

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.211734

直流微电网的惯性与阻尼自适应协调控制

孟飞, 曲骅, 郭添亨, 杜彦锟, 冯允良

(中山供电局项目与供应链服务中心, 广东 中山 528401)

摘要: 随着分布式发电单元的不断接入, 直流微电网逐渐呈现出低惯性和弱阻尼特性, 直流母线电压会随着功率扰动而发生突变或失稳。采用变下垂控制为系统提供虚拟惯性。通过根轨迹分析可知变下垂控制为系统提供虚拟惯性的同时会削弱系统的阻尼, 使直流微电网出现持续振荡的风险。在此基础上, 设计一种虚拟惯性与阻尼的自适应协调控制策略。其控制函数以电压为自变量, 在大扰动和小扰动情况下, 能够为系统提供虚拟惯性和有源阻尼, 从而改善直流微电网的低惯性和弱阻尼特性, 保证系统的安全稳定运行。通过在 Matlab/Simulink 仿真平台上搭建直流微电网模型, 验证了所提协调控制策略的有效性。

关键词: 直流微电网; 变下垂控制; 虚拟惯性; 有源阻尼; 自适应协调控制

Adaptive coordinated control of inertia and damping for DC microgrid

MENG Fei, QU Hua, GUO Tianheng, DU Yankun, FENG Yunliang

(Project and Supply Chain Service Center of Zhongshan Power Supply Bureau, Zhongshan 528401, China)

Abstract: With the continuous access of distributed generation units, DC microgrid gradually presents the characteristics of low inertia and weak damping, and the DC bus voltage will suddenly change or become unstable with power disturbance. In this paper, variable droop control is used to provide virtual inertia for the system. Through root locus analysis, it is proved that when variable droop control provides virtual inertia for the system, the damping of the system will be weakened, resulting in the risk of continuous oscillation of DC microgrid. On this basis, this paper designs an adaptive coordinated control strategy of virtual inertia and damping. Its control function takes voltage as the independent variable to provide virtual inertia and active damping for the system under large disturbance and small disturbance, so as to improve the low inertia and weak damping characteristics of DC microgrid and ensure the safe and stable operation of the system. The effectiveness of the proposed coordinated control strategy is verified by building a DC microgrid model on the Matlab/Simulink simulation platform.

This work is supported by the General Program of National Natural Science Foundation of China (No. 51977001).

Key words: DC microgrid; variable droop control; virtual inertia; active damping; adaptive coordinated control

0 引言

直流微电网因其具备灵活的功率调节能力、简化的换流环节, 并且不存在功角稳定和频率稳定等复杂的稳定性问题, 已成为新能源与直流负荷接入电网的有效方式之一^[1-6]。但由于系统中存在大量的电力电子换流器, 导致直流微电网具有较低的惯性^[7-8], 同时由于风、光等分布式电源会发生频繁的

功率扰动, 使得直流母线电压剧烈变化^[9], 甚至振荡失稳, 因此直流微电网的稳定运行面临严峻挑战。

直流微电网的惯性主要反映在系统受到扰动时, 其阻止电压突变的能力。现有的研究工作主要通过附加电容器或改善系统控制策略的方法增强直流微电网的惯性。文献[10-12]通过在系统中并联超级电容器提高系统的惯性, 但超级电容器成本较高, 且直流微电网处于稳态时, 超级电容器处于闲置状态, 造成资源浪费。而通过改变换流器的控制策略为系统提供虚拟惯性, 被认为是增强惯性更具潜力的方法, 文献[13]根据电压变化自适应地调节下垂

基金项目: 国家自然科学基金面上项目资助(51977001); 广东电网有限责任公司基建技术创新课题(032000WS22180001)

系数，为直流微电网提供大小可变地惯性支持，文献[14]提出了风储直流微网的虚拟惯性控制，在各个端口虚拟出较大的电容值，并通过协调控制弥补了风电机组虚拟惯性控制的不足，文献[15-17]通过类比交流微网中虚拟同步发电机，提出了应用在直流微电网中的虚拟惯性控制策略。虽然上述方法能有效提高系统的惯性，保证直流电压在功率扰动情况下不会发生突变，但并不能保证系统的稳定运行。

直流微电网的阻尼反映在扰动情况下，系统维持稳定运行的能力，阻止直流电压振荡失稳。文献[18-19]对增加虚拟惯性的系统进行阻尼特性分析，并以此作为参数的选择标准，但并没有提出加强系统阻尼的措施。文献[20-21]在直流系统的控制器中引入低通滤波环节增强系统的阻尼，文献[22-23]利用状态反馈控制技术增加直流微电网的阻尼，文献[24]增设输出电流反馈支路，在源侧换流器的输出端口引入虚拟电阻，改善系统稳定运行的能力，但是上述方法没有与虚拟惯性控制相结合，因此在功率频繁扰动系统中，直流母线电压会出现剧烈波动，可能会造成设备损坏或继电保护装置误动等不利影响。文献[25]实现了变速风电机组的虚拟惯性控制与有功、无功阻尼控制配合，文献[26]提出了虚拟同步发电机的转动惯量和阻尼系数协同自适应控制策略，均在惯性控制的基础上增强系统的阻尼，但是这些方法只适用在交流电网中。因此，同时考虑直流微电网的惯性与阻尼控制需进一步深入研究。

本文针对直流微电网中低惯性和弱阻尼问题，提出了一种惯性与阻尼的自适应协调控制，即在系统处于稳态或受到小扰动时，虚拟惯性调节系数根据控制函数调整为负值，协调控制为系统提供有源阻尼，阻止电压振荡失稳；当系统受到较大扰动时，虚拟惯性调节系数被调整为正值，协调控制能够为系统提供虚拟惯性，阻止电压突变。通过该自适应协调控制可实现系统的高惯性和强阻尼特性，为验证该协调控制策略的有效性，在 Matlab/Simulink 中搭建了直流微电网模型，证明了所提控制策略的有效性。

1 虚拟惯性控制下直流微电网的数学模型

1.1 直流微电网拓扑结构

图 1 为直流微电网的典型拓扑图，包括风力发电单元、光伏发电单元、储能单元及负载。其中，风电、光伏分别采用 VSC_{wf}、Boost DC/DC 换流器与直流母线相连，输出功率为 P_{wf} 、 P_{pv} ；储能侧作为电压控制单元，采用双向 Boost-Buck 换流器并

网， P_B 为储能单元的输入或输出功率；交、直流负载的输入功率分别为 P_{acl} 、 P_L 。

风、光电源输出功率一般采用最大功率跟踪控制，在短暂扰动期间，可将其视为负的恒功率负荷^[17]。直流微网的模型可简化为图 2，其中， u_s 为储能单元端电压， u_{dc} 为直流母线电压， L_B 、 R_B 分别为滤波电感和寄生电阻， i_{LB} 、 i_o 分别为储能换流器输入电流、输出电流， i_{dc} 为储能换流器输入到直流母线的电流； d_B 为开关器件 IGBT₁ 的占空比，由于双向变换器中开关器件的占空比互补，则 IGBT₂ 的占空比为 $1-d_B$ ， R_L 为直接接入母线的直流负荷， $i_{cpl\Sigma}$ 为各个恒功率负载的电流和，即 $i_{cpl\Sigma} = P_{cpl} / u_{dc}$ ， $P_{cpl} = P_{acl} - P_{wf} - P_{pv}$ 。

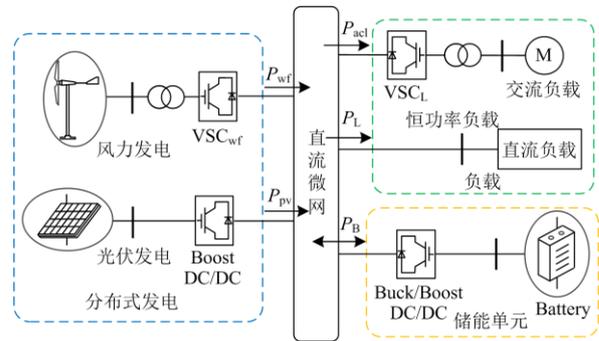


图 1 直流微网的典型拓扑

Fig. 1 Typical topology of DC microgrid

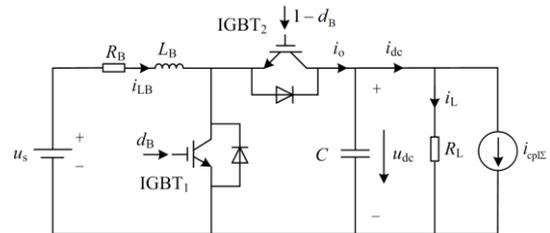


图 2 直流微网的简化模型

Fig. 2 Simplified model of DC microgrid

1.2 直流微电网变下垂控制模型

由图 1、图 2 可得，直流微电网对应的数学模型为

$$\begin{cases} L_B \frac{di_{LB}}{dt} = u_s - (1-d_B)u_{dc} - R_B i_{LB} \\ C \frac{du_{dc}}{dt} = (1-d_B)i_{LB} - i_{dc} \\ i_{dc} = \frac{u_{dc}}{R_L} + \frac{P_{cpl}}{u_{dc}} \end{cases} \quad (1)$$

储能变换器采用 u - P 下垂控制维持直流母线电压稳定。

$$u_{dc} = u_{dcref} - \frac{1}{k_B} P_B \quad (2)$$

式中: u_{dcref} 为直流母线电压的参考值; k_B 为下垂系数。

由图 2 可知, 储能单元侧满足 KCL 方程:

$$C \frac{du_{dc}}{dt} = i_o - i_{dc} \quad (3)$$

式(3)两端同时乘以直流电压 u_{dc} , 可得

$$C u_{dc} \frac{du_{dc}}{dt} = u_{dc} i_o - u_{dc} i_{dc} = P_B - P_{dc} \quad (4)$$

式中, P_{dc} 为储能侧输入到直流母线的功率。由式(4)可知, 当直流母线出现功率波动时, 稳压电容 C 越大, 母线电压的变化率 du_{dc}/dt 越小, 系统的惯性越大, 但实际上, 直流母线侧并联的电容值较小, 电压会发生较大的突变。

直流微电网的低惯性特性使直流母线电压对系统内功率的波动变得极为敏感, 因此考虑通过变下垂控制为直流微网提高虚拟惯性^[13], 从而改善电压质量, 变下垂控制的表达式为

$$k_B = k_1 - k_2 \frac{du_{dc}}{dt} \quad (5)$$

式中: k_1 为系统稳定时的常下垂系数; k_2 为虚拟惯性控制系数。将式(2)、式(5)代入式(4), 可得变下垂控制下的功率关系为

$$C u_{dc} \frac{du_{dc}}{dt} = P_{B0} - P_{dc} - k_2 \frac{du_{dc}}{dt} (u_{dcref} - u_{dc}) \quad (6)$$

式中, P_{B0} 为常下垂系数时的功率输出。式(6)两端同时对时间积分, 可得

$$\frac{1}{2} C u_{dc}^2 = W_{B0} - W_{dc} - k_2 u_{dcref} u_{dc} + \frac{1}{2} k_2 u_{dc}^2 \quad (7)$$

式中, W_{B0} 和 W_{dc} 分别为常下垂系数时储能变换器的输出能量和储能侧输出到直流母线的能量。假设 $u_{dcref} \approx u_{dc}$, 则式(7)可改写为式(8)。

$$\frac{1}{2} (C + k_2) u_{dc}^2 = W_{B0} - W_{dc} \quad (8)$$

由式(8)可知, 变下垂控制提供的惯性与 k_2 的取值成正比, 当 $k_2 > 0$ 时, 变下垂控制可为系统提供虚拟惯性。

变下垂控制的结构如图 3 所示, 采用双闭环控制结构。其中, 惯性控制环节根据式(5)进行设计, 使得下垂系数随着电压变化而变化, 此外, 由于控

制系统中的微分环节对输入信号中的高频干扰十分敏感, 常导致信号被干扰淹没, 因此采用高通滤波器代替微分环节, ω_c 为高通滤波器的截止角频率; 电压控制外环可由式(2)得出, 输出电流内环参考值 i_{LBref} ; 内环为电流环, 控制蓄电池的输出电流跟踪其参考值, 维持系统内功率平衡而稳定电压, 输出占空比 d_B , 进而生成相应的 PWM 波控制换流器。

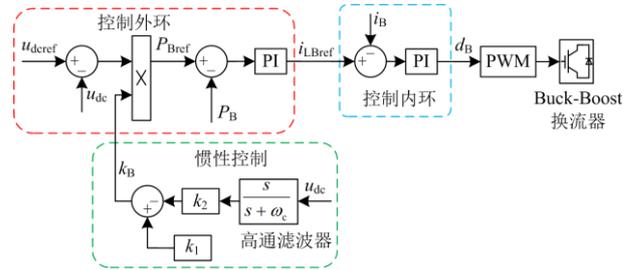


图 3 基于变下垂控制的虚拟惯性控制框图

Fig. 3 Virtual inertia control block diagram based on variable droop control

由图 3 可得, 基于变下垂系数的虚拟惯性控制的数学模型为

$$\begin{cases} d_B = k_{ip} \{ k_{up} [(u_{dcref} - \frac{u_{dc}}{U_{dc}^*}) k_B - \frac{P_B}{P_B^*}] + k_{ui} x_1 - \frac{i_{LB}}{I_{LB}^*} \} + k_{ii} x_2 \\ \frac{dx_1}{dt} = (u_{dcref} - \frac{u_{dc}}{U_{dc}^*}) k_B - \frac{P_B}{P_B^*} \\ \frac{dx_2}{dt} = k_{up} [(u_{dcref} - \frac{u_{dc}}{U_{dc}^*}) k_B - \frac{P_B}{P_B^*}] + k_{ui} x_1 - \frac{i_{LB}}{I_{LB}^*} \\ P_B = u_s i_{LB} \\ k_B = k_1 - k_2 u_{dc} \frac{s}{s + \omega_c} \end{cases} \quad (9)$$

式中: x_1 为控制外环积分环节的输出; x_2 为下垂控制内环积分环节的输出; k_{up} 、 k_{ui} 和 k_{ip} 、 k_{ii} 分别为外环和内环 PI 环节的比例和积分系数。

对式(1)、式(9)在稳态点附近进行小信号分析, 将非线性系统线性化, 可得系统的小信号模型为

$$\dot{\mathbf{x}}_0 = \mathbf{A}_0 \mathbf{x}_0 \quad (10)$$

式中: $\mathbf{x}_0 = [\Delta x_1 \ \Delta x_2 \ \Delta i_{LB} \ \Delta u_{dc} \ \Delta k_B]^T$, Δx_1 、 Δx_2 、 Δi_{LB} 、 Δu_{dc} 、 Δk_B 为状态变量 x_1 、 x_2 、 i_{LB} 、 u_{dc} 、 k_B 在稳态点附近的小扰动量; \mathbf{A}_0 为状态矩阵, 如式(11)所示。

2 虚拟惯性控制对直流微网稳定的影响

通过系统状态矩阵的根轨迹分析虚拟惯性控制对系统稳定性的影响。系统的参数如表 1 所示。

$$A_0 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -\frac{u_s}{P_B^*} & -\frac{k_1}{U_{dc}^*} & u_{dref} - \frac{U_{dc}}{U_{dc}^*} \\ k_{ui} & 0 & -\frac{k_{up}u_s}{P_B^*} - \frac{1}{I_{LB}^*} & -\frac{k_{up}k_1}{U_{dc}^*} & k_{up}u_{dref} - \frac{k_{up}U_{dc}}{U_{dc}^*} \\ \frac{k_{ip}k_{ui}U_{dc}}{L_B} & \frac{k_{ii}U_{dc}}{L_B} & -\frac{R_B}{L_B} - \frac{k_{ip}U_{dc}}{I_{LB}^*L_B} - \frac{k_{ip}k_{up}U_{dc}u_s}{L_B P_B^*} & -\frac{1-D_B}{L_B} - \frac{k_{ip}k_{up}k_1U_{dc}}{U_{dc}^*L_B} & \frac{k_{ip}k_{up}u_{dref}U_{dc}}{L_B} - \frac{k_{ip}k_{up}U_{dc}^2}{L_B U_{dc}^*} \\ -\frac{k_{ip}k_{ui}I_{LB}}{C} & -\frac{k_{ii}I_{LB}}{C} & \frac{1-D_B}{C} + \frac{k_{ip}I_{LB}}{I_{LB}^*C} + \frac{k_{ip}k_{up}I_{LB}u_s}{CP_B^*} & \frac{k_{ip}k_{up}k_1I_{LB}}{U_{dc}^*C} - \frac{1}{R_2C} & \frac{k_{ip}k_{up}U_{dc}I_{LB}}{CU_{dc}^*} - \frac{k_{ip}k_{up}u_{dref}I_{LB}}{C} \\ \frac{k_2k_{ip}k_{ui}I_{LB}}{C} & \frac{k_2k_{ii}I_{LB}}{C} & -k_2\left(\frac{1-D_B}{C} + \frac{k_{ip}I_{LB}}{I_{LB}^*C} + \frac{k_{ip}k_{up}I_{LB}u_s}{CP_B^*}\right) & -k_2\left(\frac{k_{ip}k_{up}k_1I_{LB}}{U_{dc}^*C} - \frac{1}{R_2C}\right) & k_2\left(\frac{k_{ip}k_{up}u_{dref}I_{LB}}{C} - \frac{k_{ip}k_{up}U_{dc}I_{LB}}{CU_{dc}^*} - \frac{\omega_c}{k_2}\right) \end{bmatrix} \quad (11)$$

表 1 直流微电网参数

Table 1 DC microgrid parameters

参数	数值	参数	数值
k_{up}	3	k_{ui}	500
k_{ip}	2	k_{ii}	300
C/mF	1.5	L_B/mH	5
R_B/Ω	0.01	u_{dc}/V	500
u_s/V	300	P_{ac}/kW	11
P_{pv}/kW	5	P_{wf}/kW	5
P_L/kW	5	蓄电池额定功率/kW	30

1) k_1 对系统稳定性的影响

当 $k_2 = 0$ 时, k_1 从 200 增加到 400, 系统的根轨迹如图 4 所示。可知, 随着 k_1 的增加, 系统的特征根向右移动, 因此 k_1 的增加对系统的稳定性不利, 当 $k_1 = 298$ 时, 特征根由负变正, 系统由稳定状态变为不稳定状态。

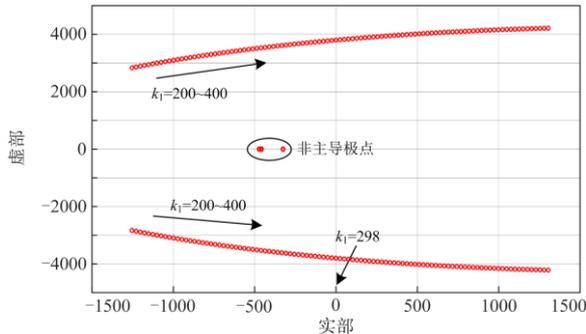


图 4 k_1 增加时的根轨迹

Fig. 4 Root locus with increase of k_1

2) 虚拟惯性控制系数 k_2 对系统稳定性的影响

当 $k_1 = 50$ 时, k_2 从 20 增加到 100, 系统的根轨迹如图 5 所示。可知, 随着 k_2 的增加, 即提供的虚拟惯性越来越大, 系统的特征根向右移动, 当 $k_2 = 70$ 时, 特征根由负变正, 系统由稳定运行状态变为不稳定运行, 因此虚拟惯性控制会削弱系统的阻尼。

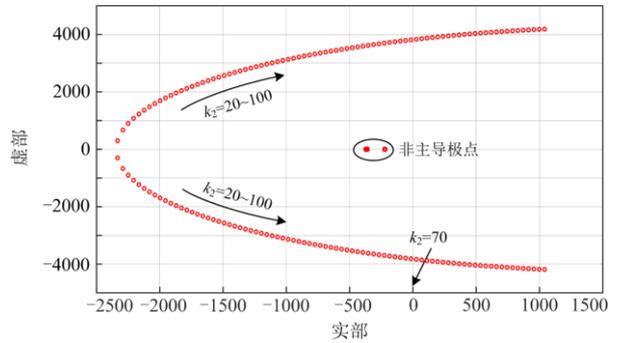


图 5 k_2 增加时的根轨迹

Fig. 5 Root locus with increase of k_2

3) 有源阻尼控制对稳定性的改善

由 1) 的分析可知, 较大的 k_1 对系统的稳定性不利, 但是减小 k_1 的值直流母线电压会有较大的偏差; 由 2) 的分析可知, 虚拟惯性控制虽然能为系统提供一定的惯性, 阻止电压的突变, 但是会削弱系统的阻尼。因此虚拟惯性控制下的直流微网, 其稳定运行面临更为严峻的考验, 需附加阻尼控制增强系统稳定运行的能力。

当 $k_1 = 350$ 时, k_2 从 -10 变化到 -150, 系统的根轨迹如图 6 所示。可知, 随着 k_2 的减小, 系统的特征根向左移动, 当 $k_2 = -15$ 时, 特征根重新回到

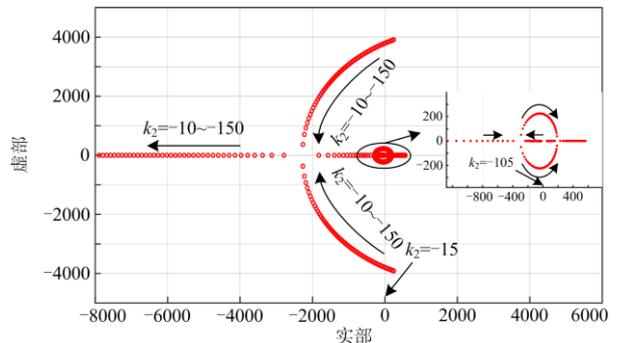


图 6 k_2 减小时的根轨迹

Fig. 6 Root locus with decrease of k_2

左半平面, 系统恢复稳定。当 $k_2 = -80$ 时, 特征根最靠近左边, 此时系统的稳定裕度最高, $k_2 = -105$ 时, 特征根又重新回到右半平面, 因此 k_2 取负值时, 在一定的范围内能为系统提供阻尼。

综上所述, 当 $k_2 > 0$ 时, 变下垂控制可为系统提供虚拟惯性, 阻止电压的突变; 当 $k_2 < 0$ 时, 变下垂控制能够增强系统的阻尼, 保证系统的稳定运行。因此, 变下垂控制不能同时提供系统的惯性和阻尼, 但可通过惯性与阻尼的协调控制实现系统的高惯性和强阻尼特性。

3 惯性与阻尼协调控制

3.1 惯性与阻尼协调控制原理

由于系统的惯性特性体现在功率发生较大扰动时阻止电压变化的能力, 而阻尼体现在稳态或小扰动情况下, 系统是否具有稳定运行的能力, 本文考虑通过惯性与阻尼的协调控制提高电压惯性以及系统稳定运行的能力。

协调控制原理如图 7 所示, u_{dc0} 为系统受到扰动之前的稳定运行电压, 系统在 t_0 时刻受到扰动, 在 $t_0 \sim t_1$ 时, 系统电压由 u_{dc0} 跌落到 u_{dc1} , 此过程若无虚拟惯性控制, 则电压会产生突变, 而采用虚拟惯性控制时, 直流母线电压会平滑地恢复到稳定值; 在 t_1 时刻, 协调控制为系统提供阻尼, 防止电压振荡失稳。

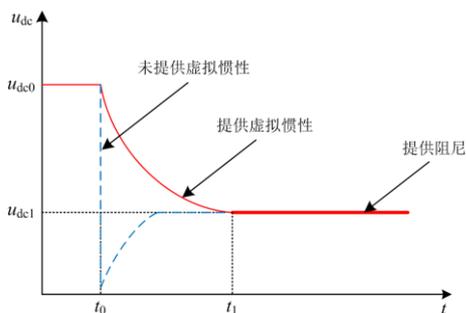


图 7 惯性与阻尼协调控制原理图

Fig. 7 Principle diagram of coordinated control of inertia and damping

根据上述的分析, 本文考虑通过调节 k_2 的值实现惯性与阻尼的协调控制, 在系统电压发生突变时, 即在 $t_0 \sim t_1$ 时间段, 满足 $k_2 > 0$, 变下垂控制为系统提供惯性; 在系统接近稳态时, 即在 $t < t_0$ 和 $t > t_1$ 时间段, 满足 $k_2 < 0$, 变下垂控制为系统提供阻尼。因此, 惯性与阻尼的协调控制, 既能够起到阻止电压突变, 也能够起到抑制系统振荡的效果, 可以更

大限度的提高电压的质量。

为了使 k_2 能够自适应地实现惯性与阻尼的协调控制, 给定 k_2 的自适应表达式为

$$k_2 = \frac{2k_G}{\pi} \left| \arctan\left(m \frac{du_{dc}}{dt}\right) \right| - k_z \quad (12)$$

式中, 选择反正切函数作为 k_2 的表达式能够自适应地将 k_2 的取值限定在合理的范围内, $-k_z$ 为系统处于稳态时 k_2 的取值, k_G 由协调控制所允许的 k_2 最大值决定, m 为调节系数。采用正切函数可将 k_2 的取值限制在 $k_G - k_z$ 和 $-k_z$ 之间, 即 $-k_z \leq k_2 \leq k_G - k_z$ 。

k_2 对应的变化曲线如图 8 所示, 当系统处于稳态时, 即 $\frac{du_{dc}}{dt} = 0$, 此时 $k_2 = -k_z < 0$, 系统具有强阻尼特性; 当系统受到扰动, 电压产生突变时, 即 $\frac{du_{dc}}{dt} \neq 0$, 此时 $0 < k_2 \leq k_G - k_z$, 系统具有高惯性, 因此根据电压变化率即可实现惯性与阻尼的自适应协调控制。

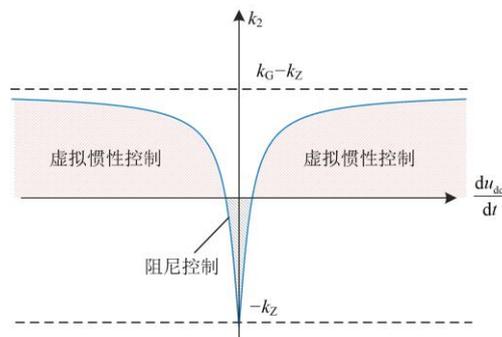


图 8 自适应协调控制时 k_2 的变化曲线

Fig. 8 Change curve of k_2 in adaptive coordinated control

3.2 参数选择

为了使协调控制达到理想的控制效果, 应对参数进行优化选择。其中, k_z 影响协调控制的阻尼特性, 可由图 6 的根轨迹给出, 即离虚轴最远时对应 k_2 的值; k_G 由调节时间决定, 由第 2 节分析可知 k_2 取值越大, 系统的惯性越大, 但稳定裕度越小, 对应的振荡时刻 t_s 越早, 假设虚拟惯性系数分别取 $k_{2,1}$ 、 $k_{2,2}$ 时对应的动态响应如图 9(a)、图 9(b)所示, 其中 $k_{2,1} > k_{2,2}$ 。 u_{dc0} 为电压初始稳态值, Δu_1 、 Δu_2 是出现振荡时对应的电压变化量。

由图 9(a)所示, 当 $k_2 = k_{2,1}$ 时, 系统在功率扰动瞬间就发生振荡失稳, 为了留给协调控制足够的调节时间, 应使得 k_2 的最大值小于 $k_{2,1}$, 本文假设

k_2 所允许的最大值为 k_{2_2} , 即

$$k_G - k_Z \leq k_{2_2} \quad (13)$$

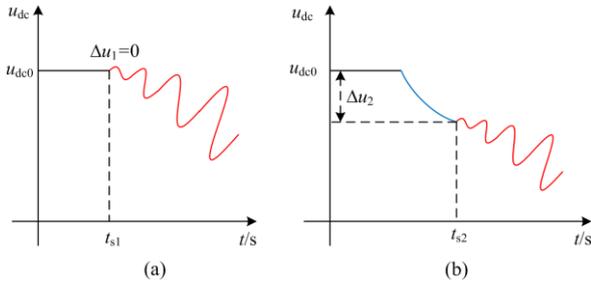


图 9 k_2 取不同值时的电压响应

Fig. 9 Voltage response with different k_2

参数 m 保证了协调控制响应电压变化的灵敏度, m 取值越大, 其为直流微电网提供虚拟惯性的灵敏度越高。而参数 k_G 决定了协调控制为系统提供虚拟惯性的限值, 但是协调控制需要短暂的调节过程, 因此参数 k_G 的选择不应过大, 应满足式(13), 此外, k_{2_2} 数值的确定将是下一步研究的重点, 本文暂且通过仿真的方法得到。

4 仿真分析

为了验证本文所提出的惯性与阻尼协调控制策略的有效性, 在 Matlab/Simulink 仿真平台搭建了如图 1 所示的直流微电网模型, 相应的参数如表 1 所示。

4.1 变下垂控制提供的虚拟惯性

由第 2 节分析可知, 当 $k_1 = 50$ 时, k_2 的最大运行极限为 70, 取 $k_2 = 60 < 70$ 。当 $t = 1$ s, 突增负载 $\Delta P_L = 5$ kW, $t = 1.8$ s, 突减负载 $\Delta P_L = -5$ kW, 对应的直流母线电压 u_{dc} 、虚拟惯性控制系数 k_2 和储能单元的功率 P_B 波形分别如图 10(a)、(b)和(c)所示。可以看出, 负载突增时, 未加入虚拟惯性的直流母线电压经过 $\Delta t_0 = 0.05$ s 的时间由 498 V 衰减到 496.3 V, 电压变化率为 $du_0/dt = 34$ V/s。加入虚拟惯性之后, 电压突变时虚拟惯性控制系数 k_2 迅速由 50 增加到 80, 储能单元增发功率迅速弥补系统功率差额, 电压经过 $\Delta t_1 = 0.5$ s 的时间缓慢下降, 衰减前后稳态值与未加入虚拟惯性时一致, 电压变化率为 $du_1/dt = 3.4$ V/s, 降为原来的 1/10; 系统减载时, 虚拟惯性控制系数 k_2 迅速由 50 减小到 20, 储能单元迅速减少输出功率维持系统内功率平衡, 电压变化率也降为原来的 1/10。因此变下垂可实现虚拟惯性控制, 阻止直流母线电压的突变。

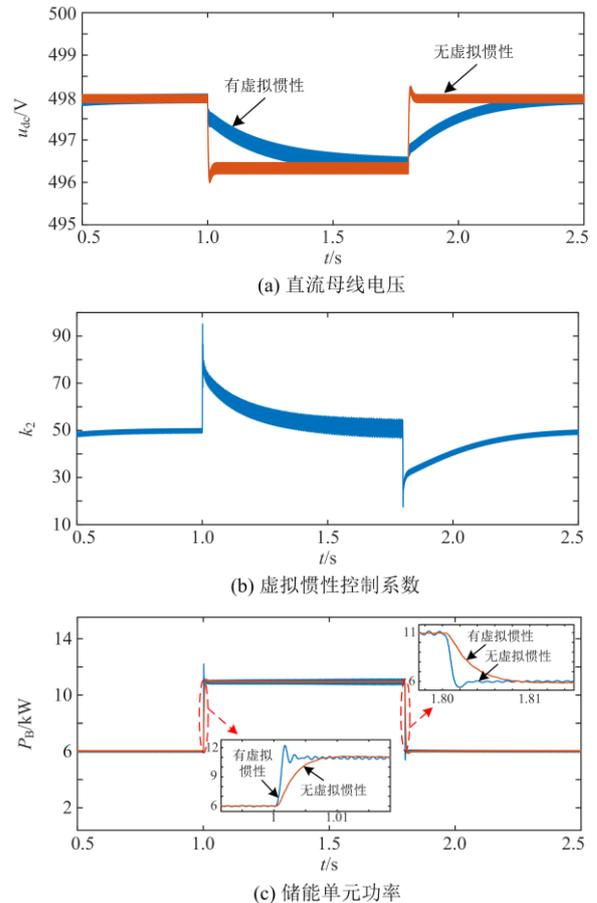


图 10 虚拟惯性控制下系统的响应

Fig. 10 Response of system under virtual inertial control

4.2 变下垂控制提供的阻尼作用

当 $k_2 = 0$, $k_1 = 300 > 298$ 时, 系统的特征根移动到右半平面, 在 $t_0 = 1$ s 时, 突增阻性负载 $\Delta P_L = 5$ kW, 直流电压出现振幅为 35.7 V 的振荡, 如图 11 蓝线所示。考虑通过增加阻尼控制抑制电压振荡, 由第 2 节分析可知, k_2 取负值可增强系统的阻尼, 当 $k_2 = -80$ 时, 系统的特征根重新回到左半平面, 并且距离虚轴最远, 系统稳定裕度最高, 电压的振荡得到抑制, 如图 11 红线所示。因此 k_2 为负时能够为系统提供阻尼, 抑制振荡。

4.3 惯性与阻尼协调控制

由第 2 节的分析可知, 直流微电网采用虚拟惯性控制时具有弱阻尼特性, 取 $k_1 = 50$, $k_2 = 72 > 70$, 在 $t = 1$ s, 突增阻性负载 $\Delta P_L = 5$ kW, 仿真如图 12 蓝线所示, 可知系统电压经过 0.22 s 的缓慢下降后振荡。当 $k_1 = 50$ 、 k_2 从 -3 变化到 -25, 根轨迹如图 13 所示, 可知当 $k_2 = -5$ 时, 主导极点离虚轴最远, 采用本文所提的惯性与阻尼协调控制, k_2 满足式

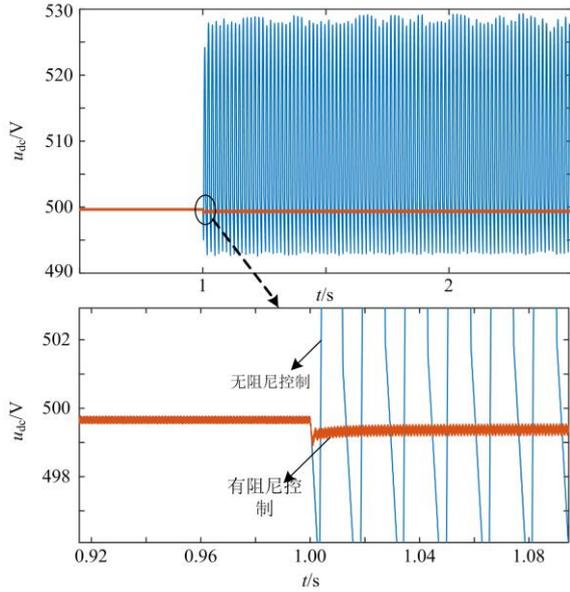


图 11 阻尼特性
Fig. 11 Damping characteristics

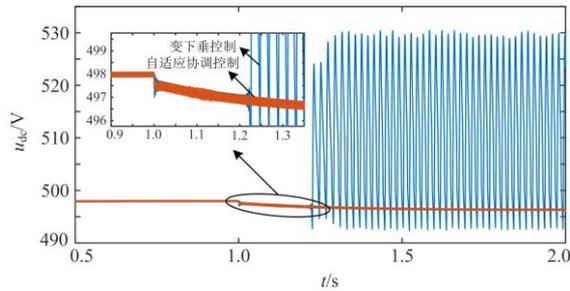


图 12 惯性与阻尼协调控制
Fig. 12 Coordinated control of inertia and damping

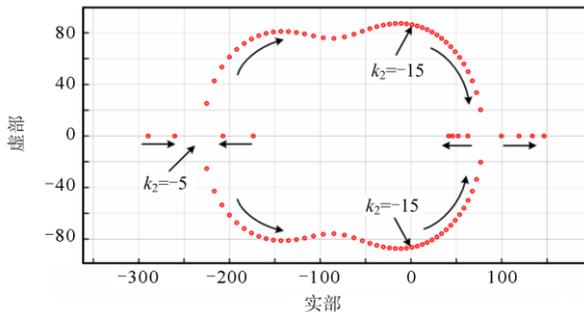


图 13 $k_1 = 50$ 、 $k_2 = -3 \sim -25$ 根轨迹
Fig. 13 Root locus of $k_1 = 50$, $k_2 = -3 \sim -25$

(12)的自适应协调控制, 选择参数 $k_Z = 5$ 、 $k_G = 90$ 、 $m = 20$, 得到的波形如图 12 红线所示, 系统的振荡得到抑制。

将所提出的自适应协调控制与传统的下垂控制进行对比, 对应的波形如图 14 所示。从图 14 可

知, 应用传统下垂控制在负荷扰动时会出现电压突变, 且稳态时的电压波动大小为 0.28 V , 而采用所提的控制, 在负荷扰动时, 电压会平缓的变化, 且稳态时的电压波动降低为 0.15 V 。因此, 本文所提控制既能够提高系统的阻尼, 还可为系统提供虚拟惯性。对应的 k_2 的变化情况如图 15 所示。从图 15 中可知, 当系统处于稳态时, k_2 的值为负, 变下垂控制为系统提供阻尼; 当负荷突增引起电压下降时, k_2 迅速增加为正值 $k_{2\max} = 76.8$, 为系统提供虚拟惯性, 当 $t = 1.8 \text{ s}$ 时, k_2 重新恢复到 -5 为系统提供阻尼。通过控制虚拟惯性控制系数 k_2 的变化即可实现惯性与阻尼的协调控制。

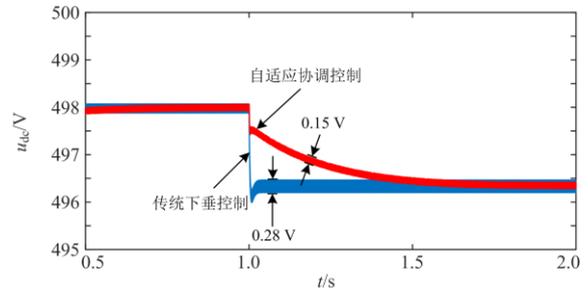


图 14 所提控制与传统下垂控制性
Fig. 14 Proposed control and traditional droop control

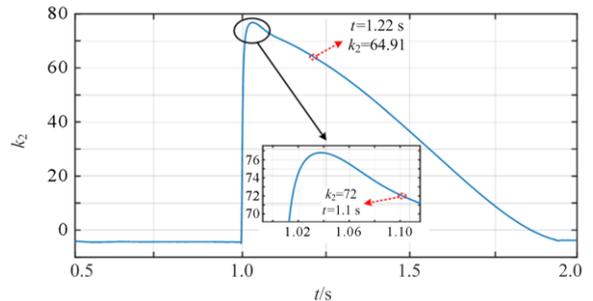


图 15 协调控制过程中 k_2 的变化
Fig. 15 Change of k_2 during coordinated control

5 结论

本文研究了直流微电网的惯性与阻尼特性, 根据电压的变化率设计了自适应协调控制策略, 能够提高系统的惯性与阻尼。通过对所提策略的仿真验证与理论分析, 得出如下结论:

- 1) 变下垂控制虽然能够为系统提供虚拟惯性, 但是直流微电网具有弱阻尼特性, 在功率频繁扰动的系统中, 其面临持续振荡的风险。
- 2) 在变下垂控制的基础上, 分析得到惯性调节系数在一定范围内取负值时, 能够增强系统的阻尼, 且阻尼特性的实现并不会过多增加控制的复杂性。

3) 基于变下垂控制, 提出了一种惯性与阻尼的自适应协调控制, 弥补了惯性控制与阻尼控制的不足, 使得系统同时具备高惯性和强阻尼特性。

参考文献

- [1] TOMISLAV D, LU X, VASQUEZ J C, et al. DC Microgrids—part I: a review of control strategies and stabilization techniques[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(7): 4876-4891.
- [2] 张勤进, 张翰文, 刘彦呈, 等. 基于参数自适应的直流微源虚拟发电机控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(18): 90-97.
ZHANG Qinjin, ZHANG Hanwen, LIU Yancheng, et al. Control strategy for a DC micro source virtual generator based on adaptive parameters[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(18): 90-97.
- [3] 曾国辉, 廖鸿飞, 赵晋斌, 等. 直流微网双向 DC/DC 变换器虚拟惯量和阻尼系统自适应控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(18): 1-10.
ZENG Guohui, LIAO Hongfei, ZHAO Jinbin, et al. Self-adaptive control strategy of virtual inertia and damping coefficient for bidirectional DC-DC converters in DC microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(18): 1-10.
- [4] 董继军, 陈浩, 周雪松, 等. 直流微电网孤岛运行控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(17): 115-121.
DONG Jijun, CHEN Hao, ZHOU Xuesong, et al. Research on control strategy of a DC microgrid in isolated operation[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(17): 115-121.
- [5] 赵忠斌, 张靖, 马蕊, 等. 互联直流微电网多模式协调控制策略[J]. 智慧电力, 2020, 48(4): 28-35.
ZHAO Zhongbin, ZHANG Jing, MA Rui, et al. Multi-mode coordinated control strategy of interconnected DC microgrid[J]. Smart Power, 2020, 48(4): 28-35.
- [6] 张天翼, 郑凯元, 王海风. 聚合相同分布式电源对直流微电网高频振荡稳定性的影响[J]. 中国电力, 2021, 54(8): 103-108.
ZHANG Tianyi, ZHENG Kaiyuan, WANG Haifeng. Impact of large number of same aggregated distributed generators on the high-frequency oscillatory stability of a DC microgrids[J]. Electric Power, 2021, 54(8): 103-108.
- [7] 聂永刚, 李俊青, 韩爽, 等. 基于虚拟惯量的 DC 换流器并联直流配电网控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(15): 19-26.
NIE Yonggang, LI Junqing, HAN Shuang, et al. Control strategy for parallel DC distribution network of DC converters based on virtual inertia[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(15): 19-26.
- [8] 舒恺, 刘峰, 郭高鹏, 等. 并网型直流微电网协调控制策略[J]. 电网与清洁能源, 2020, 36(11): 58-67.
SHU Kai, LIU Feng, GUO Gaopeng, et al. The coordinated control strategy for grid-connected DC microgrid[J]. Power System and Clean Energy, 2020, 36(11): 58-67.
- [9] LIU J, YANG D J, YAO W, et al. PV-based virtual synchronous generator with variable inertia to enhance power system transient stability utilizing the energy storage system[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(4): 429-437.
- [10] MOHAMED A, SALEHI V, MOHAMMED O. Real-time energy management algorithm for mitigation of pulse loads in hybrid microgrid[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(4): 1911-1922.
- [11] MAO M, LIU Y, JIN P, et al. Energy coordinated control of hybrid battery-supercapacitor storage system in a microgrid[C] // 2013 4th IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG), July 8-11, 2013, Rogers, AR, USA: 1-6.
- [12] 张国驹, 唐西胜, 齐志平. 超级电容器与蓄电池混合储能系统在微网中的应用[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(12): 85-89.
ZHANG Guoju, TANG Xisheng, QI Zhiping. Application of hybrid energy storage system of super-capacitors and batteries in a microgrid[J]. Automation of Electric Power System, 2010, 34(12): 85-89.
- [13] 王毅, 黑阳, 付媛, 等. 基于变下垂系数的直流配电网自适应虚拟惯性控制[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(8): 116-124.
WANG Yi, HEI Yang, FU Yuan, et al. Adaptive virtual inertia control of DC distribution network based on variable droop coefficient[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(8): 116-124.
- [14] 朱晓荣, 蔡杰, 王毅, 等. 风储直流微网虚拟惯性控制技术[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(1): 49-58.
ZHU Xiaorong, CAI Jie, WANG Yi, et al. Virtual inertia control of wind-battery-based DC micro-grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(1): 49-58.
- [15] 伍文华, 陈燕东, 罗安. 一种直流微网双向并网变换器虚拟惯性控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(2): 360-371.
WU Wenhua, CHEN Yandong, LUO An. A virtual inertia control strategy for bidirectional grid-connected converters in DC micro-grids[J]. Proceedings of the

- CSEE, 2017, 37(2): 360-371.
- [16] 曹新慧, 刘昱良, 苗世洪, 等. 考虑参数自适应的直流微电网DC/DC变换器虚拟惯性控制策略研究[J]. 高电压技术, 2020, 46(4): 1281-1290.
CAO Xinhui, LIU Yuliang, MIAO Shihong, et al. Research on virtual inertial control strategy of DC/DC converter in DC microgrid considering self-adaptive parameters[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(4): 1281-1290.
- [17] 朱小鹏, 卫志农, 颜全椿, 等. 基于虚拟惯性自适应算法的电动汽车控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(22): 134-141.
ZHU Xiaopeng, WEI Zhinong, YAN Quanchun, et al. Control strategy of electric vehicle based on virtual inertial adaptive algorithms[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(22): 134-141.
- [18] ZHU X, XIE Z, JING S, et al. Distributed virtual inertia control and stability analysis of dc microgrid[J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2018, 12(14): 3477-3486.
- [19] 孟建辉, 邹培根, 王毅, 等. 基于灵活虚拟惯性控制的直流微网小信号建模及参数分析[J]. 电工技术学报, 2019, 34(12): 2615-2626.
MENG Jianhui, ZOU Peigen, WANG Yi, et al. Small-signal modeling and parameter analysis of the DC microgrid based on flexible virtual inertia control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 32(12): 2615-2626.
- [20] 郭力, 冯恽彬, 李霞林. 直流微电网稳定性分析及阻尼控制方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(4): 927-935.
GUO Li, FENG Yibin, LI Xialin. Stability analysis and research of active damping method for DC microgrids[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(4): 927-935.
- [21] 李玉梅, 查晓明, 刘飞. 带恒功率负荷的直流微电网母线电压稳定控制策略[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(8): 57-61.
LI Yumei, ZHA Xiaoming, LIU Fei. Stability control strategy for DC microgrid with constant power load [J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(8): 57-61.
- [22] 付媛, 王耀铎, 张祥宇. 含恒功率负荷直流微电网的状态反馈电压振荡控制技术[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(5): 927-937.
FU Yuan, WANG Yaoduo, ZHANG Xiangyu. Stability control strategy for DC microgrid with constant power load[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(5): 927-937.
- [23] 付媛, 李浩, 张祥宇. 基于振荡状态反馈的直流微网储能换流器的有源阻尼控制技术[J]. 高电压技术, 2021, 47(3): 167-174.
FU Yuan, LI Hao, ZHANG Xiangyu. Active damping control of energy storage converter in DC microgrid based on oscillatory state feedback[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(3): 167-174.
- [24] WU M, LU D D. A novel stabilization method of LC input filter with constant power loads without load performance compromise in DC microgrid[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(1): 4552-4562.
- [25] 张祥宇, 付媛, 王毅, 等. 含虚拟惯性与阻尼控制的变速风电机组综合 PSS 控制器[J]. 电工技术学报, 2015, 30(1): 159-169.
ZHANG Xiangyu, FU Yuan, WANG Yi, et al. Integrated PSS controller of variable speed wind turbines with virtual inertia and damping control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(1): 159-169.
- [26] 杨赞, 梅飞, 张宸宇, 等. 虚拟同步发电机转动惯量和阻尼系数协同自适应控制策略[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(3): 125-131.
YANG Yun, MEI Fei, ZHANG Chenyu, et al. Coordinated adaptive control strategy of rotational inertia and damping coefficient for virtual synchronous generator[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(3): 125-131.

收稿日期: 2021-12-19; 修回日期: 2022-02-12

作者简介:

孟飞(1987—), 男, 通信作者, 学士, 高级工程师, 研究方向为电网输变电工程建设与运维; E-mail: Blackstar_002@sina.cn

曲 骅(1982—), 男, 学士, 高级工程师, 研究方向为电力系统及其自动化与输变电工程建设; E-mail: quhua8212@163.com

郭添亨(1990—), 男, 学士, 工程师, 研究方向为电网输变电工程建设与智能运维。E-mail: 13923334599@139.com

(编辑 魏小丽)