

DOI: 10.7667/PSPC160892

孤岛微网不平衡负荷下控制策略

屈克庆, 李文旗, 赵晋斌, 李芬

(上海电力学院, 上海 200090)

摘要: 在三相孤岛微网系统中, 负载的不平衡将会导致负序电流和电压的产生。线路参数的差异会造成各微源之间负序电流的无序分配, 低压电网中较大的线路阻抗将会进一步增大微网的不平衡性, 进而影响负荷的正常工作。针对这些问题提出了一种基于 PR 控制器的孤岛微网不平衡负荷下控制策略。该策略通过两相静止坐标系下的正负序独立控制, 实现了负序虚拟负阻抗的设计, 减小了微源传输阻抗, 实现了微源之间负序环流的抑制, 并减小了 PCC 点的电压不平衡度, 保证了微源以及微网的正常工作。通过 Matlab/Simulink 的仿真验证了所提出的控制策略的正确性和有效性。

关键词: 微网; 不平衡; 独立控制; 虚拟负阻抗

Islanded microgrid control strategy under unbalanced loads

QU Keqing, LI Wenqi, ZHAO Jinbin, LI Fen

(Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

Abstract: In three-phase islanded microgrid systems, unbalanced loads will cause negative-sequence current and negative-sequence voltage. The difference between line parameters will seriously affect the distribution of negative sequence current between micro sources and reduce the reliability of the microgrid systems. Besides, the bigger line impedance in low voltage microgrid systems will increase the unbalance of the microgrid systems. To solve these problems, this paper proposes a new islanded microgrid control strategy based on PR controllers under unbalanced loads. By controlling positive-sequence and negative-sequence independently, the strategy can realize the design of negative-sequence virtual impedance to reduce transfer impedance of the micro sources, suppress the negative-sequence circulating current and reduce unbalanced degree of the microgrid systems. Simulation by Matlab/Simulink results demonstrate that the control strategy is correct and effective.

This work is supported by Natural Science Foundation of Shanghai (No. 16ZR1413000).

Key words: microgrid; unbalance; independent control; negative-sequence virtual impedance

0 引言

微网作为一种新型的电网形式, 可以实现并网与孤岛两种运行方式, 大大增加了微网中负荷的用电可靠性^[1-2]。孤岛模式下, 由于缺乏来自大电网的频率与电压支撑, 负荷的频率与电压必须由微网中的微源进行支撑。微源通常通过电压型逆变器(VSI)与负荷连接, VSI 的性能决定了微网的可靠性。当前针对微网中 VSI 的研究主要集中在负荷平衡情况下的性能优化^[3-8]。实际上, 在三相微网系统中, 由于单相负荷等不平衡负荷的大量存在, 使得不平衡

状态十分常见。不平衡负荷将会使微网产生不平衡的电压和电流。不平衡电流会增加系统的损耗, 当不平衡较严重时甚至会影响电动机、变压器等电器的正常工作甚至会缩短其运行寿命。因此, 国际电工委员会提出了明确要求: 电力系统中的电压不平衡度不超过 2%^[9]。现有的不平衡治理通常采用串联或并联电能质量调节器, 通过补偿不平衡电流来实现^[10-12]。但是, 接入电能质量调节器不仅会增加成本, 而且当不平衡情况较严重时, 需补偿的电流也较大, 有可能超出电能质量调节器的补偿范围, 从而影响微网的正常工作。同时, 负序电流的出现也增加了系统保持稳定的难度, 如果不对 VSI 间的负序环流进行有效的抑制, 将会严重影响 VSI 的正常

运行。因此, 针对不平衡条件下微网 VSI 控制策略的研究具有十分重要的意义。文献[13]通过引入负序无功功率与电导之间的下垂控制有效地实现了功率控制以及输出电压的平衡, 但并未考虑负序环流对系统的影响。文献[14]提出了一种自适应负序虚拟阻抗的方案, 有效地抑制了 VSI 之间的负序环流, 但并未对低压微网中较大线路阻抗所造成的负荷不平衡度增加的问题提出有效的解决方案。

在微网 VSI 的控制系统中, 常采用 dq 坐标系下的 PI 控制器进行调节, 不仅需要多次坐标变换, 且需要进行复杂的解耦控制。在微网不平衡条件下, 不平衡分量在 dq 坐标系下将变为 2 倍频分量, PI 控制器无法做到无静差控制, 控制效果较差。比例谐振控制器(PR)不存在上述问题。三相平衡时, PR 控制器可以实现两相静止坐标系下的无静差控制, 不存在耦合问题, 大大减小了计算量; 三相不平衡时, 由于 PR 控制器的无极性特性, 其亦可实现两相静止坐标系下的无静差控制^[15]。因此, 得到了广泛的应用。

本文针对微网不平衡时的 VSI 控制提出了一种两相静止坐标系下的正负序独立控制策略。通过对负序电压的独立控制, 进行了负序虚拟阻抗的设计, 实现逆变器间的负序环流的抑制。同时将负序虚拟阻抗设计为负电阻的形式, 以减小低压电网线路阻抗较大造成的 PCC 点电压不平衡度较大的问题。最后, 通过 Matlab/Simulink 仿真模型验证了所提出策略的正确性和有效性。

1 孤岛模式下的不平衡分析

图 1 为包含两个分布式电源(Distributed Generation, DG)的简化微网模型。

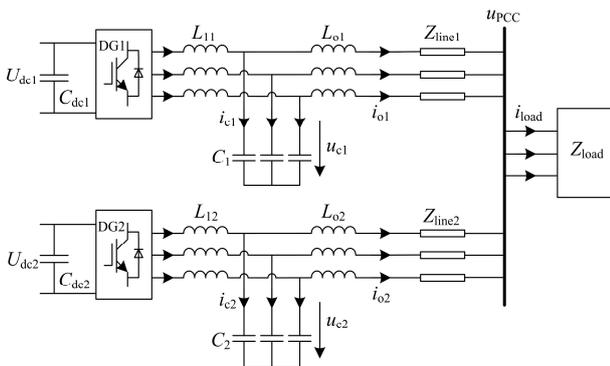


图 1 微网简化模型

Fig. 1 Simplified model of microgrid

其中 L_1 , C 和 C_{dc} 分别表示逆变器输出滤波电感、滤波电容和直流侧稳压电容; Z_{line} 与 Z_{load} 表示

线路阻抗和负载; i_c 、 u_o 、 i_o 、 i_{load} 和 u_{pcc} 分别表示电容电流、逆变器输出电压、逆变器输出电流、负荷电流和公共连接点电压; U_{dc} 为直流侧电压, 其光伏或风电容量充足, 并配有储能装置, 可以认为其为定值; 下标 1 和 2 分别表示逆变器 1 与逆变器 2 中的量。此外, 该系统为三相三线制, 不考虑零序分量的影响。

VSI 的传统控制策略如图 2。

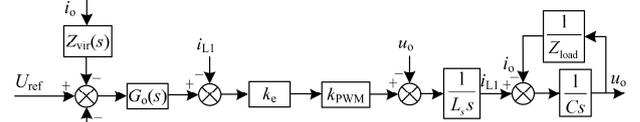


图 2 VSI 控制框图

Fig. 2 Control block of VSI

图中: $G_o(s)$ 为电压外环控制器; k_e 为电流内环比例系数; k_{PWM} 为逆变器等效环节, 忽略开关死区时间, $k_{PWM}=1$; $Z_{vir}(s)$ 为逆变器虚拟阻抗。

由图 2 可求得 VSI 的输出电压为

$$u_o = G(s)U_{ref} - (Z_o(s) + Z_{vir}(s)G(s))i_o \quad (1)$$

式中:

$$\begin{cases} G(s) = \frac{G_o(s)k_e k_{PWM}}{L_1 Cs^2 + k_e k_{PWM} Cs + G_{PR}(s)k_e k_{PWM} + 1} \\ Z_o(s) = \frac{Ls + k_e k_{PWM}}{L_1 Cs^2 + k_e k_{PWM} Cs + G_o(s)k_e k_{PWM} + 1} \end{cases}$$

由对称分量法可知, 当发生三相不平衡时, 式(1)可分解为正序与负序分量形式:

$$\begin{cases} u_o^P = G(s)U^P - (Z_o(s) + Z_{vir}^P(s)G(s))i_o^P \\ u_o^N = 0 - Z_o(s)i_o^N \end{cases} \quad (2)$$

由式(2)可知, VSI 正序分量可以等效为电压源与阻抗的串联形式, 而负序分量可等效为阻抗的形式。由文献[16]可知, 在微网中, 不平衡的负荷在其稳定情况下可等效为电流源。结合式(2), 可得 VSI 正序、负序等效模型, 如图 3。

图中 I_{load}^N 表示负荷负序等效电流源。上标 P 和 N 分别表示正序和负序分量; $Z_{inv}(s)$ 为逆变器输出阻抗, 定义为

$$Z_{inv}(s) = -\frac{U_o(s)}{I_o(s)} \Big|_{U_{ref}=0} = Z_o(s) + Z_{vir}(s)G(s) \quad (3)$$

由图 3 可求得负荷负序电压为

$$U_{load}^N(s) = I_{load}^N(s)(Z_{inv}^N(s) + Z_{line}^N(s)) \quad (4)$$

由式(4)可知, 负荷处负序电压与逆变器输出阻抗和线路阻抗二者之和成正比例关系。在低压线路中, 线路阻抗较大, 这就使不平衡时负荷需承受较大的负序电压, 影响负荷的正常工作。

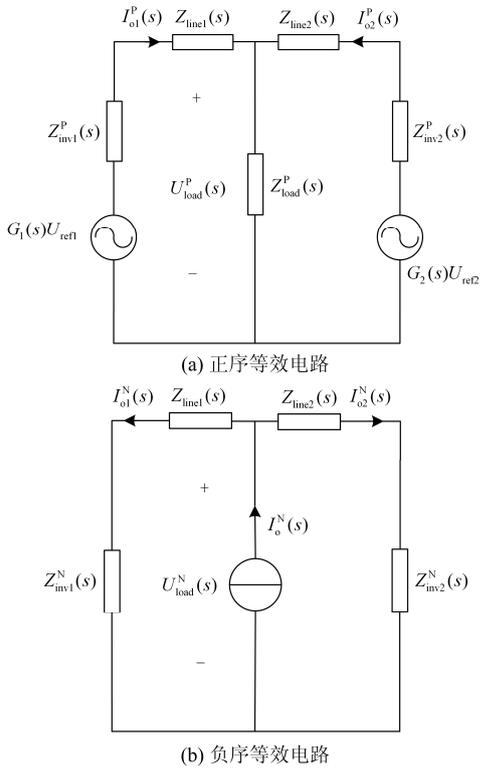


图 3 孤岛微网

Fig. 3 Model of an islanded microgrid

根据文献[17], 当微电网出现不平衡时, 逆变器输出功率为

$$\begin{cases} p = p_0 + p_1 \cos(2\omega t) + p_2 \sin(2\omega t) \\ q = q_0 + q_1 \cos(2\omega t) + q_2 \sin(2\omega t) \end{cases} \quad (5)$$

其中

$$\begin{cases} p_0 = 1.5(e_d^p i_d^p + e_q^p i_q^p + e_d^N i_d^N + e_q^N i_q^N) \\ p_1 = 1.5(e_d^p i_d^N + e_q^p i_q^N + e_d^N i_d^p + e_q^N i_q^p) \\ p_2 = 1.5(e_d^p i_q^N - e_q^p i_d^N + e_d^N i_q^p - e_q^N i_d^p) \\ q_0 = 1.5(e_q^p i_d^p - e_d^p i_q^p + e_q^N i_d^N - e_d^N i_q^N) \\ q_1 = 1.5(e_q^p i_d^N - e_d^p i_q^N + e_q^N i_d^p - e_d^N i_q^p) \\ q_2 = 1.5(e_d^p i_d^N + e_q^p i_q^N - e_d^N i_d^p - e_q^N i_q^p) \end{cases}$$

式中: p_0, q_0 分别表示瞬时有功功率与无功功率; p_1, p_2 表示瞬时有功功率二倍频波动分量; q_1, q_2 表示瞬时无功功率二倍频分量; 下标 d, q 分别表示两相旋转坐标系下的 d 轴与 q 轴分量。

可以看出, 负荷的不平衡将会使逆变器输出功率出现二倍频波动。

2 控制策略研究

图 4 为本文所提出的正负序独立控制策略框图。其由下垂控制器、序分量分离以及正负序独立控制组成。负序部分电压参考值给定为 0, 以抑制不平衡电压。电压外环采用准 PR 控制以实现电压的无静差跟踪, 电流内环为逆变器侧电流环, 采用 P 控制以增加系统稳定性。

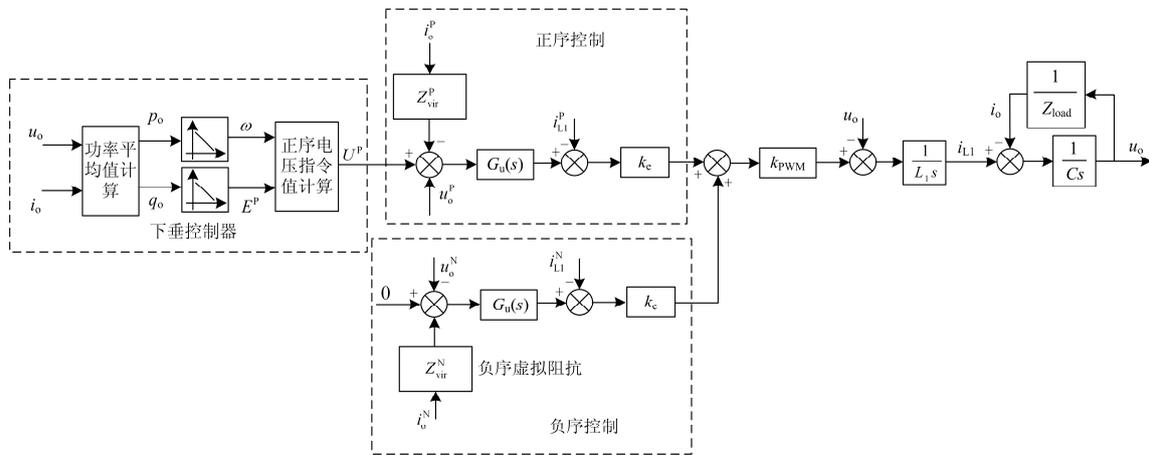


图 4 逆变器正负序独立策略控制框图

Fig. 4 Control block of inverter independent control strategy of positive-sequence and negative-sequence

2.1 下垂控制

微网孤岛模式运行时, 为了实现微源的即插即用以及多个微源之间功率的自主分配, 常采用下垂控制方法对 VSI 进行控制。考虑到不平衡时的逆变器输出功率波动, 结合式(5)传统下垂控制方程变为

$$\begin{cases} \omega = \omega_0 - m(p_0 + p_1 \cos(2\omega t) + p_2 \sin(2\omega t)) \\ U = U_0 - n(q_0 + q_1 \cos(2\omega t) + q_2 \sin(2\omega t)) \end{cases} \quad (6)$$

式中: ω 和 U 分别表示 VSI 输出端频率与电压指令; ω_0 和 U_0 分别表示逆变器空载时的输出频率与电压; m 和 n 分别表示有功功率和无功率下垂系数。

由式(6)可知, 当不平衡发生时 VSI 输出功率中包含的二次分量将会使逆变器频率和电压控制参考值出现二倍频波动, 这将会进一步影响 VSI 的输出电能质量。为了抑制该二倍频波动, 本文采用正序有功功率与正序无功功率的 p^+ 和 q^+ 作为逆变器下垂控制的输入。下垂控制方程变为

$$\begin{cases} \omega = \omega_0 - mp^+ \\ U = U_0 - nq^+ \end{cases} \quad (7)$$

式中:

$$\begin{aligned} p^+ &= 1.5(e_a^p i_a^p + e_b^p i_b^p) \\ q^+ &= 1.5(e_b^p i_a^p - e_a^p i_b^p) \end{aligned}$$

当采用式(7)所示的下垂控制时, 微网逆变器下垂控制将不再受功率二倍频波动的影响。

2.2 正负序分离控制策略

为了实现本文所提出的正负序独立控制策略, 首先需要对电压、电流信号的正序、负序分量进行分离。本文采用文献[18]所提出的 ROQR 调节器, 实现正负序分量的分离。负序分量时, 其传函为

$$G_{\text{ROQR}}(s) = \frac{k_o}{s + j\omega_{0R} + \omega_{cR}} \quad (8)$$

式中: ω_{0R} 表示基波频率; ω_{cR} 为截止频率, 其值决定了谐振频率偏移对控制系统的影响, 本文取 0.1。 k_o 为实数反馈系数, 由文献[18]分析可知, k_o 值越大其对交流信号的跟踪越好, 但会减小相角裕度, 影响系统稳定性。综合考虑, 取 $k_o=0.707$ 。图 5 为式(8)所表示的 ROQR 伯德图。

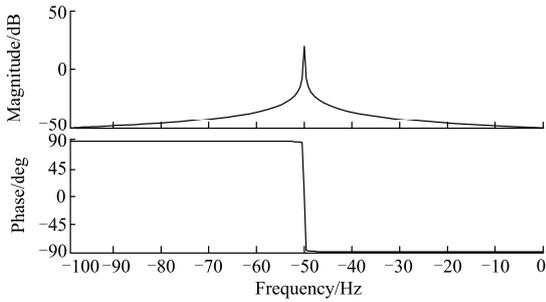


图 5 ROQR 伯德图

Fig. 5 Bode plot of ROQR

可以看出, ROQR 调节器对 -50 Hz 附近的幅值增益比其他频率处的幅值增益大得多, 其保留了 -50 Hz 的交流输入而将其他频率交流输入滤除, 具有选频作用, 实现了负序分量的分离。同理, 用于正序分量提取的传递函数为

$$G_{\text{ROQR}}(s) = \frac{k_o}{s - j\omega_0 + \omega_c} \quad (9)$$

3 控制器及其参数设计

微网不平衡时, VSI 输出电压、电流出现负序分量, 在两相旋转坐标系下, 负序分量变为二次分量, 传统 PI 控制器无法实现无静差跟踪。为了解决这一问题通常采用比例谐振(PR)控制器来进行无静差跟踪。但理想 PR 控制器不易实现, 故本文采用更易于实现的准 PR 控制器对电压信号进行跟踪。准 PR 控制器传递函数为

$$G_o(s) = K_p + \frac{2K_R \omega_c s}{s^2 + 2\omega_c s + \omega_0^2} \quad (10)$$

式中: ω_0 表示准 PR 控制器的谐振频率; ω_c 表示谐振频率处的谐振带宽; K_p 和 K_R 分别表示比例系数与谐振增益系数。

在工程中, 一般电流内环设计为开关频率的 1/5 左右, 电压内环带宽为电流内环带宽的 1/5。选取滤波参数 $L_1=5$ mH, $C=20$ μ F, 本文开关频率 f_s 为 10 kHz, 则电流内环带宽为 $f_i=f_s/5=2$ kHz, 电压内环带宽为 $f_u=f_i/5=400$ Hz。

忽略 i_o 的影响, 由图 4 可以求出逆变器侧电感电流内环闭环传递函数为

$$G_i(s) = \frac{k_c k_{\text{PWM}}}{L_1 s + k_c k_{\text{PWM}}} \quad (11)$$

由电流内环带宽为 $f_i=2$ kHz, 则可得 $k_c=62.8$ 。逆变器电压外环的闭环传递函数为

$$G_u(s) = \frac{G_{\text{PR}}(s)G_i(s)}{Cs + G_{\text{PR}}(s)G_i(s)} \quad (12)$$

将式(10)、式(11)代入式(12)可以得到

$$G_u(s) = \frac{A_2 s^2 + A_1 s + A_0}{B_4 s^4 + B_3 s^3 + B_2 s^2 + B_1 s + B_0} \quad (13)$$

式中: $A_2=k_c k_p k_{\text{PWM}}$; $A_1=(2k_c k_p k_{\text{PWM}}\omega_c + 2k_c k_R k_{\text{PWM}}\omega_c)$; $A_0=B_0=k_c k_p k_{\text{PWM}}\omega_0^2$; $B_4=L_1 C$; $B_3=(2L_1 C\omega_c + Ck_c k_{\text{PWM}})$; $B_2=(L_1 C\omega_0^2 + k_c k_p k_{\text{PWM}} + 2Ck_c k_{\text{PWM}}\omega_c)$; $B_1=(Ck_c k_{\text{PWM}}\omega_0^2 + 2k_c k_R k_{\text{PWM}}\omega_c)$ 。

国家标准规定电力系统正常的频率标准为 (50 \pm 0.2) Hz, 考虑保留一定的稳定裕度, 可选 $\omega_c=3$ 。故可得 $k_p=0.2$ 与 $k_R=30$ 。

4 负序虚拟阻抗设计

平衡条件下的虚拟阻抗设计, 很多文献进行了研究^[19], 在功率均分与环流抑制方面均取得了良好的效果。实际上, 不平衡情况下, 由于线路阻抗的差异, VSI 之间将会出现负序环流。若负序电流分配不均, 过大的负序电流有可能会造成 VSI 无法正常工作, 需要进行负序虚拟阻抗设计以减小环流。

考虑负序虚拟阻抗 Z_{vir}^N ，则式(2)变为

$$\begin{aligned} u_o^P &= G(s)U^P - (Z_o(s) + Z_{vir}^P(s)G(s))i_o^P \\ u_o^N &= 0 - (Z_o(s) + Z_{vir}^N(s)G(s))i_o^N \end{aligned} \quad (14)$$

由图 3(b)可以得出负序电流矢量之间的关系为

$$\begin{aligned} I_1^N &= \frac{Z_{inv2}^N + Z_{line2}}{Z_{inv1}^N + Z_{line1} + Z_{inv2}^N + Z_{line2}} I_{load}^N \\ I_2^N &= \frac{Z_{inv1}^N + Z_{line1}}{Z_{inv1}^N + Z_{line1} + Z_{inv2}^N + Z_{line2}} I_{load}^N \end{aligned} \quad (15)$$

逆变器实际上由于在低频段有 $G(s) \approx 1$ 且 $Z_o \approx 0$ ^[3]，故有

$$Z_{inv}^N(s) \approx Z_{vir}^N(s) \quad (16)$$

故式(15)变为

$$\begin{aligned} I_1^N &= \frac{Z_{vir2}^N + Z_{line2}}{Z_{vir1}^N + Z_{line1} + Z_{vir2}^N + Z_{line2}} I_{load}^N \\ I_2^N &= \frac{Z_{vir1}^N + Z_{line1}}{Z_{vir1}^N + Z_{line1} + Z_{vir2}^N + Z_{line2}} I_{load}^N \end{aligned} \quad (17)$$

定义 VSI 传输阻抗 Z_{tra} 为 VSI 等效阻抗与线路阻抗之和。即 $Z_{tra} = Z_{vir} + Z_{line}$ 。

可见，为了减小逆变器之间的负序环流，须使不同逆变器的输出阻抗与线路阻抗之和成比例分配：

$$S_1 Z_{tra1} = S_2 Z_{tra2} \quad (18)$$

式中， S 为微源的容量。

由式(17)可知，逆变器负序电流与逆变器负序虚拟阻抗和线路阻抗二者均相关，由于线路阻抗属于线路固有的参数，不易改变，故只能通过改变逆变器负序虚拟阻抗来改变负序电流分布。由上文分析可知，当线路阻抗较大，PCC 点将会出现较大的负序电压。同时，在低压电网中，线路的阻性远大于感性，这将造成有功功率和无功功率之间的耦合，为了减小功率间的耦合并减小 PCC 点负序压降，本文采用负序虚拟负阻抗法进行负序虚拟阻抗设计，即

$$Z_{vir}^N = -R_v + L_v \frac{s}{T_f s + 1} \quad (19)$$

式中： R_v 和 L_v 分别为虚拟电阻与虚拟电感值； T_f 为滤波时间常数。在基频处，由于 T_f 一般很小可忽略。则在基频处有

$$Z_{inv}^N(s) + Z_{line} \approx -R_v + R_{line} + s(L_v + L_{line}) \quad (20)$$

综上所述，所设计的负序虚拟阻抗需满足

$$R_{vir} + R_{line} = 0 \quad (21)$$

$$S_1(L_{vir1} + L_{line1}) = S_2(L_{vir2} + L_{line2})$$

当线路参数为 $R_{line} = 0.6 \Omega$ ， $L_{line} = 0.1 \text{ mH}$ 时，选

取 $R_v = 0.6 \Omega$ ， $L_{line} = 0.1 \text{ mH}$ 。图 6 为 VSI 传输阻抗伯德图。

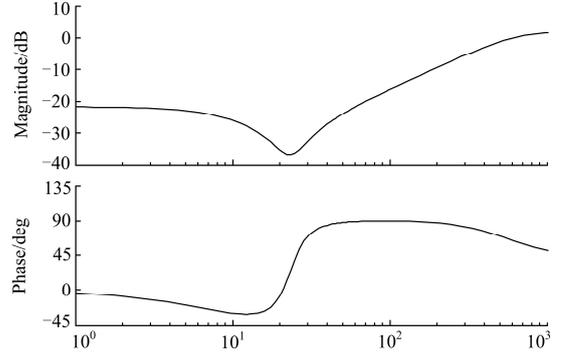


图 6 VSI 传输阻抗伯德图

Fig. 6 Bode plot of transfer impedance

可以看出，基频处 VSI 传输阻抗基本呈感性，可很好地实现功率解耦以及 PCC 点负序电压过大的问题。

5 仿真结果

为了验证所提出策略的正确性，本文在 Matlab/Simulink 采用两台容量为 3 kVA 的三相逆变器组成微网。仿真参数如表 1 所示。

表 1 系统参数与控制系统参数

Table 1 System and control parameters

参数	值	参数	值
U_{dc}	700 V	k_R	30
e_{max}	311 V	k_e	62.8
f_{PWM}	10 kHz	Z_{line1}	$0.6 + s \times 0.08 \Omega$
S_N	3 kVA	Z_{line2}	$0.5 + s \times 0.07 \Omega$
L_1	5 mH	Z_{vir1}	$-0.6 + s \times 0.02 \Omega$
C	20 μF	m	10^{-4}
k_p	0.2	n	2×10^{-5}

仿真开始时负荷三相平衡，三相负荷均为 10Ω ，在 $t = 0.2 \text{ s}$ 时，c 相并联一 5Ω 负荷。图 7 和图 8 分别为传统控制与包含负序虚拟阻抗控制时的 PCC 点电压与电流波形。两种情况的电压不平衡度分别为 1.7% 与 0.7%。可以看出，与传统 VSI 控制相比本文提出的负序控制方案可以显著降低 PCC 点的电压不平衡度，减小微网的不平衡对负荷正常工作的影响。图 9 为采用两种控制时微网两 VSI 负序电流幅值，图 10 为虚拟负阻抗加入前后 VSI 负序环流。可以看出，当加入负序虚拟阻抗控制后，两台逆变器的负序电流幅值很接近，其环流变得很小，起到了很好的抑制负序环流的效果。说明本文所提出控制策略的正确性。

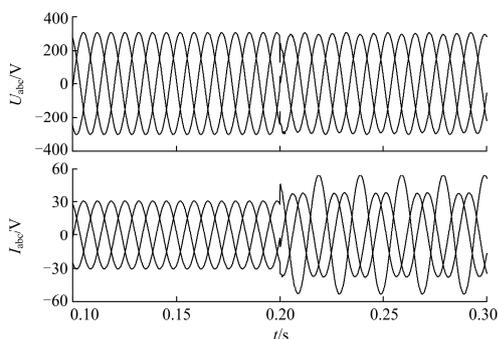


图 7 传统 DG 控制的 PCC 点电压与电流波形
Fig. 7 Voltage and current waveforms of PCC under traditional control strategy

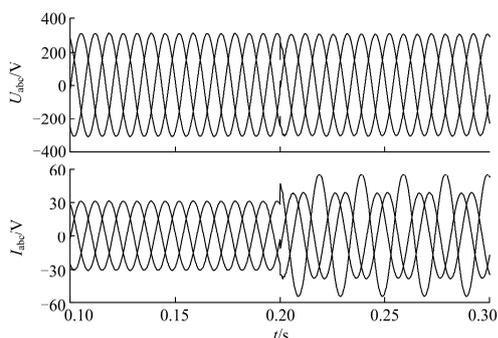


图 8 独立控制策略的 PCC 点电压与电流波形
Fig. 8 Voltage and current waveforms of PCC under independent control

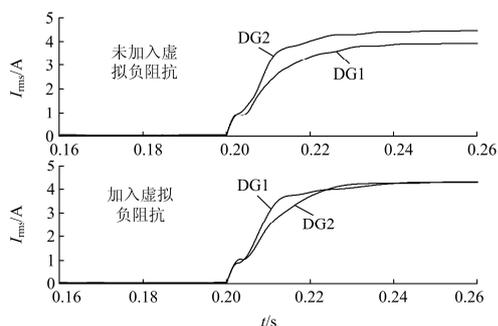


图 9 两逆变器输出负序电流均方根值
Fig. 9 RMS of two inverters output negative-sequence current

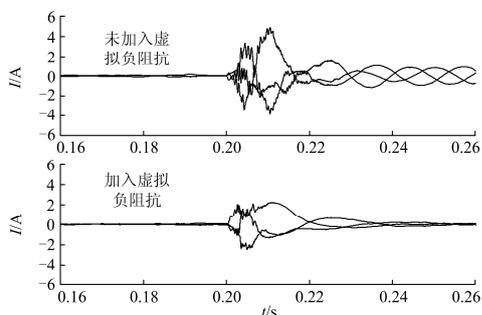


图 10 两逆变器输出负序环流
Fig. 10 Negative-sequence output circuit circulation of two inverters

综上, 可以看出本文所提出的正负序独立控制方案实现了 PCC 点负序电压的抑制以及负序电流的均分。

6 结论

针对低压微网中由于大量单相负荷接入所造成的不平衡问题, 本文提出了一种孤岛微网不平衡负荷下控制策略。通过在负序控制中添加负序虚拟负阻抗控制, 同时解决了 VSI 之间的负序环流问题以及线路阻抗过大引起的 PCC 点负序电压过大的问题, 提高了微网的供电可靠性。仿真结果也验证了本文所提出控制策略的有效性。

参考文献

- [1] 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.
WANG Chengshan, GAO Fei, LI Peng, et al. Control strategy research on low voltage microgrid[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(25): 2-8.
- [2] 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. Research on key technologies of microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 1-12.
- [3] 张庆海, 罗安, 陈燕东, 等. 并联逆变器输出阻抗分析及电压控制策略[J]. 电工技术学报, 2014, 29(6): 98-105.
ZHANG Qinghai, LUO An, CHEN Yandong, et al. Analysis of output impedance for parallel inverters and voltage control strategy[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(6): 98-105.
- [4] 张明锐, 黎娜, 杜志超. 基于小信号模型的微网控制参数选择与稳定性分析[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(25): 9-19.
ZHANG Mingrui, LI Na, DU Zhichao. Control parameter selection and stability analysis of microgrid based on small-signal model[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(25): 9-19.
- [5] 徐玉琴, 马焕均. 基于改进下垂控制的逆变器并联运行技术[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(7): 103-107.
XU Yuqin, MA Huanjun. Parallel operation technology of inverters based on improved droop control[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(7): 103-107.
- [6] 刘琳. 光伏电站有功功率优化分配[J]. 热力发电, 2015, 44(11): 104-108.
LIU Lin. Active power control in photovoltaic power plants[J]. Thermal Power Generation, 2015, 44(11): 104-108.

- [7] 孟建辉, 石新春, 王毅, 等. 改善微电网频率稳定性的分布式逆变电源控制策略[J]. 电工技术学报, 2015, 30(4): 70-79.
MENG Jianhui, SHI Xinchun, WANG Yi, et al. Control strategy of DER inverter for improving frequency stability of microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(4): 70-79.
- [8] 李浩然, 杨旭红, 冯成臣. 多逆变器并联下的输出阻抗分析和改进下垂控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(20): 29-35.
LI Haoran, YANG Xuhong, FENG Chengchen. Control strategy research of output impedance analysis and improved droop control based on multiple-inverters parallel[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(20): 29-35.
- [9] VON JOUANNE A, BANERJEE B. Assessment of voltage unbalance[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2001, 16(4): 782-790.
- [10] GRAOVAC D, KATIĆ V A, RUFER A. Power quality problems compensation with universal power quality conditioning system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22(2): 968-976.
- [11] 易皓, 卓放, 詹文达, 等. 用于并联型有源电力滤波器的谐振调节器选择性特性比较分析[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(30): 5320-5328.
YI Hao, ZHUO Fang, ZHAN Wenda, et al. Comparison analysis on selectivity of resonant controllers for parallel active power filters[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(30): 5320-5328.
- [12] 任洪波, 吴琼, 邱留良, 等. 分布式能源系统可靠性评价[J]. 热力发电, 2016, 45(4): 65-69.
REN Hongbo, WU Qiong, QIU Liuliang, et al. Reliability assessment of distributed energy system[J]. Thermal Power Generation, 2016, 45(4): 65-69.
- [13] 周洁, 罗安, 陈燕东, 等. 低压微电网多逆变器并联下的电压不平衡补偿方法[J]. 电网技术, 2014, 38(2): 412-418.
ZHOU Jie, LUO An, CHEN Yandong, et al. Voltage unbalance compensation for low-voltage microgrid with multi parallelly connected inverters[J]. Power System Technology, 2014, 38(2): 412-418.
- [14] 马添翼, 金新民, 梁建钢. 孤岛模式微电网变流器的复合式虚拟阻抗控制策略[J]. 电工技术学报, 2013, 28(12): 304-312.
MA Tianyi, JIN Xinmin, LIANG Jiangang. Multiple virtual impedance control method of micro-grid converter under island mode[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(12): 304-312.
- [15] 郭强, 刘和平, 彭东林, 等. 静止坐标系下电流型 PWM 整流器电流环控制策略研究及其参数设计[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(15): 2353-2361.
GUO Qiang, LIU Heping, PENG Donglin, et al. A novel control strategy and its parameter design of the current-loop in a stationary frame for current-source PWM rectifiers[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(15): 2353-2361.
- [16] SAVAGHEBI M, JALILIAN A, VASQUEZ J C, et al. Autonomous voltage unbalance compensation in an islanded droop-controlled microgrid[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(4): 1390-1402.
- [17] 易桂平. 电网电压不平衡条件下微网恒功率控制策略研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(14): 377-387.
YI Guiping. Micro-grid constant power control strategy analysis under grid voltage imbalance[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(14): 377-387.
- [18] 赵新, 金新民, 周飞, 等. 基于比例积分-降阶谐振调节器的并网逆变器不平衡控制[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(19): 84-92.
ZHAO Xin, JIN Xinmin, ZHOU Fei, et al. Unbalanced control of grid-connected inverters based on proportion integral and reduced order resonant controllers[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(19): 84-92.
- [19] 闫俊丽, 彭春华, 陈臣. 基于动态虚拟阻抗的低压微电网下垂控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(21): 1-6.
YAN Junli, PENG Chunhua, CHEN Chen. Droop control strategy based on dynamic virtual impedance in low-voltage microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(21): 1-6.

收稿日期: 2016-06-17; 修回日期: 2016-09-05

作者简介:

屈克庆(1970—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为电力电子技术及在新能源和电力系统中的应用; E-mail: kqqu@shiep.edu.cn

李文祺(1991—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力电子技术及其在新能源和电力系统中的应用。E-mail: liwenqishiep@163.com

(编辑 周金梅)