' = \frac{X_2 + n_2 V_{PCC} + X_{V2}}{w_{S1,2} (X_1 + n_1 V_{PCC} + X_{V1})} \quad (28)$$

式(27)和式(28)中2台逆变器的下垂系数之比和额定容量之比成反比,即 $n_2 = w_{S1,2} n_1$ 。采用反证法,假设 $Q_1 \leq w_{S1,2} Q_2$,根据式(18)和式(28)可得:

$$\eta' \leq 1 \Rightarrow X_2 - w_{S1,2} X_1 \leq k_V w_{S1,2} Q_1 - k_V w_{S1,2}^2 Q_2 \quad (29)$$

由式(29)可得, $Q_1 - w_{S1,2} Q_2 > 0$,与假设矛盾,因此 $Q_1 > w_{S1,2} Q_2$ 成立,即 $w_{S1,2} X_{V1} > X_{V2}$ 。当 $X_{V0} = X_{V1}$ 时,可得:

$$\eta > \eta' > 1 \quad (30)$$

可以看出动态虚拟阻抗无功功率分配效果比传统虚拟阻抗更佳。

3 改进下垂控制策略

为了进一步消除阻抗不匹配带来的环流,对传统下垂控制做出改进,加入电压补偿项,并消除线路压降造成的电压偏差。

3.1 线路阻抗测量

为了补偿输出电压偏差,采用文献[9]中所述的线路阻抗本地测量方法,通过在电流环增加扰动改变电力电子装置的输出电流,测量扰动前后的稳态电压值,从而进行线路阻抗测量。 dq 坐标系下扰动前,逆变器所连线路阻抗满足如下关系:

$$\begin{cases} E_{id} = R_i I_{id} - X_i I_{iq} + V_{PCCd} \\ E_{iq} = R_i I_{iq} + X_i I_{id} + V_{PCCq} \end{cases} \quad (31)$$

在当前时刻的电流参考值上添加幅值为 ΔI_{iq} 的扰动量,所得稳态表达式为:

$$\begin{cases} E'_{id} = R_i I'_{id} - X_i I'_{iq} + V_{PCCd} \\ E'_{iq} = R_i I'_{iq} + X_i I'_{id} + V_{PCCq} \end{cases} \quad (32)$$

其中, E'_{id} 、 E'_{iq} 分别为加入扰动后输出电压稳态值的 d 、 q 轴分量; I'_{id} 、 I'_{iq} 分别为加入扰动后输出电流稳态

值的 d 、 q 轴分量。

扰动前后公共连接点处电压不变,为计算简便,并降低有功功率波动,做出如下假设:

$$\begin{cases} \Delta I_{iq} = I'_{iq} - I_{iq} \\ \Delta I_{id} = I'_{id} - I_{id} = 0 \end{cases} \quad (33)$$

其中, ΔI_{id} 为电流扰动的 d 轴分量, $\Delta I_{id}=0$ 。

将式(32)与式(31)相减可得线路阻抗值为:

$$\begin{cases} X_i = -\Delta E_{id} / \Delta I_{iq} \\ R_i = \Delta E_{iq} / \Delta I_{iq} \end{cases} \quad (34)$$

计算得到线路阻抗值后,虚拟负电阻值可以设置与线路电阻值大小相等,从而抵消线路电阻影响。

3.2 改进下垂控制

根据图2,可得线路阻抗压降的相量图,如图6所示。图中, δV 、 ΔV 分别为线路电压降的纵分量、横分量。得到线路阻抗后,根据图6可计算出线路阻抗压降,忽略 δV ,可得逆变器下垂控制中参考电压补偿值:

$$\Delta V = \frac{P_i R_i + Q_i X_i}{V_{PCC}} \quad (35)$$

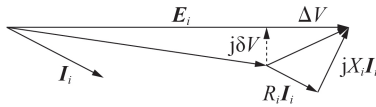


图6 线路阻抗压降

Fig.6 Line impedance voltage drop

加入线路电压降补偿后的改进下垂控制为:

$$\begin{cases} \omega_{refi} = \omega_0 - m_i P_i \\ E_{refi} = E_0 - n_i Q_i + \Delta V \end{cases} \quad (36)$$

综上可得控制系统的完整控制框图如图7所示。图中, U_{dc} 为直流侧电压; L 为线路电感。改进后的控制系统相较于传统控制系统增加了线路阻抗测量模块和动态虚拟阻抗模块,并在传统下垂控制中加入了电压补偿,从而降低了无功分配偏差和输出电压偏差,并有效抑制系统环流。且该系统完全基于本地信号,满足逆变器“即插即用”的要求。

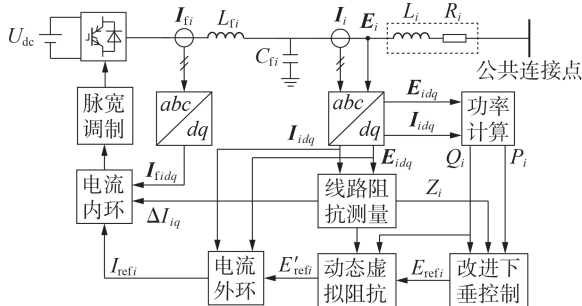


图7 整体控制框图

Fig.7 Block diagram of whole control

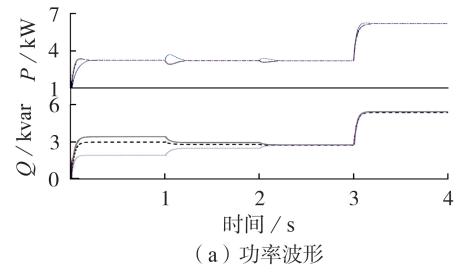
4 仿真分析

为了验证所提改进下垂控制策略的有效性,在

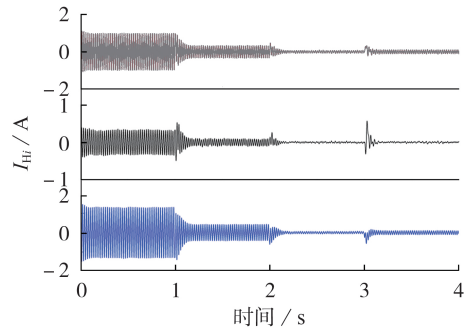
MATLAB / Simulink平台搭建如附录中图A2所示的微电网简化模型。本文将分布式电源视为直流电压源,着重研究接口逆变器协调控制策略。微电网中各项参数见附录中表A1,系统频率为50 Hz。在等容量逆变器并联和不同容量逆变器并联这2种情况下进行仿真验证,对传统下垂控制策略与改进下垂控制策略进行对比分析,验证改进下垂控制策略的有效性。

4.1 等容量逆变器并联

建立等容量逆变器并联模型,3台逆变器的下垂系数为 $m_i = 10^{-4}$ 、 $n_i = 4 \times 10^{-4}$ 。图8为等容量逆变器并联时的仿真结果。图中, P 、 Q 分别为分布式电源输出的有功、无功功率。仿真工况设置如下:0 s时各逆变器采用传统下垂控制,微电网稳定运行于孤岛模式,公共负荷为 $P_{Load} = 10 \text{ kW}$ 、 $Q_{Load} = 8 \text{ kvar}$;1 s时加入动态虚拟阻抗控制;2 s时同时加入动态虚拟阻抗和电压补偿;3 s时负荷增加为原来的2倍,即公共负荷变为 $P_{Load} = 20 \text{ kW}$ 、 $Q_{Load} = 16 \text{ kvar}$ 。



(a) 功率波形



(b) 环流波形

— DG₁, --- DG₂, DG₃

图8 改进下垂控制策略控制效果

Fig.8 Control effect of improve droop control strategy

由图8可知,采用传统下垂控制时,有功分配与线路阻抗无关,逆变器间有功负荷均分,无功分配与线路阻抗有关,逆变器间不能均分无功负荷,且无功分配偏差造成环流;加入虚拟阻抗后,有功功率在波动后很快趋于稳定,无功功率则趋于均分,但仍有偏差,逆变器间环流有所减小,峰值均在0.5 A以下。2 s时在动态虚拟阻抗的基础上加入了电压补偿,无功功率达到均分,环流接近0,抑制效果更加显著。3 s时负荷突增情况下,无功负荷仍能均分,逆变器间环流仍能得到有效抑制。仿真结果验证了改进下垂控制

策略在等容量逆变器并联时具有良好的控制效果。

4.2 不等容量逆变器并联

建立容量比为3:1.5:1的逆变器并联模型,逆变器的下垂系数 m_1 — m_3 分别为 6×10^{-4} 、 3×10^{-4} 、 2×10^{-4} ; n_1 — n_3 分别为 6×10^{-4} 、 3×10^{-4} 、 2×10^{-4} 。

仿真结果见附录中图A3,仿真工况如下:起始时刻微电网稳定运行于孤岛模式,公共负荷为 $P_{\text{Load}} = 10 \text{ kW}$, $Q_{\text{Load}} = 8 \text{ kvar}$;当 $t = 1 \text{ s}$ 时加入动态虚拟阻抗控制;当 $t = 2 \text{ s}$ 时同时加入动态虚拟阻抗和电压补偿;当 $t = 3 \text{ s}$ 时负荷增加为原来的2倍,即公共负荷变为 $P_{\text{Load}} = 20 \text{ kW}$, $Q_{\text{Load}} = 16 \text{ kvar}$ 。

由图A3可知,采用传统下垂控制时,有功分配与线路阻抗无关,各逆变器按照自身额定容量分配有功负荷,无功分配与线路阻抗有关,无功负荷不能按额定容量比例分配,且无功分配偏差造成环流;加入虚拟阻抗后,有功功率在波动后很快趋于稳定,无功功率则趋于按比例分配,但仍有偏差,逆变器间环流有所减小,峰值均在0.5 A以下。2 s时在动态虚拟阻抗的基础上同时加入了电压补偿,无功功率按比例分配,环流接近0,抑制效果更加显著。3 s时负荷突增情况下,无功负荷仍能按比例分配,逆变器间环流仍能得到有效抑制。仿真结果验证了改进下垂控制策略在不同容量逆变器并联时仍具有良好的控制效果。

5 结论

本文针对采用下垂控制策略的多并联逆变器中孤岛微电网的系统环流进行分析,并得出以下结论:

(1)逆变器间的环流由有功环流和无功环流组成,采用下垂控制的并联逆变器系统中无功分配不均造成逆变器间环流的主要原因;

(2)下垂控制有功环流由于积分项的存在,稳态时功率分配与线路阻抗无关,无功环流无积分项存在,稳态时线路阻抗不匹配是造成无功环流的主要原因;

(3)本文提出的动态虚拟阻抗控制策略和改进下垂控制策略可以实现在线路阻抗不匹配情况下无功功率的精确分配,从而抑制环流;

(4)仿真结果表明本文提出的控制策略不仅能够实现等容量逆变器间的无功均分,还可以实现不同容量逆变器间的无功按额定容量比分配,从而有效抑制系统环流,提高电能质量。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 姚玮,陈敏,牟善科,等. 基于改进下垂法的微电网逆变器并联控制技术[J]. 电力系统自动化,2009,33(6):77-80,94.
YAO Wei, CHEN Min, MU Shanke, et al. Paralleling control technique of microgrid inverters based on improved droop method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(6):

- 77-80,94.
- [2] MIHALACHE L. Paralleling control technique with no inter-communication signals for resonant controller-based inverters [C]//Industry Applications Conference. Salt Lake City, UT, USA: IEEE, 2003:1882-1889.
- [3] 黄晓翔,曾江,杨林,等. 低压微网逆变器自适应谐波下垂控制策略[J]. 电力自动化设备,2018,38(5):204-210,226.
HUANG Junchi, ZENG Jiang, YANG Lin, et al. Adaptive harmonic droop control strategy of low-voltage microgrid inverter [J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(5): 204-210, 226.
- [4] 周晓倩,艾芊. 基于自适应经济下垂控制的微电网分布式经济控制[J]. 电力自动化设备,2019,39(4):50-55.
ZHOU Xiaoqian, AI Qian. Distributed economic control of microgrid based on adaptive economic droop control [J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(4): 50-55.
- [5] GUERRERO J M, MATAS J, GARCIA D, et al. Wireless-control strategy for parallel operation of distributed-generation inverters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2006, 53(5):1461-1470.
- [6] 张厚升,张磊,姜吉顺,等. 两并联三相PWM整流器零序环流抑制与均流控制[J]. 电力自动化设备,2018,38(2):153-160,168.
ZHANG Housheng, ZHANG Lei, JIANG Jishun, et al. Circulating current suppressing and current balancing for two parallel three-phase PWM rectifiers[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(2): 153-160, 168.
- [7] 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.
- [8] 李国武,梁吉,许健,等. 适用于不同等效阻抗的并联逆变器环流抑制方法研究[J]. 电子设计工程,2016,24(19):141-144.
LI Guowu, LIANG Ji, XU Jian, et al. Study on restraint of circulating current in parallel inverters with different equivalent impedance [J]. Electronic Design Engineering, 2016, 24(19): 141-144.
- [9] 陈晓祺,贾宏杰,陈硕翼,等. 基于线路阻抗辨识的微电网无功均分改进下垂控制策略[J]. 高电压技术,2017,43(4):221-229.
CHEN Xiaqi, JIA Hongjie, CHEN Shuoyi, et al. Improved droop control strategy based on line impedance identification for reactive power sharing in microgrid [J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(4): 221-229.
- [10] ZHONG Q C. Robust droop controller for accurate proportional load sharing among inverters operated in parallel[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(4):1281-1290.
- [11] JIN L, HE Z, ZHANG Y, et al. A new virtual impedance method for parallel inverters with droop control [C]//IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC). Hangzhou, China: IEEE, 2016:1-4.
- [12] 林克文,肖飞,揭贵生,等. 引入新型虚拟阻抗的逆变器并联下垂控制策略[J]. 电器与能效管理技术,2019(1):55-61,68.
LIN Kewen, XIAO Fei, JIE Guisheng, et al. Droop control strategy for parallel inverters with new virtual impedance [J]. Electrical & Energy Management Technology, 2019(1): 55-61, 68.
- [13] 裴淑曼,张军. 基于自适应虚拟阻抗的微电网控制策略研究[J]. 电测与仪表,2017,55(12):82-87.

- PEI Shuman, ZHANG Jun. Research on control strategy of micro-grid based on adaptive virtual impedance[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2017, 55(12): 82-87.
- [14] 李维波, 徐聪, 许智豪, 等. 基于自适应虚拟阻抗的船用逆变器并联策略[J]. 高电压技术, 2019, 45(8): 2538-2544.
- LI Weibo, XU Cong, XU Zhihao, et al. Inverter parallel control strategy based on variable virtual impedance[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(8): 2538-2544.
- [15] 姜恩宇, 赵吉康, 米阳, 等. 基于模糊自适应虚拟阻抗的微电网无功功率均分控制策略[J]. 南方电网技术, 2019, 13(5): 37-43.
- JIANG Enyu, ZHAO Jikang, MI Yang, et al. Control strategy of reactive power sharing of microgrid based on fuzzy adaptive virtual impedance[J]. Southern Power System Technology, 2019, 13(5): 37-43.
- [16] 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.

作者简介:



王俊凯

王俊凯(1996—), 男, 甘肃兰州人, 硕士研究生, 主要研究方向为微电网的控制与优化(E-mail: 1830713@tongji.edu.cn);

牟龙华(1963—), 男, 江苏无锡人, 教授, 博士研究生导师, 主要研究方向为电力系统继电保护、分布式发电与微电网(E-mail: lhmu@tongji.edu.cn)。

(编辑 王欣竹)

Control strategy based on dynamic virtual impedance to suppress circulating current between multiple parallel inverters

WANG Junkai, MU Longhua, LIU Xin

(Department of Electrical Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: Inverters of distributed power generation are operated in parallel in islanding microgrid, which causes the circulating current by the difference of their parameters. Therefore, a circulating current suppression strategy based on dynamic virtual impedance is proposed. Firstly, the composition of the circulating current based on droop control is analyzed, and it is concluded that the reactive circulating current is dominant, and the mismatch of line impedance causes the reactive circulating current. Secondly, the reactive power feedback term is introduced into the virtual impedance to realize the accurate distribution of reactive power, so as to suppress the reactive circulating current. Meanwhile, the traditional droop control strategy is improved, and the voltage compensation term is added into the voltage control equation to eliminate the line voltage drop and further suppress the reactive circulating current. Finally, a microgrid model with three inverters in parallel is built in MATLAB/Simulink. Simulative results show that the dynamic virtual impedance control strategy can eliminate the influence of line impedance, realize the accurate distribution of reactive power among inverters, and solve the problem of the circulating current among multiple parallel inverters.

Key words: parallel inverters; droop control; circulating current analysis; dynamic virtual impedance; reactive power distribution

附录

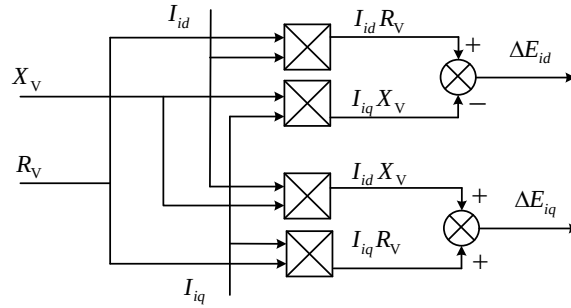


图 A1 dq 坐标系下虚拟阻抗控制框图

Fig.A1 Block diagram of virtual impedance control in dq coordinates

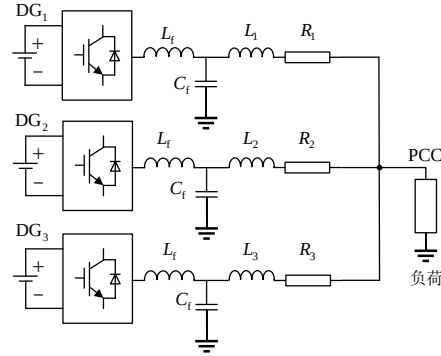


图 A2 微电网结构示意图

Fig.A2 Schematic diagram of microgrid structure

表 A1 微电网仿真参数

Table A1 Parameters of microgrid simulation

参数	参数值
逆变器直流侧电压 U_{dc}/V	800
逆变器额定电压 U_o/V	380
滤波电感 L_f/mH	0.6
滤波电容 $C_f/\mu F$	1500
滤波电感寄生电阻 R_f/Ω	0.01
线路电感 L_{li}/mH	[1.2, 2.6, 3.4]
线路电阻 R_{li}/Ω	[0.1, 0.12, 0.26]

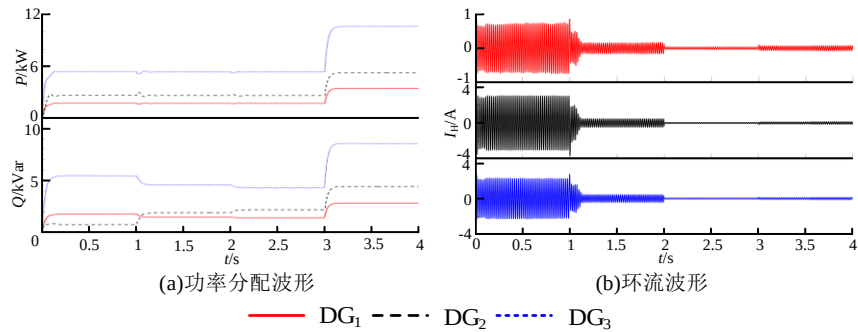


图 A3 改进控制策略控制效果

Fig.A3 Control effect of improved control strategy