

基于LQR的新能源虚拟惯量自适应控制策略

李宏强¹,鲁广明²,周雷¹,魏亚威²,张汉花¹,马晶²

(1. 国网宁夏电力有限公司电力科学研究院,宁夏 银川 710049;

2. 中国电力科学研究院有限公司,北京 100192)

摘要:为提升基于直流电容能量虚拟惯量控制的新能源并网变流器对电力系统的惯量支撑能力,提出了一种基于线性二次调节器(LQR)的自适应虚拟惯量控制方法。在分析虚拟同步机(VSG)动力学特性的基础上,获得惯量参数和系统频率响应特性的数学关系,并建立了基于LQR的自适应惯量控制模型,通过LQR代价函数寻找最优反馈矩阵,使状态变量快速趋近于零且以最少的输入能量来满足控制需求。仿真结果表明,该方法能够使得新能源并网变流器根据系统频率波动情况对有限直流电容能量进行优化分配,快速阻尼频率变化,改善了系统频率响应特性,提升了新能源并网变流器对电力系统的惯量支撑能力,保障了电力系统的稳定性。

关键词:新能源;并网变流器;线性二次调节器;虚拟惯量

中图分类号:TM28 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqcd24725

Adaptive Virtual Inertia Control of New Energy Based on LQR

LI Hongqiang¹, LU Guangming², ZHOU Lei¹, WEI Yawei², ZHANG Hanhua¹, MA Jing²

(1. State Grid Ningxia Electric Power Co., Ltd., Yinchuan 710049, Ningxia, China;

2. China Electric Power Research Institute Co., Ltd., Beijing 100192, China)

Abstract: In order to improve the inertia support ability of grid-connected converter of new energy based on DC capacitor energy virtual inertia control to the power system, an adaptive virtual inertia control method based on linear quadratic regulator (LQR) was proposed. On the basis of analyzing the dynamic characteristics of the virtual synchronous generator (VSG), the mathematical relationship between the inertia parameters and the system frequency response characteristics was obtained, and an adaptive inertia control model based on LQR was established. The optimal feedback matrix was found by LQR cost function to make the state variables approach zero quickly and meet the control requirements with the least input energy. The simulation results show that the method can make the new energy grid-connected converter optimize the allocation of limited DC capacitance energy according to the system frequency fluctuation, quickly damp the frequency change, improve the system frequency response characteristics, enhance the inertia support ability of the new energy grid-connected converter to the power system, and ensure the stability of the power system.

Key words: new energy; grid-connected converter; linear quadratic regulator (LQR); virtual inertia

构建新型电力系统是实现“碳达峰、碳中和”目标的重要举措。未来,以风电、光伏为主的新能源仍将持续快速发展,逐步替代常规电源成为电力电量供应主体^[1-2]。新能源发电采用电压源型变流器,通过锁相环被动跟踪电网制定并网控制策略,其惯量接近于零,无法主动支撑电网^[3]。因此,随着新能源在电力系统中占比的逐渐提

高,传统频率调节资源稀缺,导致系统惯量水平下降、暂态频率特性恶化,存在大面积切负荷、切机风险^[4]。模拟同步发电机特性的电压源型变流器具备一定的“惯量”,具有等效输出阻抗小以及与电网同相位的特性(低频段)^[5],可以为系统提供惯量支撑,提升系统的频率稳定性。

目前电压源型变流器的虚拟惯量控制方法

基金项目:国网宁夏电力有限公司科技项目(5229DK20005G)

作者简介:李宏强(1990—),男,硕士,高级工程师,主要研究方向为电力系统分析与控制,Email:lhq1652@126.com

通讯作者:鲁广明(1978—),男,博士,正高级工程师,主要研究方向为电力系统仿真,Email:lugm@epri.sgcc.com.cn

包括虚拟同步机控制和下垂控制等。已有研究表明,虚拟同步机和下垂控制在不考虑惯性和阻尼的情况下等价^[6],且带有滤波环节的虚拟同步机控制和下垂控制可以为系统提供等效的虚拟惯量^[7]。通过设计相应的控制参数和控制结构,可以改善并网系统的暂态频率响应特性。文献[8-9]提出了变流器转动惯量和阻尼系数协同自适应控制策略;文献[10]提出了一种根据频率变化量实时动态调节旋转惯量的方法;文献[11]提出了一种风-火系统模糊自适应虚拟惯量控制策略;文献[12]提出了一种基于频率响应区间划分的风电机组虚拟惯量模糊自适应控制方法;文献[13]提出了一种基于模糊自抗扰的双馈风电场储能虚拟惯量控制方法;文献[14]提出了一种参数自适应控制策略,使VSG在功率和频率输出具有更加良好的动态性能;文献[15]设计了一种转动惯量和阻尼系数协同自适应控制策略,通过自动调节虚拟同步发电机转动惯量和阻尼系数,抑制频率暂态响应过程中的超调;在基于直流电容容量的虚拟惯量控制方面,文献[16]利用直流电压下垂控制为并网变流器提供虚拟惯量;文献[17-18]提出基于高/低压直流电容动态的虚拟惯量控制策略;文献[19]研究了基于阈值的自适应虚拟惯量控制策略;文献[20]提出了基于光伏减载运行和下垂控制相结合的有功控制策略。然而,基于直流电容能量进行虚拟惯量控制时,如何对有限的直流电容容量合理分配,进而改善系统频率响应特性方面仍有待进一步研究。

基于上述实际问题,本文在分析虚拟惯量控制动力学的基础上,提出一种基于LQR的自适应虚拟惯量方法,该方法通过成本代价函数进行直流电容容量的合理分配,使得在有限直流电容能量约束条件下,加快了系统频率恢复,改善了系统频率响应特性,仿真验证了所提方法的正确性和有效性。

1 动力学特性分析

1.1 虚拟惯量控制策略

典型的新能源并网变流器采用三相电压源型变流器,拓扑结构如图1所示。图中,C为直流电容; u_{dc} 为直流电容电压;L为电网侧滤波电感; $i_{a,b,c}$, $u_{ga,gb,gc}$ 分别为电网侧电流、电压。在不配置储能的情况下,可利用直流电容的充放电过程为系统提供惯量效应。

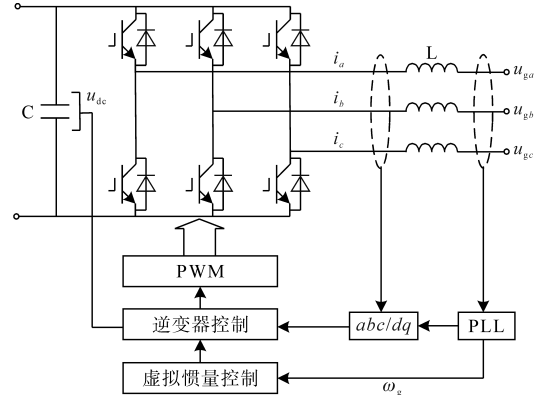


图1 典型新能源并网变流器拓扑结构图

Fig.1 Topology diagram of typical new energy grid connected converter

基于直流电容能量的虚拟惯量控制外环策略如图2所示。在基于电容能量的虚拟惯量控制下,虚拟惯量控制系数常采用 $K_v(s) = K_{dv}$,为虚拟惯量控制的增益系数。引入虚拟惯量后,当负荷变化时,系统频率发生变化,进而会导致直流电容发生充放电过程。通过释放直流电容能量,可为系统提供惯量支撑。

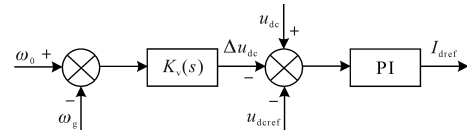


图2 基于直流电容能量的虚拟惯量控制策略

Fig.2 Outer loop strategy of virtual inertia control based on DC capacitor energy

利用直流电容C动态模拟惯量效应,虚拟惯量 J 可表示为^[16]

$$J = \frac{Cu_{dc}^2}{2S_B} = \frac{Cu_{dc}^2 u_{dc0}}{2S_B \omega_0} K_v(s) \quad (1)$$

式中: u_{dc0} 为直流电容电压初始值; S_B 为变流器容量; ω_0 为系统额定角频率。

直流电容为充放电过程提供的暂态能量 ΔE_{dc} 可表示为^[18]

$$\Delta E_{dc} = \frac{1}{2} \frac{CK_v(s)u_{dc0}}{\omega_0} [(\omega_0 + \Delta\omega)^2 - \omega_0^2] \quad (2)$$

式中: $\Delta\omega$ 为系统角频率变化量。

1.2 动力学特性分析

考虑虚拟同步发电机摇摆方程的二阶系统数学模型如下:

$$J\Delta\dot{\omega} = -D\Delta\omega - \Delta P_e \quad (3)$$

$$\Delta\omega = \frac{R_d}{1 + T_g s} \Delta P_e \quad (4)$$

式中: ΔP_e 为电磁功率的变化量; D 为阻尼转矩所对应的虚拟阻尼系数; R_d, T_g 分别为等效的同步发电机的角速度下垂系数和时间常数。

式(3)、式(4)中的变量均采用标么值。考虑式(3)中的电磁功率的变化量 ΔP_e 为已知的系统干扰,则频率变化量的稳态值可以表示为

$$\omega_{ss} = \frac{\Delta P_e}{D + R_d^{-1}} \quad (5)$$

将式(3)、式(4)写成二阶微分方程的形式:

$$\begin{aligned} \Delta \ddot{\omega} = & -\left(\frac{D}{J} + \frac{1}{T_g}\right)\Delta \dot{\omega} - \left(\frac{1}{JT_g R_d} + \frac{D}{JT_g}\right)\Delta \omega - \\ & \frac{\Delta P_e}{JT_g} - \frac{\Delta \dot{P}_e}{J} \\ = & -a\Delta \dot{\omega} - b\Delta \omega - c\Delta P_e - cT_g \Delta \dot{P}_e \end{aligned} \quad (6)$$

其中

$$\begin{aligned} a = & \frac{D}{J} + \frac{1}{T_g} \\ b = & \frac{1}{JT_g R_d} + \frac{D}{JT_g} \\ c = & \frac{1}{JT_g} \end{aligned}$$

复频域内传递函数表示为

$$\begin{aligned} G(s) = & \frac{\Delta \omega(s)}{\Delta P_e(s)} \\ = & \frac{c}{s^2 + as + b} + \frac{cT_g s}{s^2 + as + b} \end{aligned} \quad (7)$$

系统的阻尼比为

$$\begin{aligned} \zeta = & \frac{a}{2\sqrt{b}} \\ = & \frac{(J + DT_g)\sqrt{R_d}}{2\sqrt{JT_g + JT_g R_d}} \end{aligned} \quad (8)$$

为得到时域内 $\Delta \omega$ 的表达式,考虑电磁功率的变化量为阶跃变化的情形,即 $\Delta P_e(s) = s^{-1}$,则

$$\begin{aligned} \Delta \omega(s) = & G(s)\Delta P_e(s) \\ = & \frac{cs^{-1}}{s^2 + as + b} + \frac{cT_g}{s^2 + as + b} \\ = & \Delta \omega_0(s) + sT_g \Delta \dot{\omega}_0(s) \end{aligned} \quad (9)$$

假设系统为欠阻尼,即 $0 < \zeta < 1$,无阻尼自然振荡频率 $\omega_n = \sqrt{b}$,定义相角 $\theta = \cos^{-1}\zeta, \theta \in (0, \frac{\pi}{2})$,

则有:

$$\begin{aligned} \Delta \omega(t) = & L^{-1}[\Delta \omega(s)] \\ = & \Delta \omega_0(t) + T_g \Delta \dot{\omega}_0(t) \end{aligned} \quad (10)$$

其中

$$\Delta \omega_0(t) = \omega_{ss} \left\{ 1 - \frac{1}{\sin\theta} e^{-\cos\theta\omega_n t} \sin[(\omega_n \sin\theta)t + \theta] \right\} \quad (11)$$

$$\Delta \dot{\omega}_0(t) = \frac{\omega_{ss}\omega_n}{\sin\theta} e^{-\cos\theta\omega_n t} \sin[(\omega_n \sin\theta)t] \quad (12)$$

联立式(11)和式(12)得到:

$$\begin{aligned} \Delta \omega(t) = & \omega_{ss} \left[1 - \frac{1}{\sin\varphi} e^{-\cos\theta\omega_n t} \sin(\omega_n \sin\theta t + \varphi) \right] \\ \varphi \in & (\theta, \pi) \end{aligned} \quad (13)$$

其中

$$\begin{aligned} \sin\varphi = & \frac{\sin\theta}{\tau} \\ \tau = & \sqrt{(\cos\theta - T_g \omega_n)^2 + \sin^2\theta} \end{aligned}$$

满足

$$\cos\varphi = \frac{\cos\theta - T_g \omega_n}{\tau} \quad (14)$$

在得到频率变化量时域表达式的基础上,可进一步得到最大的频率变化率,对式(11)求导,可以得到:

$$\Delta \dot{\omega}(t) = \frac{\omega_{ss}\omega_n}{\sin\varphi} e^{-\cos\theta\omega_n t} \sin[(\omega_n \sin\theta)t + \varphi - \theta] \quad (15)$$

最大的频率变化率 $\Delta \omega_{max}$ 通过 $\Delta \dot{\omega}(t_p) = 0$ 得:

$$\Delta \omega_{max} = \Delta \omega(t_p) = \omega_{ss} \left[1 + \frac{\sin\theta}{\sin\varphi} e^{-\frac{\zeta(\pi + \varphi - \theta)}{\sin\theta}} \right] \quad (16)$$

$$t_p = \frac{\pi + \varphi - \theta}{\omega_n \sin\theta} \quad (17)$$

由式(13)、式(16)和式(17)可以看出,系统频率的变化量除了与其稳态值 ω_{ss} 相关,还与 θ 和 φ 相关。通过设计变流器控制回路的虚拟惯量和阻尼参数,可以改善系统的频率响应。

2 基于LQR的自适应虚拟惯量控制策略

考虑已知的电磁功率干扰 ΔP_e 是阶跃信号时,式(6)表示为

$$\begin{aligned} \Delta \ddot{\omega} = & -\left(\frac{D}{J} + \frac{1}{T_g}\right)\Delta \dot{\omega} - \left(\frac{1}{JT_g R_d} + \frac{D}{JT_g}\right)\Delta \omega - \frac{\Delta P_e}{JT_g} \\ = & -a\Delta \dot{\omega} - b\Delta \omega - c\Delta P_e \end{aligned} \quad (18)$$

选取系统的状态向量 $\mathbf{x} = [\Delta \omega \ \Delta \dot{\omega}]^T$,控制输入为 u ,设系统的初始状态 $\mathbf{x}(0) = [0 \ \Delta \dot{\omega}(0^+)]^T$,则式(18)可以写为

$$\begin{bmatrix} \Delta\dot{\omega} \\ \Delta\ddot{\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -(\frac{1}{JT_g R_d} + \frac{D}{JT_g}) & -(\frac{D}{J} + \frac{1}{T_g}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\omega \\ \Delta\dot{\omega} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{\Delta P_e}{JT_g} \end{bmatrix} \quad (19)$$

系统在干扰信号的作用下达达到新的平衡点 $[x_0 \ u_0]$, $x_0 = \begin{bmatrix} \frac{\Delta P_e}{D + R_d^{-1}} & 0 \end{bmatrix}^T$, $u_0 = J_0$ 。将系统式(19)在平衡点处线性化,则有:

$$\begin{bmatrix} \Delta\dot{\omega} \\ \Delta\ddot{\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -(\frac{1}{J_0 T_g R_d} + \frac{D}{J_0 T_g}) & -(\frac{D}{J_0} + \frac{1}{T_g}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\omega \\ \Delta\dot{\omega} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{\Delta P_e}{J_0^2 T_g} \Delta J \end{bmatrix} \quad (20)$$

引入系统的状态反馈控制:

$$\begin{aligned} u &= \Delta J = J - J_0 = -Kx \\ &= -[k_1 \ k_2] \begin{bmatrix} \Delta\omega \\ \Delta\dot{\omega} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (21)$$

则闭环系统可以表示为

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ &= (A - BK)x \end{aligned} \quad (22)$$

其中

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -(\frac{1}{J_0 T_g R_d} + \frac{D}{J_0 T_g}) & -(\frac{D}{J_0} + \frac{1}{T_g}) \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{\Delta P_e}{J_0^2 T_g} \end{bmatrix}$$

在式(22)的基础上,可通过极点配置的方法设计系统的状态反馈矩阵 K 。构造二次调节器LQR代价函数 H 并选取合适的权重矩阵 Q, R , 进而得到满足代价函数的“成本”最低的增益矩阵 K 。考虑直流电容能量式(2)的限制,为了使式(22)中的状态变量快速趋近于零且以最少的输入能量来满足控制需求,令代价函数最小化,即

$$H_{\min} = \min \int_0^{\infty} (\Delta\omega^T Q_1 \Delta\omega + \Delta\dot{\omega}^T Q_2 \Delta\dot{\omega} + \Delta J^T R \Delta J) dt \quad (23)$$

式中: Q_1, Q_2, R 分别为衡量状态量和输入量的权重矩阵。

Q_1, Q_2 为正定或者半正定矩阵, R 为正定矩阵。

状态反馈矩阵 $K = R^{-1} B^T P$, P 为对称矩阵,通

过求解如下 Riccati 方程得到:

$$A^T P + PA - PBR^{-1}B^T P + Q = 0 \quad (24)$$

其中

$$Q = \text{diag}(Q_1, Q_2)$$

权重矩阵的选取可通过电力系统稳定导则中规定的频率和频率变化率的限制求取。如频率范围为 $f \in [49.8, 50.2]$ Hz, 频率变化率 $|df/dt| \in [0, 2]$ Hz/s, 则有 $\Delta\omega_{\max} = 0.004$ (标么值), $\Delta\dot{\omega}_{\max} = 0.04$ (标么值)。固定权重矩阵中的 R , 考虑频率变化率需要满足的条件,假设虚拟惯量的最大变化不超过初始值的50%,即 $\Delta J_{\max} = 0.5\Delta J$, 通过式(24)可计算权重矩阵 Q , 得到:

$$\begin{cases} Q_1 = R(\Delta J_{\max} / \Delta\omega_{\max})^2 \\ Q_2 = R(\Delta J_{\max} / \Delta\dot{\omega}_{\max})^2 \end{cases} \quad (25)$$

从而实现虚拟惯量的自适应调节。

基于LQR的虚拟惯量自适应控制参数设计流程如下:1)根据直流电容容量和频率变化限制条件确定固定权重矩阵中的 R ; 2)将 R 代入式(25), 确定权重矩阵 Q_1, Q_2 ; 3)将权重矩阵 Q_1, Q_2, R 代入式(24), 求得矩阵 P , 并计算状态反馈矩阵 $K = R^{-1} B^T P$; 4)将状态反馈矩阵 K 代入式(21), 求得虚拟惯量 J ; 5)将虚拟惯量 J 代入式(1), 求得虚拟惯量控制常数 $K_c(s)$ 。

3 仿真分析

为验证所提自适应虚拟惯量控制算法的有效性,建立电压源型变流器并网仿真模型,仿真参数为:变流器容量 $S_B = 70$ kW, 并网电压 $U_g = 400$ V, 额定频率 $f = 50$ Hz, 直流电容 $C = 350$ μ F, 直流电容电压 $u_{dc} = 800$ V, 滤波电感 $L = 3$ mH, 下垂系数 $R_d = 0.05$ (标么值), 时间常数 $T_g = 0.2$, 虚拟转动惯量初始值 $J_0 = 1$ kg·m², 阻尼系数 $D = 1$ (标么值)。并与采用固定惯量策略和基于阈值的自适应虚拟惯量控制策略^[9]的频率响应特性进行比较。

在0.2 s发生负荷扰动,考虑负荷突增和突降两种情况,仿真结果如图3、图4所示。图3比较了负荷突增情况下上述3种策略的频率响应特性曲线。图4比较了负荷突降0.2(标么值)情况下上述3种策略的频率响应特性。

从图3可以看出,负荷功率突降0.2(标么值),系统有功功率缺额,频率降低。固定惯量的控制策略下,系统的频率响应曲线的峰值较大,频率降低的最大值为0.09 Hz,存在动态波动过

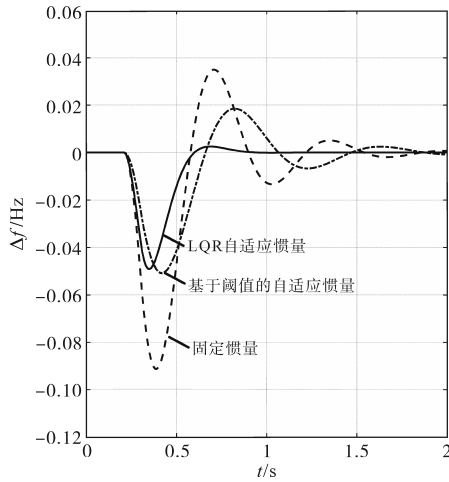


图3 负荷突增情况下虚拟惯量控制的频率响应
Fig.3 Frequency response curves of virtual inertia control under sudden load increase

程,频率恢复时间较长;基于阈值的自适应惯量策略下,系统的频率响应曲线的峰值大幅度减小,频率降低的最大值减小为0.05 Hz,但是动态波动过程仍然较长,频率恢复时间与固定惯量策略没有明显差异;本文自适应惯量控制策略下,系统的频率响应曲线的峰值减小,频率降低的最大值小于0.05 Hz,波动过程中的幅值和周期均大幅度减小,频率恢复时间非常短,能够快速进入稳定状态。

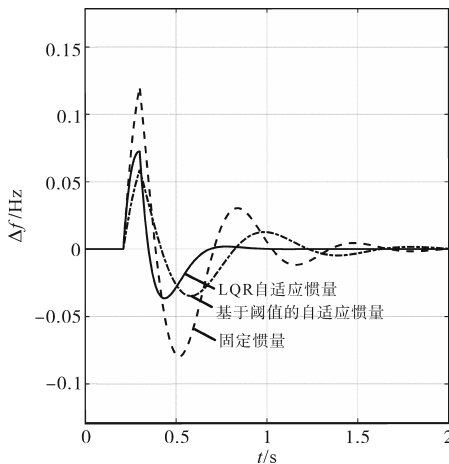


图4 负荷突降情况下虚拟惯量控制的频率响应
Fig.4 Frequency response curves of virtual inertia control under sudden load drop

从图4可以看出,负荷功率突增0.2(标么值),系统有功功率富裕,频率升高。与负荷功率突降的仿真结果一致,固定惯量控制策略的系统频率波动幅值最大、恢复周期最长;基于阈值自适应惯量策略的系统频率波动幅值较固定惯量策略减小约45%,恢复周期与固定惯量相当;本文基于LQR自适应惯量策略的系统频率波动幅

值较基于阈值的自适应惯量策略略小,恢复周期缩短3倍以上。

图5给出了负荷突增情况下本文基于LQR自适应惯量控制策略的惯量变化过程。

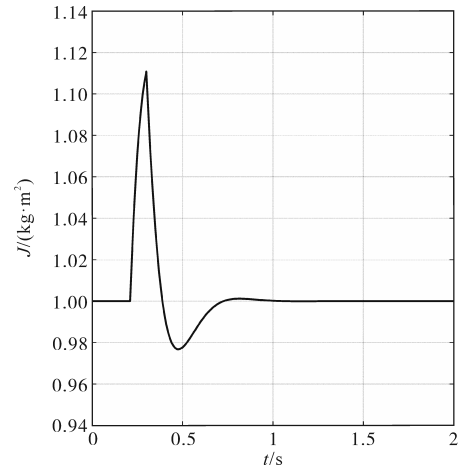


图5 负荷突增情况下自适应虚拟惯量控制的惯量特性
Fig.5 Inertia characteristic curve of adaptive virtual inertia control under sudden load increase

从图5可以看出,在直流电容容量约束的条件下,本文策略可实现惯量的自适应调节,在频率变化较大的区间,输出较大的惯量,减小频率的波动幅值并快速进入稳态值,进而改善了系统频率的动态特性。为优化直流电容能量,在频率恢复区间,适度减小输出惯量,保障能量的合理优化分配。

为了比较系统不同阻尼对自适应虚拟惯量调节的影响,仿真比较了负荷突增情况下不同阻尼系数下自适应虚拟惯量控制的系统频率响应曲线和自适应惯量曲线,结果分别如图6和图7所示。

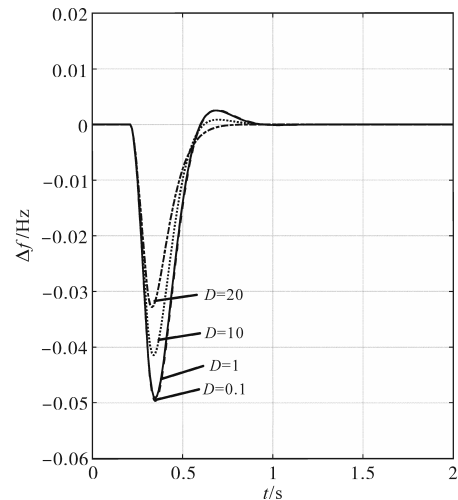


图6 负荷突增情况下自适应惯量控制的频率响应
Fig.6 Frequency response curves of adaptive inertia control under sudden load increase

图6为不同阻尼情况下本文自适应惯量控制策略的频率响应曲线。从图中可以看出,相同负荷功率波动条件下,随着阻尼的增大,系统频率变化幅度减小,波动过程缩短。

图7为不同阻尼情况下本文自适应虚拟惯量策略的惯量特性曲线。从图中可以看出,相同负荷功率波动条件下,随着阻尼的增大,变流器提供的惯量减小,所需的直流电容能量也减小。

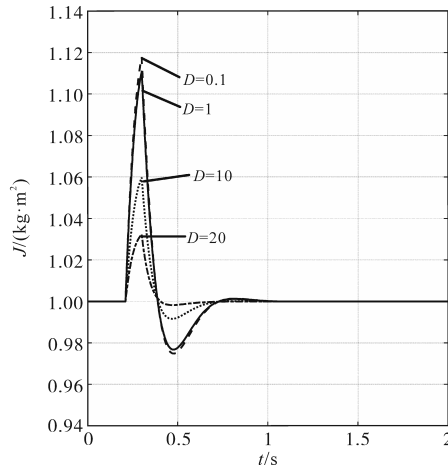


图7 负荷突增情况下自适应惯量控制的惯量特性
Fig.7 Inertia characteristic curves of adaptive inertia control under sudden load increase

4 结论

为提升基于直流电容能量虚拟惯量控制的新能源并网变流器对电力系统的惯量支撑能力,在分析虚拟同步机动力学特性的基础上,提出了一种基于LQR的自适应虚拟惯量控制方法。仿真结果表明,该方法能够使得新能源并网变流器根据系统频率波动情况实现有限直流电容能量的优化分配,快速阻尼频率变化,改善了系统频率响应特性,提升了新能源并网变流器对电力系统的惯量支撑能力,保障了电力系统的稳定性。

参考文献

[1] 周孝信,陈树勇,鲁宗相,等. 能源转型中我国新一代电力系统的技术特征[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(7): 1893-1904.
ZHOU Xiaoxin, CHEN Shuyong, LU Zongxiang, et al. Technology features of the new generation power system in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(7): 1893-1904.

[2] 康重庆,姚良忠. 高比例可再生能源电力系统的关键科学问题与理论研究框架[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(9): 2-11.
KANG Chongqing, YAO Liangzhong. Key scientific issues and theoretical research framework for power systems with high pro-

portion renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(9): 2-11.

[3] 姜齐荣,赵崇滨. 并网逆变器的电磁暂态同步稳定问题[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2021, 61(5): 415-428.
JIANG Qirong, ZHAO Chongbin. Electromagnetic transient synchronization stability with grid-connected inverters[J]. Journal of Tsinghua University (Science & Technology), 2021, 61(5): 415-428.

[4] 文云峰,杨伟峰,林晓煌. 低惯量电力系统频率稳定分析与控制研究综述及展望[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(9): 211-222.
WEN Yunfeng, YANG Weifeng, LIN Xiaohuang. Review and prospect of frequency stability analysis and control of low-inertia power systems[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(9): 211-222.

[5] 王晓寰,杨爱华,刘洋,等. 计及频率耦合效应的并网逆变器稳定控制研究[J]. 电网技术, 2023, 47(8): 3280-3295.
WANG Xiaohuan, YANG Aihua, LIU Yang, et al. Stability control study of grid-connected inverters considering frequency coupling effect[J]. Power System Technology, 2023, 47(8): 3280-3295.

[6] LIU J, MIURA Y, ISE T. A comparative study on damping methods of virtual synchronous generator control[C]//2019 21st European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'19 ECCE Europe), 2019.

[7] PAN D, WANG X, LIU F, et al. Transient stability of voltage-source converters with grid-forming control: a design-oriented study[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2020, 8(2): 1019-1033.

[8] 杨梅,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. Collaborative adaptive control strategy for moment inertial and damping coefficients of virtual synchronous generator[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(3): 125-131.

[9] 孙宇新,王鹏,施凯,等. 基于虚拟同步发电机的惯量和阻尼自适应控制[J]. 电气传动, 2021, 51(21): 35-40.
SUN Yuxin, WANG Peng, SHI Kai, et al. Inertia and damping adaptive control strategy based on virtual synchronous generator[J]. Electric Drive, 2021, 51(21): 35-40.

[10] 朱作滨,黄绍平. 基于自适应转动惯量VSG的微电网稳定控制[J]. 电气工程学报, 2020, 15(1): 41-47.
ZHU Zuobin, HUANG Shaoping. Microgrid stability control based on adaptive moment of inertial VSG[J]. Journal of Electrical Engineering, 2020, 15(1): 41-47.

[11] 柯贤波,张文朝,李朋旺,等. 高风电渗透率系统的模糊自适应虚拟惯量控制[J]. 电网技术, 2020, 44(6): 2127-2134.
KE Xianbo, ZHANG Wenchao, LI Pengwang, et al. Fuzzy adaptive virtual inertia control for high wind power penetration system[J]. Power System Technology, 2020, 44(6): 2127-2134.

[12] 李少林,王伟胜,张兴,等. 基于频率响应区间划分的风电机

- 组虚拟惯量模糊自适应控制[J]. 电网技术, 2021, 45(5): 1658-1664.
- LI Shaolin, WANG Weisheng, ZHANG Xing, et al. Fuzzy adaptive virtual inertia control strategy of wind turbines based on system frequency response interval division[J]. Power System Technology, 2021, 45(5): 1658-1664.
- [13] 崔海林, 李泰, 潘荣睿. 基于模糊自抗扰的风电场储能虚拟惯量控制[J]. 电气传动, 2021, 51(23): 48-52.
- CUI Hailin, LI Tai, PAN Rongrui. Virtual inertia control of wind energy storage based on fuzzy auto disturbance rejection [J]. Electric Drive, 2021, 51(23): 48-52.
- [14] 耿昊翔, 王维俊, 唐帅, 等. 虚拟同步发电机的参数自适应控制策略研究[J]. 电气工程学报, 2021, 16(3): 17-24.
- GENG Haoxiang, WANG Weijun, TANG Shuai, et al. Research on parameter adaptive control strategy of virtual synchronous generator[J]. Journal of Electrical Engineering, 2021, 16(3): 17-24.
- [15] 颜景斌, 杨晨, 常龙龙, 等. 虚拟同步发电机惯量阻尼协同自适应控制策略[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2019, 24(6): 58-63.
- YAN Jingbin, YANG Chen, CHANG Longlong, et al. Collaborative adaptive control strategy of inertial damping for virtual synchronous generator[J]. Journal of Harbin University of Science and Technology, 2019, 24(6): 58-63.
- [16] FANG J, LI H, TANG Y, et al. On the inertia of future more-electronics power systems[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2019, 7(4): 2130-2146.
- [17] 杨慧彪, 贾祺, 项丽, 等. 双级式光伏发电虚拟惯量控制策略[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(10): 87-102.
- YANG Huibiao, JIA Qi, XIANG Li, et al. Virtual inertia control strategies for double-stage photovoltaic power generation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(10): 87-102.
- [18] 王素娥, 吴永斌, 熊连松, 等. 光伏并网发电系统的虚拟惯量控制策略[J]. 高电压技术, 2020, 46(11): 3743-3751.
- WANG Su'e, WU Yongbin, XIONG Liansong, et al. Virtual inertia control strategy for grid-tied photovoltaic power generation system[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(11): 3743-3751.
- [19] 程冲, 杨欢, 曾正, 等. 虚拟同步发电机的转子惯量自适应控制方法[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(19): 82-89.
- CHENG Chong, YANG Huan, ZENG Zheng, et al. Rotor inertia adaptive control method of VSG[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(19): 82-89.
- [20] 付文启, 黄永章, 杨鑫, 等. 光伏驱动新能源同步机并网的调频能力研究[J]. 电气传动, 2022, 52(10): 21-27.
- FU Wenqi, HUANG Yongzhang, YANG Xin, et al. Research on frequency regulation capability of photovoltaic integration via a motor-generator pair[J]. Electric Drive, 2022, 52(10): 21-27.

收稿日期:2022-10-27

修改稿日期:2022-11-02