

电力与传动控制

基于下垂控制的微电网多逆变器并联运行研究

高首聪¹, 顾后生²

(1. 中车株洲电力机车研究所有限公司, 湖南 株洲 412001; 2. 天津大学, 天津 300072)

摘要: 多逆变器并联运行能有效提高微电网系统容量和可再生能源发电能效。文章借鉴同步发电机的运行原理, 采用下垂控制进行多逆变器的柔性互联, 以实现无互联通信下多逆变器并联运行的功率主动分配, 满足逆变器即插即用功能要求。文章介绍了电压电流双环控制器的设计方法, 并分析了其控制参数和阶跃响应之间的关系; 针对低压微电网阻性特点, 设计了虚拟阻抗环节, 以满足下垂控制感性要求, 并增强并联逆变器功率均分效果; 运用特征值法分析了关键参数对系统稳定性的影响, 并进行了相关数值仿真验证。最后搭建物理实验平台, 实验结果验证了所提控制的有效性。

关键词: 微电网; 逆变器; 下垂控制; 虚拟阻抗; 特征值法; 并联控制

中图分类号: TM464

文献标识码: A

文章编号: 2096-5427(2020)02-0041-08

doi:10.13889/j.issn.2096-5427.2020.02.008

Research on the Parallel Operation of Micro-grid Multiple Inverters Based on Droop Control

GAO Shoucong¹, GU Housheng²

(1. CRRC Zhuzhou Institute Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China; 2. Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Parallel operation of multiple inverters can effectively improve the capacity of micro-grid system and energy efficiency of renewable energy generation. In this paper, the operation principle of synchronous generator is used for reference, and the flexible interconnection of multiple inverters is carried out by using droop control, which can realize the active power distribution of multiple inverters in parallel operation without interconnection communication, meeting the plug and play of inverters. This paper introduced a design method of voltage and current dual loop controller, and analyzed the relationship between the control parameters and the response. For the problem of the resistance characteristics of low voltage micro-grid, virtual impedance is designed to meet the inductance requirements of droop control, which can enhance the power sharing effect of parallel inverters. The influence of key parameters on system stability was analyzed by means of eigenvalue method, and the correlation was verified by numerical simulation. Finally, a physical experiment platform was built and the effectiveness of the proposed control was verified.

Keywords: micro-grid; inverter; droop control; virtual impedance; eigenvalue method; parallel control

0 引言

微电网是由分布式发电单元、储能系统、能量转换装置、监控和保护装置、负荷等汇集而成的小型发/配/用电系统, 是一个具有自我控制和管理的自治系统, 其既能运行在并网模式与配电网实现功率交换, 也可以运行在孤岛模式独立地为负荷供电^[1-3]。微电网是分

布式发电单元接入配电网的有效手段, 能有效解决分布式发电间歇性和波动性的问题, 提高可再生能源利用效率^[4-5]。同时, 微电网还具有能源互联的特点, 满足源-网-荷的协调运行与控制, 是智能电网的主流发展方向^[6]。

近年来, 随着配电网中分布式发电系统的可扩展性以及渗透率的不断提高, 单机大容量逆变器已不适用于地域分布广泛的分布式发电系统^[7-8]。逆变器并联运行具有可扩展性, 可通过增减逆变器的数量来灵活控制微

收稿日期: 2020-01-15

作者简介: 高首聪(1976—), 男, 高级工程师, 主要从事风力发电、微电网及综合能源相关技术研究工作。

电网系统的容量^[9-12]。文献[13-15]采用集中控制方式,通过设置集中控制器,产生统一控制信号并通过通信线路发送给各逆变器;各逆变器根据给定的控制信号,实现输出电压幅值和相位同步调节和功率均分功能。逆变器集中控制结构简单,实现相对容易,模块间的均流效果较好,虽然能够扩大系统容量,但一旦集中控制器发生故障,将导致整个并联系统崩溃而降低系统的可靠性。文献[16-18]采用主从式控制方式,系统工作时将其中一个逆变器作为主机,其余逆变器作为从机;主机为电压源型控制,从机则为电流源型控制;从机故障退出不会影响整个系统运行,但是当主机发生故障时,系统不能正常工作。文献[19-21]采用分散逻辑控制方式,分散逻辑控制能减弱系统对单一模块的依赖程度,进一步提高并联系统的可靠性,但是系统内逆变器较多时,实时计算量大,对信息数据实时准确性要求较高,实现过程相对复杂。然而,以上控制方式都受通信距离的制约。

下垂控制借鉴了传统电力系统中同步发电机的运行原理,根据 $P-f$ 和 $Q-v$ 下垂特性,调整输出电压的频率和幅值,实现多逆变器的并联运行以及负载功率均分^[22-23];同时,采用下垂控制的逆变器具有即插即用的特性,可使并联系统供电可靠性得到提高^[24-26]。本文主要研究基于下垂控制的逆变器并联均流控制。

1 微电网结构与控制理论

1.1 微电网系统结构

典型微电网系统结构如图1所示,其由分布式发电单元(如光伏发电和风力发电等)、储能单元和交直流负荷等构成。以直流母线为分界线,可将微电网系统分为直流和交流两部分,直流母线和交流母线之间通过三相逆变器相连。本文主要讨论三相逆变器互联与协调控制方法。

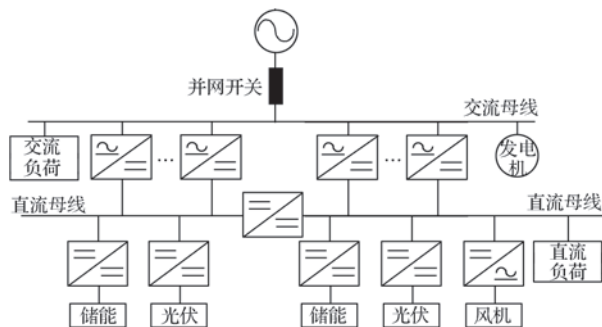


图1 典型微电网结构

Fig.1 Structure of typical micro-grid

本文采用三相半桥型逆变器(图2),其主要由开关管和滤波器组成,开关管分为3个桥臂,每个桥臂包含上下两个开关管,每个开关管反并联一个续流二极管;滤波器通常采用LCL型滤波器。图2中, u_{dc} 为直流侧

电压; i_{dc} 为直流电流; C_{dc} 为直流稳压电容; $S1\sim S6$ 为开关管器件; $D1\sim D6$ 为反并联二极管; v_{inv} 为桥臂中点电压; i_L 为电感电流; v_{Cf} 为电容电压; i_o 为输出电流; v_a, v_b, v_c 为电网电压; L_f 和 R_f 分别为桥臂滤波电感及其寄生电阻; C_f 为滤波电容; R_d 为阻尼电阻; L_c 和 R_c 分别为输出滤波电感及其寄生电阻。

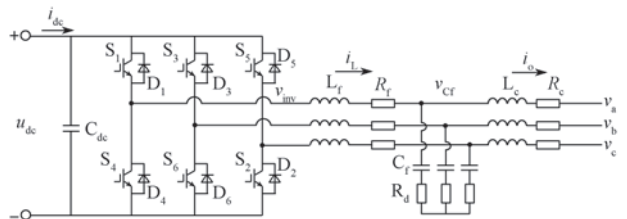


图2 逆变器拓扑结构

Fig.2 Topology of inverter

1.2 下垂控制理论

微电网系统通常由多台逆变器并联运行组成并被连接到公共交流母线。图3为逆变器运行的戴维宁等效电路,用电压源来等效逆变器输出的三相交流电压。图中, v 为逆变器输出电压幅值; U 为公共交流母线电压幅值; R 和 X 分别为线路阻抗 Z 的电阻和电抗; S, P 和 Q 分别为逆变器输出的复功率、有功功率和无功功率; θ 为逆变器输出电压相角(以公共负载端电压矢量作为参考)。

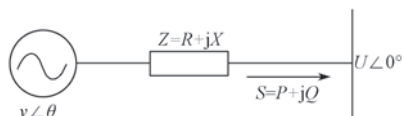


图3 等效电路模型

Fig.3 Equivalent circuit model

由图3可知,逆变器输出功率为

$$S=P+jQ \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} P &= \frac{v}{R^2 + X^2} [R(v - U \cos \theta) + XU \sin \theta] \\ Q &= \frac{v}{R^2 + X^2} [-RU \sin \theta + X(v - U \cos \theta)] \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

由于 θ 很小,因此可近似认为 $\sin \theta \approx \theta$ 和 $\cos \theta \approx 1$;同时,当互联线路阻抗 $X \gg R$ 时,式(2)可被简化为

$$\left. \begin{aligned} P &= \frac{vU\theta}{X} \\ Q &= \frac{v(v-U)}{X} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

从式(3)可以看出,有功功率 P 取决于逆变器输出端电压和公共端电压之间的相位差 θ ;无功功率 Q 取决于两者之间的电压幅值差。逆变器输出电压频率 f 和相角 θ 之间具有如下关系:

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \times \frac{d\theta}{dt} \quad (4)$$

结合式(3)和式(4)，可以得到式(5)所示的下垂控制特性方程。其下垂特性曲线如图4所示，通过控制逆变器输出有功功率，可以控制其输出频率；通过控制其输出无功功率，可以控制其输出电压幅值。

$$\left. \begin{aligned} f &= f_0 - m_p (P - P_e) \\ v &= v_0 - n_q (Q - Q_e) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中： f_0 和 v_0 ——逆变器额定电压频率和幅值； P_e 和 Q_e ——逆变器有功功率和无功功率设定值（一般设置为额定功率）； m_p 和 n_q ——逆变器的有功下垂系数和无功下垂系数。

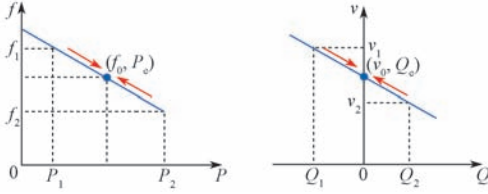


图4 逆变器下垂特性曲线

Fig.4 Characteristic curves of droop control for inverter

当多台逆变器额定容量相同时，若要实现负载功率平均分配，只需要设定各逆变器的下垂系数相同；当额定容量不相同，各逆变器的下垂系数与其额定容量有关，额定容量较小的逆变器选取较大的下垂系数，额定容量较大的逆变器选取较小的下垂系数，负载功率按照各逆变器的额定容量比进行分配。此时下垂系数需满足

$$\left. \begin{aligned} m_{p1} P_{e1} &= m_{p2} P_{e2} = \dots = m_{pi} P_{ei} \\ n_{q1} Q_{e1} &= n_{q2} Q_{e2} = \dots = n_{qi} Q_{ei} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

以两台容量相同的逆变器运行为分析对象，对下垂控制自动均流过程进行分析。两台逆变器采用相同的下垂控制系数。先假设系统已经处于稳定状态，即 $P_1=P_2$ ，

$Q_1=Q_2$ ，在公共负载不变的情况下，若逆变器1因外界因素导致其输出功率 P_1 突然增大，即 $P_1>P_2$ ，此时下垂控制开始工作，减小逆变器1的输出频率 f_1 ，增大逆变器2的频率 f_2 ，从而使得 P_1 减小， P_2 增大，最终达到 $P_1=P_2$ 的稳定运行状态。电压与无功的调节过程与之相同。所以，在下垂控制中，传输线路充当了通信载体，无须额外配置通信线路即可实现负载功率的均分。

2 控制策略设计与特征值分析

2.1 控制策略设计

为使逆变器更好地满足下垂控制中输出阻抗呈感性的要求，实现有功功率和无功功率解耦，本文在电压电流双环控制前引入逆变器输出电流负反馈，构成虚拟阻抗控制。整体控制结构如图5所示，主要分为功率控制、电压电流双环控制以及虚拟阻抗控制3部分。

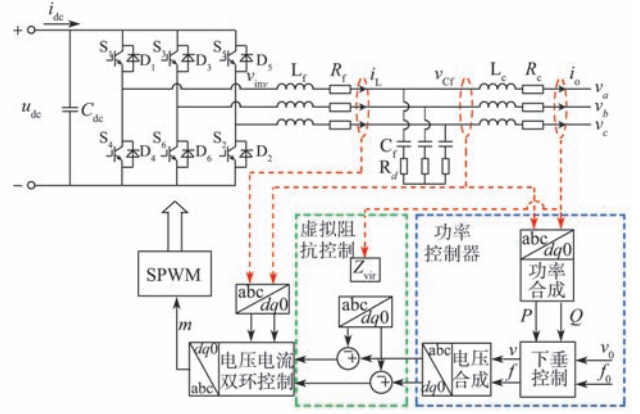


图5 下垂控制结构图

Fig.5 Structure diagram of droop control

2.1.1 功率控制

功率控制器结构如图6所示，首先通过电容电压和输出电流采样得到三相电压和电流瞬时值 v_{Cf} 和 i_o ，经Park变换得到 dq 坐标系下的电压和电流 v_{Cfd} 、 v_{Cfq} 、 i_{od} 、 i_{oq} ，之后计算瞬时功率。为防止因谐波功率影响而引起的频率和电压振荡，使瞬时功率经过一阶低通滤波器得到平均功率， ω_c 为低通滤波器截止频率；再通过下垂控制环节得到相角参考值 θ_{ref} 和电压幅值参考值 v^*_{ref} ，经过电压合成环节得到三相对称参考电压 v^*_{aref} 、 v^*_{bref} 和 v^*_{cref} ；最后再经过Park变换得到 v^*_{dref} 和 v^*_{qref} ，将其作为电压电流双环控制器的参考输入。

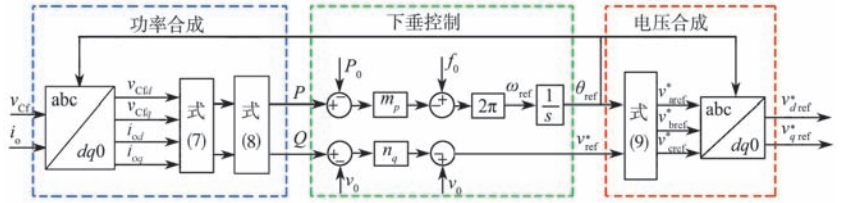


图6 功率控制器结构图

Fig.6 Structure diagram of power controller

图6中功率计算、低通滤波传递函数 $G_{LPF}(s)$ 和参考电压合成公式分别如式(7)、式(8)和式(9)所示：

$$\left. \begin{aligned} P &= 1.5(v_{Cfd} i_{od} + v_{Cfq} i_{oq}) \\ Q &= 1.5(v_{Cfd} i_{oq} - v_{Cfq} i_{od}) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

$$G_{LPF}(s) = \frac{\omega_c}{s + \omega_c} \quad (8)$$

$$\left. \begin{aligned} v^*_{aref} &= v^*_{ref} \cos(\theta_{ref}) \\ v^*_{bref} &= v^*_{ref} \cos(\theta_{ref} - 2\pi/3) \\ v^*_{cref} &= v^*_{ref} \cos(\theta_{ref} + 2\pi/3) \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

式中： i_{od} 、 i_{oq} ——输出电流 i_o 的 d 轴和 q 轴分量； v_{Cfd} 、 v_{Cfq} ——电容电压 v_{Cf} 的 d 轴和 q 轴分量；

2.1.2 电压电流双环控制

电压电流双环控制包括电容电压外环和电感电流内环（图7）。电压外环跟踪功率下垂控制器输出的电压

参考值，保证输出电压波形质量；电流内环可以提高系统的动态响应，并且能够提供过流保护的能力。

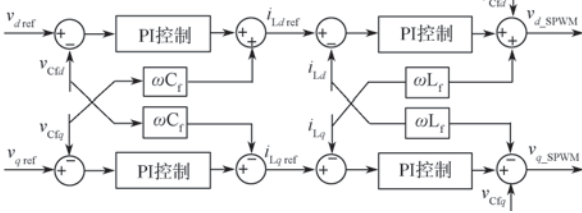


图7 电压电流控制器结构
Fig.7 Structure of voltage and current controller

本文采用 dq 坐标系下的前馈解耦控制，其中 PI 控制器能实现对电感电流的零稳态误差控制。其控制数学模型和物理数学模型分别如式 (10) 和式 (11) 所示。

$$\begin{cases} (sL_f + R_f)i_{Ld} + \omega L_f i_{Lq} = v_{invd} - v_{cfd} \\ (sL_f + R_f)i_{Lq} - \omega L_f i_{Ld} = v_{invq} - v_{cfq} \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} v_{invd} = (i_{Ldref} - i_{Ld})(k_{c,p} + k_{c,i}/s) + v_{cfd} + \omega L_f i_{Lq} \\ v_{invq} = (i_{Lqref} - i_{Lq})(k_{c,p} + k_{c,i}/s) + v_{cfq} - \omega L_f i_{Ld} \end{cases} \quad (11)$$

式中： s ——微分算子； $k_{c,p}$ 和 $k_{c,i}$ ——电流内环 PI 控制器的比例参数和积分参数； i_{Ld} 和 i_{Lq} ——桥臂电感电流 i_L 的 d 轴和 q 轴分量； v_{invd} 和 v_{invq} ——桥臂中点电压 v_{inv} 的 d 轴和 q 轴分量。

由式 (10) 和式 (11) 可知，采用前馈解耦控制后， d 轴电流和 q 轴电流可进行独立控制。以 d 轴电流为例，其闭环传递函数为

$$G_c(s) = \frac{i_{Ld}}{i_{Ldref}} = \frac{k_{c,p}s + k_{c,i}}{L_f s^2 + (R_f + k_{c,p})s + k_{c,i}} \quad (12)$$

式中： $G_c(s)$ ——典型二阶振荡系统。

此系统阻尼比 ζ 和自然频率 ω_n 可以表示为

$$\begin{cases} 2\zeta\omega_n = (R_f + k_{c,p})/L_f \\ \omega_n^2 = k_{c,i}/L_f \end{cases} \quad (13)$$

当滤波电感值和等效电阻阻值分别为 1 mH 和 0.05 Ω ， $k_{c,p}=0.25$ 和 $k_{c,i}=40$ ，可得电流内环动态性能： $\zeta=0.75$ 和 $\omega_n=200$ rad/s。

电流闭环传递函数 $G_c(s)$ 零极点分布情况如图 8 所示，

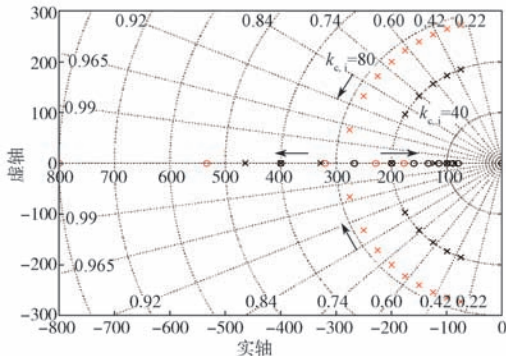


图8 $G_c(s)$ 零极点分布
Fig.8 Zero-pole distribution of $G_c(s)$

积分参数 $k_{c,i}$ 分别取 40 和 80，比例参数 $k_{c,p}$ 由 0.1 变化到 0.5，变化步长为 0.05。由图可知，当积分参数一定时， ω_n 保持不变，随着 $k_{c,p}$ 的增大，其 ζ 逐渐增大；当比例参数保持不变、积分参数增大时，其 ω_n 增大且 ζ 减小。

图 9 示出 $G_c(s)$ 阶跃响应情况。当积分参数一定时，比例参数越大，阶跃响应超调越小，即表示系统阻尼越大，如图中 $k_{c,p}=0.25, k_{c,i}=40$ 和 $k_{c,p}=0.5, k_{c,i}=40$ 所示；当比例参数保持不变，积分参数增大，阶跃响应超调增大，响应加快，表明系统 ζ 减小且 ω_n 增大，如图中 $k_{c,p}=0.25, k_{c,i}=40$ 和 $k_{c,p}=0.25, k_{c,i}=80$ 所示。阶跃响应结果证明上述电流环的理论分析是正确的。

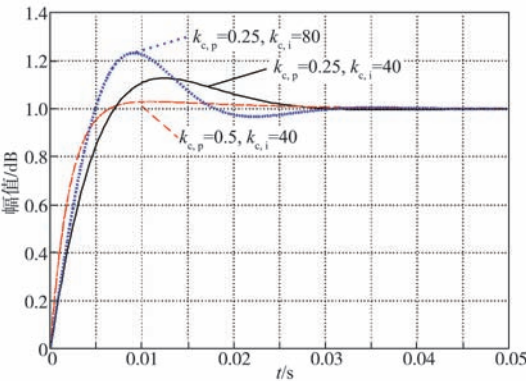


图9 $G_c(s)$ 阶跃响应
Fig.9 Step response of $G_c(s)$

加入 PI 控制器后的电流内环闭环传递函数如图 10 所示，其电流环带宽较宽，具有较快的响应速度，且在基波频率处实现了无差调节。

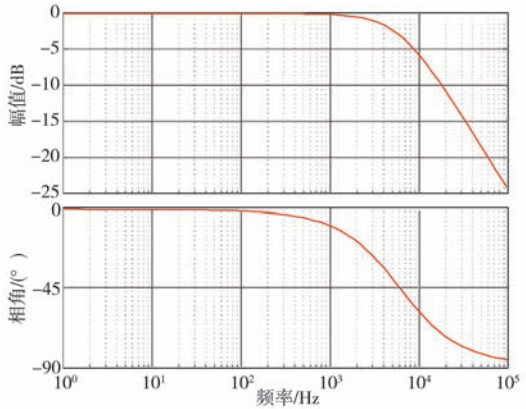


图10 电流内环伯德图
Fig.10 Bode diagram of current inner ring

采用解耦控制的电压环 s 域控制结构如图 11 所示。图中， $G_{pv}(s)$ 为电压环 PI 控制器传递函数，如式 (14) 所示，其中， $k_{v,p}$ 和 $k_{v,i}$ 分别为电压控制器比例参数和积分参数。

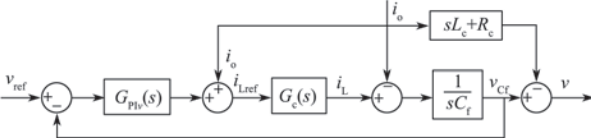


图11 电压环控制结构
Fig.11 Structure diagram of voltage loop control

$$G_{\text{Plv}}(s) = k_{v,p} + \frac{k_{v,i}}{s} \quad (14)$$

电压环传递函数可表示为

$$v(s) = \frac{G_c(s)G_{\text{Plv}}(s)}{sC_f + G_c(s)G_v(s)} v_{\text{ref}}(s) - \left[\frac{1 - G_c(s)}{sC_f + G_c(s)G_v(s)} + (sL_c + R_c) \right] i_o(s) \quad (15)$$

根据式(15)，逆变器输出电压特性可以写成戴维宁等效电路形式：

$$v(s) = G_v(s)v_{\text{ref}}(s) - Z_o(s)i_o(s) \quad (16)$$

式中： $G_v(s)$ ——电压增益， $Z_o(s)$ ——输出阻抗。

由式(16)可知，逆变器可以被等效为理想电压源 $G_v(s)v_{\text{ref}}(s)$ 串联输出阻抗 $Z_o(s)$ 的戴维宁等效电路，且其电压增益和等效输出阻抗除受 LCL 滤波器参数和线路阻抗参数影响之外，还与电压电流环控制参数密切相关。当控制参数分别取 $k_{c,p}=3$, $k_{c,i}=10$ 及 $k_{v,p}=0.4$, $k_{v,i}=1$ ，电路参数分别为 $L_f=1$ mH, $R_f=0.05$ Ω , $C_f=20$ μ F, $L_c=120$ μ H, $R_c=0.01$ Ω 时，电压增益 $G_v(s)$ 和输出阻抗 $Z_o(s)$ 的伯德图分别如图 12 和图 13 所示。在此控制参数下基波频率处，逆变器的输出电压能够完全跟踪给定，但是逆变器的输出阻抗呈阻感性，不能满足传统下垂控制的阻抗特性要求，故需要采取一定的措施改变输出阻抗特性。

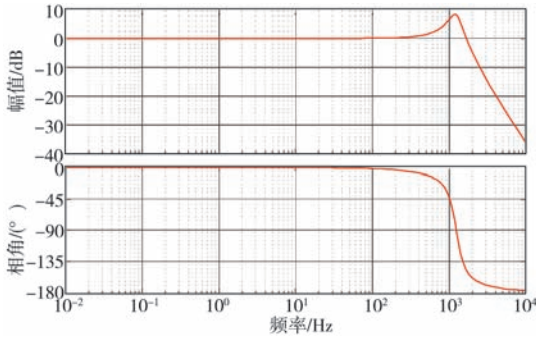


图 12 电压增益伯德图

Fig.12 Bode diagram of voltage gain

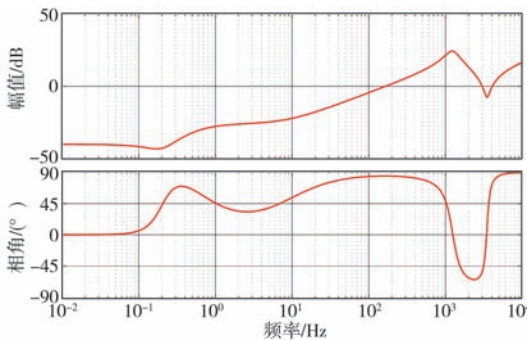


图 13 输出阻抗伯德图

Fig.13 Bode diagram of output impedance

2.1.3 虚拟阻抗控制

虚拟阻抗法通过在系统中加入额外的控制环节模拟电感特性，使得等效输出阻抗呈纯感性特点，满足传统下垂控制阻抗特性要求，从而实现有功功率和无功率

的解耦。虚拟阻抗法不仅不影响原电压电流环控制参数，而且没有实际功率消耗，不影响系统运行效率，因此得到广泛应用。

虚拟阻抗法的原理如图 14 所示，采样逆变器输出电流 i_o ，为消除谐波电流影响，可先对采样电流进行低通滤波，将滤波后的电流乘以反馈系数（即虚拟阻抗系数 $Z_{\text{vir}}(s)$ ）形成负反馈回路，由功率下垂控制环节得到的参考电压 v_{ref}^* 减去虚拟阻抗所产生的压降得到一个新的电压参考值 v_{ref} ，然后经过电压电流双闭环控制环节，最终得到 SPWM 信号进行调制，其数学表达形式如式(17)所示。

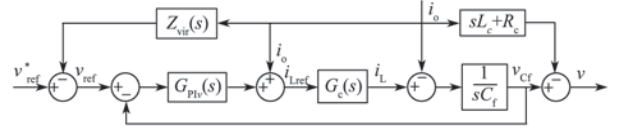


图 14 基于虚拟阻抗的控制结构图

Fig.14 Control structure diagram based on virtual impedance

$$v_{\text{ref}}(s) = v_{\text{ref}}^*(s) - Z_{\text{vir}}(s)i_o(s) \quad (17)$$

将式(17)代入式(16)，可得

$$v(s) = G_v(s)v_{\text{ref}}^*(s) - [Z_o(s) + G_v(s)Z_{\text{vir}}(s)]i_o(s) = G_v(s)v_{\text{ref}}^*(s) - Z_{\text{all}}(s)i_o(s) \quad (18)$$

其中：

$$Z_{\text{vir}}(s) = sL_{\text{vir}} + R_{\text{vir}} \quad (19)$$

$$G_v(s) = \frac{G_c(s)G_{\text{Plv}}(s)}{sC_f + G_c(s)G_v(s)} \quad (20)$$

$$Z_{\text{all}}(s) = \frac{1 - G_c(s)}{sC_f + G_c(s)G_v(s)} + \frac{G_c(s)G_v(s)Z_{\text{vir}}(s)}{sC_f + G_c(s)G_v(s)} + (sL_c + R_c) \quad (21)$$

式中： L_{vir} 和 R_{vir} 分别表示虚拟电抗和虚拟电阻。

可以看出，加入虚拟阻抗控制后，电压增益 $G_v(s)$ 没有发生任何改变，等效输出阻抗 $Z_{\text{all}}(s)$ 比未加虚拟阻抗时多了一项。从逆变器输出端口看进去，其等效为固定输出阻抗 $Z_o(s)$ ，再串联一个阻抗 $G_v(s)Z_{\text{vir}}(s)$ ，通过调节虚拟阻抗控制参数 $Z_{\text{vir}}(s)$ ，可以在很大范围内调节逆变器输出阻抗，使其满足微电网下垂控制调节。

图 15 和图 16 分别示出不同参数对等效输出阻抗的

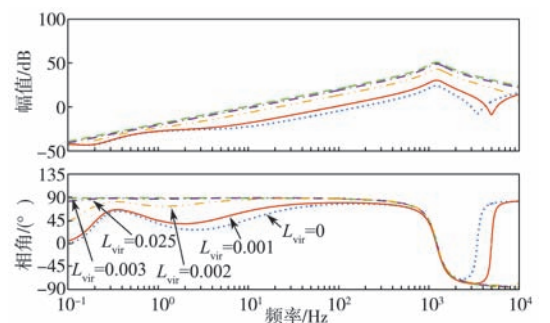


图 15 虚拟电抗对等效输出阻抗影响

Fig.15 Effect of virtual reactance on equivalent output impedance

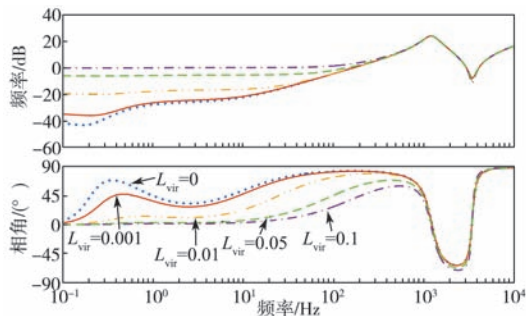


图 16 虚拟电阻对等效输出阻抗影响
Fig.16 Effect of virtual resistance on equivalent output impedance

影响情况。从图中可以看出，增大虚拟电抗值，传递函数的相角在基波频率处越接近 90°，输出阻抗呈感性；增大虚拟电阻值，输出阻抗在基波频率处呈阻性。

在 dq 坐标系下，虚拟阻抗可表示为式 (22)，其控制结构如图 17 所示。

$$\begin{cases} \Delta v_d = R_{vir} i_{od} + \omega L_{vir} i_{oq} \\ \Delta v_q = R_{vir} i_{oq} - \omega L_{vir} i_{od} \end{cases} \quad (22)$$

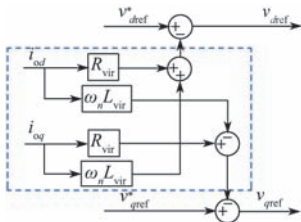


图 17 dq 坐标系下虚拟阻抗控制结构
Fig.17 Virtual impedance control structure in dq coordinate system

2.2 特征值分析

根据 2.1 节可以得到完整的控制器模型，对其进行建模可以分析不同参数对系统的影响。本文采用特征值分析法讨论不同参数对系统的影响。

微电网系统特征值分布如图 18 所示，其主要分布在 3 个区域，其中区域 1 和区域 2 为高频特征值，主要受滤波器参数和线路阻抗参数以及电压电流双环控制器参数影响。区域 3 中的低频特征值主要受到功率控制器中下垂参数和虚拟阻抗参数的影响，因其阻尼较小，参数的变化更容易导致系统的不稳定。

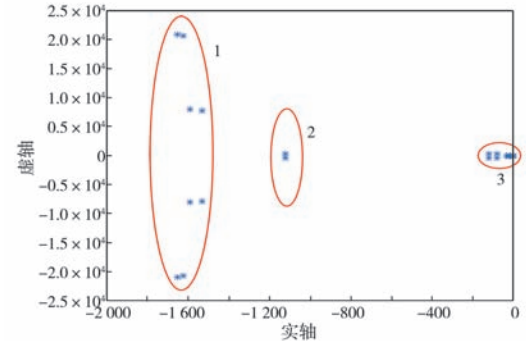


图 18 微电网系统特征值分布
Fig.18 Characteristic value distribution of micro-grid system

2.2.1 下垂系数影响

图 19 和图 20 分别为特征值随有功下垂系数 m_p 和无功下垂系数 n_q 增大而变化的轨迹， m_p 从 0 增大到 0.3， n_q 从 0 增大到 5。从图中可以看出，随着下垂系数的增大，系统特征值向虚轴靠近，最终进入右半平面，系统变得不稳定。比较取值范围可以发现，系统的稳定性受无功下垂系数影响较小。

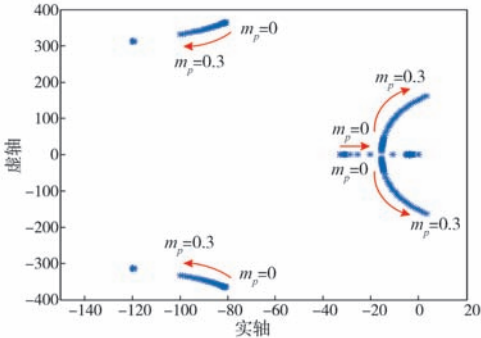


图 19 m_p 增大时系统特征值轨迹
Fig.19 System eigenvalue trace with m_p increasing

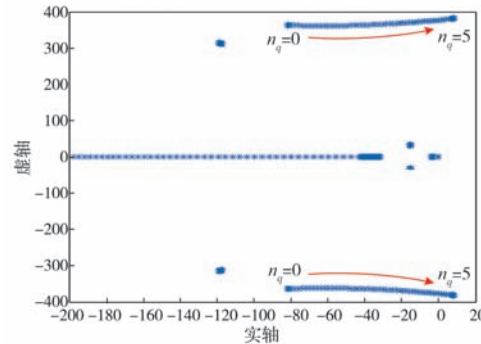


图 20 n_q 增大时系统特征值轨迹
Fig.20 System eigenvalue trace with n_q increasing

2.2.2 虚拟阻抗参数影响

图 21 为虚拟阻抗系数 L_{vir} 从 0 增大到 0.01 时的特征值变化轨迹。可以看出，加入虚拟阻抗控制环后，系统的特征值全部位于左半平面，随着 L_{vir} 的增大，系统的一组特征值逐渐向虚轴靠近，将导致系统不稳定。虚拟阻抗环的加入能够增加系统稳定性，但其 L_{vir} 不能过大，需在合理的范围内选择适当的 L_{vir} 。

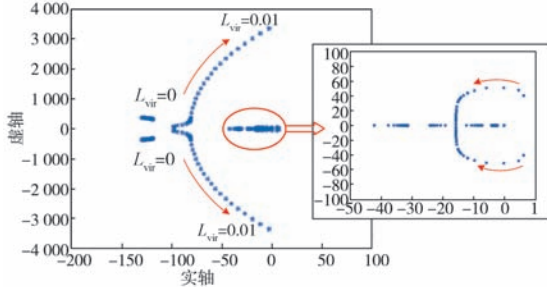


图 21 L_{vir} 增大时系统特征值轨迹
Fig.21 System eigenvalue trace with L_{vir} increasing

3 仿真验证

为验证所提控制方法的正确性以及关键参数对系统

的影响,本文基于PSCAD/EMTDC仿真平台搭建两台逆变器并联运行的仿真算例,仿真结构如图22所示,仿真中相关参数如表1所示。

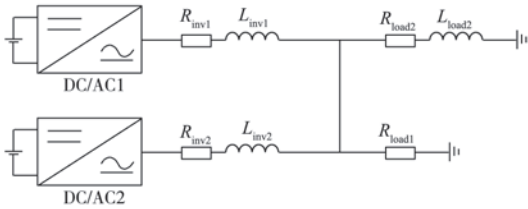


图 22 仿真结构图
Fig.22 Structure diagram of simulation

表 1 仿真算例参数
Tab.1 Parameters of simulation example

类别	参数	数值
拓扑结构 参数	直流电容 C_{dc}	4 000 μF
	LCL 滤波器	1 mH, 0.05 Ω ; 20 μF , 0.5 Ω ; 0.12 mH, 0.02 Ω
	功率设定值 P_0/Q_0	0 kW/0 kVA
控制 参数	频率电压设定值 f_0/v_0	50 Hz/311 V
	下垂系数 m_p/n_q	0.016 66/0.033 33
	滤波截止频率 ω_c	31.4 rad/s
	电流环参数 $k_{c,p}/k_{c,i}$	3/10
	电压环参数 $k_{v,p}/k_{v,i}$	0.4/1
	虚拟阻抗 L_{vir}/R_{vir}	0.001/0
负载参数	$R_{load1}/R_{load2}/L_{load2}$	7.25 Ω /1 Ω /0.06 H
线路参数	R_{inv1}/L_{inv1}	0 Ω /0 μH
	R_{inv2}/L_{inv2}	0.032 Ω /13.4 μH

3.1 有功下垂系数影响

有功下垂系数 m_p 增大时的系统响应波形如图 23 所示。 $t=0.5\text{ s}$ 时刻, m_p 从 0.016 66 变为 0.25。可以看出,随着 m_p 的增大,微电网系统开始振荡,两逆变器之间开始出现有功环流;并且由于 m_p 过大,系统频率跌落至 47 Hz,超过微电网允许的波动范围。

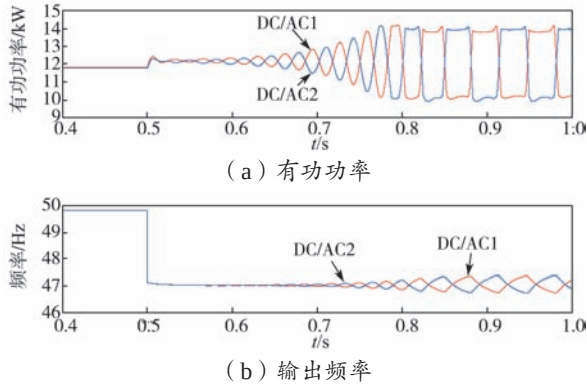


图 23 有功功率和频率波形
Fig.23 Waveforms of active power and frequency

3.2 无功下垂系数影响

两逆变器输出功率和电压随 n_q 增大的波形如图 24 所示。 $t=0.5\text{ s}$ 时刻, n_q 从 0.033 33 增大到 0.1,与有功下垂系数现象一致,微电网系统开始振荡,且两逆变器之间出现无功环流。由于 n_q 过大,系统电压跌落至

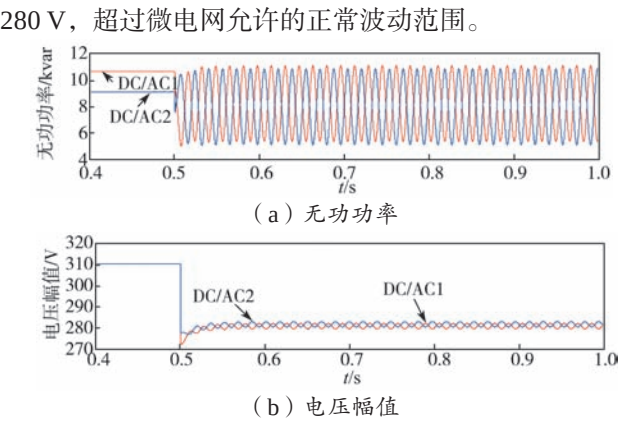


图 24 无功功率和电压波形
Fig.24 Waveforms of reactive power and voltage

由以上分析可知,当 m_p 和 n_q 在微电网允许波动范围内取值时,微电网系统能稳定运行; m_p 和 n_q 取值过大,不仅使微电网电压幅值和频率超出正常运行范围,而且会导致更严重的稳定性问题。

3.3 虚拟阻抗参数影响

虚拟阻抗参数变化时的系统频率和功率响应波形如图 25 所示。 $t=0.50\text{ s}$ 时刻, L_{vir} 由 0.001 增大到 0.005。从图中可以看出,当 L_{vir} 增大时,系统开始振荡,变得不稳定,最终发散崩溃。

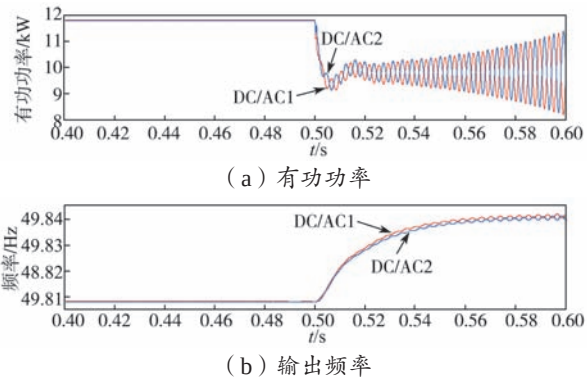


图 25 有功功率和频率波形
Fig.25 Waveforms of active power and frequency

4 实验验证

为验证采用下垂控制的多机并联运行效果,基于图 22 所示的双机并联运行结构,搭建了如图 26 所示的实验平台,包括两台逆变器、模拟直流源、可变负载、示波器和电脑上位机软件等。实验参数与仿真算例的一致。

图 27 为逆变器并联运行电流波形,图 27(a) 表示逆变器 1 运行过程中逆变器 2 投入运行时电流波形,由图可知,在逆变器 2 投入运行后,经过一段时间的暂态调节,二者自动实现负载功率均分,实现了下垂控制的即插即用。图 27(b) 表示负载切换前后的两逆变器输出电流情况,从图中可以看出,当负载所需功率突变时,两逆变器同时响应,瞬间增大自身输出,且保持负载功率均分。

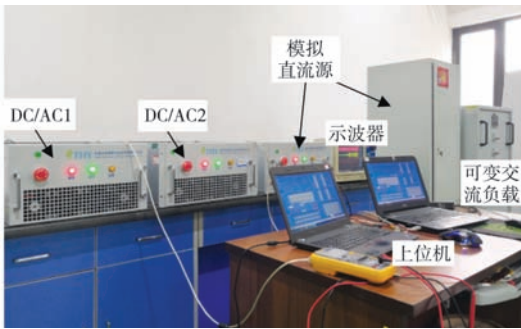
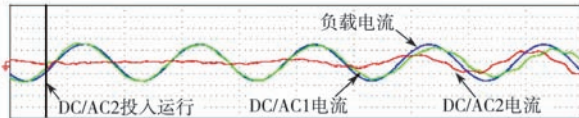
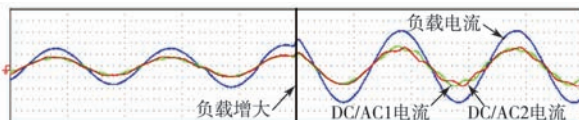


图 26 实验平台

Fig.26 Experimental platform



(a) DC/AC2 启动时刻电流波形



(b) 负载增大时刻电流波形

图 27 逆变器并联运行实验电流波形

Fig.27 Current waveforms of parallel operation experiment of inverters

5 结语

本文基于下垂控制的基本原理,对微电网并联逆变器下垂控制器进行设计,包括功率控制、电压电流双环控制器和虚拟阻抗控制器;详细分析了电压电流环控制参数和逆变器响应之间的关系,并引入虚拟阻抗控制,使得逆变器输出阻抗呈感性,满足 $P-f$ 和 $Q-V$ 的下垂特性要求,且多机并联均流运行效果更好。针对两台逆变器并联运行的系统,运用特征值法分析了关键参数对系统稳定性的影响,仿真和实验结果均验证了该控制方法的有效性。但是采用虚拟阻抗法校正阻抗特性,放大了稳态误差,需要增加二次控制使输出更精确,这是后续需要进一步解决的问题。

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.
- [2] 朱永强,贾利虎,蔡冰倩,等.交直流混合微电网拓扑与基本控制策略综述[J].高电压技术,2016,42(9):2756-2767.
- [3] LOH P C, LI D, CHAI Y K, et al. Autonomous Operation of Hybrid Microgrid with AC and DC Subgrids [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(5), 2214-2223.
- [4] 刘畅,卓建坤,赵东明,等.利用储能系统实现可再生能源微电网灵活安全运行的研究综述[J].中国电机工程学报,2020,40(1):1-18.
- [5] 王丹,孟政吉,贾宏杰,等.面向新型城镇的能源互联系统规划关键技术研究及展望[J].电力系统自动化,2019,43(14):16-28.
- [6] 李霞林,郭力,王成山,等.直流微电网关键技术研究综述[J].中国电机工程学报,2016,36(1):2-17.
- [7] 张平,王俊辉,胡朝燕,等.基于分布式控制系统的500kW光伏

逆变器设计[J].电气自动化,2014,36(4):41-42,73.

- [8] HE J W, LI Y W, WANG C S, et al. Hybrid Microgrid with Parallel- and Series-Connected Microconverters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(6): 4817-4831.
- [9] CHEN Y D, GUERRERO J M, SHUAI Z K, et al. Fast Reactive Power Sharing, Circulating Current and Resonance Suppression for Parallel Inverters Using Resistive-Capacitive Output Impedance [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(8): 5524-5537.
- [10] 陈杰,刘名凹,陈新,等.基于下垂控制的逆变器无线并联与环流抑制技术[J].电工技术学报,2018,33(7):1450-1460.
- [11] 阳敏,罗安,肖华根,等.多逆变器并联系统环流分析及抑制方法[J].电力系统及其自动化学报,2017,29(10):6-11.
- [12] HAN Y, LI H, SHEN P, et al. Review of Active and Reactive Power Sharing Strategies in Hierarchical Controlled Microgrids [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(3): 2427-2451.
- [13] 许恩泽,刘刚,孙健,等.基于虚拟同步机的集中式储能变流器研制[J].电力电子技术,2018,52(7):97-102.
- [14] PRASANNA V, SRINIVASAN D, PANDA S K. Design, analysis and implementation of a four-tier centralized control architecture for intelligent operation of grid-connected microgrids [C]//2016 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES). Trivandrum: IEEE,2016.
- [15] ABESSI A, VAHIDINASSAB V, GHAZIZADEH M S. Centralized Support Distributed Voltage Control by Using End-Users as Reactive Power Support[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(1): 178-188.
- [16] 朱永强,王福源,赵娜,等.主从控制混合微电网中互联变流器控制策略[J].电力建设,2018,39(8):102-110.
- [17] 付子义,王艺龙.基于主从结构微网控制策略运行分析[J].电子测量技术,2016,39(10):6-10.
- [18] LAI J G, LU X Q, YU X H, et al. Distributed Multi-DER Cooperative Control for Master-Slave-Organized Microgrid Networks with Limited Communication Bandwidth [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019, 15(6): 3443-3456.
- [19] SCHIFFER J, SEEL T, RAISCH J, et al. Voltage Stability and Reactive Power Sharing in Inverter-Based Microgrids with Consensus-Based Distributed Voltage Control [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2016, 24(1): 96-109.
- [20] LI Z W, ZANG C Z, ZENG P, et al. Fully Distributed Hierarchical Control of Parallel Grid-Supporting Inverters in Islanded AC Microgrids [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2018, 14(2): 679-690.
- [21] 刘海波,毛承雄,陆继明,等.基于分散逻辑的电子电力变压器并联控制技术[J].高电压技术,2007,33(4):151-156.
- [22] 汤胜清,曾正,程冲,等.微电网中多功能并网逆变器的无线协调控制[J].电力系统自动化,2015,39(9):200-207.
- [23] LIANG H, CHOI B J, ZHUANG W H, et al. Stability Enhancement of Decentralized Inverter Control Through Wireless Communications in Microgrids [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2013, 4(1): 321-331.
- [24] ZHONG Q C, ZENG Y. Universal Droop Control of Inverters with Different Types of Output Impedance [J]. IEEE Access, 2016, 4: 702-712.
- [25] 章伟明,赵巧娥,张强,等.孤岛运行时逆变器并联改进下垂控制策略[J].电气自动化,2019,41(4):76-79.
- [26] 陈杰,闫震宇,赵冰,等.下垂控制三相逆变器阻抗建模与并网特性分析[J].中国电机工程学报,2019,39(16):4846-4856,4986.
- [27] 孟明,陈世,赵树军,等.新能源微电网研究综述[J].现代电力,2017,34(1):1-7.
- [28] 郭力,张绍辉,李霞林,等.考虑电网分时电价的直流微电网分层协调控制[J].电网技术,2016,40(7):1992-2000.